Revista Bianual

2025-2026

Num. 2

ISSN No. 2992-8516

TecNM ZACATEPEC

CITID

Congreso Internacional en Tecnología, Innovación y Docencia

TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO®

CITID

CITID, Año 2, Numero 2, 2025 - 2026 es una revista bianual, publicada y editada por el Tecnológico Nacional de México, dependiente de la Secretaria de Educación Pública, a través del Instituto Tecnológico de Zacatepec, Av. Universidad No. 12002, Quinto Piso, Col. Xoco, Alcaldía Benito Juárez C.P. 03330, Ciudad de Reserva México, Tel 5536002500 Ext. 65064, d_vinculacion05@tecnm.mx, Editor Responsable Dra. María Lidia Palacios Contreras. de derechos al uso exclusivo No. 04-2023-092911362100-102, ISSN No. 2992-8516, ambos son otorgados por el Instituto Nacional del Derecho de Autor.

Responsable de la última actualización de este número: Dra. Areli Marlen Salgado Delgado, profesora investigadora del Instituto Tecnológico de Zacatepec, Calzada Tecnológico No. 27, Col. Centro, Zacatepec, Morelos, C.P. 62780, Tel. (734) 3431394, fecha de última actualización 10 de julio de 2025. El objetivo de la revista es establecer un espacio que permite visualizar los aportes científicos ingenieriles, y administrativas académicas y de en educación diferentes que disciplinas generan los investigadores, docentes y expertos y así por medio de una publicación académica arbitrada en formato electrónico dar la difusión y divulgación de proyectos presentados en el CITID.

Las publicaciones de los artículos son sometidas a revisión por un Comité de Arbitraje y el contenido es responsabilidad de y no necesariamente reflejan la postura de los autores editores de la publicación. Queda prohibida la reproducción parcial o total de los contenidos e imágenes de la publicación sin previa autorización del Instituto Tecnológico de Zacatepec, salvo que sea citada la fuente de origen.

PROLOGO

"¡Es importante no desperdiciar la capacidad intelectual de la mitad de la población! Piensen en cuantos misterios más se resolverían si todas las mentes capaces que trabajan en un problema se duplicaran e incluyeran tanto a hombres como a mujeres."

Marla B. Sokolowski (Canadá)

Genética

La adquisición de conocimiento en los campos de la Ciencia, la Tecnología, la Innovación y la Docencia representa un proceso continuo y dinámico que no tiene fin. A medida que la humanidad avanza, también lo hacen nuestras preguntas, nuestras herramientas y nuestras capacidades para comprender el mundo que nos rodea. En este contexto, el conocimiento no es estático ni absoluto; por el contrario, se construye, se transforma y se expande constantemente a partir de la experiencia, la observación, la experimentación y la reflexión crítica.

Como cada dos años, en el Tecnológico Nacional de México – Instituto Tecnológico de Zacatepec se realizó el Congreso Internacional en Tecnología Innovación y Docencia (CITID 2025), donde se dieron cita estudiantes, académicos, investigadores y profesionales para compartir e intercambiar conocimientos y experiencias en el ámbito de la investigación. Las temáticas tratadas en el congreso fueron diversas:

Ingeniería de métodos y ergonomía (IIN)
Logística y Cadenas de Suministros (IIN)
Manufactura Esbelta y Calidad (IIN)
Sistemas Electromecánicos Avanzados (IEM)
Infraestructura, obras civiles y diseño estructural normativo (IC)
Biotecnología Ambiental (IQ)
Materiales Poliméricos (IQ)
Procesos Químicos (IQ)
Tecnología Ambiental (IQ)
Biotecnología de Alimentos (IBQ)
Ciencia y Tecnología de Alimentos (IBQ)
Bioprocesos (IBQ)
Aplicaciones en Entornos Web y Móvil (ISC)
Ciencia de Datos Para la Toma de Decisiones (ISC)
Inteligencia Artificial (ISC)
Internet de las Cosas (ISC)
Digitalización de las organizaciones (IGE)
Tópicos avanzados de administración (IAD)
Ecoturismo y Emprendimiento Comunitario (LT)
Investigación educativa en Ingeniería (DC)
Retos y Perspectivas en la Aplicación de las Ciencias Básicas (DC)
Biomateriales Poliméricos (PG)

Desarrollo de Tecnología e Innovación (PG)
Diseño de Materiales en Ingeniería Sustentable (PG)
Ingeniería y Tecnología de Materiales (PG)
Modelado y Simulación de Procesos (PG)

A decir de los participantes, el Congreso expuso las contribuciones de los avances más sobresalientes en los últimos años. Finalmente, se agradece el apoyo de los Directivos de la Institución, de los Jefes académicos y, especialmente, el entusiasmo, compromiso y colaboración del personal de la División de Estudios de Posgrado e Investigación (DEPI). Se desea que las Contribuciones registradas en estas Memorias, ayuden a disipar dudas e interrogantes que, alguna vez, se hayan hecho los lectores y, además, sean referencia para incrementar el conocimiento existente.

COMITÉ TÉCNICO

DRA. MARÍA LIDIA PALACIOS CONTRERAS

ING. FELIPE SÁNCHEZ SÁNCHEZ

MC. ENRIQUE LÓPEZ CHÁVEZ

MA. BRENDA SELENE LÓPEZ MEDINA

MC. VERÓNICA GAMA NÁJERA

ING. JOSÉ ELÍAS SALADO HUERTA

DR. ARTURO EMMANUEL DÍAZ DOMÍNGUEZ

LIC. OFELIA ESPINOSA BACA

MC. OSVALDO DE LA PAZ SOTO TALAVERA
MC. ERIKA GRISELDA CARRILLO GONZÁLEZ
DRA. ANA LUZ TEJEDA GUTIERREZ
DRA. CLAUDIA BARRETO ACBRERA
MI. HOMERO ALONSO JIMÉNEZ
MC. ROBERTO CARLOS CÁRDENAS VALDEZ
DRA. LUZ ELVA MARIN VACA
MA. VICTORIA YAZMIN ATALA CAMPOS
MC. MANUEL JESUS GRANADOS BAEZA
DRA. ARELI MARLEN SALGADO DELGADO
DR. JOSE RODOLFO PEREZ ESPINOSA
DRA. LEONOR ZAVALETA AVEJAR
DRA. ZULLY VARGAS GALARZA
DR. EDGAR GARCÍA HERNÁNDEZ
DRA. CINTHYA DINORAH ARRIETA GONZÁLEZ
DR. RENÉ SALGADO DELGADO

MM. JEANETT DEL CARMEN ORTEGA MILLÁN
DRA. MIRIAM ANTONIA CHAVARRÍA SANTIBAÑEZ
DR. JESUS ANGEL PEÑA RAMÍREZ
MI. YANET CASTREJÓN HERNÁNDEZ
DR. LUIS JOSÉ MUÑIZ RASCADO
DRA. ANA CELIA CAMPOS HERNÁNDEZ
MTI. CLAUDIA GABRIELA BUSTILLOS GAYTÁN
DR. EUGENIO CESAR VELÁZQUEZ SANTANA
DR. ERIK LÓPEZ GARCÍA
DRA. MARÍA LIDIA PALACIOS CONTRERAS
MC. JACQUELINE ZUÑIGA DÍAZ
MC. ERIKA REYES DORANTES
JOSE EFRAIN RUIZ RAMÍREZ
DR. ARTURO JAVIER MARTINEZ MATA
MC. ROSEMBER OVANDO CASTELAR

ÍNDICE

Ing. Industrial (IIN)	Ingeniería de métodos y ergonomía Logística y Cadenas de Suministros Manufactura Esbelta y Calidad	Pág.
IIN-1	USO DEL SOFTWARE SIMIO PARA LA SIMULACIÓN DE LA RED DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA PURIFICADA *D. Torres Sierra, V. Gama Nájera, O. García Torres, C. Barreto Cabrera, U. Estrada Altamirano*	1
IIN-2	LA IMPORTANCIA DE LA APLICACIÓN DE HERRAMIENTAS DE ADMINISTRACIÓN DE ALMACENES PARA GARANTIZAR LA CONFIABILIDAD DEL INVENTARIO *G. Castañeda Gómez, S. Espinoza Salgado, A. E. Ramírez Traveceras, J. A. Peña Ramírez*	8
IIN-3	REDUCCIÓN DE TIEMPO EN EL PROCESO DE MAQUINADO DE EJE EN UNA EMPRESA DE MANUFACTURA MEDIANTE LA METODOLOGÍA PDCA *E. De La Rosa-Durán, I.L. Hernández-Solís, C. Barreto-Cabrera, A. Rojas-Ayala*	15
IIN-4	ERGONOMÍA; MÉTODOS DE EVALUACIÓN - HERRAMIENTAS PARA REDUCCIÓN DE LAS PRINCIPALES ENFERMEDADES DE TRABAJO EN MÉXICO *J.L. Espinoza Díaz*	24
Ing. Electromecánica (IEM)	**Sistemas Electromecánicos Avanzados**	**Pág.**
IEM-1	ANÁLISIS DE EXTRACCIÓN DE ENERGÍA DE UN SISTEMA FOTOVOLTAICO UTILIZANDO UN ALGORITMO DE OPTIMIZACIÓN *A.U. Córdova Ávila, E. Hernández Pardiñas, M. Cervantes Bobadilla, J. García Morales, E.J. Moreno Carpintero*	32
IEM-2	ANALOGÍA DE DIAGRAMAS DE CONTROL ELÉCTRICO EN DISEÑO DE CIRCUITOS NEUMÁTICOS CON ALGEBRA BOOLEANA PARA ESQUEMAS DE AUTOMATIZACIÓN *J. A. Santana Camilo, J. E. Ruiz Ramírez, R. Ovando Castelar, A. Olarte Paredes y A. Blanco Ortega.*	41
Ing. Civil (IC)	**Infraestructura, obras civiles y diseño estructural normativo**	**Pág.**
IC-1	ESTUDIO HDROLÓGICO CUENCA DEL RÍO DULCE, MUNICIPIO DE TLALTIZAPÁN DE ZAPATA, MORELOS *J. M. Ramírez Cuevas, D. Zúñiga Malpica, J. A. Uribe Medina, M. Zuñiga Ortíz*	48
IC-2	ANÁLISIS NORMATIVO DE LAS CONDICIONES DE REGULARIDAD DE LAS EDIFICACIONES PARA EL DISEÑO ESTRUCTURAL POR SISMO *F. Sánchez Sánchez, M. Ortiz Gómez, A. A. Pacheco López*	56
Ing. Química (IQ)	**Biotecnología Ambiental** **Materiales Poliméricos** **Procesos Químicos** **Tecnología Ambiental**	**Pág.**
IQ-1	LIMITANTES PARA LA CUANTIFICACIÓN DE EMISIONES ATMOSFÉRICAS DE METANO EN LA ELABORACIÓN DEL INEGyCEI *R. Sanjuan-Galindo, E. M. Contró-Esparza, M. C. Errasquin-Barradas, F.G. Benavides-Bravo, D.C. Martínez-Peón*	67

IQ-2	ANÁLISIS DE LAS CONDICIONES DE OPERACIÓN DE UN CONCENTRADOR CILINDRO PARABÓLICO PARA DIFERENTES CIUDADES DE LA REPUBLICA MEXICANA *D. Briseño Garduño, Y. R. Galindo Luna*	75
IQ-3	DESTILACIÓN POR MEMBRANA PARA LA DESALINIZACIÓN DE SALMUERAS *J. Ibarra Bahena, U. Dehesa Carrasco, Y. R. Galindo Luna, W. Rivera*	82
IQ-4	POTENCIAL DE EXTRACCION DE AGUA ATMOSFÉRICA EN LA CIUDAD DE PUEBLA *N. Alva Herrera, M. Alvarado-Flores, I.L. Hernández-Solís, J. D. Santa Maria Juarez, Z. Vargas Galarza*	86
IQ-5	EVALUACIÓN EXPERIMENTAL DE UN SISTEMA DE ENFRIAMIENTO ABSORCIÓN-DIFUSIÓN DE PEQUEÑA ESCALA *J. Delgado-Gonzaga, M. F. Díaz-Ayala, A. A. Aguilar-Ayala, J. L. Labra-Liborio, R. Saravanan*	94
IQ-6	EVALUACIÓN EXPERIMENTAL PRELIMINAR DE LA EFICIENCIA TÉRMICA EN UN CONCENTRADOR CILÍNDRICO PARABÓLICO A DOS FLUJOS MÁSICOS *S. Flores Cajero, Y. R. Galindo Luna*	101
IQ-7	EFECTO DEL CuO INCORPORADO AL POLÍMERO SEMICONDUCTOR P3HT MEDIANTE EL MÉTODO OXIDATIVO *A. Gómez-Cortez, M. E. Nicho-Díaz, A. Baray-Calderón, M. Fuentes-Pérez, D. Hernández-Martínez.*	106
IQ-8	CALENTAMIENTO DE AGUA PARA PROCESOS DE BAJA TEMPERATURA UTILIZANDO UN CONCENTRADOR CILINDO PARABÓLICO *Y. R. Galindo Luna, J. Ibarra Bahena*	115
Ing. Bioquímica (IBQ)	***Biotecnología de Alimentos*** ***Ciencia y Tecnología de Alimentos*** ***Bioprocesos***	***Pág.***
IBQ-1	EFECTOS DE PRETRATAMIENTOS BASADOS EN PROPIONALDEHÍDO EN LA ESTABILIZACIÓN DE LIGNINA CONTENIDA EN CÁSCARA DE COCO *J. P. Navarro Uribe, F. J. Hernández Campos, M. E. Acevedo Quiroz, A. Quinto Hernández*	119
Ing. en Sistemas Computacionales (ISC)	***Aplicaciones en Entornos Web y Móvil*** ***Ciencia de Datos Para la Toma de Decisiones*** ***Inteligencia Artificial*** ***Internet de las Cosas***	***Pág.***
ISC-1	SISTEMA INTELIGENTE MÓVIL PENITA PARA DETECTAR VARIABLES CLIMATOLÓGICAS MEDIANTE PROTOCOLO MQTT. *J. Á. Peña-Ramírez. M. Delgado Reyes, N.J. Ontiveros-Hernández, S. Espinoza-Salgado, Y. Castrejón Hernández*	126
ISC-2	SISTEMA MOVIL PARA EVALUAR LAS UNIDADES DE LOS ESTUDIANTES EN TRES PLANTELES EDUCATIVOS (CONALEP, UAEM, ITZ) MEDIANTE QR *J. Á. Peña-Ramírez, M. Delgado Reyes, N.J. Ontiveros-Hernández, S. Espinoza-Salgado, Y. Castrejón Hernández*	133
ISC-3	SISTEMA MOVIL PENITA QUE PERMITE REALIZAR DESCUENTOS MEDIANTE QR EN UNA CADENA HOTELERA *J. Á. Peña-Ramírez, M. Delgado Reyes, N.J. Ontiveros Hernández, S. Espinoza-Salgado*	140
ISC-4	GLOSARIO GASTRONÓMICO EN LENGUA DE SEÑAS MEXICANA-UTSEM *Y. Ávila-Nájera, E. Adán-Moren, K. Trujillo-Toledo, J.L. Arroyo-Anica, R. Rodríguez Yesca*	147

ISC-6	ESTUDIO DE FÁRMACOS EMPLEANDO CIENCIA DE DATOS, EL CASO DE LA ENFERMEDAD DE ALZHEIMER *J. J. Sánchez-García, E. Aguilar-Ortiz*	154
Ing. en Gestión Empresarial (IGE)	***Digitalización de las organizaciones***	***Pág.***
IGE-1	CASO DE APLICACIÓN DEL REQUISITO 7.5 INFORMACIÓN DOCUMENTADA DE LA NORMA ISO 9001:2015 EN UN PROYECTO DE RESIDENCIA. *A. Bahena Díaz, C. M. Ambriz Zavaleta, C. Y. Arce Ocampo, J. P. Jiménez Ramos, N. Domínguez Reyes*	161
Ing. En Administración (IAD)	***Tópicos avanzados de administración***	***Pág.***
IAD-1	ANÁLISIS DE ESTRATEGIAS DE APRENDIZAJE DE LOS ESTUDIANTES DEL PROGRAMA EDUCATUVO DE INGENIERÍA EN ADMINISTRACIÓN DEL INSTITUTO TECNOLÓGICO DE ZACATEPEC *J. L. Moreno Hernández, E. I. Flores Martínez, M. A. Chavarria Santibañez, M. R. Ramírez Miranda*	170
IAD-2	GESTIÓN FINANCIERA Y DE INNOVACIÓN TECNOLÓGICA DE LAS MICRO Y PEQUEÑAS EMPRESAS TURÍSTICAS DE OAXTEPEC *N. L. Martínez Mata, R. I. Covarrubias Pinzón, J. L. Romero Torres, A. J. Martínez-Mata*	178
Docencia (DC)	***Investigación educativa en Ingeniería Retos y Perspectivas en la Aplicación de las Ciencias Básicas***	***Pág.***
DC-1	INTEGRACIÓN DE LA CIBERSEGURIDAD Y LA GOBERNANZA DIGITAL EN LA EDUCACIÓN DE INGENIEROS EN TIC´S *H. Díaz Rincón, J. A. Navarrete Prieto, J. C. Flores Mercado, J. A. Gallardo Godínez, C. Ruiz Muñoz*	186
DC-2	ANÁLISIS DE LA REPROBACIÓN EN ÉPOCA DE PANDEMIA EN ESTUDIANTES DE PRIMER SEMESTRE DE LA CARRERA DE INGENIERÍA EN GESTIÓN EMPRESARIAL DEL INSTITUTO TECNOLÓGICO DE ZACATEPEC *M. S. Contreras Ochoa, M. L. Palacios Contreras, C. E. Cisneros Vargas, R. Velázquez Vázquez, B. S. López Medina*	194
DC-3	TÉCNICAS DE ANÁLISIS QUÍMICO PARA EXTRACCIONES LÍQUIDO-LÍQUIDO: UNA PRÁCTICA PARA IMPLEMENTACIÓN EN EL LABORATORIO DE ENSEÑANZA *D. Pitalúa Calleja, C. H. Cornelis Janssen*	200
DC-4	ANÁLISIS DE LOS FACTORES QUE INCIDEN EN LA DESERCIÓN ESTUDIANTIL A NIVEL LICENCIATURA, TecNM-CAMPUS CUAUTLA *E. Benítez Torres, M. L. Acosta Miranda, J. Pérez Machorro, V. H. Antonio López*	208
DC-5	SISTEMA DE EVALUACIÓN DE COMPETENCIAS A TRAVÉS DE UN SEMÁFORO QR UTILIZANDO TIC'S PARA LA EVALUACIÓN DE PROYECTOS COLABORATIVOS *D. Domínguez Estudillo, E. R. Zavaleta Olea, M. R. Hernández Andrade, M. L. Acosta Miranda, L. Ángeles Hernández*	216
DC-6	DESARROLLO DEL PROCESO COGNITIVO SUPERIOR DEL PENSAMIENTO EN EL APRENDIZAJE DE LOS CIRCUITOS ELÉCTRICOS EN EL ÁREA DE TECNOLOGÍA *M. L Guerrero-Julio*	221
DC-7	EXPERIENCIAS EN LA CREACIÓN DE ESTRATEGIAS DOCENTES CON EL EMPLEO DE LA IA	228

	C. G. Bustillos Gaytán, A. C. Campos Hernández	
DC-8	ASPECTOS RELEVANTES EN EL ENLACE DEL ENFOQUE DIDÁCTICO CONSTRUCTIVISTA CON LA DIVERSIÓN EN EL DISEÑO DE VIDEOJUEGOS FORMATIVOS *A. Caballero Alfaro, J. Reyes Reyes, G. L. Osorio Gordillo, C. M. Astorga Zaragoza, R. A. Vargas Méndez*	235
DC-9	ENSEÑAR QUÍMICA DESDE UNA PERSPECTIVA MODERNA PARA EL DESARROLLO DE CONCEPTOS Y TÉRMINOS TÉCNICOS *J. J. Sánchez García, E. Aguilar Ortíz, P. Labra-Vázquez, C. Flores Avila, M. Monroy Barreto*	245
Posgrado (PG)	***Biomateriales Poliméricos*** ***Desarrollo de Tecnología e Innovación*** ***Diseño de Materiales en Ingeniería Sustentable*** ***Ingeniería y Tecnología de Materiales*** ***Modelado y Simulación de Procesos***	***Pág.***
PG-1	ESTUDIO DE LOS MECANISMOS DE REACCIÓN DE LA TRICAPRILINA Y ÁCIDO CAPRÍLICO COMO MODELOS EN LA PRODUCCIÓN DE DIÉSEL VERDE *R. Navarro Severiano, D. Ochoa Resendiz, J. P. Pérez Orozco, A. Quinto Hernández*	253
PG-2	SÍNTESIS DEL 1,6-DIFENIL-1,3,5-HEXATRIENO CON PROPIEDADES FLUORESCENTES, POR MEDIO DE LA REACCIÓN DE MCMURRY *S. Lizardi Rivera, E. A. Aguilar Ortiz, Y. A. Amador-Sánchez3, E. Klimova†, J. J. Sánchez García*	260
PG-3	EL USO DE LA INTELIGENCIA ARTIFICIAL Y REDES NEURONALES PARA LA DETECCIÓN DE DAÑOS EN LAS ESTRUCTURAS DE AERONAVES. *R. A. Serrano Cruz, G. L. Osorio Gordillo, R. A. Vargas Méndez*	267
PG-4	OPTIMIZACIÓN DE LA CAPA VENTANA BÚFER EN CELDAS SOLARES DE PELÍCULA DELGADA CON CIGS: SUSTITUCIÓN DE CdS POR MATERIALES ALTERNATIVOS *A. Ledesma-Juárez, JF. Quintero-Guerrero, M. Chávez-Castillo, AM Fernández*	274
PG-5	CAPACIDAD ANTIOXIDANTE DE EXTRACTOS DE HOJAS DE CITRUS X SINENSIS *J. C. Vicencio Reyes, M. Z. Pérez González, E. J. Ceja Gordillo, M. B. Vázquez Ramo, W. Sánchez Ortiz*	281
PG-6	OBTENCIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE UN MATERIAL COMPUESTO BIODEGRADABLE A PARTIR DE QUITOSANO/PVA/CELULOSA MICROBIANA *V. Y. Bahena Iturbe, C. D. Arrieta González, M. J. Granados Baeza*	288
PG-7	VIRTUALIZACIÓN DE SISTEMAS LINEALES E INVARIANTES EN EL TIEMPO PARA LA CO-SIMULACION DE SISTEMAS DE CONTROL ACADÉMICOS *A. C. Pérez Flores, J. D Mina Antonio*	295
PG-8	ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO CORROSIVO DEL ALUMINIO 1050A Y EL 7005 EXPUESTOS A LOS GASES ATMOSFÉRICOS GENERADOS EN LA UNIDAD 9 Y 10 DE LA CENTRAL GEO-TERMOELÉCTRICA DE LOS HUMEROS *A. Cristóbal Neri, R. E. Parcero Gómez, N. B. Gómez Guzmán, A. Méndez Ochoa, J. A. López Najera*	302
PG-9	DISEÑO DE UNA ESTRATEGIA DE CONTROL PARA UN MOTOR RECIPROCANTE MAGNÉTICO *R. Alegría-Gómez, A. D. Espinosa Pedroza, J. García-Morales, G. V. Guerrero-Ramírez, M. Adam-Medina5*	309

PG-10	CARACTERIZACIÓN FISICOQUÍMICA, TÉRMICA, FUNCIONAL Y ESTRUCTURAL DE ALMIDÓN AMARANTO AISLADO POR DIFERENTES MÉTODOS DE EXTRACCIÓN *M. Ramírez Meneses, J. P. Hernández Uribe, A. Vargas Torres, H. M. Palma-Rodríguez, R. O. Navarro Cortez*	317
PG-11	POTENCIAL ELECTROSTÁTICO PROYECTADO A LA DENSIDAD ELECTRÓNICA PARA EVALUAR REACTIVIDAD QUÍMICA Y ACIDEZ-BASICIDAD *O. Castro-Ocampo, G. Santos-Raga, F. Guerrero, E. Santoyo, J. Muñiz*	326
PG-12	UN ENFOQUE DE LOS DISEÑOS DE EXPERIMENTOS EN LA ELABORACIÓN DE MATERIALES COMPUESTOS *I.L. Hernández Solís, Z. Vargas Galarza, E. García Hernández, M. Alvarado Flores*	331
PG-13	CORROSIÓN INDUCIDA POR MICROORGANISMOS EN ACERO 1018 Y SU ESTUDIO CON UN ANTIBIÓTICO Y EXTRACTO NATURAL *A. A. Palacios Talavera, U. León Silva, R. Saldivar Guerrero, J. Escobedo Alatorre, A. Olarte Paredes, R. Salgado Delgado*	339
PG-14	CAPACIDAD ANTIOXIDANTE DE HOJAS Y TALLOS DE RUTA GRAVEOLENS (RUDA) EXTRAIDOS CON DISOLVENTES EUTÉCTICOS PROFUNDOS *E. J. Ceja Gordillo, M. Z. Pérez González, J. C. Vicencio Reyes, M. B. Vazquez Ramos, W. Sánchez Ortiz*	343
PG-15	POLI(3-HEXILTIOFENO) SU APLICACIÓN EN DISPOSITIVOS DE ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA *A. Cervantes-Mendiola, M.E. Nicho-Díaz, U. León-Silva3, J. A. Sandoval-Espino, R. Salgado-Delgado*	350
PG-16	POLIFENOLES TOTALES Y CAPACIDAD ANTIOXIDANTE DE EXTRACTOS DE CÁSCARA DE CHILE ANCHO (CAPSICUM ANNUUM L. GROSSUM SENDT) *M. B. Vazquez Ramos, M. Pérez González, E. Ceja Gordillo, J. Vicencio Reyes, W. Sánchez Ortiz*	355
PG-17	CONTROL DE SEGUIMIENTO DE TRAYECTORIA BASADO EN LMI APLICADO A UN UAV TIPO CUADRICÓPTERO, CONSIDERANDO UNA REGIÓN LMI. *A. D. Espinosa-Pedroza, M. Adam-Medina, J. García-Morales, M. Cervantes-Bobadilla*	362
PG-18	USO DE SiO2 OBTENIDO A PARTIR DE CASCARILLA DE ALPISTE PARA LA SÍNTESIS DE P3HT *L. Cajero-Sotelo, M. E. Nicho-Díaz, U. León-Silva, M. R. Díaz-Guillén, A. Olarte-Paredes*	370
PG-19	POLIMERIZACIÓN RADICALARIA POR TRANSFERENCIA DE ÁTOMO (ATRP) INDUCIDA POR LUZ LED UTILIZANDO UN COMPLEJO CICLOMETALADO DE RUTENIO (II) *J. J. Sánchez Garcìa, C. Aguilar Lugo, S. López Morales, L. Alexandrova*	375
PG-20	ESTIMACIÓN DE FALLAS EN EMPUJE MEDIANTE UN OBSERVADOR PI BASADO EN LMI Y SU APLICACIÓN PARA UN DRON EXPERIMENTAL *D. Estrada Téllez, I. Huicochea Ríos, J. F. Guerrero Castellanos, N. Mendoza Robles, M. Adam Medina*.	383
PG-20	CASO DE ESTUDIO EN LA CENTRAL GEOTÉRMICA “LOS HUMEROS” SOBRE EL COMPORTAMIENTO DEL COBRE ANTE LA CORROSIÓN EN ROTORES DE LOS GENERADORES ELÉCTRICOS DE LAS UNIDADES 9 Y 10 *A. Cristóbal Neri, D. López Domínguez, N. B. Gómez Guzmán, A. Méndez Ochoa, J. A. López Nájera*	391

PG-21	COMPORTAMIENTO ELECTROQUÍMICO DE ALEACIONES ENCONTRADAS EN LOS DEVANADOS DE UN MOTOR ELÉCTRICO DE LA CENTRAL GEOTERMOELÉCTRICA LOS HUMEROS *A. Cristóbal Neri, N. B. Gómez Guzmán, D. López Domínguez, R. E. Parcero Gómez, J. A. López Nájera*	401
PG-22	COMUNICACIONES SEGURAS A TRAVÉS DEL DISEÑO DE UN OBSERVADOR PROPORCIONAL *E. Bahena-Bustamante, G.-L. Osorio-Gordillo, R.-A. Vargas Méndez, J. Reyes-Reyes, C.-M. Astorga-Zaragoza*	408
PG-23	DE LA NECESIDAD A LA MEJORA CONTINUA: EL DESARROLLO DEL SISTEMA DE EVALUACIÓN DOCENTE EN LA UTSEM. *J. Casimiro, B. Manjarrez, T.A. Antonio*	415
PG-24	CONTROL POR RETROALIMENTACIÓN DE ESTADOS DE UN UAV *I. O. Huicochea Rios, D. G. Estrada Téllez, J. García Morales, M. Cervantes Bobadilla, M. Adam Medina*	424
PG-25	LOCALIZACIÓN DE HOJAS Y FRUTOS EN PLANTAS DE JITOMATE MEDIANTE YOLONV8 *J. L. Carranza Flores, A. Magadan Salazar, J. Cristóbal Alejo, R. Pinto Elías, J. Fuentes-Pacheco*	432
PG-26	CONTROL POR RETROALIMENTACIÓN DE ESTADOS DE UN UAV *I. O. Huicochea Rios, D. G. Estrada Téllez, J. García Morales, M. Cervantes Bobadilla, M. Adam Medina*	440

USO DEL SOFTWARE SIMIO PARA LA SIMULACIÓN DE LA RED DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA PURIFICADA

Torres Sierra Diana [1], Gama. Nájera Verónica [2], García Torres Oscar [3], Barreto Cabrera Claudia[4], U. Estrada Altamirano[5]

[1]Ingeniera Industrial. Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Zacatepec. 7341409870. Col. Cuentepec, Morelos, México. diaanita_torres@hotmail.com
[2]Maestra en ciencias de la ingeniería. Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Zacatepec. Departamento de Ing. Industrial. 7774296735, Calzada Tecnológico no.27, Col. Centro, Zacatepec, Morelos, México. veronica.gn@zacatepec.tecnm.mx
[3]Maestro en ciencias de la Ingeniería. Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Zacatepec. Departamento de Ing. Industrial. 7772062347, Calzada Tecnológico no.27, Col. Centro, Zacatepec, Morelos, México. Oscar.gt@zacatepec.tecnm.mx
[4]Doctora en ciencias de la Ingeniería. Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Zacatepec. Departamento de Ing. Industrial. 7341060217, Calzada Tecnológico no.27, Col. Centro, Zacatepec, Morelos, México. Claudia.bc@zacatepec.tecnm.mx
[4]Ingeniero Industrial. Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Zacatepec. Departamento de Ing. Industrial. 7771345685, Av. Adolfo Lopez Mateos No.30, Temixco Morelos.

Resumen – El presente proyecto busca optimizar la distribución de agua potable en el proceso de purificación, garantizando su calidad y eficiencia. Para ello se utiliza el software SIMIO para simular el proceso de distribución. El análisis permite identificar las ineficiencias en rutas, tiempos y costos, proponiendo mejoras que optimicen recursos y reduzcan costos operativos. Además de beneficiar a la empresa, el estudio refuerza su compromiso con la sostenibilidad y la satisfacción del cliente.

Palabras Clave: Simulación, Red de distribución, Software SIMIO.

Abstract – The present project aims to optimize the distribution of drinking water in the purification process, ensuring its quality and efficiency. To achieve this, SIMIO software is used to simulate the distribution process. The analysis identifies inefficiencies in routes, times, and costs, proposing improvements to optimize resources and reduce operational costs. In addition to benefiting the company, the study reinforces its commitment to sustainability and customer satisfaction.

Key words – Simulation, Distribution network, Software SIMIO.

INTRODUCCIÓN

El presente estudio aborda los desafíos en la distribución de agua purificada en el proceso de purificación, centrándose en la falta de planificación y organización en las rutas de reparto. Actualmente, la distribución presenta diversas ineficiencias que afectan la calidad del servicio, generan costos adicionales y ocasionan retrasos en la entrega, lo que impacta directamente en la satisfacción del cliente. Además, la ausencia de un sistema optimizado provoca un uso ineficiente de recursos, como combustible y mano de obra, lo que también repercute en el medio ambiente debido al aumento en las emisiones de carbono.

Para mejorar esta situación, se implementó la metodología PDCA (Plan-Do-Check-Act) como marco de trabajo para la mejora continua del proceso de distribución. Esta metodología permitió analizar de manera estructurada cada etapa del ciclo logístico, desde la planificación de rutas hasta la ejecución y evaluación de los resultados. Como complemento, se utilizó el software de simulación SIMIO, una herramienta especializada en modelar y optimizar procesos logísticos complejos. A través de esta tecnología, se analizaron diferentes estrategias de distribución con el objetivo de identificar las mejores alternativas para optimizar la recolección de garrafones vacíos y la entrega de garrafones llenos.

El estudio se centró en la zona de Acatlipa, Morelos, y sus alrededores, donde se evaluaron distintos escenarios para mejorar la eficiencia del reparto. Mediante la simulación, se lograron identificar problemas clave como la falta de rutas optimizadas, recorridos innecesarios y el desaprovechamiento de la capacidad de los vehículos de reparto. Con base en estos hallazgos, se propusieron estrategias para optimizar las rutas de distribución, reducir costos operativos y mejorar el uso de la mano de obra.

El objetivo principal del proyecto es diseñar un sistema de distribución más eficiente que permita a la empresa mejorar su servicio y reducir sus costos logísticos. Al optimizar las rutas de reparto, se espera disminuir el consumo de combustible, minimizar el impacto ambiental y garantizar una mejor cobertura en la entrega de los garrafones. Además, una planificación adecuada permitirá mejorar la puntualidad en las entregas, aumentar la satisfacción del cliente y fortalecer la competitividad de la empresa en el mercado.

DESARROLLO

"Metodología PDCA"

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

La metodología PDCA (Plan-Do-Check-Act) será empleada para abordar las ineficiencias identificadas en el proceso de agua purificada mediante los siguientes pasos.
A continuación, se describe el desarrollo de cada etapa aplicada al presente proyecto de los pasos para la resolución del problema según (12):

Plan (Planificar)

El proceso actual de distribución presenta ineficiencias debido a la tardanza en la recolección y entrega del producto, causada principalmente por la falta de una ruta establecida para la entrega al cliente final. Esta situación genera recorridos innecesarios y duplicación de trayectos, lo que no solo aumenta los tiempos de entrega, sino que también incrementa los costos operativos y reduce la satisfacción del cliente. Es necesario abordar estos problemas para optimizar la eficiencia del proceso de distribución.

Definir y analizar la magnitud del problema:

Para determinar mejor las causas del problema se realiza un diagrama de Pareto (6) mostrado en la figura 1, ya que ayuda a priorizar las acciones de mejora, enfocándose en las causas que contribuyen de manera más significativa al problema de distribución.
En la Figura 1 se muestra un diagrama de Pareto analizando ¿qué problemas debemos priorizar?

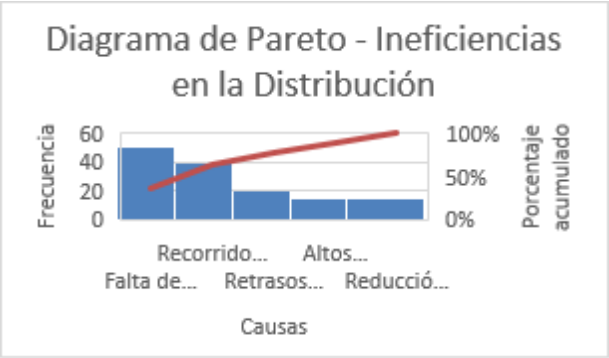


Figura 1. Diagrama de Pareto de ineficiencias en la distribución.

Interpretación de los resultados:
- La "falta de ruta establecida" es la causa más frecuente, con la mayor cantidad de incidencias en el proceso de distribución.
- Las causas "recorridos innecesarios" y "retrasos en la entrega" siguen en frecuencia, aunque en menor grado.
- La línea de porcentaje acumulado muestra que aproximadamente el 80% de las ineficiencias provienen de las primeras tres causas (las que están antes de que la línea cruce el umbral del 80%).

Buscar todas las posibles causas:

Una vez priorizadas las causas con el diagrama de Pareto, se utiliza un Diagrama de Ishikawa (4) para investigar por qué suceden esas causas, como objetivo identificar las causas raíz detrás de los problemas.

En la siguiente figura 2 se muestra el diagrama Ishikawa analizando ¿por qué ocurren estos problemas?

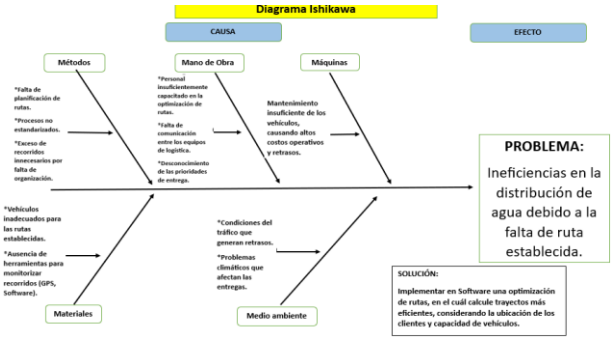


Figura 2. Diagrama Ishikawa

Investigación de cual es la causa más importante:

El análisis mediante el Diagrama de Ishikawa permitió identificar las posibles causas raíz que contribuyen a las principales ineficiencias en la distribución de agua purificada, señaladas previamente en el Diagrama de Pareto. Estas causas se agruparon en categorías clave como Métodos, Mano de obra, Maquinas, Materiales y Medio Ambiente, lo que brinda un marco claro para la toma de decisiones.

Considerar las medidas remedio:

A continuación, se emplea la tabla 1, 5W+1H (5)porque organiza las acciones necesarias para resolver las ineficiencias de manera clara y estructurada, abordando el problema desde todas sus perspectivas. Además, al integrar la metodología PDCA, permite planificar, ejecutar, monitorear y ajustar soluciones de forma continua, optimizando recursos, asegurando resultados medibles y estableciendo estándares sostenibles para evitar futuras fallas en la distribución.

Tabla 1. 5W+1H

PREGUNTA	RESPUESTA
What? (¿Qué?)	Ineficiencias en la distribución de agua debido a la falta de una ruta de entrega definida.
Why? (¿Por qué?)	No existe un plan logístico optimizado para las entregas, lo que genera retrasos y sobrecostos.
Who? (¿Quién?)	El personal encargado de las entregas y la gerencia

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

	responsable de planificar las rutas.
Where? (¿Dónde?)	En las áreas de distribución de entrega a los clientes finales de la empresa.
When? (¿Cuándo?)	Durante las operaciones diarias de distribución.
How? (¿Cómo?)	Implementar un sistema de rutas con diagrama de pert, con apoyo de software como SIMIO y herramientas PDCA

La falta de una ruta establecida para la distribución de agua genera ineficiencias operativas que impactan los tiempos de entrega, los costos y la satisfacción del cliente. Para solucionar este problema, es crucial diseñar y optimizar rutas utilizando herramientas como SIMIO y representarlas mediante un diagrama de PERT. Esto permitirá identificar actividades críticas, minimizar tiempos de entrega y garantizar una distribución eficiente hacia los clientes finales.

Do (Hacer)

Poner en práctica las medidas remedio:

Se diseñó un diagrama para la nueva distribución, mediante diagrama de diseño de redes usando el método del Problema del árbol de Expansión mínima (3):
En la figura 3.3 se muestra este sistema de caminos, en donde A se encuentra la purificadora; las otras letras representan cada localidad en donde distribuye la purificadora los cuales son:

- A: Purificadora
- B: Estribio
- C: Acatlipa centro
- D: Río escondido
- E: Rivera
- F: Villa
- G: Sabinos
- H: Temixco
- I: 10 de abril
- J: Las Rosas
- K: Encamisadero
- L: Zapata
- M: Granjas

Los números son el tiempo en minutos, ya que se pretende disminuir el tiempo de distribución.

La red de la figura 3 tiene 15 nodos que son representados por 15 círculos. Tienen 26 arcos lo cual corresponden a los 26 caminos. Los arcos de una red pueden tener un flujo de algún tipo que pase por ellos; por ejemplo, el flujo de tranvías sobre los caminos de la purificadora. El diagrama cuenta con arcos dirigidos (2), cuando se etiqueta un arco dirigido con el nombre de los nodos que unen, siempre se pone primero el nodo de donde viene y después del nodo hacia dónde va, un arco dirigido al del nodo A al nodo B debe etiquetarse como AB y no como BA.

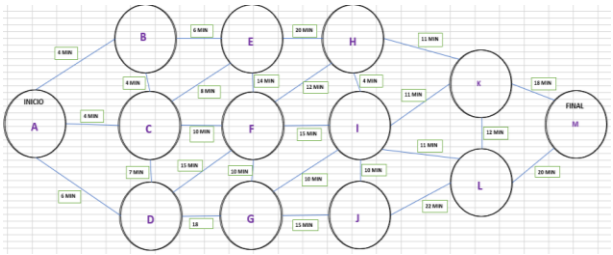


Figura 3. Red de distribución.

Con el objetivo de optimizar el proceso y reducir los tiempos de distribución, se diseñaron 3 redes. A continuación, en la figura 4 se muestra el primer diagrama aplicando el problema del árbol de expansión mínima encontrando la ruta más corta.
Se puede observar que la distribución sería:
A→B→E→C→D→F→G→J→I→H→K→L→M
Con un total de 122 minutos, es decir 2hrs y 2 min.

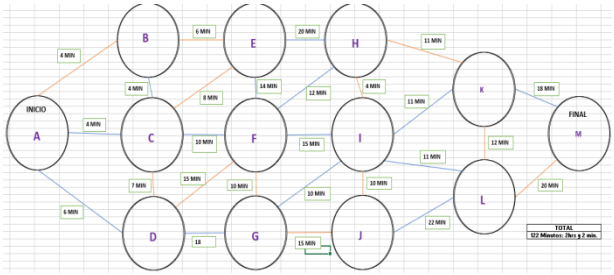


Figura 4. Diagrama 1 mediante problema del árbol de expansión mínima.

En la figura 5, se muestra el segundo diagrama con la siguiente ruta:
A→D→C→B→E→F→G→J→I→H→K→L→M
Con un total de 119 minutos igual a 1hra y 59 min.

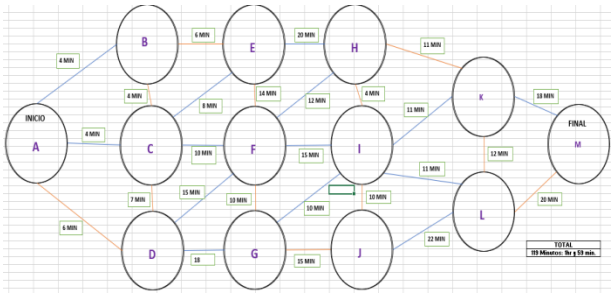


Figura 5. Diagrama 2 mediante problema del árbol de la expansión mínima.

Por último, en la figura 6 se muestra el tercer diagrama con la siguiente ruta:
A→C→B→E→F→D→G→J→I→H→K→L→M
Con un total de 133 minutos, igual a 2hrs y 13 min.

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

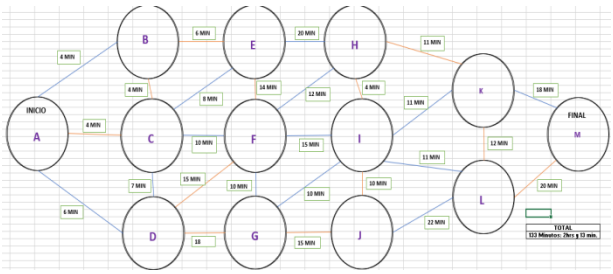


Figura 6. Diagrama 3 mediante problema del árbol de la expansión mínima.

En el análisis de los diagramas de diseño de redes, se evaluaron tres opciones considerando el tiempo total requerido para completar los procesos. Se puede observar que el segundo diagrama se obtiene un tiempo de 119 minutos, lo cual se presenta como la opción más eficiente.

Check (Verificar)

Dentro de la simulación en SIMIO (9), uno de los objetivos principales es identificar la ruta más corta que permita optimizar el proceso de distribución de garrafones de agua. Este análisis considera los tiempos establecidos en el diagrama de red, así como las restricciones propias del sistema, como la secuencia de nodos, la velocidad del vehículo, y los recursos disponibles.
La simulación ayuda a evaluar las diferentes trayectorias posibles entre los nodos y a determinar cuál de ellas minimiza el tiempo total de recorrido. Este enfoque no solo busca reducir el tiempo de distribución, sino también garantizar la eficiencia operativa del transporte y el uso óptimo de los recursos.

A continuación, se presentan las evidencias gráficas y los resultados obtenidos al simular las rutas posibles y analizar la ruta más eficiente en términos de tiempo generando variables aleatorias.
A continuación, en la figura 7 se muestran los valores generados en Excel con un total de 1,000 variables aleatorios utilizando la fórmula Xi= a+(b-a)ri, donde a y b son el tiempo que corresponden a los tiempos de entrega observados en la operación actual.

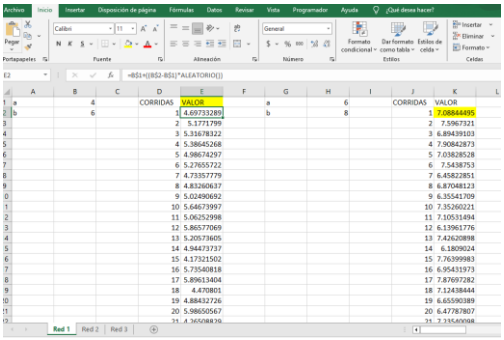
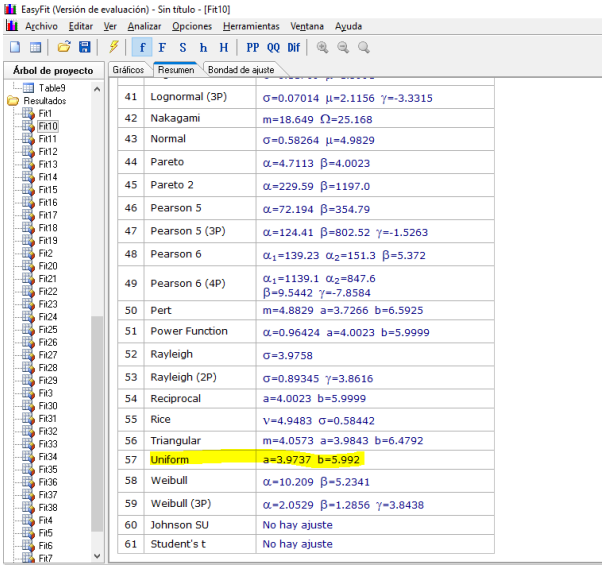


Figura 7. Valores generados en Excel.

Los datos generados serán exportados a EasyFit, un software especializado en análisis estadístico, con el propósito de determinar la distribución de probabilidad que mejor se ajuste a los tiempos de entrega. En este caso se buscará una distribución uniforme, identificando su límite inferior y superior para definir el rango más adecuado.

En la siguiente figura 8 se muestra la determinación de obtener el rango mínimo y máximo para una localidad.



41	Lognormal (3P)	σ=0.07014 μ=2.1156 γ=-3.3315
42	Nakagami	m=18.649 Ω=25.168
43	Normal	σ=0.58264 μ=4.9829
44	Pareto	α=4.7113 β=4.0023
45	Pareto 2	α=229.59 β=1197.0
46	Pearson 5	α=72.194 β=354.79
47	Pearson 5 (3P)	α=124.41 β=802.52 γ=-1.5263
48	Pearson 6	α_1=139.23 α_2=151.3 β=5.372
49	Pearson 6 (4P)	α_1=1139.1 α_2=847.6 β=9.5442 γ=-7.8584
50	Pert	m=4.8829 a=3.7266 b=6.5925
51	Power Function	α=0.96424 a=4.0023 b=5.9999
52	Rayleigh	σ=3.9758
53	Rayleigh (2P)	σ=0.89345 γ=3.8616
54	Reciprocal	a=4.0023 b=5.9999
55	Rice	ν=4.9483 σ=0.58442
56	Triangular	m=4.0573 a=3.9843 b=6.4792
57	Uniform	a=3.9737 b=5.992
58	Weibull	α=10.209 β=5.2341
59	Weibull (3P)	α=2.0529 β=1.2856 γ=3.8438
60	Johnson SU	No hay ajuste
61	Student's t	No hay ajuste

Figura 8. Datos exportados en EasyFit

Una vez obtenida la distribución uniforme optima, los parámetros calculados (mín y máximo) serán implementados en SIMIO (10). Esto permitirá asignar tiempos de entrega variables a cada localidad, reflejando de manera más realista la variabilidad del proceso. A continuación, se muestran los datos obtenidos de cada red.

A continuación, se muestran las siguientes figuras donde se muestran las simulaciones de las redes.

Simulación de la primera red, se muestra en la figura 9.

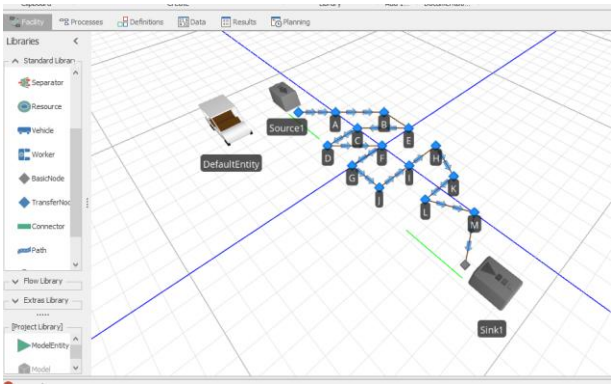


Figura 9. Simulación 1.

Resultados:

Drop Filter Fields Here

Average

Drop Column Fields Here

Object Type	Object Name	Data Source	Category	Data Item	Statistic	Average Total
ModelEntity	DefaultEntity	[Population]	Content	NumberInSystem	Average	262.8557
					Maximum	535.0000
			FlowTime	TimeInSystem	Average (Hou...	2.2237
					Maximum (Ho...	2.2592
					Minimum (Hou...	2.1567
					Observations	19.0000
			Throughput	NumberCreated	Total	550.0000
				NumberDestroyed	Total	19.0000
Path	Path1	[Travelers]	Content	NumberOnLink	Average	17.3885
					Maximum	26.0000
			FlowTime	TimeOnLink	Average (Hou...	0.0747
					Maximum (Ho...	0.0903
					Minimum (Hou...	0.0599
			Throughput	NumberEntered	Total	550.0000
				NumberExited	Total	529.0000
	Path2	[Travelers]	Content	NumberOnLink	Average	0.0042
					Maximum	3.0000
			FlowTime	TimeOnLink	Average (Hou...	0.0005
					Maximum (Ho...	0.0005
					Minimum (Hou...	0.0005
			Throughput	NumberEntered	Total	19.0000

Figura 10. Resultados de la simulación 1.

Simulación de la segunda red, se muestra en la figura 11

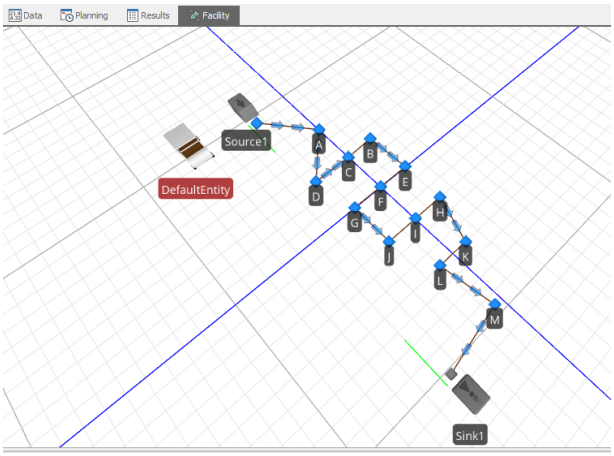


Figura 11. Simulación 2.

Resultados:

Drop Filter Fields Here

Average

Drop Column Fields Here

Object Type	Object Name	Data Source	Category	Data Item	Statistic	Average Total
ModelEntity	DefaultEntity	[Population]	Content	NumberInSystem	Average	301.4220
					Maximum	540.0000
			FlowTime	TimeInSystem	Average (Hours)	2.1806
					Maximum (Hours)	2.2514
					Minimum (Hours)	2.0933
					Observations	67.0000
			Throughput	NumberCreated	Total	596.0000
				NumberDestroyed	Total	67.0000
Path	Path1	[Travelers]	Content	NumberOnLink	Average	18.3188
					Maximum	30.0000
			FlowTime	TimeOnLink	Average (Hours)	0.0768
					Maximum (Hours)	0.0880
					Minimum (Hours)	0.0659
			Throughput	NumberEntered	Total	596.0000
				NumberExited	Total	575.0000
	Path2	[Travelers]	Content	NumberOnLink	Average	0.0220
					Maximum	2.0000
			FlowTime	TimeOnLink	Average (Hours)	0.0008
					Maximum (Hours)	0.0008
					Minimum (Hours)	0.0008

Figura 12. Resultados de la simulación 2.

Simulación de la tercera red, se muestra en la figura 13

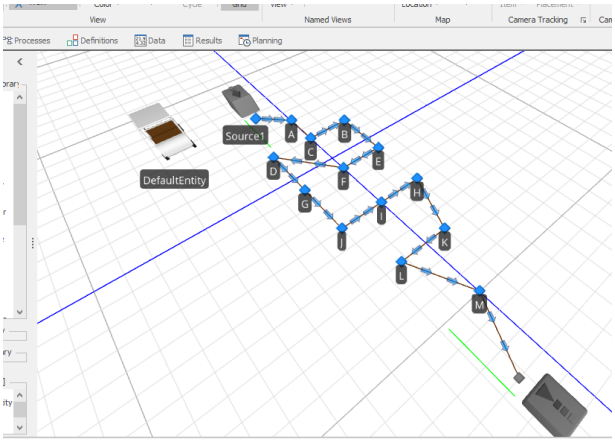


Figura 13. Simulación 3.

Resultados:

Processes Definitions Data Results Planning

Drop Filter Fields Here

Average

Drop Column Fields Here

Object Type	Object Name	Data Source	Category	Data Item	Statistic	Average Total
ModelEntity	DefaultEntity	[Population]	Content	NumberInSystem	Average	368.9024
					Maximum	617.0000
			FlowTime	TimeInSystem	Average (Hou...	2.4162
					Maximum (Ho...	2.5207
					Minimum (Hou...	2.3256
					Observations	176.0000
			Throughput	NumberCreated	Total	789.0000
				NumberDestroyed	Total	176.0000
Path	Path1	[Travelers]	Content	NumberOnLink	Average	25.9303
					Maximum	39.0000
			FlowTime	TimeOnLink	Average (Hou...	0.1063
					Maximum (Ho...	0.1276
					Minimum (Hou...	0.0853
			Throughput	NumberEntered	Total	789.0000
				NumberExited	Total	756.0000
	Path2	[Travelers]	Content	NumberOnLink	Average	0.0357
					Maximum	3.0000
			FlowTime	TimeOnLink	Average (Hou...	0.0006
					Maximum (Ho...	0.0006
					Minimum (Hou...	0.0006
			Throughput	NumberEntered	Total	176.0000

Figura 14. Resultados de la simulación 3.

A partir del análisis de los resultados obtenidos en cada simulación, se observa que la primera red representa un tiempo promedio de entrega de 2.2237 horas, la red 2 registra un promedio de 2.1806 horas, y la red 3 alcanza un promedio de 2.4162 horas. Con base a estos valores, se determina que la red 2 representa la opción más eficiente para la distribución, ya que optimiza los tiempos de entrega en función de las condiciones del sistema.

Act (Actuar)

Prevenir la recurrencia del problema:

Registrar y monitorear los elementos clave del proceso de distribución para garantizar que se cumpla con los tiempos establecidos y que sigan los procedimientos estandarizados.

A continuación, se muestra una propuesta para la Hoja de Verificación elaborada en Excel para la estandarización del proyecto.

Empresa:	
Fecha:	
Nombre del responsable:	
Turno:	
Ruta evaluada:	

Núm.	Localidad de entrega	Hora de salida	Hora de llegada (min)	Tiempo de tránsito	Tiempo estimado
1	Purificadora				
2	Rio Escondido		6		
3	Acatlipa centro		7		
4	Estribio		4		
5	Rivera		6		
6	Villa		14		
7	Sabinos		10		
8	Las Rosas		15		
9	10 de Abril		10		
10	Temixco		4		
11	Encamisadero		11		
12	Zapata		12		
13	Granjas		20		

Puntos de verificación	
Configuración de vehículo	
Velocidad asignada:	
Capacidad de carga:	
Cumplimiento del recorrido:	
¿El vehículo siguió la secuencia establecida?	
Si:	
No:	
Anomalías detectadas	
Retraso en las localidades:	
Problemas técnicos o logísticos:	
Resultado general del recorrido	
Tiempo estimado según la simulación:	
¿Cumplió con el tiempo total?	
Si:	
No:	

Observaciones

Firma del responsable

Figura 15. Propuesta de hoja de verificación.

DISCUSIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

El análisis del proceso actual permitió identificar diversas ineficiencias relacionadas con la falta de una ruta definida para la recolección y entrega de garrafones de agua. Estas ineficiencias generan tiempos prolongados de distribución, recorridos innecesarios y duplicación de trayectos, impactando negativamente en los costos operativos y en la satisfacción del cliente.
Con el objetivo de optimizar este proceso, se realizó una simulación basada en un modelo diseñado mediante la herramienta SIMIO, utilizando un diagrama de red optimizado. Este modelo permitió evaluar diferentes escenarios y seleccionar la configuración más eficiente para el proceso de distribución.
En la siguiente figura 16 se muestra los resultados de la red 2 obteniendo la simulación con los tiempos de entrega fijos.

Drop Filter Fields Here

Average

Drop Column Fields Here

Object Type	Object Name	Data Source	Category	Data Item	Statistic	Average Total
ModelEntity	DefaultEntity	[Population]	Content	NumberInSystem	Average	301.4220
					Maximum	540.0000
			FlowTime	TimeInSystem	Average (Hours)	2.1806
					Maximum (Hours)	2.2514
					Minimum (Hours)	2.0933
					Observations	67.0000
			Throughput	NumberCreated	Total	596.0000
				NumberDestroyed	Total	67.0000
Path	Path1	[Travelers]	Content	NumberOnLink	Average	18.3188
					Maximum	30.0000
			FlowTime	TimeOnLink	Average (Hours)	0.0768
					Maximum (Hours)	0.0880
					Minimum (Hours)	0.0659
			Throughput	NumberEntered	Total	596.0000
				NumberExited	Total	575.0000
	Path2	[Travelers]	Content	NumberOnLink	Average	0.0220
					Maximum	2.0000
			FlowTime	TimeOnLink	Average (Hours)	0.0008
					Maximum (Hours)	0.0008
					Minimum (Hours)	0.0008

Figura 16. Resultados de la Simulación 2.

La implementación de un modelo con tiempos variables permite capturar con mayor precisión las fluctuaciones en los tiempos de entrega, facilitando la identificación de oportunidades de mejora y optimización del sistema. Por lo tanto, la red 2 de rango de tiempos (mínimo y máximo) proporciona resultados más representativos y confiables para la toma de decisiones estratégicas en la distribución.

Los resultados obtenidos evidencian que la simulación es una herramienta clave para analizar y mejorar procesos logísticos, permitiendo establecer rutas definidas y estrategias que optimizan tiempos, reducen costos y mejoran la calidad del servicio ofrecido al cliente.

CONCLUSIONES

La implementación de un modelo de simulación con tiempos variables ha demostrado ser una metodología efectiva para capturar con mayor precisión las fluctuaciones en los tiempos de entrega, lo que permite una evaluación más realista del desempeño del sistema de distribución. Los resultados obtenidos evidencian que la red 2, al considerar un rango de tiempos mínimo y máximo, proporciona estimaciones más representativas y confiables, facilitando la toma de decisiones estratégicas de distribución.

La implementación de esta nueva ruta optimizada no solo reduce los tiempos de entrega, sino que también elimina recorridos innecesarios y la duplicación de trayectos, contribuyendo a disminuir los costos operativos y mejorando la satisfacción del cliente. Este resultado valida la importancia de establecer rutas definidas y planificadas con base en herramientas de simulación, como SIMIO, para tomar decisiones informadas y mejorar la eficiencia operativa.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos al personal de la empresa y al director, por abrirnos las puertas para el desarrollo de este trabajo.

BIBLIOGRAFÍA

[1]Banks, .. C. (2010). Discrete-Event System Simulation 5th ed. Upper Saddle River, New Jersey: Pearson.
[2]Goetsch, D. &. (2010). Quelity Management for Organizational Excellence: Itroduction to Total Quality (6 ed.). Pearson Prentice Hall.
[3]Hillier, F. S., & Lieberman, G. J. (2010). INTRODUCCIÓN A LA INVESTIGACIÓN DE OPERACIONES novena edición. México: McGraw-Hill.
[4]Ishikawa, K. (1986). Guía para la Calidad en los Procesos de Producción. McGraw-Hill.
[5]Juran, J. M. (1999). Juran´s Quality Handbook (5ta ed.). McGraw-Hill.
[6]Juran, J. M. (1999). Juran´s Quality Handbook: The complete Guide to Perfomance Excellence (6 ed.). McGraw-Hill.

[7]Kerzner, H. (2009). Project Management: A Systems Approach to Planning, Scheduling, and Controlling (10 ed.) . Wiley.
[8]KRAJEWSKI, L. J., RITZMAN, L. P., & MALHOTRA, M. K. (2008). ADMINISTRACIÓN DE OPERACIONES Octava edición. México: PEARSON EDUCACIÓN.
[9]Law, A. M. (2000). Simulatión Modeling and Analysis . McGraw-Hill.
[10]LLC, S. (s.f.). SIMIO Simulation Software. Obtenido de https:www.simio.com
[11]María Elena Bernal, M. G. (31 de Agosto de 2019). HERRAMIENTAS PARA EVALUAR LAS HABILIDADES METACOGNITIVAS EN ESTUDIANTES DE INGENIERÍA AL RESOLVER PROBLEMAS EN SIMULACIÓN DE EVENTOS DISCRETOS. Obtenido de https://acofipapers.org/index.php/eiei/article/view/72
[12]Pulido, H. G. (2013). Control Estadístico de la Calidad y Seis Sigma. McGraw-Hill.
[13]Pyke, D. F. (2009). Operations Management: A practical Approach to Simulatin Modeling. Prentice Hall.
[14]Render, B., Stair, R., & Hanna, M. E. (2012). Métodos cuantitativos para los negocios. México: PEARSON.
[15]Sterman, J. D. (2000). Business Dynamics: Systems Thinking and Modeling for a Complex World. . McGraw-Hill.

AUTORIZACIÓN Y RENUNCIA.

Los autores del presente artículo autorizan al TecNM/Instituto Tecnológico de Zacatepec para publicar el escrito en el libro electrónico del CITID 2025. El TecNM/ITZ o los editores no son responsables ni por el contenido ni por las implicaciones de lo que está expresado en el escrito.

LA IMPORTANCIA DE LA APLICACIÓN DE HERRAMIENTAS DE ADMINISTRACIÓN DE ALMACENES PARA GARANTIZAR LA CONFIABILIDAD DEL INVENTARIO

Gilberto Castañeda Gómez[1], Sócrates Espinoza Salgado[2], Alfredo Ezequiel Ramírez Traveceras[3], Jesús Ángel Peña Ramírez[4]

Ingeniero Industrial. Tecnológico Nacional de México/ Instituto Tecnológico de Zacatepec, mg92090443@zacatepec.tecnm.mx, 777 389 25 42, Calzada Tecnológico No. 27, C.P. 62780, Zacatepec de Hidalgo, Morelos México.
Dr. En Ciencias en Polímeros. Tecnológico Nacional de México/ Instituto Tecnológico de Zacatepec, Departamento de Sistemas y Computación. socrates.es@zacatepec.tecnm.mx, 777 236 36 10, Calzada Tecnológico No. 27, C.P. 62780, Zacatepec de Hidalgo Morelos México.
Ingeniero Industrial. Tecnológico Nacional de México Instituto/ Tecnológico de Zacatepec, mg15090930@zacatepec.tecnm.mx, 777 565 67 81, Calzada Tecnológico No. 27, C.P. 62780, Zacatepec de Hidalgo, Morelos México.
Dr. en Pedagogía e Innovación Educativa. Tecnológico Nacional de México/ Instituto Tecnológico de Zacatepec, Departamento de Sistemas y Computación, jesus.pr@zacatepec.tecnm.mx, 734 106 92 40, Calzada Tecnológico No. 27, C.P. 62780, Zacatepec de Hidalgo, Morelos México.

Resumen -- Los almacenes juegan un papel crucial en la industria, debido a su función estratégica en la cadena de suministro. Algunas de las funciones clave son la conservación de los productos, la recepción y expedición de mercancías, el control de inventarios y la gestión del stock, así como la preparación de pedidos y envíos. Actualmente las empresas tienden a la automatización de sus procesos, a la implementación de sistemas de gestión de almacenes y al uso de tecnologías de información y comunicación. El presente artículo tiene como objetivo resaltar la importancia del uso de herramientas de administración de almacenes, para garantizar inventarios confiables. La implementación de estas herramientas, se llevó a cabo en una empresa farmacéutica del parque industrial CIVAC (Ciudad Industrial del Valle de Cuernavaca) en el estado de Morelos México, industria en la cual, al analizar la operación del almacén de materia prima, se pudo identificar que las transacciones realizadas en el ERP (por sus siglas en ingles de Planeación de los Recursos Empresariales), no coincidían con las realizadas físicamente, lo cual nos obligaba, en cada cierre de mes, a realizar ajustes de inventario, para hacer coincidir el stock reflejado en el ERP con el stock que se tenía físicamente, lo cual impactaba directamente en la confiabilidad del inventario, uno de los principales indicadores claves del proceso de un almacén. Otros aspectos que se tomaron en cuenta para garantizar la confiabilidad del inventario son la baja productividad del personal del departamento de almacén de materia prima y el bajo nivel de servicio ofrecido al cliente interno inmediato, que es el departamento de producción. Aquí mismo se mencionan y se describen las diferentes herramientas de administración de almacenes, que se utilizaron para obtener el inventario del almacén de materia prima confiable.

Palabras Clave -- Almacén, Inventario, Confiabilidad, Herramientas de calidad.

Abstract --Warehouses play a crucial role in the industry due to their strategic function in the supply chain. Some of the key functions are product storage, goods receiving and dispatching, inventory control and stock management, as well as order picking and shipping. Nowadays, companies are tending to automate their processes, implement warehouse management systems and use information and communication technologies. The purpose of this article is to highlight the importance of using warehouse management tools to ensure reliable inventories. The implementation of these tools was carried out in a pharmaceutical company in the CIVAC industrial park (Ciudad Industrial del Valle de Cuernavaca) in the state of Morelos, Mexico, an industry in which, upon analyzing the operation of the raw material warehouse, it was possible to identify that the transactions carried out in the ERP did not coincide with those carried out physically, which forced us, at the end of each month, to make inventory adjustments to match the stock reflected in the ERP with the stock that was physically held, This forced us, at the end of each month, to make inventory adjustments to match the stock reflected in the ERP with the physical stock, which had a direct impact on the reliability of the inventory, one of the main key indicators of the warehouse process. Other aspects that were taken into account to guarantee the reliability of the inventory are the low productivity of the raw material warehouse personnel and the low level of service offered to the immediate internal customer, which is the production department. The different warehouse management tools that were used to obtain a reliable raw material warehouse inventory are mentioned and described here.

Keywords -- Warehouse, Inventory, Reliability, Quality tools.

INTRODUCCIÓN

En la era de la globalización y el comercio electrónico, la gestión eficiente de inventarios se ha convertido en un

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

factor crítico para el éxito de cualquier empresa. La precisión y confiabilidad en la administración de inventarios pueden significar la diferencia entre la rentabilidad y la pérdida, la satisfacción del cliente y la insatisfacción. Sin embargo, muchos negocios aún enfrentan desafíos en la gestión de sus inventarios, desde la falta de visibilidad y control hasta la ineficiencia en la cadena de suministro.

La implementación de herramientas de administración de almacenes, de acuerdo a varios autores mencionados en este artículo, es una solución efectiva para abordar estos desafíos y mejorar la eficiencia, efectividad, productividad y rentabilidad en la gestión de almacenes. Desde sistemas de gestión de almacenes e inventarios (WMS y IMS respectivamente) hasta tecnologías de código de barras y RFID (Identificación por radio frecuencia), existen diversas herramientas que pueden ayudar a las empresas a optimizar sus operaciones de almacén y mejorar la satisfacción del cliente.

En este artículo, exploraremos cómo las herramientas de administración de inventarios pueden revolucionar la forma en que las empresas gestionan sus activos. Describiremos como la empresa en la cual se basa este artículo, implementó algunas herramientas de administración de almacenes logrando optimizar la gestión de inventarios, reducir costos y mejorar la eficiencia.

En el presente artículo se mencionan y se describe las diferentes herramientas de administración de almacenes que se utilizaron y su implementación para poder alcanzar los niveles de confiabilidad de inventario establecidos por la dirección corporativa de dicha empresa farmacéutica, así como los resultados obtenidos y el tiempo de implementación de las mismas.

DESARROLLO

La administración de almacenes es una actividad clave en la cadena de suministro, ya que permite a las empresas mejorar la eficiencia en la gestión de inventarios, reducir costos, mejorar la satisfacción del cliente y mantenerse competitivo en el mercado, por lo tanto, es importante implementar herramientas de administración de almacenes que permitan a las empresas optimizar sus operaciones y alcanzar sus objetivos.

Para lograr llevar a cabo este proyecto, se utilizaron varias herramientas de administración de almacenes que son las siguientes:

1. SISTEMA PEPS (Primeras Entradas Primeras Salidas).
2. Diagrama de Ishikawa o de Pescado.
3. 5 porqués.
4. Conteos Cíclicos o conteos Rotativos.
5. Circulo de Deming, PDCA (Plan, Do, Check, Act) o PHVA (Planear, Hacer, Verificar, Actuar).
6. Código de Barras.
7. Método ABC.

SISTEMA PEPS (Primeras Entradas Primeras Salidas)

Por ser productos de consumo humano, los que fabrica dicha empresa, es muy importante llevar un orden cronológico en el uso de los insumos a utilizarse en la fabricación de productos que se reciben de proveedor.

Con el método PEPS el primer lote de mercancía que entra en el almacén debe ser el primero en salir. Se prioriza la salida de los productos que llevan más tiempo almacenados.

Según Donald J. Bowersox [1] “El método PEPS es una técnica de gestión de inventarios que consiste en vender o utilizar los productos que han estado en inventario durante más tiempo.".

El principal problema identificado fue que al no usar el sistema PEPS, existía un stock de material obsoleto al final del año fiscal, que se traducían en pérdidas financieras atribuible en gran parte al almacén de materia prima. (Ver Figura 1) (Ver Tabla 1).

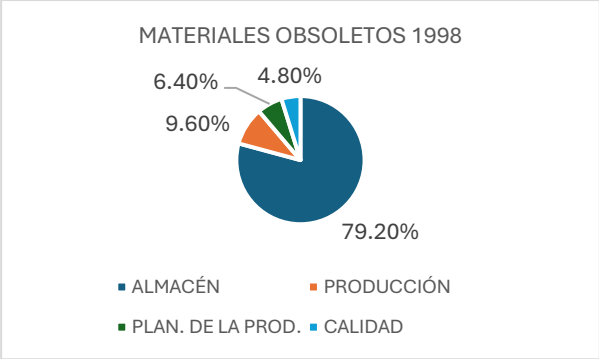


Figura 1, Materiales Obsoletos por departamento expresado en porcentaje en 1998. (elaboración propia)

Tabla 2, Monto en dlls. de materiales obsoletos por departamento en 1998. (elaboración propia)

MONTO DE MATERIALES OBSOLETOS EXPRESADO EN DLLS 1998		
DEPTO	MONTO	%
ALMACÉN	$198,000.00	79.20
PRODUCCIÓN	$24,000.00	9.60
PLAN. DE LA PROD.	$16,000.00	6.40
CALIDAD	$12,000.00	4.80

Mediante el ERP (JDEdwars) que se utiliza para realizar las transacciones de inventario, pudimos establecer el surtido del lote más antiguo de insumos en existencia y evitar obsolescencias y por consecuencia pérdidas financieras.

Dando capacitación al personal encargado del almacén de materia prima pudimos crear la conciencia y la disciplina para evitar futuros rezagos de materiales,

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

logrando para el siguiente año fiscal cero materiales obsoletos atribuibles al departamento de almacén de materia prima, (Ver Figura 2) (Ver Tabla 2).

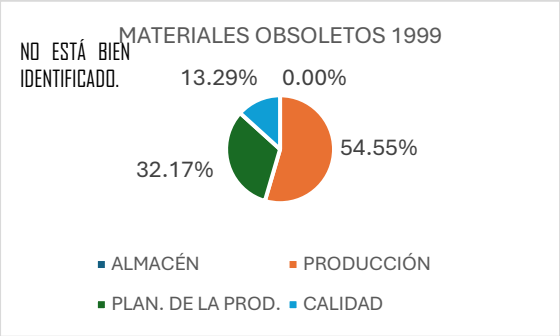


Figura 2, Materiales Obsoletos por departamento expresado en porcentaje en 1999. (elaboración propia)

Tabla 2, Monto en dlls. de materiales obsoletos por departamento en 1999. (elaboración propia)

MONTO DE MATERIALES OBSOLETOS EXPRESADO EN DLLS 1999		
DEPTO	MONTO	%
ALMACÉN	$0.00	0.00%
PRODUCCIÓN	$7,800.00	54.55%
PLAN. DE LA PROD.	$4,600.00	32.17%
CALIDAD	$1,900.00	13.29%

DIAGRAMA DE ISHIKAWA O DE PESCADO

El diagrama de Ishikawa o de pescado, es una herramienta que identifica problemas de calidad y les da solución al representar de forma gráfica los factores que involucran la ejecución de un proceso. También es conocido como diagrama de causa-efecto o de las 6 M.

De acuerdo a Ishikawa K. [3] "El diagrama de Ishikawa es una herramienta útil para identificar y analizar las causas raíz de problemas.".

Se realizó un diagrama de Ishikawa para identificar los diferentes factores que afectaban la confiabilidad del inventario, priorizando de entre todos, los que se encuentran en recuadro rojo, debido a que se consideró que eran los factores que más impactaban en la baja confiabilidad, como lo muestra la Figura 3.

Con lo que se llegó a la conclusión de que los principales factores que causaban la baja confiabilidad del inventario, era que los registros se hacían de forma manual, ya que no se contaba con lectores de códigos de barras y existía un alto riesgo de error al realizar los registros de recibo y surtido de los materiales. Teníamos muchos documentos sin capturar en el sistema, por la carga de trabajo que se acumulaba al personal encargado de hacer los registros de las transacciones del inventario, y los recorridos para hacer la entrega de los insumos al departamento de producción, en muchas ocasiones eran muy largos, por lo cual no se entregaban en tiempo y forma y había equivocaciones a la hora de la recolección de los materiales a entregar.

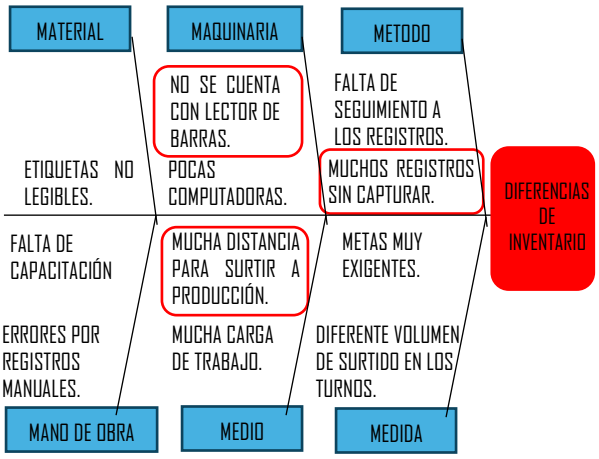


Figura 3. Ishikawa de diferencias de inventarios del almacén de materia prima. (elaboración propia)

5 PORQUÉS

Los cinco porqués, es una herramienta para la mejora continua que busca identificar la raíz del problema a través de preguntas sucesivas, con las que trazamos una línea que profundiza en el análisis de ese problema hasta identificar su origen. Al analizar los diferentes factores que generaban la baja confiabilidad en el inventario, se llegó a la conclusión de que el principal factor que ocasionaba la baja confiabilidad del inventario, era la falta de actualización de los registros de las transacciones del inventario y no se verificaba físico vs sistema las posiciones reales de los materiales existentes en el almacén.

Con la ayuda de los 5 porqués, se concluye la necesidad de establecer un método de conteo, que permita verificar día a día que lo existente físicamente en el almacén, coincida con lo que es mostrado dentro del sistema. Aunque es considerada una herramienta sencilla, ha demostrado su efectividad para llegar al problema raíz, como lo menciona Ohno T. [4], “El método de los 5 Porqués es una herramienta simple pero efectiva, para encontrar la causa raíz de problemas.", "Al preguntar '¿Por qué?' cinco veces, podemos llegar a la causa verdadera del problema." . Al ejecutar la herramienta de los 5 porqués, se concluye lo siguiente expresado en la Figura 4:

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

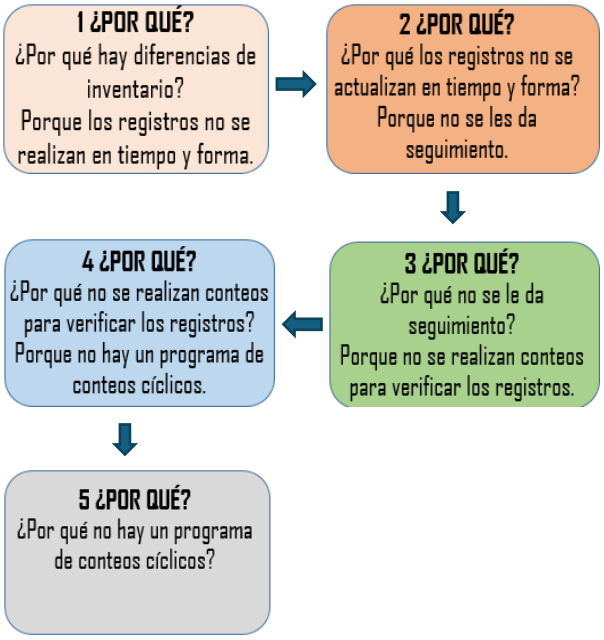


Figura 4, 5 Por qués, que concluye la necesidad de generar un programa de conteos cíclicos. (elaboración propia)

Con la conclusión de este análisis, nos dimos a la tarea de realizar un programa de conteos cíclicos que a continuación se muestra.

CONTEOS CÍCLICOS O CONTEOS ROTATIVOS

Un conteo cíclico en almacenes es un proceso de inventario continuo que implica realizar conteos regulares y sistemáticos de los productos almacenados en un almacén a lo largo de todo el año. A diferencia de un conteo anual completo, el conteo cíclico se enfoca en contar y verificar una parte específica del inventario en un momento determinado, y luego rotar hacia otra sección o categoría de productos.

Según Reyes E. [5], los conteos cíclicos son un método de conteo de inventario, que implica contar y verificar el inventario de manera regular y sistemática, que ayuda a garantizar la precisión del inventario, reducir errores y desviaciones, mejora la eficiencia en la gestión del inventario, reduce costos y mejora la productividad y destaca la importancia de implementar un programa de conteos cíclicos.

Como se muestra en la Figura 5, la confiabilidad del proceso de inventario no satisfacía los requerimientos establecidos por la dirección corporativa de la empresa, lo anterior debido a la realización de únicamente 2 inventarios por año, por parte del departamento de finanzas, por ello se aconsejó al personal del departamento del almacén de materia prima, implementar un programa de conteos cíclicos con mayor frecuencia, que consistiera en imprimir reportes directos del sistema de los materiales existentes en el almacén con ubicación, lote y cantidad, que permitiera corroborar los datos que reflejaba el ERP vs lo que se tenía físicamente en cada localidad.

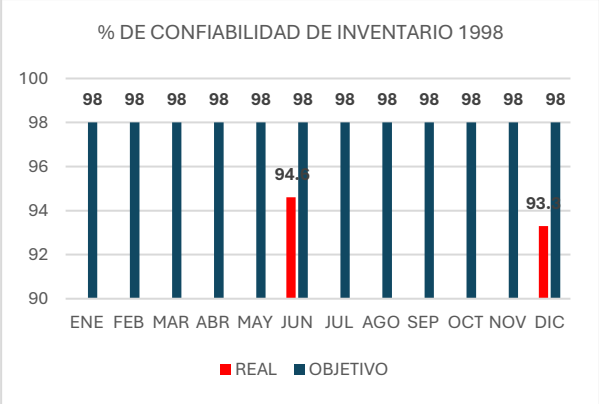


Figura 5, Confiabilidad de inventario del almacén de materia prima, 1998. (elaboración propia)

Posteriormente, se realizaba la entrega de los reportes del material a contar, a los operadores encargados de la recepción y surtido de los insumos dentro del departamento de almacén de materia prima de forma aleatoria, es decir, ningún operador contaba las mismas localidades cada vez que se le asignaba un conteo, ya que se imprimían los reportes del material a contar, siguiendo la secuencia del número de las localidades. Una vez realizados los conteos, el personal operativo entregaba los resultados al personal administrativo, encargado de realizar las transacciones de inventario vía sistema, para su análisis y corrección de los posibles errores encontrados.

Cabe mencionar que, si bien se tuvo mejoría en el resultado de la confiabilidad del inventario en el primer semestre del siguiente año, existía aun área de mejora para el cumplimiento del objetivo marcado por la dirección corporativa, como lo muestra la Figura 6.

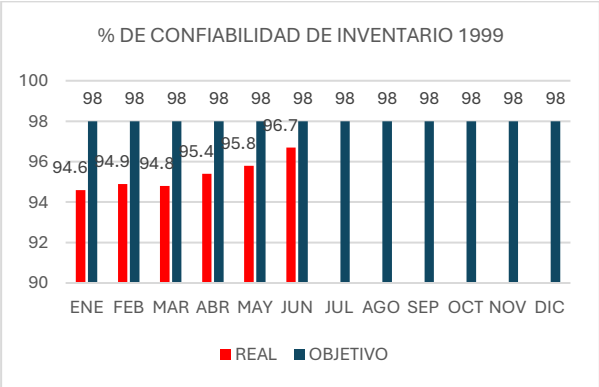


Figura 6, Confiabilidad de inventario del almacén de materia prima, 1999 1er semestre. (elaboración propia)

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

Por lo anterior, la forma de ejecutar los conteos cíclicos fue replanteado, haciendo uso de la herramienta de circulo de Deming, PDCA o PHVA. Con lo cual se modificó la asignación de localidades a contar de forma equitativa para cada operador del almacén de materia prima, para tratar de llegar al objetivo establecido.

CIRCULO DE DEMING, PDCA O PHVA

Es el sistema más utilizado para implantar dicho plan de mejora continua, desarrollado por Walter Shewhart y que recibe el nombre de Edwards Deming, quien fue su principal impulsor, pero también se conoce como ciclo PHVA o PDCA. Hiroyuki Hirano, [2], aborda el PDCA, como una herramienta fundamental para la mejora continua y dice que "El PDCA, es un ciclo de mejora continua que ayuda a mantener y mejorar la calidad.", "Este ciclo consiste en cuatro pasos: Planificar, Hacer, Verificar y Actuar.".

Por ello fue propuesta la mejora del programa de conteos rotativos, realizando un simple cambio en la asignación de localidades que debía contar cada operador del almacén. Se asignó a cada operador del almacén, de forma equitativa, una zona de localidades especifica al azar, tomando en cuenta el número de localidades disponibles en el almacén de materia prima, de las cuales eran responsables de cada variación que resultara en el inventario de esa zona en específico, con lo cual se generó el sentido de pertenencia de las localidades asignadas. El cambio realizado, dio como resultado una mejoría en la confiabilidad del inventario en el segundo semestre de ese mismo año, como se muestra en la Figura 7.

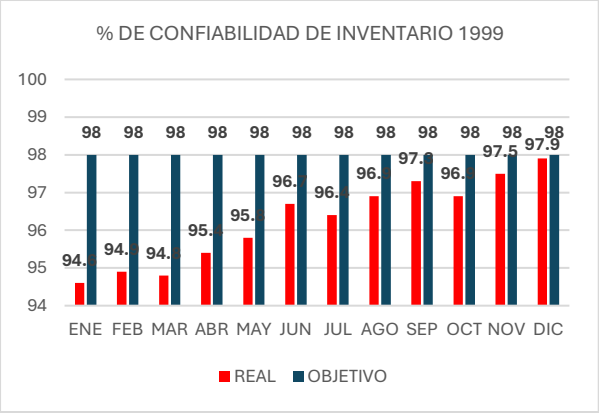


Figura 7, Confiabilidad de inventario del almacén de materia prima, 1999 1er y 2º semestre. (elaboración propia)

Aún con las técnicas y herramientas implementadas, existía el riesgo del error humano, que disminuyó en gran parte con la capacitación que se otorgó a todo el personal del almacén de materia prima en el uso del software, pese a ello, aun con la mejora significativa en la confiabilidad del inventario, no se lograba llegar al objetivo marcado por la dirección, por lo que el siguiente paso fue, desarrollar e implementar el proyecto de código de barras, que garantizara una correcta y fiable captura de las transacciones del inventario.

CÓDIGO DE BARRAS

Se trata de una tecnología legible en etiquetas impresas con tecnología térmica que identifica, traza y contabiliza cualquier objeto, normalmente de igual forma y tamaño, gracias a la información codificada e inalterable contenida en las barras de cada código, la cual debe ser leída por un lector láser.

El código de barras es una herramienta esencial para la gestión de almacenes, ya que permite identificar de forma rápida y precisa los materiales, reduce los errores en la gestión del inventario, mejora la eficiencia y la productividad, controla el stock y da seguimiento a las transacciones del inventario, se integra con el sistema de gestión de inventario y logística.

Gary C. Smith, [6], aborda los códigos de barras como una herramienta fundamental para la gestión de inventarios, en el cual comenta lo siguiente:

"Los códigos de barras son una forma eficiente y precisa de identificar y rastrear productos.", "Los códigos de barras ofrecen precisión y eficiencia en la gestión de inventarios.".

La implementación de código de barras tiene como principales beneficios, la precisión y eficiencia en la gestión del inventario, reduce los errores y costos, mejora la trazabilidad de los materiales y refleja las transacciones del inventario vía sistema de forma más ágil.

Este proyecto se llevó acabo en conjunto con el departamento de TI (Tecnología de la Información), dicho departamento desarrolló el formato de las etiquetas adheribles, que se le coloca a cada pallet que se recibe de proveedor, las cuales contienen la información específica de cada material como es la descripción, código del material, lote que se le asigna al momento del recibo y la cantidad contenida en cada pallet, también configuró las terminales manuales con las cuales se lee el código de barras de cada producto.

Se colocó una etiqueta de código de barras a cada localidad o ubicación de cada rack o estante existente en el almacén, de esta forma fue posible realizar las transacciones del inventario con un mínimo de error y de manera más rápida, evitando con esto, los atrasos que teníamos en la captura de documentos cuando se hacían de forma manual en la computadora.

Una vez implementado el código de barras en las operaciones diarias del almacén de materia prima, se

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

logró alcanzar el objetivo marcado por la dirección corporativa como se muestra en la Figura 8.

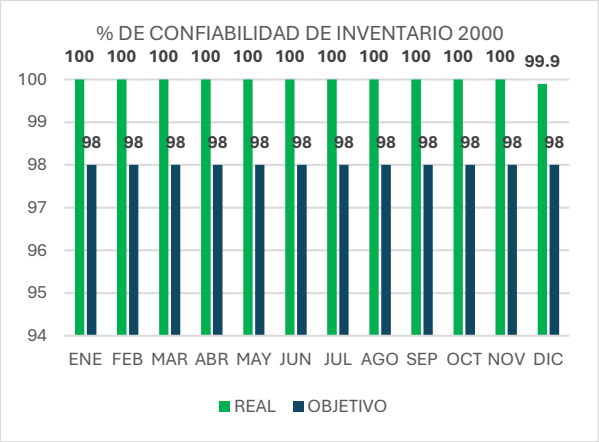


Figura 8, Confiabilidad de inventario del almacén de materia prima, 2000 1er y 2º semestre. (elaboración propia)

MÉTODO ABC

El método de clasificación de inventarios ABC, es un sistema para segmentar y organizar los productos de un almacén con base a su importancia, relevancia para la empresa, valor económico, beneficios aportados, rotación generada, etc.

James A. Tompkins [7], menciona el método ABC como una herramienta para clasificar y priorizar los artículos de inventario en la gestión de almacenes y reducir costos.

Como se menciona anteriormente en este punto del método ABC, los materiales se pueden clasificar por la frecuencia en la rotación que tienen dentro del almacén. El nivel de servicio que se ofrecía al departamento de manufactura al momento de entregar los materiales, era del 91%, ya fuera porque no se encontraba el material solicitado o porque las entregas de los mismos no eran en el horario solicitado, esto último se debía a la mala distribución de los materiales en el almacén, ya que en algunas ocasiones los materiales se encontraban en el punto más lejano al área de entrega a producción, por lo que se hizo una distribución de tal forma que los materiales con mayor rotación estuvieran en la zona más cercana al área de entrega de materiales, los materiales de rotación media, fueron ubicados en una zona intermedia al área de entrega de materiales y los materiales de rotación baja en la zona más retirada a la zona de entrega, con esta distribución logramos entregar los materiales en tiempo y forma al 100%, incrementando el nivel de servicio ofrecido a nuestro cliente interno.

DISCUSIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

La aplicación de las herramientas de administración de inventarios mencionadas en este artículo, lograron el incremento de la confiabilidad del inventario de un 93.3% a un 99.9% en un año, superando el objetivo establecido por la dirección corporativa de la empresa que era de 98%.

Aplicar el sistema PEPS, dio como resultado que el monto de los materiales caducados fuera de $0.00 dlls., atribuibles al departamento de almacén de materia prima en los años subsecuentes a la implementación de dicho sistema.

Aplicar las herramientas, diagrama de Ishikawa y 5 porqués, permitió identificar los factores que más afectaban el resultado de confiabilidad de inventario obtenido.

Con la elaboración del programa de conteos cíclicos, se logró tener un control eficiente de entradas y salidas de los insumos, así como de los materiales existentes en el departamento de almacén de materia prima, de igual forma, permitió identificar y corregir de forma eficaz los errores causados por un orden inadecuado de los materiales.

Con la automatización a partir de la implementación de del código de barras, el tener registros confiables y de forma inmediata, permitió mejorar los registros realizados en el momento en que se recibían los materiales entregados por el proveedor o durante la entrega/recepción al departamento de manufactura, dando una ubicación física dentro del almacén.

Ya que no se obtuvo el objetivo marcado por la dirección en la confiabilidad del inventario con la programación e implementación de los conteos cíclicos realizados en los primeros ejercicios, se utilizó la herramienta de circulo de Deming, con la cual se hicieron cambios en la forma de asignar los conteos cíclicos a los operadores del almacén, permitiéndonos alcanzar y sobrepasar de forma clara la confiabilidad del inventario, teniendo como resultado un 99.9%, en los ejercicios posteriores.

Con la implementación del método ABC se logró reducir el tiempo de entrega de material al departamento de manufactura, colocando los materiales, dependiendo de su nivel de rotación, lo más cercano posible al área de entrega, también se logró la entrega en tiempo y forma todos los materiales solicitados por el departamento de manufactura, obteniendo un nivel de servicio al departamento de producción del 100% en cada entrega.

CONCLUSIONES

Para poder mejorar un proceso cualquiera, es necesario llevar a cabo un análisis previo, que nos permita identificar los factores que afectan dicho proceso, dar prioridad a cada uno de ellos e intentar minimizarlos con las diferentes herramientas administrativas o tecnológicas que se puedan aplicar para lograrlo.

Al utilizar e implementar algunas herramientas de administración de almacenes, se logró una mejora significativa en la eficiencia, reduciendo tiempo en la búsqueda de materiales. Se obtuvo mayor eficiencia en la precisión del inventario, se redujeron los errores en la recepción de los insumos, se mejoró la distribución de

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

los materiales, según su rotación dentro del almacén y al momento de surtir los materiales solicitados por manufactura, también se redujeron los costos por errores de inventario. Se optimizó la utilización del espacio físico del almacén, se tuvo un mayor control en los niveles de stock, se eliminó la obsolescencia de materiales atribuibles al almacén. Se obtuvo mayor rapidez y precisión en la entrega de materiales, se obtuvo un mejor nivel de servicio otorgado al cliente interno y se alcanzó el objetivo planteado por la dirección corporativa de la empresa.

La implementación de herramientas de administración de almacenes, ha generado importantes mejoras en varios aspectos dentro del departamento de almacén de materia prima. Sin embargo, es importante continuar trabajando en la integración de tecnologías y herramientas de administración y en la constante capacitación del personal tanto operativo como administrativo, para asegurar la sostenibilidad de estos resultados.

BIBLIOGRAFÍA

[1] Donal J. Bowersox, D. J. (2013). *Logística y Gestión de la Cadena de Suministro.* McGraw-Hill.
[2] Hirano, H. (2001). *5S: Una revolución en la Gestión de la Calidad.* Editoria Reverté.
[3] Ishikawa, K. (1990). *Introducción al Control de Calidad.* Editorial Reverté.
[4] Ohno, T. (1988). *El Sistema de Producción Toyota.* Editorial Reverté.
[5] Reyes, E. M. (2019). *Gestión de Operaciones.* Pearson Educación.
[6] Smith, G. C. (2009). *Códigos de Barras y RFID; Una Guía para la Gestión de Inventarios.* Editoria Reverté.
[7] Tompkins, J. A. (2003). *No Boundaries: Break Through to Supply Chain Excellence.* Tompkins Press.

AUTORIZACIÓN Y RENUNCIA.
Los autores del presente artículo autorizan al TecNM/Instituto Tecnológico de Zacatepec para publicar el escrito en el libro electrónico del CITID 2025. El TecNM/ITZ o los editores no son responsables ni por el contenido ni por las implicaciones de lo que está expresado en el escrito.

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

REDUCCIÓN DE TIEMPO EN EL PROCESO DE MAQUINADO DE EJE EN UNA EMPRESA DE MANUFACTURA MEDIANTE LA METODOLOGÍA PDCA

E. De La Rosa-Durán[1], I.L. Hernández-Solís[2], C. Barreto-Cabrera[3], A. Rojas-Ayala[4]

[1]Ingeniero Industrial. Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Zacatepec. Departamento de Ingeniería Industrial. Correo electrónico: enriquedlrduran@gmail.com, teléfono: 7771202677, Calzada Tecnológico No.27, Col. Centro, Zacatepec de Hidalgo Morelos, México
[2]Maestra en Ciencias de la Ingeniería. Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Zacatepec. Departamento de Ingeniería Industrial. Correo electrónico: iris.hs@zacatepec.tecnm.mx, teléfono: 7341262779, Calzada Tecnológico No.27, Col. Centro, Zacatepec de Hidalgo Morelos, México
[3]Doctora en Ciencias. Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Zacatepec. Departamento de Ingeniería Industrial. Correo electrónico: claudia.bc@zacatepec.tecnm.mx, teléfono: 7341060217, Calzada Tecnológico No.27, Col. Centro, Zacatepec de Hidalgo Morelos, México
[4]Maestro en Ciencias. Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Zacatepec. Departamento de Ciencias Básicas. Correo electrónico: alejandro.ra@zacatepec.tecnm.mx, teléfono: 7341332611, Calzada Tecnológico No.27, Col. Centro, Zacatepec de Hidalgo Morelos, México

Resumen -- El presente trabajo se enfoca en el aumento de productividad mediante la reducción de tiempo en el proceso de maquinado de eje en un centro de trabajo.

Se implementó la metodología PDCA para el desarrollo del trabajo, en la etapa Plan, se identificó la causa raíz del problema mediante el uso de herramientas como lluvia de ideas, 5W + 1H y el diagrama de Ishikawa. Posteriormente, con la ayuda del diagrama de Pareto en el efecto 80-20, se identificaron los materiales de mayor impacto en la producción, lo que permitió definir el plan de trabajo para iniciar la mejora. En la etapa Hacer, se implementaron las actividades definidas en el plan de trabajo, como la toma de tiempos del proceso de maquinado actual, creación de nuevos programas de maquinado CNC, el cambio de proceso a un maquinado completo, etc. Durante la etapa de Verificar, se evaluaron los resultados obtenidos para medir el impacto de las mejoras realizadas, se realizó una comparación de tiempos de maquinado antes y después de la mejora, y finalmente, en la etapa Actuar, se realizaron actividades para evitar la recurrencia del problema, como la creación de un registro de los programas de maquinado.

Como resultado, el tiempo de maquinado de eje se redujo en un 32%, superando ampliamente el objetivo inicial. Esto incrementó la productividad del centro de trabajo y aumentó la competitividad de la empresa.

La mejora demostró la efectividad del enfoque estructurado de la metodología PDCA para la mejora continua, logrando resultados significativos.

Palabras Clave – CNC, manufactura, maquinados, optimización, PDCA, procesos.

Abstract -- This work focuses on increasing productivity by reducing time in the shaft machining process in a work center.

The PDCA methodology was implemented for the development of this work. In the Plan phase, the root cause of the problem was identified using brainstorming, 5W + 1H, and the Ishikawa diagram. Subsequently, the materials with the greatest impact on production were identified using the 80-20 effect of the Pareto diagram. In the Do phase, the activities defined in the action plan were implemented, such as obtaining the cycle times of the current process, creating new CNC machining programs, changing the process to a complete machining, etc. During the Verify phase, the results obtained were evaluated to measure the impact of the improvements, a comparison of machining times before and after the improvement was made, and finally, in the Act phase, activities to prevent the recurrence of the problem were carried out, such as the creation of a record of the machining programs.

As a result, the shaft machining times were reduced by 32%, far exceeding the initial objective. This increased the productivity of the work center and enhanced the company's competitiveness.

The improvement demonstrated the effectiveness of the PDCA methodology in continuous improvement, achieving significant results.

Key words – CNC, machining, manufacturing, optimization, PDCA, processes.

INTRODUCCIÓN

La industria de maquinados en México ha tenido un crecimiento significativo a lo largo de los años, “en el segundo trimestre de 2024 se registró un producto interno bruto de $6.58B MX, evidenciando un alza de 5.06% con respecto al trimestre anterior” [1]. El aumento de productividad en la industria manufacturera trae consigo beneficios tales como, mejora de la calidad, reducción de costos de producción, mayor competitividad, etc. Tomando como ejemplo un caso de

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

estudio realizado en la India, en una empresa manufacturera donde, mediante el calentamiento previo de la maquinaria y el cambio del equipo de medición se obtuvieron mejoras del el 82,29% (Cp), 33,68% (Cpk) y 15,7% en productividad [2].

Este trabajo se llevó a cabo en una empresa de manufactura dedicada a la fabricación de motores y transformadores eléctricos. Al realizar una comparación de costos de producción entre las plantas de México y de Brasil, reveló que los costos en México eran significativamente más altos. El objetivo principal del trabajo fue reducir en un 10% el tiempo en el proceso de maquinado de eje en un centro de trabajo designado. Para lograrlo, se realizaron diversas actividades, incluyendo el análisis del proceso actual, la evaluación de la productividad, la revisión y rediseño de los programas CNC, la validación de estos programas en las máquinas, la estandarización de condiciones de corte y la capacitación de los operadores en el nuevo proceso.

A raíz del inicio de un proyecto de competitividad entre México y Brasil, se busca aumentar la productividad en los procesos de manufactura en México para reducir costos de producción; por esta razón, se intenta reducir el tiempo en el proceso de maquinado de eje del centro de trabajo para incrementar la productividad, medida en minutos por pieza (min/pza). Cada centro de trabajo se compone por dos tornos CNC denominados como máquina uno y máquina dos, y cada uno de ellos se enfoca en distintos tipos de material (se le llama material al tipo de eje o flecha producido y se identifica con un número particular, ej. 0950) para los distintos motores que se comercializan. Analizando el proceso de maquinado de eje llevado a cabo en el centro de trabajo, se encontró que el proceso de maquinado se divide en dos pasos, maquinando lado visible (A) en la máquina uno y lado no visible (B) en la máquina dos. Al realizar el proceso de esta manera, se pierde un lapso en lo que la máquina uno termina el maquinado del lado A, para que el eje maquinado pueda pasar a la máquina dos; continuando así el proceso de maquinado del lado B, esto limita la producción a un solo torno, es decir, los min/pza en los que se produce un eje son restringidos al tiempo de maquinado de la máquina dos, ya que a pesar de que la máquina uno maquine el primer lado, la restricción final para el tiempo de proceso lo da la máquina dos.

Por lo que, se busca aumentar la productividad en el centro de trabajo designado mediante la reducción del tiempo en el proceso de maquinado de eje, convirtiendo el maquinado de eje en dos pasos a un maquinado en un solo paso, permitiendo así producir un eje por torno, teniendo como objetivo reducir en un 10% el tiempo en el proceso de maquinado de eje en el centro de trabajo designado para esta mejora.

La mejora es crucial debido a que La reducción del tiempo de maquinado no solo buscaba mejorar la productividad y reducir costos, sino también aumentar la competitividad de la planta mexicana.

DESARROLLO

Metodología PDCA.

En el libro Calidad y productividad, se describe a la metodología PDCA como un ciclo de mejora continua con 4 etapas principales, “En este ciclo, también conocido como el ciclo de Shewhart, Deming o ciclo de la calidad, se desarrolla un plan (planear), este se aplica en pequeña escala o sobre una base de ensayo (hacer), se evalúa si se obtuvieron los resultados esperados (verificar) y se actúa en consecuencia (actuar), ya sea generalizando el plan —si dio resultado— con medidas preventivas para que la mejora no sea reversible, o reestructurándolo porque los resultados no fueron satisfactorios, con lo que se vuelve a iniciar el ciclo”. (Gutiérrez, 2014) [3]. En la tabla 1 se presentan los 8 pasos a seguir propuestos por Gutiérrez Pulido.

Tabla 1. Ocho pasos del ciclo PDCA.

Etapa	Paso	Nombre del paso
Planear	1	Definir y analizar la magnitud del problema.
	2	Buscar todas las posibles causas.
	3	Investigar cual es la causa más importante.
	4	Considerar las medidas remedio.
Hacer	5	Poner en práctica las medidas remedio
Verificar	6	Revisar los resultados obtenidos.
Actuar	7	Prevenir la recurrencia del problema.
	8	Conclusión.

Productividad.

“La productividad es una medida de qué tan eficientemente utilizamos nuestro trabajo y nuestro capital para producir valor económico. Una alta productividad implica que se logra producir mucho valor económico con poco trabajo o poco capital. Un aumento en productividad implica que se puede producir más con lo mismo” (Galindo y Ríos, 2015) [4].

Procesos de maquinado.

Consiste en la eliminación controlada de material mediante herramientas de corte, con el fin de esculpir la pieza deseada. Este procedimiento implica la deformación cortante del material, generando virutas que, al ser retiradas, exponen nuevas superficies. El maquinado de eje, es la operación realizada en un centro de trabajo designado, los cuales reciben la barra de metal lista para ser transformada en la flecha o eje de un motor

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

eléctrico, en específico, mediante el desprendimiento de viruta en la barra de metal con insertos de corte, moldeando así la barra según las especificaciones deseadas.

Programación CNC.
"El término CNC se refiere al control numérico de máquinas, generalmente máquinas herramientas. Normalmente este tipo de control se ejerce a través de una computadora y la máquina está diseñada a fin de obedecer las instrucciones de un programa dado" (Castillo, 2008) [5].

"El lenguaje para elaborar los programas para equipos de CNC, como ya se ha explicado, está compuesto por una serie de letras y números, las cuales llamaremos palabras, donde una cantidad determinada de ellas, formarán un bloque, y una serie sucesiva de bloques completarán un programa"(UTN, s.f.) [6].

Estas instrucciones son dadas a la máquina a través de una serie de códigos alfanuméricos que dictan las acciones a realizar, a continuación, se presenta una tabla con los códigos más relevantes para este trabajo, extraídos del manual de programación de Daewoo [7]. (Ver tabla 2).

Tabla 2. Códigos CNC.

Código	Descripción
M0	Paro del programa
M1	Paro opcional del programa
M2	Fin del programa
M30	Fin del programa y regreso a la primera línea
M98	Llama a un subprograma
M99	Regreso al programa principal
G0	Movimiento rápido de posicionamiento
G1	Movimiento de corte lineal con avance programado
G70	Ciclo de acabado
G71	Ciclo de desbaste en el diámetro

"La programación CNC es el proceso de definir las instrucciones que una máquina CNC debe seguir para fabricar una pieza de trabajo específica. Se basa en un lenguaje de programación especializado, como el código G, que contiene comandos para controlar los movimientos de la máquina y las operaciones de mecanizado" (Gómez y López, 2023) [8].

Etapa Planear.
Definido cómo: "Establecer los objetivos y procesos necesarios para entregar resultados de acuerdo con el producto esperado (la meta o metas)" (Chandrakanth, s.f) [9].

Definir Y Analizar La Magnitud Del Problema.
Durante las reuniones de competitividad llevadas a cabo en el área de ingeniería industrial dentro de la empresa, se analizaron los costos de producción de dos motores en específico, los cuales son producidos tanto en la planta mexicana como en la planta brasileña. Analizando los datos presentados en la reunión se notó que los costos de producción en México eran significativamente más altos que los costos de producción en Brasil, a raíz de esto se comenzó un proyecto de competitividad contra Brasil para reducir los costos, en el cual se busca incrementar la productividad de las operaciones llevadas a cabo. En el área de Ingeniería de procesos componentes, se comenzó en el centro de trabajo de este trabajo, en el cual se maquinan los ejes que componen a los motores analizados en la reunión de competitividad. Con este planteamiento se utilizó el método de las 5W+1H para definir el problema (Ver tabla 3).

Tabla 3. Método 5W+1H

¿Qué?	Aumentar la productividad en el centro de trabajo
¿Cuándo?	En todo el proceso de maquinado de ejes
¿Dónde?	En el área de maquinado de flechas y rotores
¿Quién?	Operadores, analistas y programadores
¿Por qué?	Reducir el costo de producción en el proceso de maquinado de eje
¿Cómo?	Reduciendo el tiempo en el proceso de maquinado de eje

Buscar todas las posibles causas.
Se realizó un diagrama de Pareto contemplando la producción de los materiales, cargados al centro de trabajo.

"El diagrama de Pareto también conocido como el 80/20, en donde el 20% de los eventos es el 80% de los problemas" (Vaughn, 1998) [10].

Se realizó haciendo uso de las transacciones del sistema SAP: *Referencia al puesto de trabajo,* utilizada para extraer todos los materiales cargados al centro de trabajo, *Sistema info de órdenes de fabricación*, obteniendo un registro histórico de lo producido en el centro de trabajo; con la información obtenida se elaboró una tabla en Excel, sintetizando la información con el número de material y la cantidad producida o entregada (Ver tabla 4).

Tabla 4. Cantidades de materiales maquinados.

Material	Cantidad producida	% Acumulado
3995	4136	27.9913%
3963	3653	52.7139%
4507	2391	68.8955%
9165	966	75.4331%
7737	927	81.7068%

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

0950	585	85.6659%
XX16	508	89.1040%
XX39	235	90.6944%
XX53	214	92.1427%
Otros	2118	100%

Se muestra el diagrama de Pareto en la figura 1, que, de acuerdo con el 80-20, se obtuvieron 5 materiales que abarcan el 80% de la producción en el centro de trabajo.

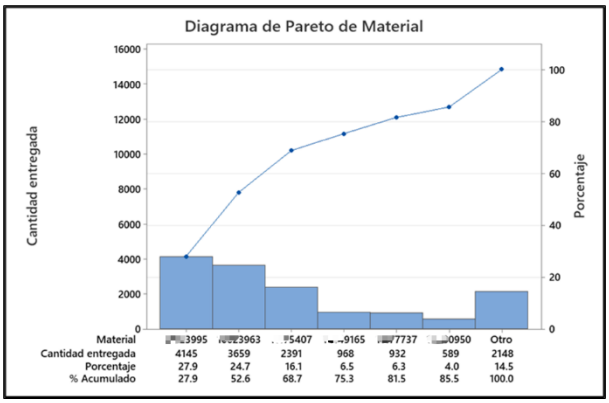


Figura 1. Diagrama de Pareto.

Posteriormente se procedió a buscar las posibles causas a atacar para aumentar la productividad, para la realización de este paso se llevó a cabo una lluvia de ideas para identificar las causas del problema planteado con los miembros del equipo trabajo, se expuso el problema obtenido en el método 5W+1H y se tomaron en cuenta todas las ideas sin descartar ninguna. A continuación, se presenta una lista de todas las ideas generadas:

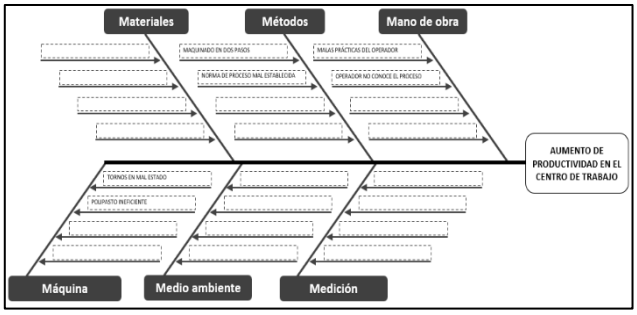
1. El operador no conoce el proceso
2. Malas prácticas del operador
3. Tornos en mal estado
4. Polipasto ineficiente
5. Norma de proceso mal establecida
6. Maquinado en dos pasos

Una vez generadas las ideas, se plasman en un diagrama de Ishikawa para una mejor visualización.
"El diagrama de Ishikawa se define como una representación gráfica que ilustra esquemáticamente las relaciones entre un resultado específico y sus causas" (Luca, 2016) [11].
En la figura 2 se muestra el diagrama de Ishikawa con el método de las 6M.
Investigar cual es la causa más importante.

Figura 2. Diagrama de Ishikawa.

Posterior al diagrama de Ishikawa, se utilizó la técnica 5 porqués para identificar la causa raíz del problema y proponer medidas para atacarlo:

- El operador no conoce el proceso
    1. El operador conoce el proceso, causa descartada.
- Malas prácticas del operador



    1. El operador realiza el proceso correctamente, causa descartada.
- Tornos en mal estado.
    1. Los tornos se encuentran en buen estado, causa descartada.
- Polipasto ineficiente.
    1. El polipasto está en buenas condiciones, causa descartada.
- Norma de proceso mal establecida
    1. La norma es correcta, causa descartada.
- Maquinado en dos pasos
    1. Porque se restringe la productividad en min/pza a la máquina dos.
    2. La máquina dos, está restringida a que la máquina uno acabe, para poder iniciar el proceso.
    3. El proceso se realiza maquinando un lado en cada máquina.
    4. En la máquina uno, se hace lado A y en la maquina dos, lado B.
    5. Así se estableció el proceso.

Considerar las medidas remedio.
A continuación, se presentan las actividades redactadas en el plan de acción para aumentar la productividad y reducir los tiempos en el proceso de maquinado de eje en el centro de trabajo designado (Ver figura 3).

1. Cronometrar tiempos del proceso actual.

Aquí se recabaron los tiempos de maquinado de eje en el centro de trabajo designado en minutos por pieza(min/pza) haciendo uso de los registros de tiempo de maquinado del departamento de métodos y tiempos.

2. Crear programas CNC de maquinado completo.

Con ayuda de los programadores, se comenzaron a crear los programas para maquinar ambos lados del eje en una sola máquina, empezando por los materiales obtenidos en el diagrama de Pareto, hasta abarcar todos los materiales cargados al centro de trabajo.

3. Maquinado de mordazas Ø barra bruta y maquinada.

En el proceso actual se utilizaba un juego de mordazas(3 piezas) maquinadas, para sujetar el diámetro de la barra bruta y maquinar lado A en la máquina uno, y otro juego de mordazas para sujetar el diámetro del lado maquinado y maquinar lado B en la máquina dos. Para el proceso de maquinado completo se maquinaron juegos de mordazas

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

para poder sujetar tanto diámetro de la barra bruta, como el diámetro del lado maquinado en la misma máquina.

4. Norma para parámetros de corte en herramientas para torneado en ejes para tornos CNC.

Se creó una norma que especifique los parámetros de corte a utilizar en los procesos de maquinado, para estandarizar las condiciones de corte y evitar variaciones.

5. Validación de programa en máquina.

Una vez creados los programas, se cargó un programa en las máquinas del centro de trabajo verificando que la programación y todo lo necesario para realizar el maquinado completo estaba correcto, así mismo que la máquina no marcara ningún error para poder iniciar el proceso.

6. Capacitar operador en el nuevo proceso.

Se le dio una breve explicación de los cambios realizados al proceso al operador, y se dejó que trabajara dos semanas a modo de prueba para que se familiarice con el proceso, en este periodo de prueba no se vigiló rigurosamente el modo en que el operador trabajó ni el impacto obtenido a los KPI del proceso.

7. Capacitación nuevo proceso (operadores, preparador, facilitador).

Se dio la capacitación del nuevo proceso a todos los colaboradores relacionados con el proceso de maquinado de eje en el centro de trabajo.

8. Implementación de nuevo proceso controlando nuevos materiales.

Se comenzó a operar con el nuevo proceso de maquinado de eje en el centro de trabajo.

9. Actualización de norma de proceso con nuevo proceso.

Se actualizó la norma de proceso de maquinado de eje del centro de trabajo con el procedimiento del nuevo proceso.

10. Cronometrar tiempos.

Se realizó la toma de tiempos de maquinado de eje del nuevo proceso en el centro de trabajo.

#	¿Qué?	¿Por qué?	¿Cómo?	¿Quién?	¿Cuándo?		Estatus
					Fecha Inicial	Fecha Final	
1	Cronometrar tiempos del proceso actual	Para conocer los min/pza del proceso actual	Realizando la toma de tiempos del proceso	Metodos y tiempos	29/01/2024	09/02/2024	No iniciada
2	Crear programas CNC de maquinado completo	Para realizar el maquinado en un solo paso	Cambiando los programas del CNC	Programadores	05/02/2024	26/04/2024	No iniciada
3	Maquinado de mordazas Ø barra bruta y maquinada	Para fijar los diametros de la barra	Maquinando	Técnicos	11/03/2024	18/03/2024	No iniciada
4	Establecer norma para parámetros de corte en herramientas para torneado en ejes para tornos CNC	Estandarizar condiciones de corte	Norma	Procesos/facilitador	04/03/2024	15/03/2024	No iniciada
5	Validación de programa en máquina	Asegurar que el programa este correcto	Cargando el programa en máquina	Programadores	01/04/2024	02/04/2024	No iniciada
6	Capacitar operador en el nuevo proceso	Para que el operador sepa como trabajaran las nuevas herramientas	Trabajo en 2 semanas	Procesos	08/04/2024	22/04/2024	No iniciada
7	Capacitación nuevo proceso (operadores, preparador, facilitador)	No están capacitados para el nuevo proceso	Capacitación	Facilitador	15/04/2024	16/04/2024	No iniciada
8	Implementación de nuevo proceso controlando nuevos materiales	Para llevar un control al implementar el nuevo proceso	Correr programas en máquina	Proceos/Programadores	22/04/2024	22/04/2024	No iniciada
9	Actualización de norma de proceso con nuevo proceso	Se creó un nuevo procedimiento	Documentando el nuevo proceso en la norma de proceso	Facilitador	22/04/2024	20/05/2024	No iniciada
10	Cronometrar tiempos	Medir si el cambio de proceso aumenta la productividad	Realizando una toma de tiempos al nuevo proceso	Metodos y tiempos	22/04/2024	31/05/2024	No iniciada

Figura 3. Plan de acción.

Etapa Hacer.

Poner en práctica las medidas remedio.

"En este paso se deben ejecutar las medidas remedio, acordadas antes, iniciando a pequeña escala sobre una base de ensayo" (Gutiérrez y De La Vara, 2009) [12].

Cronometrar tiempos del proceso actual.

A través del registro de tiempos de los procesos de maquinado llevado a cabo por el área de métodos y tiempos, se obtuvieron los tiempos de maquinado de eje del proceso actual del centro de trabajo . En la tabla 5 se concentra la información de los tiempos actuales en el proceso de maquinado de eje para los materiales considerados en el diagrama de Pareto.

Tabla 5. Tiempos de maquinado

Material	min/pza
3995	5.8
3963	5.865
5407	9.407
9165	4.284
7737	11.328
0950	5.221

1. Crear programas CNC de maquinado completo.

La programación ocupada para el proceso actual consistía en una programación por ciclos o también llamado enlatado, el cual se puede definir como "Estos ciclos tienen la particularidad de agrupar en una o varias líneas una cantidad considerable de operaciones facilitando así la programación CNC" (Dávalos, 2011) [13].

Al analizar los códigos de programación para ambos lados del eje, se encontró que se utilizaba el código G71 para iniciar el ciclo enlatado de desbaste y acabado, así mismo, los tornos CNC hacen uso del punto cero de la pieza cómo punto de origen, el cual puede ser definido como "Es el punto de origen que se fija para la programación de las medidas de la pieza" (Fagor, s.f.) [14]; para maquinar el primer lado del eje se utiliza un punto cero distinto al utilizado para maquinar el otro lado; por lo tanto, cambia el punto cero de la pieza, si se desea maquinar el otro lado en la misma máquina, se necesita calcular nuevamente este punto de origen, lo cual alargaría significativamente el tiempo total del proceso; esto se podría cambiar de la programación por ciclos enlatados a una programación con macros o subprogramas, la cual, puede ser definida cómo "La programación de macros es una técnica de programación de piezas que combina métodos de programación CNC estándar con funciones de control adicionales para obtener más potencia y flexibilidad" (Smid, 2005) [15].

Para el nuevo proceso, se cambió la programación de ciclos enlatados a una programación con macros, que permite cargar un subprograma en la máquina y llamarlo con el código M98, donde se cargan los parámetros con

los que va a trabajar la máquina, rpm, avance de corte, etc.

En la programación actual, se define el punto cero en la cara de la barra bruta; para la nueva programación se utilizan dos puntos cero, ambos ubicados en el lado de las mordazas, debido a que, al voltear la pieza, el lado maquinado es colocado más al interior de las mordazas que del lado bruto; por lo tanto, se define otro punto cero donde cambia la longitud del eje, y se debe restar la medida introducida en las mordazas.

2. Maquinado de mordazas ø barra bruta y maquinada.

En esta actividad se cambiaron las mordazas utilizadas para sujetar la barra en el proceso, ya que los diámetros sujetados por cada máquina dependían del lado que maquinaban, para el nuevo proceso, se maquinaron las nuevas mordazas para que pudieran sujetar ambos diámetros de barra bruta y barra maquinada (Ver figura 4).

Figura 4. Mordazas para el nuevo proceso.

3. Norma para parámetros de corte en herramientas para torneado en ejes para tornos CNC.

En el proceso actual, no se cuenta con una norma interna que establezca los parámetros de corte que se deben utilizar en el proceso de maquinado, los operadores utilizan las especificaciones contenidas en los paquetes de insertos de corte proporcionados por cada proveedor, Para el nuevo proceso, con el apoyo de los analistas del área de ingeniería de procesos se creó la norma que estandariza los parámetros de corte a utilizar para las operaciones de maquinado. Esta norma tiene como objetivo establecer las velocidades de corte, rotación, avance y herramientas de maquinado necesarias para tornear ejes en tornos CNC en los centros de trabajo de la empresa.

4. Validación del programa en máquina.

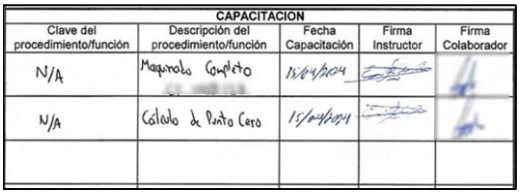
Se cargó el programa creado para el nuevo proceso en la máquina uno del centro de trabajo; con ayuda del programador y el operador del centro de trabajo, se verificó que el programa estuviera correcto y la máquina no marcara algún error.

5. Capacitar operador en el nuevo proceso.

Se explicó al operador cómo será llevado a cabo el nuevo proceso, los cambios realizados, así como todo lo necesario para iniciar el nuevo proceso y se permite que trabaje a modo de práctica durante dos semanas y se habitúe el nuevo proceso. En este tiempo no se vigila rigurosamente los KPI del proceso.

6. Capacitación nuevo proceso (operadores, preparador, facilitador).

Posteriormente al trabajo de prueba de dos semanas en el nuevo proceso, y una vez que el operador se familiarizó, se programó una reunión donde se dio la capacitación formal al operador del centro de trabajo, al preparador y al facilitador de correspondientes, donde se les explicaron los cambios realizados en el proceso de maquinado de eje en el centro de trabajo; principalmente, el cambio al cálculo del punto cero. Se utilizó el formato de capacitación utilizado en la empresa, el cual fue firmado por los colaboradores capacitados (Ver figura 5).



CAPACITACION				
Clave del procedimiento/función	Descripción del procedimiento/función	Fecha Capacitación	Firma Instructor	Firma Colaborador
N/A	Maquinado Completo	15/04/2024		
N/A	Calculo de Punto Cero	15/04/2024		

Figura 5. Capacitación formal.

7. Implementación de nuevo proceso controlando nuevos materiales.

Una vez capacitados los colaboradores involucrados en el proceso de maquinado de eje en el centro de trabajo, se inició de manera oficial con el nuevo proceso de maquinado completo, comenzando con los materiales contemplados en el diagrama de Pareto.

8. Actualización de la norma de proceso con nuevo proceso.

Se analizó la norma y se actualizó de acuerdo con los cambios implementados en el proceso de maquinado de eje. Uno de los cambios más importantes fue el cálculo del punto cero de la pieza.

Se programó una reunión con el analista de procesos correspondiente al centro de trabajo, los programadores y el facilitador, en la cual se explicaron los cambios del nuevo proceso y qué es lo que se debía cambiar en la norma, posteriormente se comenzó con la actualización de la norma con ayuda de el facilitador.

9. Cronometrar tiempos.

Se solicitó al departamento de métodos y tiempos la toma de los tiempos de cada material cargado, empezando por los materiales contemplados en el diagrama de Pareto.

A continuación, en la tabla 6 se muestran los nuevos tiempos de maquinado de eje en los materiales mostrados en el diagrama de Pareto.

Tabla 6. Tiempos nuevos de maquinado.

Material	min/pza
3995	3.59
3963	5.51
5407	6.40
9165	2.69

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

7737	2.76
0950	4.21

Etapa verificar.
En esta etapa se verifican los resultados obtenidos de las actividades realizadas en la Etapa hacer. A continuación, se presenta el plan de acción finalizado (Ver figura 6).

#	¿Qué?	¿Por qué?	¿Cómo?	¿Quién?	¿Cuándo?		Estatus
					Fecha Inicial	Fecha Final	
1	Cronometrar tiempos del proceso actual	Para conocer los min/pza del proceso actual	Realizando la toma de tiempos del proceso	Metodos y tiempos	29/01/2024	09/02/2024	Concluida
2	Crear programas CNC de maquinado completo	Para realizar el maquinado en un solo paso	Cambiando los programas del CNC	Programadores	05/02/2024	26/04/2024	Concluida
3	Maquinado de mordazas Ø barra bruta y maquinada	Para fijar los diametros de la barra	Maquinando	Técnicos	11/03/2024	18/03/2024	Concluida
4	Establecer norma para parámetros de corte en herramientas para torneado en ejes para tornos CNC	Estandarizar condiciones de corte	Norma	Procesos/facilitador	04/03/2024	15/03/2024	Concluida
5	Validación de programa en máquina	Asegurar que el programa este correcto	Cargando el programa en máquina	Programadores	01/04/2024	02/04/2024	Concluida
6	Capacitar operador en el nuevo proceso	Para que el operador sepa como trabajaran las nuevas herramientas	Trabajo en 2 semanas	Procesos	08/04/2024	22/04/2024	Concluida
7	Capacitación nuevo proceso (operadores, preparador, facilitador)	No están capacitados para el nuevo proceso	Capacitación	Facilitador	15/04/2024	16/04/2024	Concluida
8	Implementación de nuevo proceso controlando nuevos materiales	Para llevar un control al implementar el nuevo proceso	Correr programas en máquina	Proceos/Programadores	22/04/2024	22/04/2024	Concluida
9	Actualización de norma de proceso con nuevo proceso	Se creó un nuevo procedimiento	Documentando el nuevo proceso en la norma de proceso	Facilitador	22/04/2024	20/05/2024	Concluida
10	Cronometrar tiempos	Medir si el cambio de proceso aumenta la productividad	Realizando una toma de tiempos al nuevo proceso	Metodos y tiempos	22/04/2024	31/05/2024	Concluida

Figura 6. Plan de acción finalizado.

Revisar los resultados obtenidos.
Para llevar a cabo este paso en la Etapa verificar, se evaluaron las actividades realizadas, comenzando por el cronometrado de los tiempos actuales, la cual se hizo mediante los registros históricos del departamento de métodos y tiempos, posteriormente, se crearon los programas de maquinado con el nuevo proceso, comenzando con los cinco materiales indicados en el diagrama de Pareto. Se maquinaron las mordazas para el nuevo proceso de acuerdo con los diámetros de los materiales a maquinar, se contemplaron cuatro rangos de diámetro, maquinando así cuatro juegos de tres piezas cada uno por cada torno. Se creó la norma que estandariza los parámetros de corte a utilizar en los procesos de torneado de eje para tornos CNC, se verificó esta norma por parte del analista de procesos y el analista de herramientas. No se presentó ningún error al momento de validar los programas en la máquina, todos los programas fueron programados de manera correcta. Se capacitó de manera no formal al operador en el nuevo proceso, explicándole el nuevo cálculo del punto cero y se le dejó trabajar durante dos semanas a modo de prueba. Posteriormente, se llevó a cabo la capacitación de los colaboradores, se explicó el cambio al cálculo del punto cero y se llenaron los formatos de capacitación como evidencia. Se comenzó la implementación del nuevo proceso en los materiales de mayor producción contemplados en el diagrama de Pareto, se verificó con el analista de industriales que el proceso se desarrollara de manera correcta. En la figura 7 se muestra la torreta de la máquina de uno de los centros de trabajo en color verde, indicando una operación sin inconvenientes.

Figura 7. Máquina operando sin inconvenientes.

Con ayuda de los facilitadores se actualizó la norma de proceso, se verificó su elaboración con el analista de industriales.
Por último, se cronometraron los tiempos del nuevo proceso, a continuación, se hace una comparación de los tiempos de maquinado de eje del proceso actual contra los tiempos del nuevo proceso. En la tabla 7 se presentan los tiempos del proceso actual en la columna “DE” y, los tiempos del nuevo proceso en la columna “PARA”; además, se muestra el porcentaje de tiempo que se redujo, también, se muestra la comparación de los materiales contemplados en el diagrama de Pareto.

Tabla 7. Comparativa de tiempos de maquinado de eje.

Material	De	Para	% Reducido
3995	5.8	3.59	38%
3963	5.865	5.51	6%
5407	9.407	6.4	32%
9165	4.284	4.254	1%
7737	11.328	2.76	76%
0950	5.221	4.21	19%

Así mismo, se recopilaron los nuevos tiempos de todos los materiales cargados al centro de trabajo, para hacer la comparativa entre los tiempos actuales y los tiempos del nuevo proceso.

Etapa actuar.
Prevenir la recurrencia del problema.
En el proceso actual de maquinado de eje, no se tenía un control sobre los programas realizados para los procesos de maquinado, es por esto por lo que se decidió realizar una macro en Excel donde se pueda llevar un registro de los programas nuevos que se están realizando, no solo para los programas de los materiales cargados al centro de trabajo de este trabajo, sino de todos los programas de todo lo maquinado en el área.
“Una macro es un conjunto de comandos que se almacenan en Excel de manera que están siempre disponibles cuando se necesita ejecutarlas. Las macros se utilizan principalmente para evitar tener que repetir los pasos de aquellas tareas que se realizan una y otra vez” (Briones, s.f.) [16].

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

La macro consiste en dos partes importantes, grabar los programas y el registro donde se llevan todos los programas cargados. Se creó el código en VBA, en donde se dieron de alta las variables necesarias para indicar a la macro los nombres de las hojas, ubicación de las celdas a rellenar, etc. Para la parte de Grabar Programas, se solicita al programador el llenado de los datos correspondientes al programa que se va a realizar, que son: centro de trabajo, programador, número de material, revisión, número de documento de material, ruta y observaciones. Adicionalmente, se requiere saber el tiempo que los programadores usan para programar, ya que muchas veces son llamados por producción para apoyar con paros en las máquinas. Para esto se realizó un código que registre la hora de inicio, la hora de pausa, hora de reanudación y hora de término; cuando el programador utiliza el botón de término, la macro resta la hora de término menos la hora de inicio, para calcular el tiempo total. En dado caso de que exista alguna pausa, el tiempo de pausa se calcula restando la hora de reanudación menos la hora de pausa, dándonos como resultado el tiempo total de la pausa, el cual es restado al tiempo total para obtener el tiempo de programación. En la figura 8 se muestra la interfaz de la macro realizada.

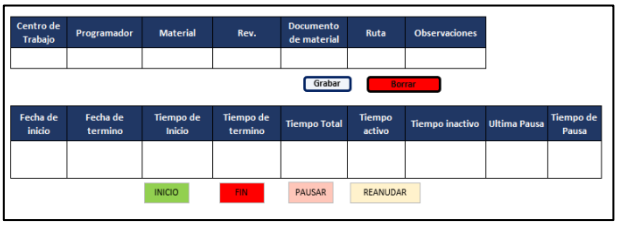


Figura 8. Macro para registro de programas.

Se realizó una reunión en donde se capacitó a los programadores acerca del funcionamiento de la macro y cómo debía ser utilizada.

También, se decidió llevar a cabo la prueba de los insertos de corte, donde se comparó el rendimiento de distintas marcas en los insertos utilizados para desbaste, se colocaron los insertos en ambas máquinas del centro de trabajo, y se contabilizó la cantidad de piezas maquinadas por filo del inserto. Para llevar a cabo la prueba, se utilizaron formatos establecidos de la empresa para prueba de herramientas de maquinado, y se programaron las pruebas de los insertos con los proveedores, informando al jefe de producción correspondiente al centro de trabajo.

DISCUSIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Como se pudo apreciar en la tabla 7, el porcentaje de tiempo reducido va desde el 1% hasta un 76%, dando como resultado un promedio de 28.7% de reducción de tiempo en el proceso de maquinado de eje para los materiales contemplados en el diagrama de Pareto, sin embargo, al considerar todos los materiales cargados al centro de trabajo, se obtuvo una reducción del 32%.

En la tabla 8, se muestra un resumen de las actividades realizadas y los resultados obtenidos.

Tabla 8. Resultados obtenidos.

Descripción	Resultado
Cronometrar tiempos del proceso actual	Se obtuvieron los tiempos de los materiales del centro de trabajo
Crear programas CNC de maquinado completo	Se crearon los programas para los materiales del centro de trabajo
Maquinado de mordazas Ø barra bruta y maquinada	Se maquinaron 4 juegos de mordazas en total, capaz de sujetar ambos lados del eje
Norma para parámetros de corte en herramientas para torneado en ejes para tornos CNC	Se creó la norma que estandariza los parámetros de corte para los procesos de maquinado
Validación de programa en máquina	Los programas fueron validados
Capacitar operador en el nuevo proceso	El operador trabajó durante las dos semanas sin inconvenientes.
Capacitación nuevo proceso	Todos los colaboradores fueron capacitados
Implementación de nuevo proceso controlando nuevos materiales	El proceso se desarrolló de manera correcta, sin inconvenientes
Actualización de norma de proceso con nuevo proceso	Se actualizó la norma de proceso
Cronometrar tiempos	Se obtuvieron los nuevos tiempos de maquinado

CONCLUSIONES

"La productividad de la mano de obra se ve directamente afectada por la maquinaria, herramientas, materiales y los métodos de trabajo utilizados por los trabajadores. El objetivo principal de mejorar estos métodos es incrementar la productividad al aumentar la capacidad de producción de las distintas operaciones."(Norman y Frazier, 1999) [17].

Se mejoró el proceso de maquinado de eje, aumentando su productividad mediante las cuatro fases del ciclo PDCA, se analizó el proceso actual de maquinado de eje en el centro de trabajo, se entendió el proceso y se encontró un área de mejora, la cual fue el maquinado en dos pasos, se lograron crear todos los programas CNC para maquinar con el nuevo proceso. Se cambiaron las mordazas para poder sujetar ambos lados del eje en una sola máquina y se capacitó a los colaboradores involucrados en el proceso de maquinado de eje en el centro de trabajo.

Los resultados obtenidos han demostrado una mejora notable en la productividad, logrando reducir el tiempo en el proceso de maquinado de eje en un 32%, lo cual supera el 10% planteado como objetivo. Estos logros no solo reflejan el éxito de las mejoras implementadas, sino que también permite que la planta mexicana sea más

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

competitiva ante la planta brasileña en la fabricación de motores eléctricos.

Así mismo, siguiendo con el ciclo de mejora continua, se recomienda seguir desarrollando programas en el nuevo proceso, e implementar la mejora a los demás centros de trabajo para lograr aumentar la productividad del área de maquinado de ejes industriales.

BIBLIOGRAFÍA

[1] Secretaria de Economía (2024). Fabricación de Maquinaria y Equipo para la Industria Metalmecánica: Salarios, producción, inversión, oportunidades y complejidad. Data México. Recuperado de https://www.economia.gob.mx/datamexico/es/profile/industry/metalworking-machinery-manufacturing

[2] Narula, V., Kumar, G., & Loganathan, M. K. (2021). Improving the Productivity of the Machining Process of a Manufacturing Company: A Six Sigma Case Study. Delhi Technological University, Delhi, India. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/352727481

[3] Gutiérrez Pulido, H. (2014). Calidad total y productividad (tercera edición). Mcgraw-hill.

[4] Galindo, Mariana y Viridiana Ríos (2015) "Productividad" en Serie de Estudios Económicos, Vol. 1, Agosto 2015. México DF: México ¿cómo vamos?.

[5] Díaz del Castillo Rodríguez, F. (2008). Programación automática de máquinas CNC. Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán. http://olimpia.cuautitlan2.unam.mx/pagina_ingenieria/mecanica/mat/mat_mec/m4/master_cam.pdf

[6] Universidad Tecnológica Nacional Facultad Regional Reconquista. (n.d.). Manual de programación de CNC. https://frrq.cvg.utn.edu.ar/pluginfile.php/50036/mod_resource/content/1/manual-programacion-de-cnc.pdf

[7] Daewoo Heavy Industries LTD (s.f.). CNC Program.

[8] Gómez A. y López D. (2023). *Programación En Máquinas De Control Numérico Utilizando Macros Para Piezas Con Operaciones De Cajeado, Taladrado, Ranurado, Contorneado Y Planeado.* Universidad Distrital Francisco José De Caldas.

[9] Chandrakanth, K. (s.f.), *Plan Do Check Act (PDCA) Improving Quality Through Ágil Accountability,* Tektronix Engineering Development India.

[10] Vaughn R. (1998). *Control de calidad.*

[11] Luca, L. (2016). *A new model of Ishikawa diagram for quality assessment,* University "Constantin Brâncuşi" of Targu-Jiu.

[12] Gutiérrez H. y De La Vara R. (2009). *Control Estadístico de Calidad y Seis Sigma. McGRAW-HILL/INTERAMERICANA EDITORES, S.A. DE C.V*

[13] Dávalos Martínez V.H. (2011) Desarrollo de ciclos enlatados para torno CNC, Universidad Autónoma de Querétaro, Facultad de Ingeniería.

[14] Fagor Automation (s.f.). *CNC 8037 -M- manual de programación.*

[15] Smid, P. (2005). FANUC CNC Custom Macros: Programming resources for FANUC Custom Macro B users, Industrial Press Inc.

[16] Briones L. (s.f.). *Programación De Macros De Excel Utilizando Visual Basic For Applications.*

[17] Norman G. y Frazier G. (1999). *Administración de producción y operaciones.* Cuarta edición. *Thompson editores.*

AUTORIZACIÓN Y RENUNCIA.

Los autores del presente artículo autorizan al TecNM/Instituto Tecnológico de Zacatepec para publicar el escrito en el libro electrónico del CITID 2025. El TecNM/ITZ o los editores no son responsables ni por el contenido ni por las implicaciones de lo que está expresado en el escrito.

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

ERGONOMÍA; MÉTODOS DE EVALUACIÓN - HERRAMIENTAS PARA REDUCCIÓN DE LAS PRINCIPALES ENFERMEDADES DE TRABAJO EN MÉXICO

Jorge Luis Espinoza Díaz [1]

[1]Ingeniero Electromecánico. Tecnológico Nacional de México/ Instituto Tecnológico de Zacatepec. georkaed@hotmail.com,

7775945394, Mariano Escobedo #2, col. Centro, Tlaltizapán Morelos.

Resumen – Los Trastornos musculoesqueléticos representan 3 de las primeras 5 enfermedades de trabajo en México. La ergonomía y los distintos métodos de evaluación ergonómica son una herramienta para la identificación de riesgos asociadas con la actividad laboral. Como parte de las responsabilidades de las organizaciones en materia del marco legal en cuanto a la gestión de la Seguridad y Salud en el trabajo, existen requisitos obligatorios que regulan la gestión laboral, así como la gestión de riesgos específicos, a través de las Normas Oficiales Mexicanas. Es de suma importancia considerar la legislación que regula la prevención de riesgos laborales, ya que son la parte central que determina los alcances en derechos y obligaciones para los patrones y trabajadores. Para reducir las enfermedades de trabajo relacionadas con trastornos musculoesqueléticos, tenemos que conocer el proceso de gestión de riesgos ergonómicos; esta gestión de riesgos se enfatiza en 2 grandes etapas: evaluar riesgos y controlar riesgos. La evaluación y control de riesgos se realizan mediante distintas metodologías o técnicas cualitativas y cuantitativas, que están diseñadas y validadas para ser la más idónea según lo que se vaya a evaluar. Estas técnicas de análisis de riesgos son indicadores de riesgos, más nunca la representación exacta del riesgo. La selección del método de evaluación de riesgos ergonómicos consiste en identificar cuál de ellos considera aquellos factores de riesgo (movimientos repetitivos, levantamientos de carga, mantenimiento de posturas forzadas, posturas estáticas, exigencia mental, monotonía, vibraciones, condiciones ambientales, etc.) que influyen e incrementan la probabilidad de desarrollar un Trastornos musculoesqueléticos.

El Instituto Mexicano del Seguro Social (IMSS), a través del programa “Entornos Laborales Seguros y Saludables” (ELSSA), apoya a las empresas y centros de trabajo para reducir los riesgos para la salud mediante prácticas laborales seguras, entornos de trabajo saludables y una organización de trabajo responsable.

No basta con aplicar los conocimientos de los distintos métodos de evaluación de riesgos ergonómicos, la capacitación, adiestramiento y sensibilización a la base trabajadora, enseña técnicas de levantamiento seguro, ajuste de mobiliario y pausas activas.

Palabras Clave: Ergonomía, enfermedad de trabajo, métodos de evaluación de riesgos trastorno musculoesquelético (TME).

Abstract -- Musculoskeletal disorders represent 3 of the top 5 occupational diseases in México. Ergonomics and the different ergonomic assessment methods are a tool for identifying risks associated with work activity. As part of the responsibilities of organizations regarding the legal framework for the management of Safety and Health at work, there are mandatory requirements that regulate labor management, as well as the management of specific risks, through the Mexican Official Standards. It is of utmost importance to consider the legislation that regulates the prevention of occupational risks, since they are the central part that determines the scope of rights and obligations for employers and workers. To reduce occupational diseases related to musculoskeletal disorders, we need to know the ergonomic risk management process; This risk management is emphasized in 2 major stages: assessing risks and controlling risks. Risk assessment and control are carried out using different qualitative and quantitative methodologies or techniques, which are designed and validated to be the most suitable depending on what is to be evaluated. These risk analysis techniques are indicators of risk, but never the exact representation of risk. The selection of the ergonomic risk assessment method consists of identifying which of them considers those risk factors (repetitive movements, lifting loads, maintenance of forced postures, static postures, mental demand, monotony, vibrations, environmental conditions, etc.) that influence and increase the probability of developing a musculoskeletal disorder.

The Mexican Social Security Institute (IMSS), through the "Safe and Healthy Work Environments" (ELSSA) program, supports companies and workplaces to reduce health risks through safe work practices, healthy work environments, and responsible work organization.

It is not enough to apply the knowledge of the different methods of ergonomic risk assessment, training, training and sensitization to the worker base, teach safe lifting techniques, furniture adjustment and active breaks.
Key words – Ergonomics, occupational disease, risk assessment methods, musculoskeletal disorders.

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

INTRODUCCIÓN

A lo largo de su existencia el hombre ha tenido que transformar el entorno en que se encuentra con el ánimo de procurarse la satisfacción que requieren sus necesidades, para lograrlo, ha tenido que fabricar y hacer uso de una serie de herramientas que en ocasiones, al no ser las adecuadas para el trabajo que desarrolla le producen fatiga, enfermedades y accidentes, produciéndole éstos últimos lesiones físicas externas e internas en su cuerpo que ponen en peligro su vida o bien lo lesionan dejando marcas imborrables para toda su vida, como ocurre por ejemplo, cuando sufre la amputación de una parte de su cuerpo como consecuencia del trabajo que realiza [1].

Desarrollar actividades laborales conlleva a exposición de factores de riesgos como: físicos, químicos. biológicos, psicológicos y ergonómicos, siendo este último la herramienta principal para la prevención de enfermedades de trabajo relacionados con trastornos musculoesqueléticos.

La ergonomía es reconocida mundialmente como una disciplina científica reciente, si bien sus orígenes datan de los años 40's en el periodo entre guerras mundiales en Europa y Norteamérica, también se reconocen los aportes previos durante la segunda revolución industrial desde análisis científico del trabajo realizado por F.W. Taylor durante el siglo XIX y sus continuadores [2].

Un método de prevención de riesgos ergonómicos completo es aquel que puede determinar con eficacia cuál es el nivel de riesgo, considerando la valoración de todos los factores de riesgo previamente identificados, y determinando cuánto influyen en cada situación.

Los métodos de evaluación de riesgos ergonómicos más destacados, ya sea por ser de los más empleados en la actualidad por los servicios de prevención y/o por tratarse de metodologías que incorporan criterios técnicos más fiables y adecuados en la valoración del nivel de riesgo ergonómico son: manejo manual de cargas (NIOSH, GINSHT, SNOOK Y CIRIRELLO), posturas forzadas (RULA, OWAS, REBA, EPR), movimientos repetitivos (JSI, OCRA), entre otros.

Es de suma importancia considerar la legislación que regula la prevención de riesgos laborales, ya que son la parte central que determina los alcances en derechos y obligaciones para los patrones y trabajadores.

La Ley Federal de Trabajo, en su artículo 475, describe a la enfermedad de trabajo como todo estado patológico derivado de la acción continuada de una causa que tenga su origen o motivo en el trabajo o en el medio en que el trabajador se vea obligado a prestar sus servicios [3]. El instituto Mexicano del Seguro Social, presentó su informe anual 2023 en materia de salud en el trabajo, donde refiere las principales enfermedades de trabajo registradas se encuentran: dorsopatias, con 2,856; COVID-19, con 2, 545 casos; Hipoacusias, con 1,680; lesiones del hombro, con 1,471 y Síndrome del Túnel del Carpo, con 1, 371.

En México, las enfermedades de trabajo son un problema acuciante que debe ser atendido, las acciones de prevención de riesgos laborales han afectado significativamente la seguridad y salud de las personas trabajadoras por lo que mediante el presente artículo de investigación contribuirá en proporcionar los conocimientos para reconocer cuales son los factores de riesgo ergonómico que favorecen en desarrollar alguna de las principales enfermedades de trabajo en México. La ergonomía ha ido tomando reconocimiento no solo enfocándose en el diseño y adaptación de los entornos de trabajo sino propiciando condiciones de trabajo saludables y seguras. Si bien existe una regulación legal para la prevención de estas enfermedades de trabajo, hasta el momento solo se han elaborado normas oficiales mexicanas considerando únicamente manejo manual de cargas a nivel ergonómico (NOM-036-1-STPS-2018: Factores de riesgo ergonómico en el trabajo-identificación, análisis, prevención y control. Parte 1: Manejo manual de cargas), quedando pendiente la regulación para atender factores de riesgo asociados con movimientos repetitivos y posturas forzadas

Por los datos antes mencionados como principales enfermedades de trabajo, se puede identificar como dorsopatias, enfermedades del hombro y síndrome del túnel del carpo como enfermedades por trastorno musculoesquelético, por lo que se realizan las siguientes preguntas de investigación: ¿Cuáles son las causas que propician desarrollar enfermedades de trabajo relacionadas con trastornos musculoesqueléticos? ¿Se realiza evaluación o actualización de riesgos ergonómicos en las organizaciones? ¿Cuál es la legislación que vigila y procura la salud de los trabajadores para prevenir enfermedades con trastornos musculoesqueléticos? Formadas las preguntas de investigación se plantean los siguientes objetivos: Conocer y aplicar los distintos métodos de evaluación ergonómica para la reducción de enfermedades de trabajo y; contribuir en revisar los distintos puestos de trabajo de las organizaciones para identificar los factores de riesgo ergonómico.

La Ergonomía, es la disciplina que se encarga del diseño de lugares de trabajo, herramientas y tareas, de modo que coincidan con las características fisiológicas, anatómicas, psicológicas y las capacidades de los trabajadores que se verán involucrados.

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

Los métodos de evaluación ergonómica permiten identificar y valorar los factores de riesgo presentes en los puestos de trabajo para, posteriormente, en base a los resultados obtenidos, plantear opciones de rediseño que reduzcan el riesgo y lo sitúen en niveles aceptables de exposición para el trabajador. La exposición al riesgo de un trabajador en un puesto de trabajo depende de la amplitud del riesgo al que se expone, de la frecuencia del riesgo y de su duración. Dicha información es posible obtenerla mediante métodos de evaluación ergonómica, cuya aplicación resulta sencilla, frente a otras técnicas más complejas o que requieren conocimientos más específicos o instrumentos de medida no siempre al alcance de los ergónomos, como por ejemplo la medición del consumo de oxígeno, de la frecuencia cardíaca, de la fuerza soportada por el disco intervertebral L5/S1 (unión lumbosacra), del consumo metabólico, el uso de electromiógrafos (EMG), etc.

DESARROLLO

"Fundamento teórico".

Los trastornos musculoesqueléticos (TME) son lesiones acumulativas y crónicas de los tejidos blandos, músculos, tendones, ligamentos, nervios, las articulaciones y los vasos sanguíneos. El cuerpo tiene límites y puede fallar o desgastarse cuando no se utiliza correctamente. Los TME se definen como lesiones en músculos, tendones, ligamentos, articulaciones, nervios y discos que están causadas o agravadas por nuestras acciones y / o un medio ambiente que no sigue las prácticas de trabajo seguras y saludables [4].

Los TME comprenden más de 150 trastornos que afectan el sistema locomotor, abarcan desde trastornos repentinos y de corta duración como fracturas, esguinces y distenciones, a enfermedades crónicas que causan limitaciones de las capacidades funcionales e incapacidad permanente [5].

De acuerdo con la Organización Mundial de la Salud (OMS), aproximadamente 1,710 millones de personas tienen trastornos musculoesqueléticos en todo el mundo. Entre los trastornos musculoesqueléticos, el dolor lumbar es el más frecuente, con una prevalencia de 568 millones de personas. Los trastornos musculoesqueléticos son la principal causa de discapacidad en todo el mundo, y el dolor lumbar es la causa más frecuente de discapacidad en 160 países.

Estos trastornos limitan enormemente la movilidad y la destreza, lo que provoca jubilaciones anticipadas, menores niveles de bienestar y una menor capacidad de participación social [5].

Los TME son provocados por una mala interacción entre la persona y el trabajo que realiza, ya sea por herramientas inapropiadas, tipo de actividad, ambiente laboral, incluyendo tareas que impliquen manipulación de cargas, movimientos repetitivos, posturas inadecuadas, entre otros. La identificación y control de todos estos factores de riesgo ergonómico es importante para prevenir lesiones y/o enfermedades, así como mejorar la salud y calidad de vida de los trabajadores. En su informe del departamento de salud en el trabajo del IMSS presentado en 2023, se reportan 18,489 enfermedades de trabajo dentro de las cuales 3 de las 5 principales enfermedades están relacionadas con TME.

Tabla 1. Enfermedades de trabajo en México (Fuente: memoria estadística, 2023, IMSS).

Naturaleza de la lesión	2021	2022	2023
Dorsopatias	1,811	2,836	2,856
Covid-19	74,494	63,405	2,545
Hipoacusias	1,874	2,149	1,680
Lesiones del hombro	760	1,223	1,471
Síndrome del túnel Carpiano	732	1,144	1,371

Las dorsopatias son el principal trastorno musculoesquelético, seguido de lesiones del hombro y síndrome del túnel carpiano en cuarto y quinto lugar respectivamente, como enfermedad de trabajo en México.

Los principales factores de riesgo ergonómico que conlleva a desarrollar dichas enfermedades son situaciones laborales que causan desgaste en el cuerpo y pueden causar lesiones, estos pueden ser: aplicación de fuerzas excesivas como manipulación manual de cargas pesadas; posturas forzadas como agacharse frecuentemente puede causar fatiga muscular y dolores; movimientos repetitivos, son más frecuentes de lo que pudiera parecer, se desarrolla en uso de teclados, mouses y herramientas; posturas estáticas, como mantener partes del cuerpo inmóvil por periodos prolongados al usar computadoras puede causar fatiga en cuello , dolor en hombros, espalda y brazos.

Las enfermedades de trabajo relacionadas con TME han incrementado en los últimos 3 años, lo que conlleva a poner atención en prevenir y reducir dichas cifras.

Por los datos anteriores es imprescindible mencionar la pirámide de Kelsen, dicha pirámide representa gráficamente la idea de sistema jurídico escalonado.

El artículo 123 de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos (CPEUM), fracción XIV y XV, refieren con claridad que los empresarios son los responsables de los accidentes del trabajo y de las enfermedades profesionales de los trabajadores, sufridas con motivo o en ejercicio de la profesión o trabajo que ejecuten; por lo tanto, los patronos deberán pagar la

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

indemnización correspondiente, según que haya traído como consecuencia la muerte o simplemente incapacidad temporal o permanente para trabajar, de acuerdo con lo que las leyes determinen. Esta responsabilidad subsistirá aún en el caso de que el patrono contrate el trabajo por un intermediario; El patrón estará obligado a observar, de acuerdo con la naturaleza de su negociación, los preceptos legales sobre higiene y seguridad en las instalaciones de su establecimiento, y adoptar las medidas adecuadas para prevenir accidentes en el uso de las máquinas, instrumentos y materiales de trabajo, así como a organizar de tal manera éste, que resulte la mayor garantía para la salud y la vida de los trabajadores, y del producto de la concepción, cuando se trate de mujeres embarazadas. Las leyes contendrán, al efecto, las sanciones procedentes en cada caso [6].

Figura 1. Pirámide Legislativa en Materia de Seguridad y Salud en el Trabajo en México (Imagen obtenida de STPS).

El artículo 132, fracción XVll, de la Ley Federal de trabajo, refiere a las obligaciones que tiene el patrón en cumplir el reglamento y las normas oficiales mexicanas en materia de seguridad, salud y medio ambiente de trabajo [3].

Por otra parte, el artículo 475 Bis de la Ley Federal de Trabajo, refiere que el patrón es responsable de la seguridad e higiene y de la prevención de los riesgos en el trabajo, conforme a las disposiciones de esta Ley, sus reglamentos y las normas oficiales mexicanas aplicables [3].

Así mismo, en el artículo 513 de la Ley Federal de Trabajo, se muestra la Tabla de Enfermedades de Trabajo, donde se puede ubicar en las enfermedades 101, trastornos de columna vertebral (cervical, dorsal y lumbar), 102, dolor lumbar crónico inespecífico (lumbago mecano postural, contractura dorsal inferior, espondilopatía interespinosa, dolor lumbar y lumbago SAI), 105, síndrome del túnel carpiano (lesión del nervio mediano) y 111, tendinitis del hombro (síndrome del manguito rotatorio) [3].

El Reglamento Federal de Seguridad y Salud en el Trabajo (RFSST), tiene por objeto establecer las disposiciones en materia de Seguridad y Salud en el Trabajo que deberán observarse en los Centros de Trabajo, a efecto de contar con las condiciones que permitan prevenir riesgos y, de esta manera, garantizar a los trabajadores el derecho a desempeñar sus actividades en entornos que aseguren su vida y salud, con base en lo que señala la Ley Federal del Trabajo [7].

En el título noveno de dicho reglamento se establecen las sanciones administrativas por las violaciones a los preceptos del reglamento y de las normas mexicanas.

Es necesario puntualizar cuales son las sanciones administrativas por violación al Reglamento Federal de Seguridad y Salud en el Trabajo en relación con riesgos ergonómicos (ver tabla 2).

Tabla 2. Sanciones administrativas conforme a RFSST (Fuente: RFSST, 2014).

Artículo 42		*Sanción administrativa (UMA)*	
Fracción I	Contar con un análisis de los Factores de Riesgo Ergonómico de los puestos de trabajo	Art. 115	50 a 100
Fracción II	Adoptar medidas preventivas para mitigar los Factores de Riesgo Ergonómico en sus instalaciones, maquinaria, equipo o herramientas del Centro de Trabajo.	Art. 120	250 a 5000
Fracción III	Practicar exámenes médicos al Personal Ocupacionalmente Expuesto.	Art. 119	50 a 3000
Fracción IV	Informar a los trabajadores sobre las posibles alteraciones a la salud por la exposición a los Factores de Riesgo Ergonómico.	Art. 117	250 a 5000
Fracción V	Capacitar al Personal Ocupacionalmente Expuesto sobre las prácticas de trabajo seguras.	Art. 117	250 a 5000
Fracción VI	Llevar los registros sobre las medidas preventivas adoptadas y los exámenes médicos practicados	Art. 118	50 a 2000

Para reducir las enfermedades de trabajo relacionadas con TME tenemos que conocer el proceso de gestión de riesgos ergonómicos; esta gestión de riesgos se enfatiza en 2 grandes etapas (evaluar riesgos y controlar riesgos) mostradas en figura 2.

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

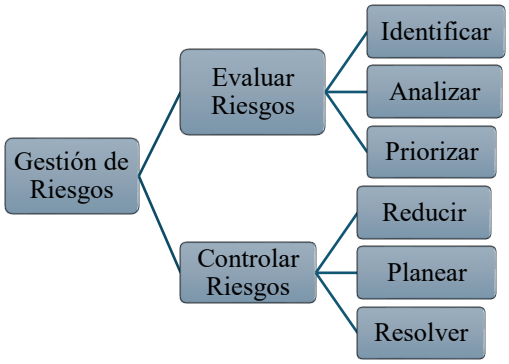


Figura 2. Gestión de riesgos. Fuente: elaboración propia.

La primera etapa se enfoca en analizar la actividad por medio de la identificación de los peligros para priorizar acciones correctivas a implementar, la segunda etapa se enfoca en planear las acciones correctivas para resolver el problema detectado, esto es saber controlar los riesgos.

Un sistema de gestión está basado en normas internacionales que permiten controlar distintas facetas en una empresa, como la calidad de su producto o servicio, los impactos ambientales que pueda ocasionar, la seguridad y salud de los trabajadores, la responsabilidad social o la innovación, entre otros.

La ISO-45001:2018, Sistemas de gestión de la seguridad y salud en el trabajo; establece como objetivo prevenir lesiones y deterioro de la salud relacionados con el trabajo a los trabajadores y proporcionar lugares de trabajo seguros y saludables [8]. Para ello utiliza el enfoque conocido como Planificar-Hacer-Verificar-Actuar (PHVA):

- Planificar: establecer los objetivos y requisitos necesarios para conseguir resultados de acuerdo con la política de gestión del riesgo de la organización.
- Hacer: implementar los requisitos.
- Verificar: realizar el seguimiento y la medición de los requisitos respecto a la política de gestión del riesgo, los objetivos, las metas y los requisitos legales, reglamentarios y otros requisitos, e informar sobre los resultados.
- Actuar: llevar a cabo acciones para mejorar continuamente el desempeño del sistema de gestión del riesgo.

Como parte de las responsabilidades de las organizaciones en materia del marco legal en cuanto a la gestión de la Seguridad y Salud en el trabajo, existen requisitos obligatorios que regulan la gestión laboral, así como la gestión de riesgos específicos, a través de las Normas Oficiales Mexicanas.

Por otra parte, también existe normatividad que es considerada como voluntaria (no obligatoria), la cual nos orienta sobre la gestión del riesgo considerándolo como un sistema de gestión, tal es el caso de las normas:

- ISO 31000 Risk Management – Guidelines (Gestión de Riesgos – Directrices). Este documento proporciona directrices para gestionar el riesgo al que se enfrentan las organizaciones.

La aplicación de estas directrices puede adaptarse a cualquier organización y a su contexto. Considerando un enfoque común para gestionar cualquier tipo de riesgo y no es específico de una industria o un sector. El documento puede utilizarse a lo largo de la vida de la organización y no solo para las maduras y estructuradas, sino también las organizaciones jóvenes e incluso las nuevas organizaciones precisan de una adecuada gestión del riesgo.

- ISO 31010 Risk Management – Risk Assessment techniques (Gestión de Riesgos – Técnicas de Análisis de Riesgos). Esta Norma Internacional proporciona orientación sobre la selección y aplicación de las técnicas para evaluar el riesgo en una amplia gama de situaciones. Las técnicas se utilizan para ayudar en la toma de decisiones donde hay incertidumbre, para proporcionar información sobre riesgos particulares y como parte de un proceso de gestión de riesgos. El documento proporciona resúmenes de una variedad de técnicas, con referencias a otros documentos donde las técnicas se describen con más detalle.

La evaluación de riesgos es un proceso dirigido a estimar la magnitud de aquellos riesgos que existen en la organización obteniendo la información necesaria para la toma de decisiones apropiadas y la adopción de medidas preventivas. Actualmente se reconoce que la evaluación de riesgos es la base para una gestión activa de la seguridad y salud en el trabajo. Por lo que es de vital importancia que las organizaciones tengan la capacidad de identificar los requisitos aplicables al giro correspondiente, enfatizando la gestión de riesgos para sus procesos.

La evaluación del riesgo es el proceso global en el cual incluye de identificación del riesgo, es decir, la identificación del peligro, el análisis del riesgo y valoración del riesgo. La evaluación del riesgo se debería llevar a cabo de manera sistemática, iterativa y colaborativa, basándose en el conocimiento y los puntos de vista de las partes interesadas.
El propósito de la identificación del riesgo es encontrar, reconocer y describir los riesgos que pueden ayudar o impedir a una organización lograr sus objetivos.

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

Para la identificación de los riesgos es importante contar con información pertinente, apropiada y actualizada.

La organización puede utilizar un rango de técnicas para identificar incertidumbres que pueden afectar a uno o varios objetivos. El propósito del análisis del riesgo es comprender la naturaleza del riesgo y sus características incluyendo, cuando sea apropiado, el nivel de riesgo.

El análisis del riesgo implica una consideración detallada de las incertidumbres, fuentes de riesgo, consecuencias, probabilidades, eventos, escenarios, controles y su eficacia. Un evento puede tener múltiples causas y consecuencias y puede afectar a múltiples objetivos.

El análisis del riesgo se puede realizar con diferentes grados de detalle y complejidad, dependiendo del propósito del análisis, la disponibilidad y la confiabilidad de la información y los recursos disponibles. Las técnicas de análisis pueden ser cualitativas, cuantitativas o una combinación de éstas, dependiendo de las circunstancias y del uso previsto.

El propósito de la valoración del riesgo es apoyar a la toma de decisiones. La valoración del riesgo implica comparar los resultados del análisis del riesgo con los criterios del riesgo establecido para determinar cuándo se requiere una acción adicional. Esto puede conducir a una decisión de:

- No hacer nada más.
- Considerar opciones para el tratamiento del riesgo.
- Realizar un análisis adicional para comprender mejor el riesgo.
- Mantener los controles existentes.
- Reconsiderar los objetivos.

Existen distintas formas de llevar a cabo una evaluación de riesgos, muchas de ellas están contenidas en normativas específicas; además de existir distintas metodologías o técnicas cualitativas y cuantitativas, que están diseñadas y validadas para ser la más idónea según lo que se vaya a evaluar. Estas técnicas de análisis de riesgos son indicadores de riesgos, más nunca la representación exacta del riesgo.

La selección del método de evaluación de riesgos ergonómicos consiste en identificar cuál de ellos considera aquellos factores de riesgo (movimientos repetitivos, levantamientos de carga, mantenimiento de posturas forzadas, posturas estáticas, exigencia mental, monotonía, vibraciones, condiciones ambientales, etc.) que influyen e incrementan la probabilidad de desarrollar un TME.
No hay que confundir, las evaluaciones ergonómicas no evalúan el conjunto de movimientos repetidos, posturas forzadas, levantamientos de cargas, etc., que se realizan en el puesto de trabajo durante la jornada laboral; sino que evalúan tareas concretas, ciclos de trabajo e incluso operaciones simples.

Un método de evaluación ergonómico debe considerar: la intensidad del esfuerzo al que se expone, de la frecuencia del riesgo y duración de la exposición, con el fin de valorar adecuadamente la exposición y la probabilidad de que se produzca el TME.

De acuerdo con la Universidad Politécnica de Valencia, España; algunos de los métodos de evaluación de riesgo ergonómico se muestran clasificados en la siguiente figura 3 [9].

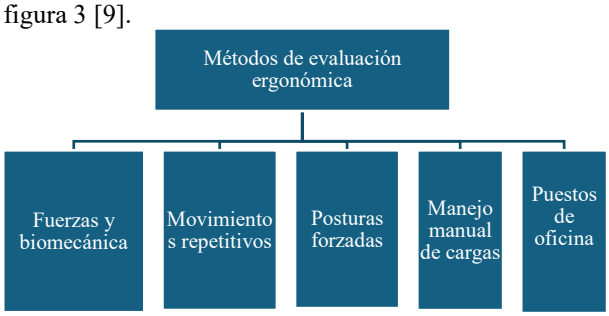


Figura 3. Métodos de evaluación ergonómico.

FUERZAS Y BIOMECÁNICA

Fuerzas aplicadas- EN1005-3: Evalúa el riesgo derivado de ejercer fuerzas basándose en la capacidad de los trabajadores siguiendo el procedimiento de cálculo en la norma EN1005-3

Análisis biomecánico: Realiza evaluaciones biomecánicas de esfuerzos estáticos coplanares a partir de la postura adoptada, la carga y la frecuencia y duración de los esfuerzos. Permite conocer el riesgo de sobre carga por articulación, la carga máxima recomendable y la estabilidad de la postura

MOVIMIENTOS REPETITIVOS

Método OCRA (Occupational Repetitive Action): Permite la evaluación rápida del riesgo asociado a movimientos repetitivos de los miembros superiores.

Método JSI (Job Strain Index): Evalúa los riesgos relacionados con las extremidades superiores. A partir de datos semi-cuantitativos ofrece un resultado numérico que crece con el riesgo asociado a la tarea.

POSTURAS FORZADAS

Método RULA: Permite evaluar la exposición de los trabajadores a riesgos debidos al mantenimiento de posturas inadecuadas que pueden ocasionar trastornos en los miembros superiores del cuerpo.

Método REBA (Rapid Entire Body Assessment): Evalúa la exposición de los trabajadores a factores de riesgo que

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

pueden ocasionar desordenes traumáticos acumulativos debido a la carga postural dinámica y estática.

Método OWAS: Es un método sencillo destinado al análisis ergonómico de la carga postural. Basa sus resultados en la observación de las diferentes posturas adoptadas por el trabajador.

Método EPR: Permite valorar, de manera global, la carga postural del trabajador a lo largo de la jornada. El método esta pensado como un examen preliminar que indique la necesidad de un examen más exhaustivo.

MANEJO MANUAL DE CARGAS

Ecuación de NIOSH: Permite identificar riesgos relacionados con las tareas en las que se realizan levantamientos manuales de carga, íntimamente relacionadas con las lesiones lumbares.

Método GINSHT: Evalúa riesgos relativos a la manipulación manual de cargas desarrollado por el Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo en España.

Método de Snook y Cirello: Permiten determinar los pesos máximos aceptables para diferentes acciones como el levantamiento, el descenso, el empuje, el arrastre y el transporte de cargas.

PUESTOS DE OFICINA

Método ROSA (Rapid Office Strain Assessment): Es una lista de comprobación que permite cuantificar el riesgo ergonómico asociado a puestos de oficina o con uso de pantallas de visualización de datos.

Conocida la valoración del riesgo desarrollando los métodos anteriores, se deben implementar los planes de tratamiento del riesgo cuyo propósito es especificar la manera en la que se implementarán las opciones elegidas para abordar el riesgo.

Es importante considerar, especificar y adherir una jerarquía de métodos de control de riesgos al identificar una medida de prevención o protección, o combinación de medidas, para reducir el riesgo asociado con un peligro (ver figura 4).

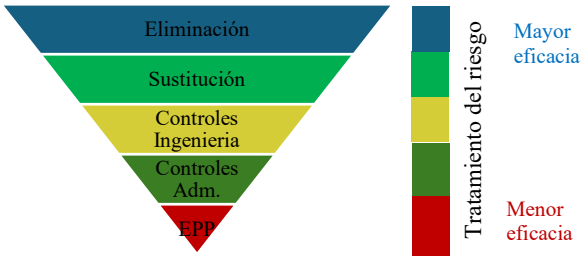


Figura 4. Tratamiento del riesgo.

DISCUSIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

El Instituto Mexicano del Seguro Social, a través del programa Entornos Laborales Seguros y Saludables (ELSSA), apoya a las empresas y centros de trabajo para reducir los riesgos para la salud mediante prácticas laborales seguras, entornos de trabajo saludables y una organización de trabajo responsable. ELSSA, está conformado por 10 líneas de acción:

- Prevención de accidentes de trabajo en mano y tobillo.
- Prevención de trastornos musculoesqueléticos en espalda.
- Vigilancia de la salud en el trabajo.
- Prevención de enfermedades de trabajo relacionadas con factores de riesgo psicosociales en el trabajo.
- Promoción de la salud y el bienestar en los centros de trabajo.
- Vinculación con centros de seguridad social: cultura, deporte, prevención de adicciones.
- Fortalecimiento y evaluación de la prescripción social.
- Acciones de protección, prevención y promoción de la salud y bienestar para las mujeres trabajadoras.
- Capacitación masiva a través de la plataforma CLIMSS.
- Aprovechamiento de tecnología, e-ELSSA e inter-operabilidad de sistemas internos del IMSS

El programa ELSSA tiene como principales objetivos: mejorar la salud y el bienestar de las personas trabajadoras, prevenir la exposición a factores de riesgos psicosociales y ergonómicos en el trabajo, así como disminuir la incidencia de enfermedades crónico-degenerativas y riesgos de trabajo; contribuir a una mejor calidad de vida de las personas trabajadoras, lo que puede impactar en disminuir el ausentismo e incrementar la productividad, considerando que el mayor activo de las empresas son sus personas trabajadoras [10].

Algunas organizaciones en México no cuentan con personal especializado en materia de Seguridad y Salud en el Trabajo, mediante el programa ELSSA, el IMSS ofrece una plataforma digital para incorporar a las empresas a la red de empresas ELSSA.

Si bien, los TME están dentro de las 5 principales enfermedades laborales, en México existen metodologías que ayudan a identificar los riesgos asociados a dichas enfermedades.

En 2019, el IMSS registró 1,342 casos por trastornos musculoesqueléticos en espalda, generando más de 50 mil días de Incapacidad Temporal para el Trabajo (ITT)

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

que en total corresponden a 737 millones de pesos aproximadamente, considerando el costo promedio de ITT en 2019 [10].

CONCLUSIONES

Las enfermedades de trabajo relacionadas con Trastornos musculoesqueléticos, sin duda, son un riesgo a la salud con consecuencias a corto y largo plazo que se originan por realizar trabajos pesados, monótonos, repetitivos, por realizar movimientos bruscos, elevados ritmos de trabajo y una mala organización de trabajo. Existen leyes que buscan proteger la salud ocupacional e incluyen regulaciones sobre prevención de riesgos laborales, hoy en día la ergonomía y los distintos métodos de evaluación de riesgos son una herramienta a nuestro alcance que nos permite disminuir el índice de riesgos de trabajo y prevenir enfermedades laborales, así mismo ayuda a diseñar espacios de trabajo y procesos eficientes, eliminando obstáculos y reduciendo la fatiga y el estrés laboral. Aplicando la gestión de riesgos ergonómicos previene bajas por enfermedad y ausentismo al mejorar el bienestar de los empleados y reducir lesiones y enfermedades de trabajo.

Aunado al conocimiento de los distintos métodos de evaluación de riesgos ergonómicos, es necesario continuar la implementación de normatividad mexicana para reducir la tendencia creciente de las enfermedades de trabajo de carácter musculoesquelético, ya que los costos de los accidentes y enfermedades de trabajo no solo repercuten en el trabajador (dolor físico y mental, disminución para la capacidad para el trabajo, afectación a la familia, gastos adicionales), también repercuten costos para las empresas y costos sociales (aumento de la prima de seguro de riesgos de trabajo, perdida de recurso humano, , sanciones o multas, baja productividad por contratación de personal nuevo, gasto de prestaciones económicas como atención hospitalaria).

AGRADECIMIENTOS

Agradezco al TecNM/Instituto Tecnológico de Zacatepec, por brindar el espacio para publicar el artículo en el libro electrónico del CONGRESO INTERNACIONAL EN TECNOLOGÍA, INNOVACIÓN y DOCENCIA 2025.

BIBLIOGRAFÍA

[1] Flores, J. G. (Septiembre de 2017). Marco jurídico aplicable a la ergonomía laboral en México. Obtenido de file:///C:/Users/huawei/AppData/Local/Temp/MicrosoftEdgeDownloads/204b2553-b582-49bc-9ee5-740e0915323c/Dialnet-MarcoJuridicoAplicableALaErgonomiaLaboralEnMexico-6622358.pdf

[2] ATACAMA, U. d. (15 de Enero de 2025). Historia de la Ergonomía: Una disciplina científica en evolución. Obtenido de https://salud.uda.cl/ergonomia/historia-de-la-ergonomia/

[3] LFT. (24 de DICIEMBRE de 2024). CÁMARA DE DIPUTADOS DEL H. CONGRESO DE LA UNIÓN. Obtenido de https://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/LFT.pdf

[4] OSHA. (2018). Libro de ejercicios para identificar y abordar peligros ergonómicos. Obtenido de https://www.osha.gov/sites/default/files/2018-12/fy15_sh-27643-sh5_LibrodeejerciciousdeErgonomia.pdf

[5] OMS. (8 de Febrero de 2021). Trastornos musculoesqueléticos, datos y cifras. Obtenido de https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/musculoskeletal-conditions

[6] UNIÓN, C. D. (17 de Enero de 2025). CONSTITUCIÓN POLÍTICA DE LOS ESTADOS UNIDOS MEXICANOS. Obtenido de https://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/CPEUM.pdf

[7] STPS. (13 de Noviembre de 2014). Reglamento Federal de Seguridad y Salud en el Trabajo. Obtenido de Reglamento_Federal_de_Seguridad_y_Salud_en_el_Trabajo

[8] ISO. (2018). ISO-45001:2018, Sistemas de gestión de la seguridad y salud en el trabajo — Requisitos con orientación para su uso. Obtenido de https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:45001:ed-1:v1:es

[9] Valencia, U. P. (2025). Ergonautas. Obtenido de Métodos de evaluación de la ergonomía de puestos de trabajo: https://www.ergonautas.upv.es/metodos-evaluacion-ergonomica.html

[10] IMSS. (2025). ELSSA. Obtenido de https://www.imss.gob.mx/sites/all/statics/elssa/docs/infog-ConocerMas.pdf

AUTORIZACIÓN Y RENUNCIA.

Los autores del presente artículo autorizan al TecNM/Instituto Tecnológico de Zacatepec para publicar el escrito en el libro electrónico del CITID 2025. El TecNM/ITZ o los editores no son responsables ni por el contenido ni por las implicaciones de lo que está expresado en el escrito.

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

ANÁLISIS DE EXTRACCIÓN DE ENERGÍA DE UN SISTEMA FOTOVOLTAICO UTILIZANDO UN ALGORITMO DE OPTIMIZACIÓN

A.U. Córdova Ávila [1], E. Hernandez Pardiñas [2], M. Cervantes Bobadilla[3], J. García Morales[4], E.J. Moreno Carpintero[5]

[1,3,4] Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, e-mail: m24ce119@cenidet.tecnm.mx , Tel: 777 362 7770, ext:414, Cuernavaca, Morelos, México;
[2,5] Tecnológico Nacional de México/I.T. Zacatepec, Departamento de MetalMecánica, e-mail: L19090845@zacatepec.tecnm.mx, Tel. 7343432111, Zacatepec Morelos, México, C.P. 62780

Resumen – El crecimiento constante de la demanda energética requiere el uso de técnicas de optimización para maximizar la extracción de energía en sistemas fotovoltaicos. En este trabajo, se implementa el Algoritmo de Optimización por Enjambre de Partículas (PSO) para el seguimiento del punto de máxima potencia (MPPT) en un panel fotovoltaico empleando un convertidor BOOST que permite ajustar el voltaje de salida y mejorar la eficiencia del sistema. A través de simulaciones en Matlab/Simulink, se evalúa el desempeño del sistema bajo condiciones ambientales variables y no lineales, demostrando la efectividad del enfoque basado en PSO para mejorar la extracción de energía.
Palabras Clave: Algoritmo MPPT, convertidor Boost, Optimización por Enjambre de Partículas, Sistema FV

Abstract – The constant growth in energy demand requires the use of optimization techniques to maximize energy extraction in photovoltaic systems. In this work, the Particle Swarm Optimization (PSO) Algorithm is implemented for Maximum Power Point Tracking (MPPT) in a photovoltaic panel, using a BOOST converter to adjust the output voltage and improve system efficiency. Through simulations in Matlab/Simulink, the system's performance is evaluated under variable and nonlinear environmental conditions, demonstrating the effectiveness of the PSO-based approach in enhancing energy extraction.
Key words – MPPT *Algorithm, Boost Converter, Particle Swarm Optimization, Perturb and Observe, PV System*

INTRODUCCIÓN

El aumento constante en la demanda energética a nivel global ha impulsado el desarrollo de tecnologías basadas en fuentes renovables, destacando la energía solar fotovoltaica debido a su disponibilidad y viabilidad a largo plazo. De acuerdo con el Renewables 2024 Global Status Report, el consumo total de energía en el mundo experimentó un crecimiento del 5 % en 2022, alcanzando los 399 exajulios (EJ), de los cuales solo el 13 % provino de fuentes renovables [1]. Este panorama resalta la importancia de mejorar los métodos de aprovechamiento de la energía en sistemas fotovoltaicos para atender las crecientes necesidades energéticas.

El rendimiento de un sistema fotovoltaico depende de diversos factores, entre ellos la calidad de los materiales utilizados en los paneles, la tecnología implementada y las condiciones ambientales. Investigaciones previas, como la realizada por Cepeda [2], señalan que parámetros como la temperatura, la intensidad de la radiación solar y el ángulo de incidencia pueden afectar de manera significativa la eficiencia de conversión energética de los paneles fotovoltaicos.

Para mejorar la captación de energía en condiciones variables, se han desarrollado distintas estrategias de seguimiento del punto de máxima potencia (Maximum Power Point Tracking, MPPT). Entre los métodos más utilizados se encuentra el algoritmo de Perturbación y Observación (P&O), debido a su facilidad de implementación y resultados satisfactorios [3]. No obstante, este enfoque presenta ciertas limitaciones cuando se enfrenta a cambios abruptos en las condiciones ambientales, como variaciones en la radiación solar o la presencia de sombreados parciales, lo que puede hacer que el controlador MPPT opere en picos de potencia locales en lugar de alcanzar el punto de máxima potencia global.

Para superar estas limitaciones, se han explorado técnicas de optimización más avanzadas, como los algoritmos metaheurísticos, que han demostrado una mejor adaptabilidad y precisión en entornos con alta variabilidad [4]. En particular, el Algoritmo de Optimización por Enjambre de Partículas (PSO) ha mostrado ventajas significativas en la estimación de parámetros y en la mejora de la eficiencia energética en comparación con métodos deterministas.

En este estudio, se lleva a cabo una simulación de un panel fotovoltaico utilizando el algoritmo PSO como técnica de MPPT, con el objetivo de evaluar su capacidad para optimizar la extracción de energía.

DESARROLLO

Sistema fotovoltaico

El efecto fotovoltaico (EF) es el fenómeno físico que permite la conversión de energía en las celdas fotovoltaicas. Este proceso ocurre cuando la radiación electromagnética impacta un material semiconductor en dos regiones distintas, generando una diferencia de potencial que da lugar a un voltaje utilizable. Cabe destacar que, para que el

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

efecto fotovoltaico tenga lugar, es indispensable la presencia del efecto fotoeléctrico, el cual se refiere a la emisión de electrones por parte de un material cuando es irradiado con luz. [5].

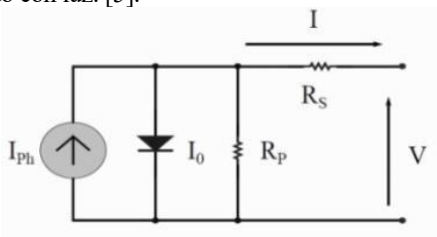


Figura 1. Modelo de un solo diodo de una celda solar [6]

La corriente de salida de la celda fotovoltaica en el modelo de un solo diodo, como se muestra en la Figura 1, se calcula mediante la Ec.(1):

$$I = I_{ph} - I_0\left[\exp\left(\frac{V+R_sI}{V_ta}\right) - 1\right] - \frac{V+R_sI}{R_p} \qquad Ec.\ (1)$$

Donde: I_{ph} es la corriente generada por la luz incidente, R_s y R_p son las resistencias serie y paralelo de la celda, V es la tensión, I_0 es la corriente de saturación y es la tensión térmica siendo k la constante Botlzman q la carga de un electrón [7].

Debido a que la potencia de una celda es pequeña es necesario trabajar en conjunto con un grupo de ellas, de esa manera proporcionar la potencia necesaria para el sistema fotovoltaico, estas conexiones se les conocen como panel solar o modulo fotovoltaico [8].

Un sistema fotovoltaico cuenta con diferentes componentes dependiendo su aplicación, algunos de ellos son inversores de corriente continua a corriente alterna, acumuladores, transformadores, etc. [9]

Para evaluar el desempeño de un panel solar, es fundamental considerar tres aspectos clave:

• Puntos característicos sobre la curva I-V los cuales son: Corriente de corto circuito (I_{SC}).
• voltaje de circuito abierto (V_{OC}) y el Punto de máxima potencia (PMP)[10].
• Ubicar los puntos característicos sobre la curva P-V: La potencia es el resultado del producto de la corriente y el voltaje; el V_{pmp} debe coincidir con el punto PMP en la curva como se muestra en la Figura 2.

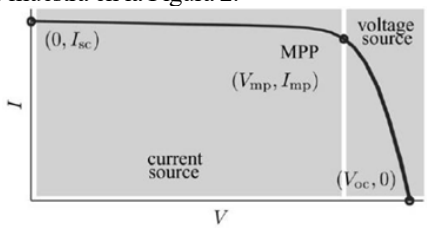


Figura 2. Curva I-V de un módulo PV y los tres puntos característicos [11]

Con los datos obtenidos en los pasos anteriores se puede calcular el Factor de Forma (FF) utilizando la Ec. (2), este representa la relación entre las áreas formadas por el rectángulo de los puntos (V_{pmp}, I_{pmp}) y (V_{OC}, I_{SC}),).

$$FF = \frac{V_{PMP}I_{PMP}}{V_{OC}I_{SC}} \qquad Ec.(2)$$

Utilizando la Ec. (3) se determina la eficiencia de un panel solar que compara la energía extraída con respecto a la cantidad de irradiación recibida. [10]

$$\eta = \frac{V_{PMP}\ I_{PMP}}{S\ A_C} \qquad Ec.(3)$$

Donde A_c es el área superficial del panel o la celda en m^2 y S la irradiancia en W/m^2.

Técnicas de seguimiento del punto de máxima potencia

La conversión de la energía solar a eléctrica se ve afectada por diferentes factores como la cantidad de radiación, temperatura, hora del día, nubosidad, entre otros factores por lo cual los resultados son no lineales lo que conlleva a variar la cantidad de potencia obtenida puntualmente en un momento del día y a una disminución de la eficiencia del panel solar.

Por ello se implementan diferentes técnicas para hacer frente a los desafíos, muestra de ello es el uso de diodos de derivación (bypass) colocados en cadenas con lo que se pretende hacer frente a la creación de puntos calientes en situación de sombreado [12]

Un elemento de gran utilidad en los sistemas fotovoltaicos es el seguimiento del punto de máxima potencia (MPPT), debido a su importancia se estudia y explora la implementación de algoritmos con el fin de extraer la máxima energía a partir de controles ya sean directos o indirectos. [13]

Los algoritmos MPPT actúan monitoreando continuamente el voltaje y corriente, para ajustar la resistencia del sistema de carga con el fin de mantener el panel en su PMP.

Existen diferentes algoritmos para determinar el punto de máxima potencia en sistemas fotovoltaicos [14], entre los que destacan:

- *Algoritmos convencionales "online"*. Estos métodos monitorean continuamente la tensión y la corriente del sistema, ajustando dinámicamente el convertidor de corriente continua para optimizar el rendimiento. Un ejemplo es el método de Perturbar y Observar (P&O).
- *Algoritmos convencionales "offline":* No requieren mediciones en tiempo real, ya que operan con parámetros previamente establecidos de los paneles confiables del fabricante, aunque su precisión disminuye ante cambios en las condiciones

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

ambientales.

- *Algoritmos metaheurísticos*: Inspirados en fenómenos naturales, presentan mayor capacidad de adaptación a condiciones dinámicas, como el sombreado parcial y la variabilidad en la irradiación solar. Un ejemplo es el Algoritmo de Optimización por Enjambre de Partículas (PSO).
- *Algoritmos de optimización híbrida:* Combinan distintos enfoques para mejorar la eficiencia en la búsqueda del punto de máxima potencia. Son especialmente útiles en escenarios complejos donde un solo método resulta insuficiente para lograr una optimización efectiva. [15]

En este trabajo se implementará el Algoritmo de Optimización por Enjambre de Partículas (PSO) para la extracción de máxima potencia en un panel solar.

Algoritmo "Enjambre de Partículas"

Los MPPT convencionales pueden presentar mayor simplicidad en su implementación sin embargo al enfrentar condiciones reales no lineales se reduce la eficiencia de extracción de energía.

El Algoritmo de Optimización por Enjambre de Partículas (PSO), desarrollado por Kennedy [16], se inspira en el comportamiento colectivo de las bandadas de aves. Como método evolutivo, utiliza un conjunto de partículas, donde cada una representa una posible solución al problema, explorando el espacio de búsqueda mediante la colaboración e intercambio de información entre ellas.

El algoritmo se basa en la interacción entre las partículas dentro de la población para mejorar sus posiciones y encontrar la mejor solución posible, cada partícula ajusta su posición en función de su experiencia individual (P_{best}) y de la mejor solución encontrada en la población (G_{best}) [17].

Cada partícula persigue dos puntos fundamentales:

- Seguir la partícula con mejor rendimiento dentro del enjambre.
- Determinar las mejores condiciones obtenidas por la propia partícula.

El algoritmo se caracteriza por las siguientes ecuaciones:

$$\theta_i^{k+1} = w\theta_i^k + c_1 r_1 [P_{best} - X_i^k] + c_2 r_2 [G_{best} - X_i^k] \quad \text{Ec. (4)}$$

$$X_i^{k+1} = X_i^k + \theta_i^{k+1} \quad \text{Ec. (5)}$$

Dónde:

- X_i^{k+1} es la posición de la partícula i.
- θ_i^k representa su velocidad.
- k es el número de iteración.
- w es el factor de inercia.
- $r_1 y\ r_2$ son valores aleatorios entre [0,1].
- $c_1 y\ c_2$ son los coeficientes cognitivo y social, respectivamente.
- P_{best} almacena la mejor posición encontrada por la partícula.
- G_{best} es la mejor posición encontrada por todo el enjambre [18].

La Figura 3 muestra un diagrama de flujo del Algoritmo de Optimización por Enjambre de Partículas (PSO). El proceso comienza con la inicialización del algoritmo, donde se definen los valores iniciales de las partículas. Luego, el algoritmo evalúa la aptitud de cada partícula, determinando qué tan buena es su solución.

A continuación, se comparan los valores obtenidos con los mejores registros previos. Si una partícula encuentra un valor de aptitud superior a su mejor solución anterior, se actualiza su mejor valor individual (P_{best}). Luego, si este nuevo valor es mejor que cualquier otro encontrado por el grupo, se actualiza el mejor valor global (G_{best}).

Una vez evaluadas todas las partículas, se actualizan la velocidad y posición con base en las ecuaciones del modelo. Finalmente, se verifican los criterios de convergencia; si se cumplen, el proceso finaliza, de lo contrario, se repite hasta alcanzar una solución óptima.

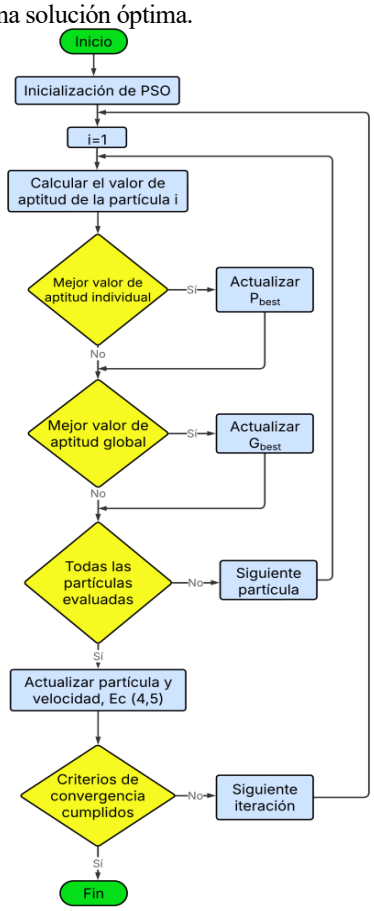


Figura 3. Diagrama del algoritmo PSO (Creación propia)

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

Convertidor tipo Boost

Los sistemas fotovoltaicos emplean convertidores de voltaje cuya configuración varía según el tipo de conversión requerida, pudiendo ser CA-CD, CA-CA o CD-CA. Para el seguimiento del punto de máxima potencia (MPPT), se utiliza comúnmente un convertidor CD-CD, el cual permite regular la tensión de salida según los parámetros del sistema, ya sea incrementándola o reduciéndola según sea necesario.

Para incrementar el voltaje se utiliza mayormente el convertidor tipo Boost, mientras que para disminuirlo se suele utilizar el tipo Buck, no obstante, existen otras variantes como pueden ser el Buck-Boost, Cuk, Sepic y Zeta. El uso principal de los convertidores es optimizar la potencia extraída de los sistemas fotovoltaicos y lograr llegar al máximo punto de potencia.

Los algoritmos MPPT están diseñados para ajustar la impedancia de entrada del convertidor con el objetivo de optimizar la extracción de energía del panel solar. Para lograrlo, es fundamental establecer una configuración adecuada entre el ciclo de trabajo y la impedancia de carga. Por ello, la selección del convertidor debe realizarse con especial atención a sus límites operativos, garantizando un rendimiento óptimo del sistema [19].

El convertidor Boost, representado en la Figura 4, es una de las opciones más utilizadas en la implementación de algoritmos MPPT debido a su capacidad para aumentar la tensión de salida en sistemas fotovoltaicos. Su diseño se basa en el uso de un inductor (L), un interruptor de control (generalmente un MOSFET), un diodo ($D1$), un capacitor (C) y una carga resistiva (R). Sin embargo, para garantizar su correcto funcionamiento, es crucial una configuración adecuada de los parámetros del sistema, incluyendo la frecuencia de conmutación, el ciclo de trabajo y la impedancia de carga.

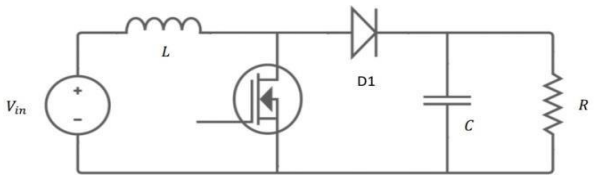


Figura 4. Modelo de un convertidor Boost [19]

En el presente trabajo se utiliza el convertidor tipo Boost gracias que permite elevar la tensión de salida, junto con su capacidad para regular la impedancia de entrada, siendo esta característica de gran importancia al optimizar el proceso de extracción de la energía del panel solar.

Simulación

Para comparar la eficacia en la extracción de la energía de un sistema fotovoltaico haciendo uso de un algoritmo MPPT se realizó una simulación utilizando el software Simulink de MATLAB R2021a.

Las características del panel solar empleado para la simulación se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Datos del panel solar configurados en Simulink MATLAB

Parámetro	Valor
Potencia máxima en STC (Pmax)	330W
Eficacia del módulo	17.01%
Voltaje de máxima potencia (V_{mp})	37.87 V
Corriente de máxima potencia (I_{mp})	8.71 A
Voltaje de circuito abierto (V_{oc})	46.79 V
Corriente de cortocircuito (I_{sc})	9.18ª
Coeficiente de temperatura de P_{max}	-0.396 %/ °C
Coeficiente de temperatura de Voc	-0.31 %/ °C
Coeficiente de temperatura de Isc (KI)	+ 0.06 %/ °C
Cantidad de células en serie (Ns)	72
Cantidad de células en paralelo (Np)	1
Condiciones Estándar de Prueba (STC)	1000 W/m^2, 25°C

Estados del convertidor Boost

A continuación, se describen los dos estados principales de funcionamiento del convertidor Boost, los cuales permiten que se logre la conversión de energía y la regulación del voltaje de salida.

La Figura 5 se muestra el convertidor en estado 0 (cerrado). La corriente fluye de la fuente de entrada a través del inductor L y el interruptor, el inductor trabaja

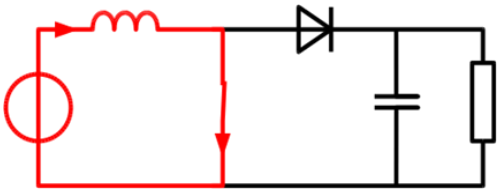


Figura 5. Estado del interruptor 0.

Las ecuaciones (6) y (7) se utilizan para describir el comportamiento de la corriente a través del inductor y el voltaje en el capacitor, respectivamente, en el estado 0 del convertidor Boost.

$$\frac{d_i\, L(t)}{d_i} = \frac{v_i}{L} \qquad \text{Ec. (6)}$$

$$\frac{d_{vc}\,(t)}{d_t} = -\frac{v_c\,(t)}{R} \qquad \text{Ec. (7)}$$

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

La Figura 6 representa el convertidor Boost en su Estado 1 (interruptor abierto). En esta fase, al abrirse el interruptor, la corriente almacenada en el inductor se libera, invirtiendo la polaridad de su voltaje y facilitando el paso de corriente a través del diodo. Como resultado, el voltaje de entrada V_i y el voltaje inducido en el inductor V_L se combinan, suministrando un nivel de tensión mayor a la carga. Durante este estado, el diodo conduce, permitiendo el flujo de corriente hacia la carga y el capacitor. En este proceso, el capacitor se carga, asegurando un suministro continuo de energía a la carga cuando el convertidor cambie nuevamente al Estado 0 (interruptor cerrado).

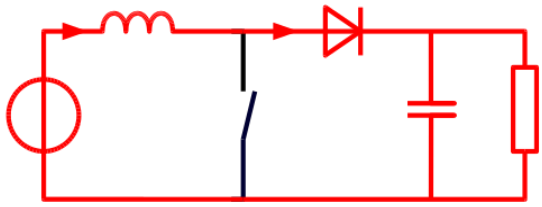


Figura 6. Estado del interruptor 1.

Las ecuaciones (8), (9) y (10) se utilizan para describir el comportamiento del convertidor Boost en el estado 1, cuando el interruptor está abierto.

$$\frac{d_i\, L(t)}{d_i} = \frac{v_i - v_C}{L} \qquad \text{Ec. (8)}$$

$$i_r = \frac{v_c}{R} \qquad \text{Ec. (9)}$$

$$\frac{d_i\, L(t)}{d_i} = \frac{i_L}{C} - \frac{v_c}{RC} \qquad \text{Ec. (10)}$$

Expresiones del punto de operación

En el siguiente apartado se presentan las ecuaciones (11) y (12) que definen el punto de operación del convertidor Boost en estado estable.

$$v_c = \frac{v_i}{1-D} \qquad \text{Ec. (11)}$$

$$I_L = \frac{v_C}{R\,(1-D)} \qquad \text{Ec. (12)}$$

La operación se encuentra en estado estable del convertidor, el ciclo de trabajo entre 0 y 1 nos muestra que la operación será efectivamente elevar.

Balance de carga para la corriente en el capacitor

En estado estacionario, el promedio de la corriente en el capacitor debe ser igual a 0 para que el voltaje de salida se mantenga constante. La ecuación (13) define la corriente de la carga:

$$\frac{v_c}{R} = I_L(1-D) \qquad \text{Ec. (13)}$$

Rizos

En el siguiente apartado se muestran las ecuaciones que definen los rizos con los que el convertidor Boost trabajará. La ecuación (14) define el rizo de la corriente en el inductor, la ecuación (15) define el rizo en el voltaje del capacitor y la ecuación (16) define un porcentaje de rizo entre 0 y 1.

$$2\Delta I_L = \frac{V_i}{L} DTs \qquad \text{Ec. (14)}$$

$$2\Delta V_C = \left(\frac{I_L}{C} - \frac{V_c}{RC}\right)(1-D)\,Ts \qquad \text{Ec. (15)}$$

$$\alpha_C\, V_c = \frac{I_L - \frac{V_c}{R}}{C}(1-D)\,Ts \qquad \text{Ec. (16)}$$

Sustituimos las ecuaciones del punto de operación, se sustituyen las ecuaciones (11) y (12) para obtener las ecuaciones (17) y (18).

$$L = \frac{R(1-D)^2}{\alpha_L}\,Ts \qquad \text{Ec. (17)}$$

$$C = D\,\frac{Ts}{R\alpha_C} \qquad \text{Ec. (18)}$$

Cálculos para el Diseño del Convertidor Boost:

A continuación, se presentan los cálculos realizados para el diseño del convertidor elevador Boost, el cual toma como entrada 37.87 V suministrados por el panel fotovoltaico y los eleva a 50 V. Donde Vi = 37.87 V (Voltaje de entrada), Vo = Vc = 50 V (voltaje de salida), Po = 330 W (potencia del sistema), α_L = 15% = 0.15 (porcentaje de rizo de corriente del inductor), α_c = 5% = 0.05 (porcentaje de rizo de voltaje en el capacitor) y Fs = 50 kHz (frecuencia de conmutación de 50 kHz con la que el convertidor opera).

La ecuación (19) define el valor de la ganancia que indica el incremento del voltaje de entrada (Vi) para obtener el voltaje de salida (Vo). La ecuación (20) determina el ciclo de trabajo del convertidor, la ecuación (21) define la resistencia de carga equivalente del convertidor considerando la potencia de salida (Po) y el voltaje de salida (Vo). La ecuación (22) define el periodo de conmutación (el tiempo que dura un ciclo completo de encendido y apagado del interruptor), la ecuación (23) determina el valor del inductor necesario para mantener el rizo de corriente y la ecuación (24) determina el valor del capacitor necesario para reducir el rizo de voltaje en la salida.

$$M = \frac{V_c}{V_i} = \frac{50V}{37.87V} = 1.3203 \qquad \text{Ec. (19)}$$

$$M = \frac{1}{1-D};\, D = \frac{1}{1.3203} = 0.7574 \qquad \text{Ec. (20)}$$

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

$$R = \frac{Vo^2}{Po} = \frac{(50)^2}{330\ W} = 7.5757\ \Omega$$

Ec. (21)

$$Ts = \frac{1}{50\ KHz} = 20\ us$$

Ec. (22)

$$L = \frac{7.5757\ \Omega(1-0.7574)^2}{0.15}(20\ us) = 59.447\mu H$$

Ec. (23)

$$C = \frac{(0.7574)(20\ us)}{(7.5757\ \Omega)(0.05)} = 39.991\mu F$$

Ec. (24)

Resultados de la simulación

En este apartado se presentan los resultados obtenidos a partir de la simulación del sistema de extracción de energía del panel fotovoltaico, empleando el algoritmo de optimización PSO. Se analizan las respuestas del sistema bajo diferentes condiciones de irradiancia, específicamente a 1000 W/m^2 y 750 W/m^2, manteniendo una temperatura de 25°C. Se comparan la potencia, voltaje y corriente, tanto con el algoritmo de optimización como sin él.

La Figura 7. Muestra el sistema de extracción de energía. El algoritmo de optimización PSO se encuentra delimitado por un recuadro punteado de color azul, el panel fotovoltaico se encuentra delimitado por un recuadro punteado de color verde y el convertidor Boost se encuentra delimitado por un recuadro punteado de color rojo.

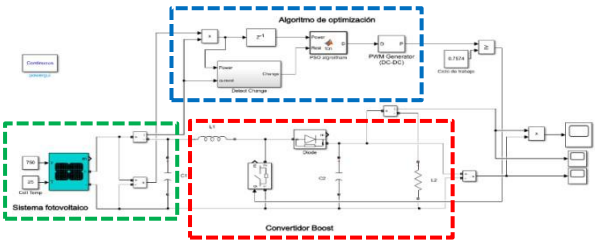


Figura 7. Simulación del sistema de extracción de energía.

La Figura 8. Muestra la potencia y corriente esperados del sistema con la irradiancia y temperatura a 1000 W/m^2 y 750 W/m^2.

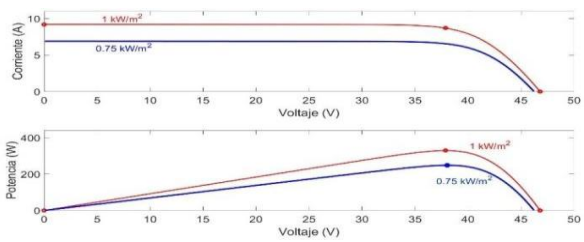


Figura 8. Potencia y corriente esperados del sistema.

En la Figura 9. Podemos observar el ciclo de trabajo del convertidor, el cual representa la fracción de tiempo en la que el interruptor del convertidor está encendido durante cada período de conmutación. El interruptor está abierto (estado 1) el 74.75% del tiempo en cada ciclo y se cierra (estado 0) 25.25% el del tiempo en cada ciclo.

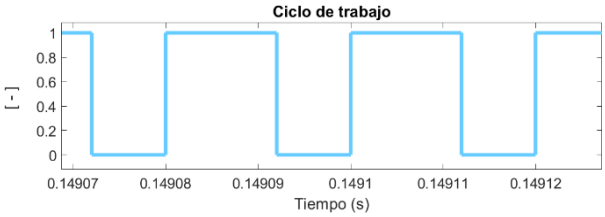


Figura 9. Ciclo de trabajo del convertidor.

Simulación del sistema con irradiancia de 1000 W/m² y temperatura de 25°C

En la Figura 10. Observamos el voltaje, corriente y potencia a la salida del convertidor sin implementación del algoritmo de optimización. Observamos mayores oscilaciones en el voltaje y en la potencia del sistema.

La potencia del sistema alcanza la estabilización alrededor de 9 segundos. Se observa que el voltaje tiene oscilaciones hasta llegar a un nivel de 30 V, el voltaje sufre variaciones hasta aproximadamente los 4 segundos, lo que se debe al proceso de carga y descarga de los elementos de almacenamiento de energía (inductor y capacitor), la corriente no se ve muy afectada en la medida por las oscilaciones del voltaje debido al comportamiento propio del panel fotovoltaico como podemos observar en la Figura 8, alcanzando un valor de 9 A. finalmente, la potencia presenta una relación directa del voltaje y la corriente, la estabilización de la potencia se alcanza alrededor de los 9 segundos.

Al no implementar el algoritmo de optimización, el convertidor es controlado por el ciclo de trabajo constante, al haber un cambio en la irradiancia, el ciclo de trabajo no podría ajustarse para seguir el MPP. Sin un control activo, se producen mayores oscilaciones, las cuales afectan la estabilidad del voltaje en la salida y ocasiona que el sistema pierda eficiencia.

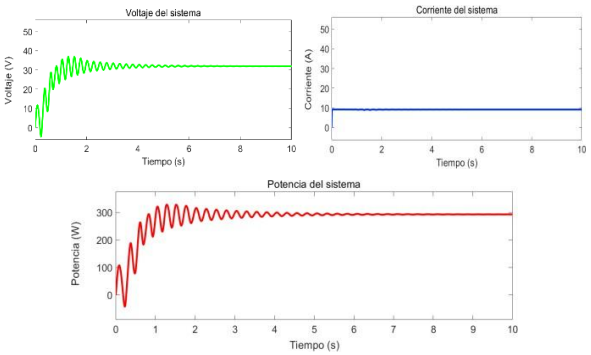


Figura 10. Simulación del sistema sin implementación del algoritmo de optimización con irradiancia de 1000 W/m^2 y temperatura de 25°C.

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

En la Figura 11. Observamos las gráficas del voltaje, corriente y potencia a la salida del panel fotovoltaico implementando el algoritmo de optimización PSO. Se observa una reducción en las oscilaciones iniciales en comparación con la simulación sin optimización. Las oscilaciones en la corriente con PSO ocurren debido a que el algoritmo ajusta dinámicamente el ciclo de trabajo para mejorar su rendimiento, mientras que sin optimización la corriente parece más estable porque los parámetros del sistema son fijos. Las oscilaciones en la potencia aún están presentes, pero son menos pronunciadas en comparación con la simulación sin optimización, su estabilización ocurre alrededor de los 5-6 segundos, mejorando con respecto a los 9 segundos de la simulación sin algoritmo de optimización.

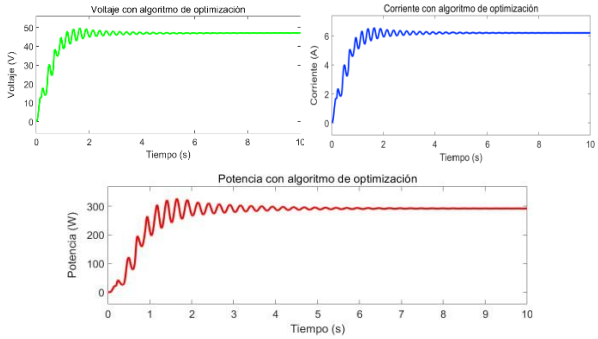


Figura 11. Simulación del sistema implementando el algoritmo de optimización con irradiancia de 1000 W/m² y temperatura de 25°C.

Potencia de salida del sistema con irradiancia de 750 W/m² y temperatura de 25°C

En la Figura 12. Podemos observar el voltaje, corriente y potencia a la salida del convertidor sin implementación del algoritmo de optimización. Observamos oscilaciones pronunciadas en el voltaje y en la potencia, similares a la Figura 10, la potencia sigue manteniendo el comportamiento propio del panel fotovoltaico. El voltaje se estabiliza entre 8 y 9 segundos, la potencia del sistema se estabiliza alrededor de 9 segundos.

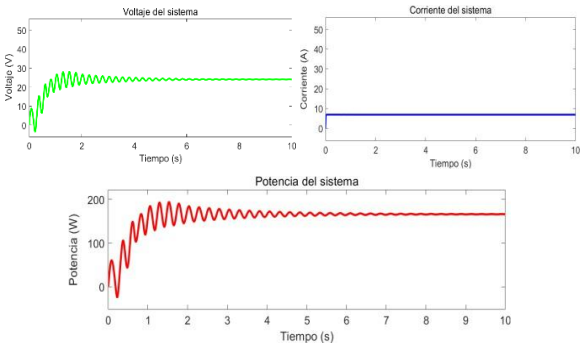


Figura 12. Simulación del sistema sin implementación del algoritmo de optimización con irradiancia de 750 W/m² y temperatura de 25°C.

En la Figura 13. Observamos las gráficas del voltaje, corriente y potencia a la salida del panel fotovoltaico implementando el algoritmo de optimización. La potencia máxima alcanzada es menor en comparación con la simulación previa, debido a que la irradiancia se ha reducido a 750 W/m². Podemos observar tiempo de atenuación de la potencia del sistema de alrededor de 7 y 8 segundos. Se observa una reducción en las oscilaciones iniciales en comparación con la simulación sin optimización. Sin embargo, las oscilaciones en la corriente aún están presentes debido a que el algoritmo ajusta dinámicamente el ciclo de trabajo para mejorar su rendimiento. Mientras que sin optimización la corriente parece más estable porque los parámetros del sistema son fijos. La potencia se estabiliza alrededor de 5 y 6 segundos, lo que representa una mejora con respecto a los 9 segundos observados en la simulación sin algoritmo de optimización.

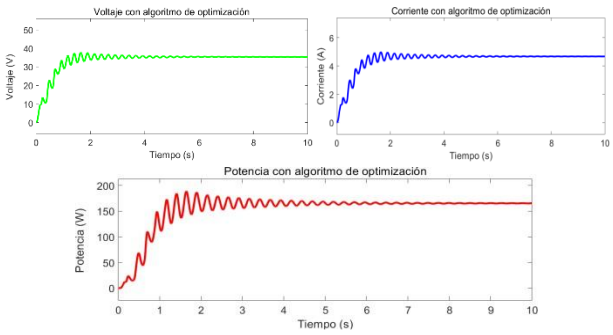


Figura 13. Simulación del sistema implementando el algoritmo de optimización con irradiancia de 750 W/m² y temperatura de 25°C.

DISCUSIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Los resultados obtenidos muestran un análisis comparativo del comportamiento del sistema con y sin la aplicación del algoritmo de optimización PSO, la implementación del algoritmo PSO genera una respuesta más rápida y con menor tiempo de establecimiento en comparación con el sistema sin algoritmo de optimización. La amplitud de las oscilaciones es mayor al inicio, pero rápidamente el sistema alcanza la estabilidad. El voltaje con PSO es superior al del sistema sin optimización, lo que indica un mejor aprovechamiento del sistema. La corriente con PSO presenta un crecimiento progresivo con oscilaciones iniciales, pero alcanza un estado estacionario más estable.

La potencia de salida con PSO alcanza un valor superior con menor tiempo de estabilización. Se observa una mejora en la eficiencia, lo que sugiere que la optimización permite un mejor aprovechamiento de la energía disponible. En condiciones de 1000 W/m², la respuesta del sistema optimizado mantiene un mejor desempeño en voltaje, corriente y potencia de salida. Esto indica que el algoritmo PSO se adapta correctamente a las condiciones de irradiancia, permitiendo un mejor control y

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

aprovechamiento del recurso solar.

CONCLUSIONES

La aplicación del algoritmo PSO mejora significativamente el rendimiento del sistema, optimizando la respuesta del voltaje, la corriente y la potencia de salida. Se observa una reducción en el tiempo de establecimiento y en las oscilaciones, lo que indica un mejor control dinámico y una mayor eficiencia energética.

En particular, se cuantificó la reducción del tiempo de estabilización en distintas condiciones de irradiancia:

Para una irradiancia de 1000 W/m², el tiempo de estabilización se redujo de 5.32 s a 4.82 s, lo que representa una mejora del 9.40%.

Para una irradiancia de 750 W/m², el tiempo de estabilización se redujo de 3.14 s a 2.76 s, lo que representa una mejora del 12.10%.

Estos resultados demuestran que el sistema optimizado con PSO responde de mejor manera a variaciones en la irradiancia, asegurando una operación más estable y eficiente en comparación con el sistema sin optimización.

El uso de algoritmos de optimización como PSO permite un mejor aprovechamiento de la energía disponible, reduciendo pérdidas y mejorando el desempeño del sistema fotovoltaico

AGRADECIMIENTOS

Agradezco al Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (CENIDET) por su apoyo académico y a la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (Secihti) por su respaldo financiero, lo que hizo posible este trabajo.

BIBLIOGRAFÍA

[1] Renewables global status report (2024.) Global overview. Recuperado de: https://www.ren21.net/gsr-2024/modules/global_overview/

[2] Cepeda, J. (2017). Aspectos que afectan la eficiencia en los paneles fotovoltaicos y sus potenciales soluciones. [Trabajo de Grado, Universidad Santo Tomás]. Repositorio Institucional. Recuperado de: https://repository.usta.edu.co/handle/11634/4196

[3] Dawood, Z. A., Tackie, S. N., & Dimililer, K. (2025). Evaluation of optimization algorithms for power and voltage in solar power generation system: FOPID controller and MPPT-based P&O algorithm. International Journal of Information Technology, 1-13. https://doi.org/10.1007/s41870-025-02432-0

[4] Wei, L., Li, Y. Research on maximum power point tracking of photovoltaic power generation based on improved hybrid optimization algorithm. Sci Rep 15, 3991 (2025). https://doi.org/10.1038/s41598-025-87694-1

[5] Torres, S., Jurado, F., Granados, D., & Lozano, A. (2018). Eficiencia en paneles solares. Revista del Diseño Innovativo, 2(2), 9-21. Recuperado de: https://www.ecorfan.org/taiwan/research_journals/Diseno_Innovativo/vol2num2/Revista_Diseno_Innovativo_V 2_N2_2.pdf

[6] Bayod, A. (2009). Sistemas fotovoltaicos. Prensas Universitarias de Zaragoza. Recuperado de: https://pdfcoffee.com/energias-renovables-sistemas-fotovoltaicos-angel-antonio-bayod-rujula-8-pdf-free.html

[7] Echeverría, N., Judewicz, M., Murcia, G., Strack, J. & González, S. (2014). Algoritmo MPPT de Conductancia Incremental con Doble Cota. Recuperado de: https://www.researchgate.net/publication/265866384_Algoritmo_MPPT_de_Conductancia_Incremental_con_Do ble_Cota

[8] McGraw-Hill/Interamericana de España. (2012). Componentes de una instalación solar fotovoltaica. In Componenetes de una instalacion solar fotovoltaica (Vol. 1, p. 24). Recuperado de: https://www.mheducation.es/bcv/guide/capitulo/844861 4488.pdf

[9] Laborde, M., & Williams, R. (Eds.). (2016). Energía solar (1ª ed. especial). ANCEFN Academia Nacional de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Recuperado de: https://ancefn.org.ar/user/FILES/PUBLICACIONES/En ergia_Solar.pdf#page=6

[10] Ezpinoza, M., Vasquez, J. & Alonso, M. (2021). Caracterización de un panel solar por resistencia de carga. 2021, 2(2), 55–59. Recuperado de: https://citt.itsm.edu.mx/ingeniantes/articulos/ingeniantes 8no2vol2/7%20Caracterización%20de%20un%20panel %20solar%20por%20resistencia%20de%20carga.pdf

[11] Ayna, I. (2021). Análisis de las Curvas Características de una Planta Fotovoltaica bajo el Efecto del Sombreado y Modelo de un Inversor Autor. 34–40. Recuperado de: https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/366711/an-lisis-de-las-curvas-caracter-sticas-de-una-planta- fotovoltaica-bajo-el-efecto-del-sombreado-y-modelo-de-un-inversor.pdf?sequence=1&isAllowed=y

[12] Luna, J.(2019). Implementación de la técnica Perturbar y Observar para el seguimiento del punto de máxima potencia ante sombreado parcial [Tesis de maestría, Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico].Recuperado de: http://51.143.95.221/bitstream/TecNM/2434/6/ME_JuanAntonio_Luna_Arteaga_2019.pdf

[13] Acevedo, H., Mendoza , J., & Sepúlveda Mora, S.B.

(2017). Estrategias De Control Mppt Aplicadas En Un Convertidor Dc/Dc Tipo Boost Para Sistemas Fotovoltaicos. Revista Colombiana De Tecnologias De Avanzada (Rcta), 1(29). Recuperado de: https://www.researchgate.net/publication/321130254_ESTRATEGIAS_DE_CONTROL_MPPT_APLICADAS_EN_UN_CONVERTIDOR_DCDC_TIPO_BOOST_P ARA_SISTEMAS_FOTOVOLTAICOS

[14]Vaca J. (2023). Determinación del punto de máxima potencia de paneles solares mediante algoritmo MPPT perturbar y observar para maximizar el factor de forma en electrolinera fotovoltaica aplicada al abastecimiento energético de vehículos eléctricos (Trabajo de titulación). Universidad Politécnica Salesiana, Sede Quito. Recuperado de: https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/29317

[15]Reyes, L. (2024). Reconfiguración en un arreglo fotovoltaico, basado en la generación de energía utilizando un convertidor multipuerto (Tesis de maestría). Tecnológico Nacional de México, Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico. Recuperado de: https://rinacional.tecnm.mx/jspui/bitstream/TecNM/7834/1/ME_Lazaro_Ibrahel_de_los_Reyes_Suarez_2024.pd f

[16]J. Kennedy, R. Eberhart. Particle swarm optimization. Proceedings., IEEE International Conference on Neural Networks, pp. 1942--1948, IEEE, 1995.

[17]Zenteno, S. (2021). Seguidor del máximo punto de potencia en circuito integrado para sistemas recolectores de energía (Tesis de maestría). Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Facultad de Ciencias de la Electrónica. Recuperado de: https://repositorioinstitucional.buap.mx/server/api/core/bitstreams/11a9937d-8da1-4d68-8453ac702bc85f64/content

[18]Alshareef, M., Lin, Z., Ma, M., & Cao, W. (2019). Accelerated particle swarm optimization for photovoltaic maximum power point tracking under partial shading conditions. Energies, 12(4), 682. Recuperado de: https://www.researchgate.net/publication/331325866_Accelerated_Particle_Swarm_Optimization_for_Photovoltaic_Maximum_Power_Point_Tracking_under_Partial_S hading_Conditions

[19]Rojas, I., (2024) Estimación del desempeño de un convertidor CD-CD usando redes neuronales artificiales inversas aplicado a cosecha de energía. Tesis de maestría, Tecnológico Nacional de México, Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, Cuernavaca, Morelos, México. Recuperado de: https://rinacional.tecnm.mx/bitstream/TecNM/8566/1/M E_Ireti_Ticatame_Rojas_Arredondo_2024.pdf

AUTORIZACIÓN Y RENUNCIA.

Los autores del presente artículo autorizan al TecNM/Instituto Tecnológico de Zacatepec para publicar el escrito en el libro electrónico del CITID 2025. El TecNM/ITZ o los editores no son responsables ni por el contenido ni por las implicaciones de lo que está expresado en el escrito.

CITID 2025 ISSN: 2992-8516

ANALOGÍA DE DIAGRAMAS DE CONTROL ELÉCTRICO EN DISEÑO DE CIRCUITOS NEUMÁTICOS CON ÁLGEBRA BOOLEANA PARA ESQUEMAS DE AUTOMATIZACIÓN

J. Alfonso Santana Camilo[1], J. Efraín Ruiz Ramírez[2], Rosember Ovando Castelar [3], Alfredo Olarte Paredes[4] y Andrés Blanco Ortega[5].

[1,2,3] Maestro en Ciencias, [4]Doctor en Ciencias. Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Zacatepec, Departamento Metal Mecánica. jose.sc@zacatepec.tecnm.mx, 7341127963, jose.rr@zacatepec.tecnm.mx, 7341174406, rosember.oc@zacatepec.tecnm.mx 7771882186, alfredo.op@zacatepec.tecnm.mx 7341127203. Calzada Tecnológico No. 27, Col. Centro Zacatepec Morelos, México, C.P. 62780.

[5]Doctor en Ciencias. Tecnológico Nacional de México/ Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (CENIDET) Departamento de Ingeniería Mecánica. andres.bo@cenidet.tecnm.mx , 7771108103. Interior Internado Palmira S/N, Col. Palmira Cuernavaca Morelos, México, C.P. 62490.

Resumen – El atributo de egreso en ingeniería debe ser una cualidad con característica especial dependiendo del perfil de la carrera, de ahí que se requiere su fortalecimiento a través de estrategias didácticas. El presente trabajo realiza la vinculación de dos áreas importantes en los esquemas de automatización, el diseño de controles eléctricos y los sistemas neumáticos aplicados en circuitos de potencia. Con el respaldo de la lógica combinatoria de compuertas usadas en álgebra booleana, se realiza una analogía con respecto a la tabla de verdad de cada bloque en la parte de control, ya sea una conexión negada en serie o en paralelo de señales de entrada; haciendo la analogía con respecto a las válvulas neumáticas tipo selectora o de simultaneidad, la válvula de control 3/2 en connotación NA o NC, así como la válvula 5/2 de control directo a señal de salida aplicando realimentación para el esquema de control.

El control eléctrico se puede representar en simbología americana o europea. Con la misma interpretación para la analogía, se hace énfasis en la fundamentación de la parte de control con sus equivalencias en lógica combinatoria, sus respectivas tablas de verdad e interpretación en la migración para el uso de las diferentes válvulas que tengan funciones análogas y establecer una interconexión de éstos que tengan un resultado igual con respecto a la activación de las entradas en relación con las señales de salida.

Palabras Clave: Analogía, Automatización, Compuertas Lógicas, Controles Eléctricos y Sistemas Neumáticos.

Abstract - The attribute of graduation in engineering must be a quality with a special characteristic depending on the profile of the career, hence it is required to be strengthened through didactic strategies. The present work links two important areas in automation schemes, the design of electrical controls and pneumatic systems applied in power circuits. Supported by the combinatorial logic of gates used in Boolean algebra, an analogy is made with respect to the truth table of each block in the control part, whether it is a serial or parallel denied connection of input signals; making the analogy with respect to the pneumatic selector or simultaneity type valves, the 3/2 control valve in NA or NC connotation, as well as the 5/2 direct control valve to output signal applying feedback for the control scheme.

Electrical control can be represented in American or European symbology. With the same interpretation for the analogy, emphasis is placed on the foundation of the control part with its equivalences in combinatorial logic, their respective truth tables and interpretation in the migration for the use of the different valves that have analogous functions and establish an interconnection of these that have an equal result with respect to the activation of the inputs in relation to the output signals.

Key words – Analogy, Automation, Logic Gates, Electrical Controls, and Pneumatic Systems.

INTRODUCCIÓN

En sistemas de automatización es importante el entendimiento y la relación análoga de los sistemas de control eléctrico ordinario en lo que respecta a los diagramas de conexión neumática. Se tienen estrategias y métodos para el diseño de arrancadores de motores eléctricos a través de diagramas con simbología tipo europea o americana, dependiendo bajo que régimen normativo éste se realiza [1,2]. Esto también se presenta en los sistemas neumáticos de potencia debido a que, con la capacitación en la interpretación de simbología de cilindros y válvulas, se proponen circuitos de operación dependiendo de lo que se requiere en la secuencia de movimientos de los actuadores.

.

En el diseño de automatismos con neumática existen métodos ya planteados con sus respectivas reglas o serie de pasos, pero con sus limitaciones o restricciones, así como sus ventajas y accesibilidad para la aplicación con métodos didácticos; tales métodos son: secuenciador, en cascada, paso a paso, etc.

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

De igual forma, en la parte eléctrica se tienen diagramas con área de control y protección, atendiendo la parte normativa sea cual fuere la parte de actuación, o tipo de motor (de corriente alterna, monofásico, trifásico, de corriente continua), modo de conexión, etc.

En los motores eléctricos se elabora un diagrama de control, donde por medio de elementos tipo sensor, los cuales toman información lógica binaria, y a través de la configuración del control se procesa y entrega información a la parte operativa para el movimiento de los actuadores, y en algunas situaciones esta información se asume como una realimentación (feedback) para la operatividad del sistema de control [3].

Es importante recordar que los sistemas de control se clasifican en sistemas de lazo abierto y de lazo cerrado, según se muestra en las Figuras 1 y 2.

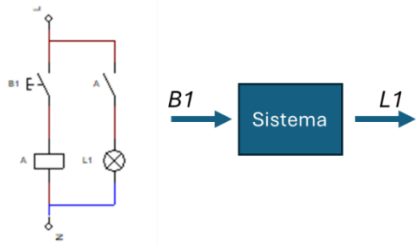


Figura 1 Lazo Abierto en control eléctrico

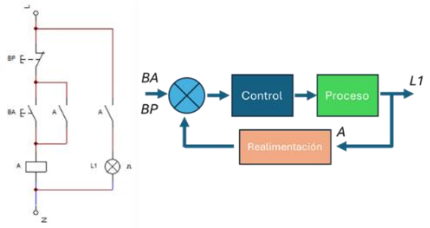


Figura 2 Lazo Cerrado en control eléctrico

La base de los controladores en el área eléctrica cuenta con una realimentación denominada enclave o memoria eléctrica, que permite que el sistema sea de tipo semiautomático, que tenga operación de arranque y paro, de ahí la mención de los sistemas de lazo cerrado por la cuestión de la realimentación.

En ingeniería eléctrica se le denomina sistema de 3 hilos a la conexión entre una estación de botones con un contactor o relevador del cual se usa un contacto auxiliar instantáneo normalmente abierto en paralelo con el botón de arranque para enclavar el contactor y que este a través de este se suministra la energía al actuador, en este caso a un motor trifásico de inducción como se muestra en la Figura 3.

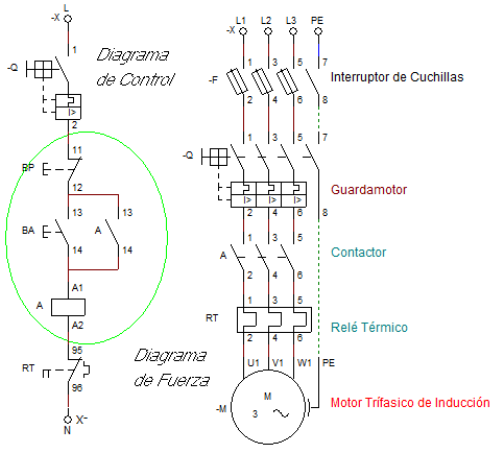


Figura 3 Arrancador de un motor trifásico de inducción

En el aspecto técnico, la formación de profesionistas es altamente relevante para el logro de los atributos de egreso, es por ello que la estrategia de fomentar vínculos entre diferentes áreas de automatización para el entendimiento y la comprensión de la relación entre sistemas neumáticos y sistemas de control, así como fomentar en el estudiante fortalezas con medios experimentales y afrontar retos que conlleven a adquirir confianza en el diseño de automatismos, para que en el futuro sean capaces de integrar métodos adicionales y el uso de tecnologías en crecimiento y desarrollo.

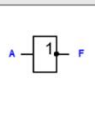
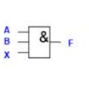
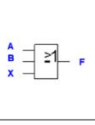
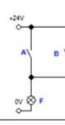
DESARROLLO

Para realizar la migración de un sistema eléctrico de control a un sistema neumático, es necesario considerar tres elementos del álgebra booleana, con su respectiva equivalencia a través de una tabla de verdad en su conexión con contactos eléctricos, como se muestra en la Tabla 1.

Metodología.

Los sistemas neumáticos de igual manera se manejan con base en símbolos con su respectiva interpretación, que de forma breve se muestra en la Figura 4.

Tabla 3 Equivalencia de Compuertas Lógicas en control

Compuerta	Símbolo	Analogía	Tabla de verdad
NOT			A F 1 0 0 1
AND			A B F 0 0 0 1 0 0 0 1 0 1 1 1
OR			A B F 0 0 0 1 0 1 0 1 1 1 1 1

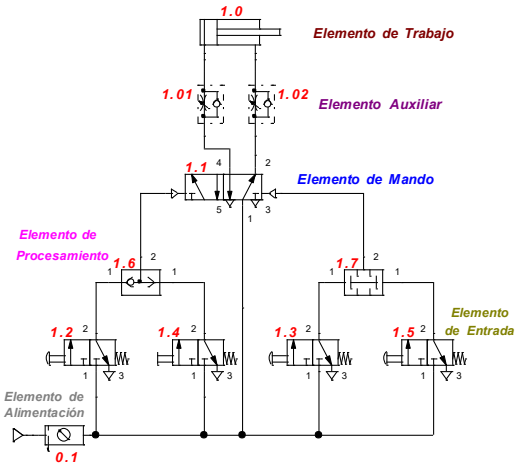


Figura 4 Estructura general de un diagrama neumático

En la Tabla 2 se muestran los símbolos de neumática que se aplican en es este trabajo para la analogía propuesta.
.

Tabla 4 Simbología neumática

Símbolo	Descripción
	Fuente de aire comprimido
	Unidad de mantenimiento
	Válvula 3 vías, 2 posiciones activado por botón y retorno por resorte, normalmente cerrado
	Válvula 3 vías, 2 posiciones activado por botón y retorno por resorte, normalmente abierto
	Válvula monoestable 5 vías, 2 posiciones activado neumáticamente y retorno por resorte.
	Válvula de simultaneidad
	Válvula selectora
	Cilindro de doble efecto

Aplicando la lógica combinatoria de compuertas, con respecto a su tabla de verdad, en circuitos neumáticos se toman las válvulas que análogamente presentan el mismo comportamiento:

- Para la compuerta NOT, se considera la válvula 3/2 normalmente abierta como análoga, con el arreglo eléctrico con el botón normalmente cerrado para energizar una salida o actuador.
- La combinación en serie de dos pulsadores normalmente abiertos se considera como análogo a una compuerta AND y en circuitos neumáticos se utiliza la válvula de simultaneidad.
- La válvula selectora, tiene el funcionamiento análogo a la compuerta OR, y en arreglo eléctrico se identifica cuando se tienen dos botones normalmente abiertos en paralelo para activar una salida.

En la Tabla 3 se visualiza de forma gráfica la analogía del control eléctrico con respecto a los elementos neumáticos, con la identificación de resultados de la tabla de verdad de cada compuerta lógica.

Tabla 5 Analogía de válvulas neumáticas

Compuerta	Eléctrico	Neumático
NOT		
AND		
OR		

Se utilizarán válvulas 5/2 monoestables, identificando los ductos de salida 4 y 2 como señales A y A' respectivamente, indicando la activación o no del sistema, es decir un 1 o un 0 lógico; por cuestiones de didáctica se colocan dos líneas indicando las salidas de la válvula para la interconexión necesaria con los demás elementos neumáticos según la analogía, como se muestra en la Figura 5.

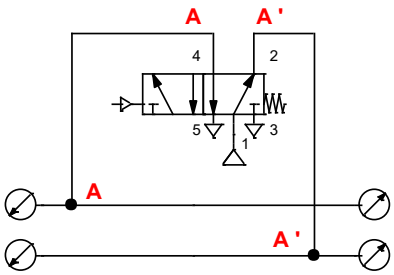


Figura 5 Señal de salida de válvula 5/2

En sistemas de control el funcionamiento de un actuador depende de la información requerida por parte de las señales de entrada o del área de sensores. En la Figura 6 se inicia con el planteamiento de una activación de un contactor o relevador a través de un pulsador y su contacto ligado a la activación de la salida permite la operación del indicador luminoso; de forma análoga se visualiza en la válvula 3/2 la activación con pulsador y que ésta manda a operación de forma neumática a la válvula 5/2, permitiendo el paso de energía neumática para la operación del cilindro.

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

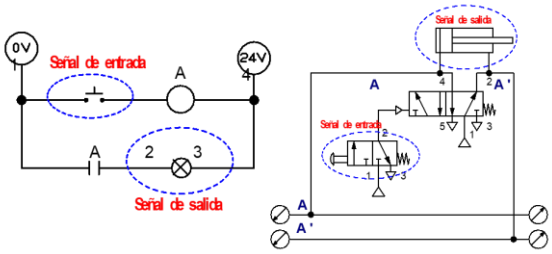


Figura 6 Arreglo de compuerta "IF"

De forma similar se propone un arreglo de operación inversa para desactivar una salida utilizando un botón normalmente cerrado que, al activarse la bobina del relevador, sale de operación abriendo el contacto y por lo tanto la lámpara se apaga. Aplicando la analogía, en neumática se utiliza una válvula 3/2 normalmente abierta, permitiendo el flujo de aire al cilindro y al activarse la válvula éste retorna a su punto inicial.

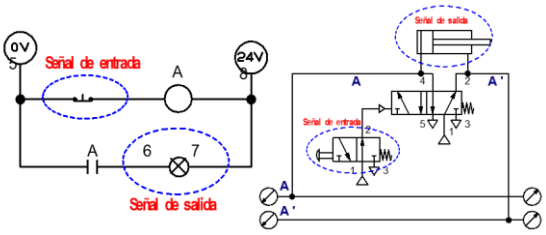


Figura 7 Arreglo en combinación NOT

En control eléctrico, el arreglo de señales de entrada en serie normalmente abierto se relaciona con una compuerta AND como se muestra en la Figura 8, que análogamente en neumática se usa con una válvula de simultaneidad, donde recibe dos señales de entrada que, con base en su tabla de verdad, solo hay señal de salida cuando se operan las dos válvulas 3/2 como se visualiza en la Figura 9.

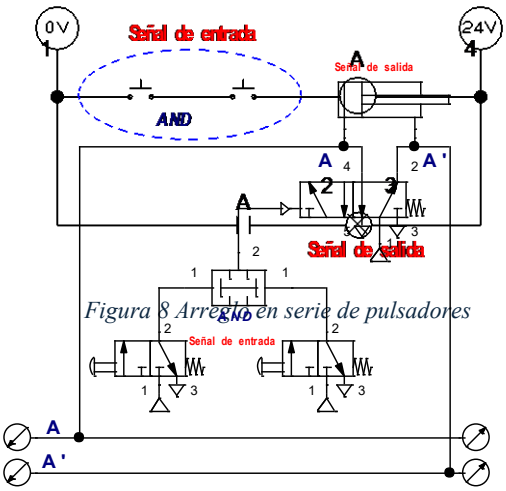


Figura 8 Arreglo en serie de pulsadores

Figura 9 Aplicación de válvula de simultaneidad

En control eléctrico, la combinación en paralelo de señales de entrada equivale a una compuerta lógica OR, que ante una señal 1 en cualquier entrada, se tendrá la activación de la salida (ver Figura 10).

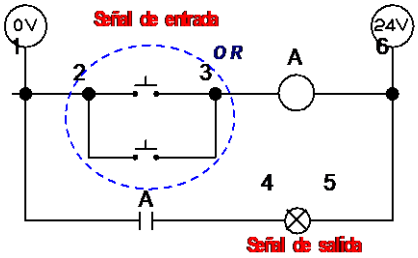


Figura 10 Arreglo en paralelo de pulsadores

En circuitos neumáticos, para lograr la operación lógica OR se aplica la válvula selectora que, con la combinación de dos señales de entrada, a través de válvulas de control 3/2 se tendrá una salida con cualquier señal habilitada. En la Figura 11 se visualiza la aplicación de este circuito neumático.

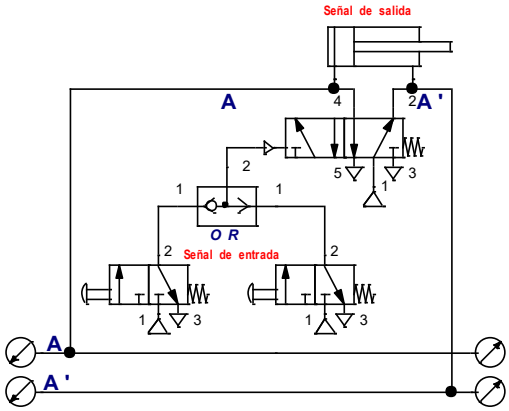


Figura 11 Aplicación de la válvula selectora

DISCUSIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

En sistemas de control, se requiere información lógica de elementos de entrada a considerar para la activación de un sistema o proceso y con base en una lógica cableada, se tiene una salida requerida en el contexto adecuado; en la analogía sugerida en este trabajo, se toman algunos esquemas aplicados en la parte de control de motores eléctricos, tales como:

- *Control a 2 hilos*: es un sistema literalmente manual, donde se requiere el elemento humano para la operación del motor;
- *Control a 3 hilos*: es un sistema de control semiautomático, donde se requiere el elemento humano para el inicio y termino de una operación de un actuador o señal de salida. En ingeniería de control se le denomina feedback o señal de realimentación, pero en control eléctrico se le conoce como memoria o enclavamiento eléctrico;

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

- *Control independiente de 2 sistemas*: en este caso de forma unilateral se opera o activa un sistema sin depender de la operación del otro, pero también pudieran activarse de forma simultánea;
- *Control con dependencia*: en este tipo de arreglo que aplica a dos sistemas de control, la operación de uno con respecto al otro está condicionada a no operar estando el otro activado y viceversa; en esquemas eléctricos a este tipo de control se le denomina bloqueo y pudiera desactivarse con un sensor único para ambos sistemas;

Con base a las analogías indicadas de control eléctrico respecto a las válvulas neumáticas se propone una analogía de un sistema de arranque y paro, en el contexto que se requiera realizar; en la Figura 12 muestra un controlador de arranque y paro por medio de una estación de botones que activa un solenoide de un contactor o relevador, y que a través de un contacto normalmente abierto del mismo conectado en paralelo con el botón de arranque, al activarse ocasiona la operación denominado enclave o memoria eléctrica, en este caso el indicador luminoso enciende.

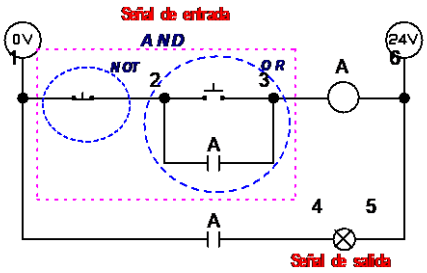


Figura 12 Memoria en control eléctrico

Realizando la analogía del sistema de control antes indicado con circuitos neumáticos, se considera que:

- El botón de paro es análogo a la compuerta NOT y corresponde con la válvula 3/2 NA;
- La conexión en paralelo del botón de arranque con la señal de realimentación de la salida de la válvula 5/2, etiquetada como *A*, se conecta como función OR, mientras que en neumática se usa la válvula selectora;
- El bloque del botón de paro en serie con el bloque del arreglo en paralelo del botón de arranque con la memoria eléctrica es una combinación análoga a una compuerta AND, para lo cual en neumática se utiliza la válvula de simultaneidad;

En la Figura 13 ilustra la interconexión de las válvulas indicadas con la realimentación de la salida de la válvula 5/2, donde se tiene un botón que provoca que el cilindro se extienda hacia adelante, en tanto que el otro botón posiciona el retorno de éste.

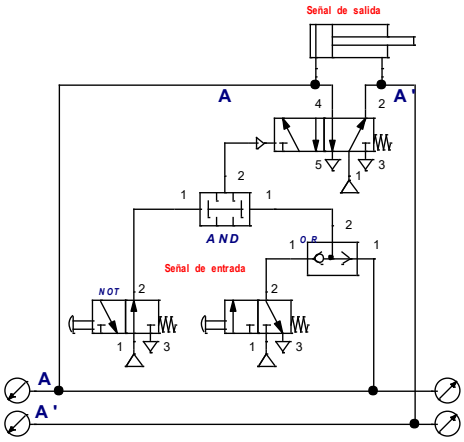


Figura 13 Analogía de memoria en neumática

La Figura 14 muestra otro ejemplo de aplicación, en el que se realiza la analogía de sistemas independientes de control eléctrico en neumática (ver Figura 15), para lo cual se debe de considerar que:

- El botón de paro es análogo a una compuerta NOT y corresponde con la válvula 3/2 NA, cuya función es realizar la desactivación, sea cual sea el sistema que esté operando;
- La conexión en paralelo del botón de arranque 1 con la señal de realimentación del sistema de salida 1 válvula 5/2, etiquetada como *A*, corresponde con una función OR, aplicando la válvula selectora y de forma análoga, esto también aplica para el sistema 2;
- El bloque del botón de paro en serie con cada bloque de cada arreglo en paralelo del botón de arranque con la memoria eléctrica es una combinación análoga a una compuerta AND, en el caso del sistema 1. Esto aplica de igual forma con el sistema 2, al hacer uso de válvulas de simultaneidad;

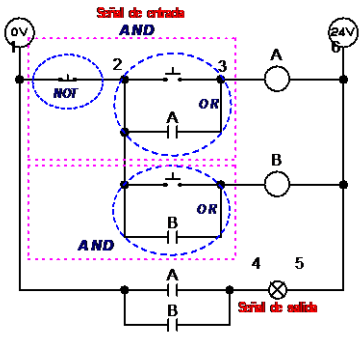


Figura 14 Control Independiente

La interconexión de las válvulas planteadas ocasiona la operación con un botón de la válvula 3/2 para sistema 1, que activa con señal neumática la válvula 5/2 para

cilindro 1, así como análogamente para sistema 2, donde tendremos un botón que hace que el actuador 1, 2 o ambas retrocedan a su estado inicial, como se muestra en la Figura 15.

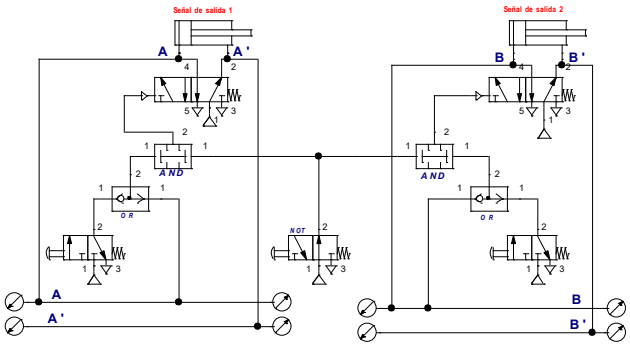


Figura 15 Control independiente en neumática

En el diseño de sistemas de control los bloqueos son importantes cuando se requiere condicionar la operatividad de un sistema con respecto a otro, ya sea que se bloquee el sistema B cuando este en operación el sistema A o viceversa. Por ejemplo, en el arranque de motores eléctricos es necesario realizar un paro antes de poder realizar una inversión de rotación de éste, de cierta forma esto implícitamente es una protección mecánica y eléctrica.

En la siguiente propuesta de analogía, que se muestra en la Figura 16, cuando se activa el sistema A con el primer pulsador de arranque, se tiene una realimentación que mantiene en enclave a este sistema, pero al presionar el segundo botón de arranque que permite operar al sistema B, se produce la desactivación del sistema A y viceversa. Sólo con el botón de paro se cancela la operación simultánea de ambos sistemas, sea cual fuere el sistema que esté operando.

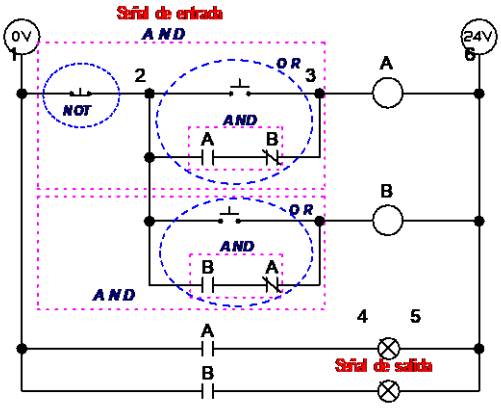


Figura 16 Control con dependencia

Con base en la interconexión de las señales de entrada, independientemente que éstas estén en conexión serie o en paralelo, se aplican las válvulas de simultaneidad y selectora respectivamente, conjuntamente con la señal de realimentación de cada sistema, se propone de forma similar a los ejercicios planteados anteriormente la combinación de las válvulas, y de igual forma para realizar el paro o retroceso de los cilindros esto se logra mediante el botón de paro (que es la válvula 3/2 NA), como se muestra en la Figura 17.

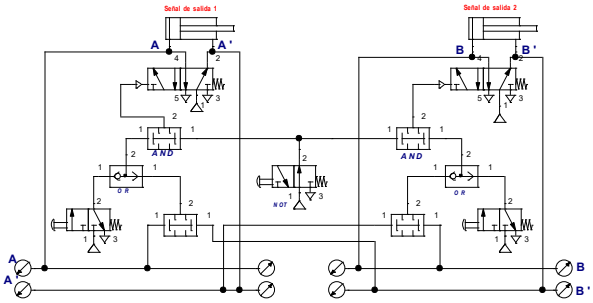


Figura 17 Dependencia de control neumático

Una forma de comprobar que las relaciones de control eléctrico con la propuesta de analogía respecto a la neumática son correspondientes, es mediante el uso de un diagrama de estado. En este diagrama se muestra de forma gráfica el comportamiento de la activación de las válvulas de control 3/2 NA y NC, así como el desplazamiento de los actuadores que representa las señales de salida.

En la Figura 18 se visualiza la aplicación del diagrama neumático para el análisis de la operación del sistema análogo al diagrama de control denominado Control con dependencia de la Figura 16, con la siguiente nomenclatura:

- BA1, es el botón de arranque para el sistema 1;
- BA2, es el botón de arranque para el sistema 2;
- BP, es el botón de paro para ambos sistemas;
- S1, es la salida hacia el sistema 1 (A);
- S2, es la salida hacia el sistema 2 (B);

$$A = BP(BA1 + AB') \qquad \text{Ec. (1)}$$

$$B = BP(BA2 + A'B) \qquad \text{Ec. (2)}$$

Las ecuaciones (1) y (2), muestran otra forma de describir en notación algebraica, la analogía realizada entre la parte de control eléctrico con la neumática, donde se observan las señales de salida implícitas en la ecuación, que representa el enclavamiento o memoria eléctrica aplicada en los sistemas indicados.

En el diagrama de la Figura 18 se visualiza que cuando se activa BA1, el sistema 1 inicia el desplazamiento del actuador, posteriormente al activar BA2, se inicia el movimiento del actuador 2, pero también retrocede el actuador del sistema 1. Si se activa nuevamente BA1 se logra la activación del sistema 1 y se desactiva el sistema 2. Después se observa que al presionar el botón de paro

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

BP, se desactivan las salidas de los sistemas que estén operando.

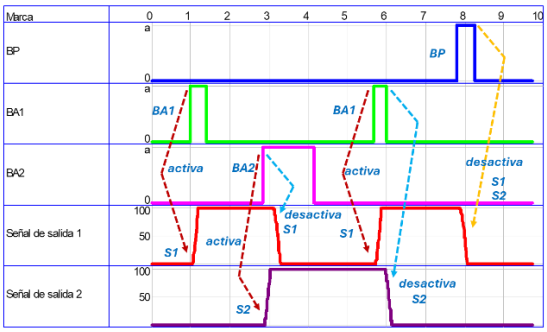


Figura 18 Diagrama de estado control dependiente

CONCLUSIONES

El perfil de egreso en el programa educativo de ingeniería electromecánica establece que los estudiantes deben fortalecer la competencia de diseñar e implementar estrategias y programas para el control y automatización de sistemas electromecánicos. Para el logro de este propósito, en este trabajo se consideró la propuesta de realizar analogías de control eléctrico en diferentes contextos, es decir aplicando los diferentes tipos de simbología o normas, ya sea americana o europea, así como en diferentes tipos de aplicaciones de automatización interactuando señales de entrada y de salida, tales como en arrancadores de motores, sincronización de indicadores luminosos o auditivos, etc.

Esta propuesta de analogía entre un sistema eléctrico y un sistema neumático, se basa literalmente en la relación de utilización de elementos de sistemas eléctricos tales como sensores de entrada como los pulsadores NA y NC, solenoides de contactores y/o relevadores de control, así como sus respectivos contactos instantáneos NA y NC con su contraparte neumática mediante válvulas de control 3/2 NA y NC, válvulas 5/2 de activación directa a actuador (cilindro) y el empleo de señales de realimentación para el control propuesto, según la aplicación de automatización.

.

La propuesta tiene el objetivo de consolidar los procesos de aprendizaje en las disciplinas de control y automatización, visualizando la estrecha relación que existe entre las asignaturas de controles eléctricos y sistemas hidráulicos y neumáticos de potencia mediante las analogías indicadas en este trabajo y que como trabajo futuro, con base en el entendimiento y comprensión asimilado, generar proyectos de investigación para la realización de esquemas de automatización mejorados mediante el uso de tecnologías de vanguardia.

BIBLIOGRAFÍA

[1] Wildi Theodore, Máquinas Eléctricas y Sistemas de Potencia (6ª. edición) Pearson Prentice Hall
[2] Steren, EL ABC de la electrónica https://www.freelibros.net/manual/el-abc-de-la-electronica-steren
[3] Chapman S., Máquinas Eléctricas (5a. edición) Mc Graw Hill.
[4] Henao E., Monroy M.; Método tabla de secuencias para la solución de circuitos neumáticos e hidráulicos, Revista Técnica de la Facultad de Ingeniería Universidad del Zulia, Vol. 35, No. 2; pp .132-140, ISSN 0254-0770.
[5] Haring W., Metzgen M., Weber R., 2005, Neumática Nivel Básico; Festo Didactic Gmbh & Co.
[6] Art System, Festo Fluid Sim Neumática manual de Usuario; Festo Didactic Gmbh & Co.

AUTORIZACIÓN Y RENUNCIA.

Los autores del presente artículo autorizan al TecNM/Instituto Tecnológico de Zacatepec para publicar el escrito en el libro electrónico del CITID 2025. El TecNM/ITZ o los editores no son responsables ni por el contenido ni por las implicaciones de lo que está expresado en el escrito.

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

ESTUDIO HIDROLÓGICO CUENCA DEL RÍO DULCE, MUNICIPIO DE TLALTIZAPÁN DE ZAPATA, MORELOS.

J. M. Ramírez Cuevas[1], D. Zúñiga Malpica[1], J. A. Uribe Medina[1], M. Zuñiga Ortíz[2]

[1] Maestro en Ciencias en Hidráulica. Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Zacatepec, Departamento de Ciencias de la Tierra, jose.rc@zacatepec.tecnm.mx; Teléfonos: 734-34-3-13-94, ext. 263. C.P.: 62780.
[1] Maestro en Administración de la Construcción. Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Zacatepec, Departamento de Ciencias de la Tierra, david.zm@zacatepec.tecnm.mx. Teléfonos: 734-34-3-13-94, ext. 263. C.P.: 62780.
[1] Ingeniero Civil. Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Zacatepec, Departamento de Ciencias de la Tierra, jorge.um@zacatepec.tecnm.mx. Teléfonos: 734-34-3-13-94, ext. 263. C.P.: 62780.
[2] Ingeniero Civil. H. Ayuntamiento de Tlaltizapán de Zapata, Morelos. Comité de Planeación de Desarrollo Municipal (COPLADEMUN), zunigaortizm32@gmail.com. Teléfono: 734-106-9688. C.P.: 62770

Resumen -- La información presentada en el siguiente artículo aborda el estudio hidrológico de la cuenca del río Dulce y la zona de inundación localizada en el Municipio de Tlaltizapán de Zapata, Morelos, con el propósito de entender y conocer la problemática y generar posibles soluciones de mejoramiento para mitigar las consecuencias derivadas del desbordamiento del río Dulce. El presente trabajo expone la solución técnica de protección de las márgenes del río para evitar la constante amenaza de inundación de las comunidades cercanas al cauce del río en la zona de inundación. Con este estudio se proponen medidas para resolver o disminuir los efectos presentados en la zona de inundación del río Dulce, evitando con ello pérdidas materiales y posibles pérdidas humanas.

Palabras Clave: cuenca, hidrométrica, avenida máxima.

Abstract -- The information presented in the following article addresses the hydrological study of the Dulce River Basin and the flood zone located in the Municipality of Tlaltizapán de Zapata, Morelos, with the aim of understanding and analyzing the issue to develop potential improvement solutions that mitigate the consequences of the Dulce River's overflow. This study presents a technical solution for the protection of the riverbanks to prevent the constant threat of flooding in communities near the river's course within the flood zone. This study proposes measures to resolve or reduce the effects presented in the flood zone of the Dulce River, thereby preventing material losses and potential human casualties.

Key words – basin, hydrometric, maximum avenue

INTRODUCCIÓN

Para implantar acciones tendientes a disminuir los efectos de una inundación es necesario conocer anticipadamente la respuesta hidrológica de la cuenca a una lluvia de cualquier intensidad y duración que puede llegar a presentarse [1].

La salida de la cuenca que nos interesa se localiza en la zona de inundación que se presenta en el cruce del río Dulce con la carretera estatal Zacatepec-Tlaltizapán, en el municipio de Tlaltizapán de Zapata, Morelos. La superficie de la cuenca sujeta a inundaciones tiene un área estimada de 10 km^2, el 60% corresponde al ejido de Tlaltizapán de Zapata con los campos los sauces, la oricera y casa blanca. La actividad económica de la región depende principalmente del turismo por su ruta de balnearios y manantiales, y su zona arqueológica y colonial donde destacan haciendas, conventos, iglesias y museos, el cultivo de granos y cereales, caña de azúcar, maíz, jícama, hortalizas, frutas, flores y plantas como berros, pipizcas, la crianza de ganado bovino, porcino, ovino, y en menor escala la avicultura y la apicultura [1] Estas actividades se ven frecuentemente paralizadas por las inundaciones producidas en época de lluvias en la parte baja de la cuenca en el municipio de Tlaltizapán, provocando un retraso en el desarrollo económico de la zona, y la afectación de áreas de cultivo, afectando con ello la calidad de vida de sus habitantes [1]. Por esto, se llega a tener una gran problemática en ocasiones cuando se presentan inundaciones, quedan incomunicando esta zona y región varias horas o inclusive días; lo que ha generado como objetivo presentar en este artículo algunas soluciones, y así evitar o minimizar esta problemática.

DESARROLLO

Problemática.
Dentro de las principales variables que intervienen en el desbordamiento del escurrimiento del río Dulce se tienen [1]:

- La cuenca del río Dulce tiene aportaciones de escurrimiento que dependen de los fenómenos hidrometeorológicos y del cambio de uso del suelo de zona agrícola a superficie para desarrollo inmobiliario.
- El cauce principal del río es sinuoso, lo que provoca el depósito de material de arrastre.

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

- Existe en el cauce residuos sólidos domésticos e industriales y desechos de árboles que ocasionan taponamientos
- En gran medida las inundaciones presentadas en el río Dulce ejido de Tlaltizapán se deben a que se continúa invadiendo la zona federal del mismo
- En septiembre de 2024 el puente sobre la carretera Zacatepec–Tlaltizapán fue rebasado en cinco ocasiones alcanzando un valor estimado de 0.65m por encima del nivel del camino y el puente sobre la carretera Jojutla–Yautepec fue rebasado al menos en dos ocasiones

Antecedentes
El río Dulce no cuenta con estudios previos de referencia sobre el comportamiento hidráulico del cauce. El río Dulce es una microcuenca que pertenece a la cuenca del río Yautepec que a su vez entrega sus aportaciones a la cuenca del río Amacuzac, que pertenece a la cuenca del río Balsas.

La salida de la cuenca del río Dulce hasta está localizada en el cruce con la carretera estatal Zacatepec-Tlaltizapán tiene un área de 357.10 km2. La longitud del cauce principal es de 35 Km. de los cuales 20 Km pertenecen a la zona baja en donde al menos en un tramo de 5 Km se presenta el desbordamiento del río ocasionando problemas de inundación en una superficie estimada [1] de 7.0 a 10.0 km^2. Figura 1

Figura 1 Avenida máxima río Dulce gasto estimado Q=230.00 m^3/seg

Fundamento Teórico.
Para entender las propiedades fisiográficas definiremos algunos de los conceptos más importantes del estado del arte, cuando se realizan estudios de avenidas máximas de un río en una cuenca.

Una <u>*cuenca*</u> es una unidad morfológica integral que incluye todo el concepto de cuenca hidrográfica, abarcan en su contenido, toda la estructura hidrológica superficial e hidrogeológica subterránea del acuífero como un todo [2].

Las cuencas hidrológicas se pueden subdividir en tres zonas de funcionamiento hídrico principales: zona de cabecera, zona de captación y transporte, zona de emisión y salida [2].

<u>*Parteaguas*</u>: Línea imaginaria que divide y limita que las vertientes hidrográficas continuas, se ubica en la parte más altas de las montañas o cerros que es el límite natural, es decir, es el límite en el cual al momento de presentarse una precipitación las aguas superficiales se dirigen hacia vertientes distintas de aguas arriba hacia aguas abajo [3].

<u>*Área de la cuenca*</u>: Es la superficie del terreno que contribuye al escurrimiento, dirigiéndolo de sus tributarios hacia el cauce principal, delimitada por el parteaguas o línea imaginaria que se ubica en los puntos de mayor elevación topográfica [4], [5].

<u>*Pendiente media de la cuenca*</u>: Es la pendiente media representativa de toda la configuración topográfica de la cuenca. La pendiente de la cuenca influye en una buena parte la velocidad con que se da la escorrentía superficial y afecta, por lo tanto, el tiempo que lleva el agua de lluvia para concentrarse en los lechos fluviales que constituyen la red de drenaje de las cuencas [6]. Por lo que la pendiente media de la cuenca es un factor que influye en el proceso de infiltración y escurrimiento superficial [7]. Siendo un parámetro de importancia, pues da un índice de la velocidad media de la escorrentía y su poder de arrastre y de la erosión sobre la cuenca [8].

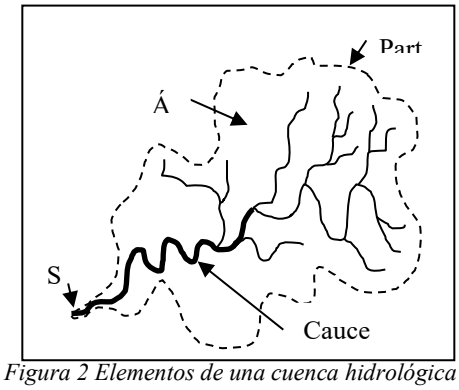


Figura 2 Elementos de una cuenca hidrológica

<u>*Elevación media de la cuenca*</u>: Es la altura media de la cuenca sobre el nivel del mar o cualquier otra referencia.

<u>*Pendiente media y longitud del cauce principal*</u>: Es la pendiente media del cauce principal o corriente de mayor longitud dentro de la cuenca, medida desde su inicio hasta el sitio donde se ubicará la salida de la cuenca. Las corrientes de menor longitud se consideran tributarias del cauce principal [7].

<u>*Coeficiente de rugosidad*</u>: Son los coeficientes que permiten determinar, mediante el método de Manning, la velocidad y el gasto del flujo para cada uno de los tramos de las secciones hidráulicas consideradas. Estos coeficientes están determinados por las condiciones del

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

cauce principal y, en su caso, de sus llanuras de inundación, dadas por el tipo, la densidad y la distribución de la vegetación, por las características de los materiales que constituyan el cauce y por los tirantes de agua [7].

Coeficiente de escurrimiento de la cuenca: La determinación de la cantidad de agua de lluvia en exceso es función directa de las características fisiográficas de la cuenca y del uso del suelo, cobertura vegetal, textura y condición hidrológica de esta. Estos últimos factores son utilizados para definir lo que se conoce como coeficiente de escurrimiento "C" o número de escurrimiento "N".

Este coeficiente es una variable que tiene mayor incertidumbre al determinarse debido a que varía de acuerdo con las condiciones de la superficie, la cubierta vegetal y el tipo de suelo. Por ejemplo, las superficies que son relativamente impermeables como las calles tienen un coeficiente de escurrimiento aproximado a uno mientras que las superficies con vegetación y suelos que permita la infiltración tienen coeficientes más cercanos al cero [11].

Red de Drenaje: Arreglo geométrico de los cauces de las corrientes naturales de la cuenca se define con base en: tipo de corrientes, orden de las corrientes, longitud de tributarios, densidad de corriente y densidad de drenaje [9].

El tipo de Corrientes, según el tiempo que dura el escurrimiento en el cauce, las corrientes se clasifican en:

a) Efímera. Se presenta cuando llueve e inmediatamente después.
b) Intermitente. Ocurre la mayor parte del tiempo, sobre todo en época de lluvias.
c) Perenne. Ocurre todo el tiempo, su caudal es alimentado por agua subterránea. [9], [10].

Orden de las corrientes: Según el grado de bifurcación de los cauces dentro de una cuenca se tiene [9]:

Grado 1 – corrientes sin tributarios.
Grado 2 – corrientes con tributarios de grado 1
Grado 3 – corrientes con 2 o más tributarios de grado 2, etc.

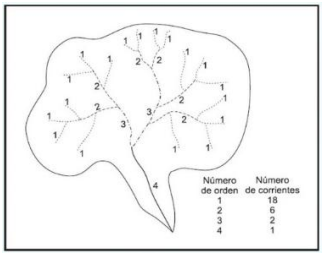


Figura 3 Método para determinar el orden de las corrientes de una cuenca.

Longitud de los tributarios: Proporciona una idea de la pendiente de la cuenca y el grado de drenaje, se mide a lo largo del valle sin tomar en cuenta los meandros.

Densidad de corriente: Relación entre el número de corrientes y el área drenada.

$$Ds = \frac{Ns}{A} \qquad \text{…. Ec. (1)}$$

Donde:
A = área total de la cuenca, en km^2
Ns = número de corrientes perennes e intermitentes.
Ds = densidad de corriente.

Densidad de drenaje: Relación entre la longitud total de las corrientes perennes e intermitentes y el área de la cuenca.

$$Dd = \frac{L}{A} \qquad \text{… Ec. (2)}$$

Donde:
Dd = densidad de drenaje
L = suma de las longitudes de corrientes perennes e intermitentes (m).
A = área de la cuenca (km^2).

Uso del suelo, cobertura vegetal y condición hidrológica:
Un aspecto importante en el estudio hidrológico de una cuenca de aportación es la capacidad que tiene de interceptar o infiltrar el agua de lluvia, que, para el caso de la hidrología de superficie, sería la definición de la cantidad de lluvia en exceso, es decir la complementaria de la lluvia total y que es la que no se pierde y genera el escurrimiento tanto por la superficie del terreno, como su concentración por medio de cauces naturales (arroyos y ríos) [9].

Avenida Máxima: elevación rápida y comúnmente breve del nivel del agua (y por lo tanto del gasto), en un río, hasta un máximo desde el cual dicho nivel desciende a menor velocidad.

Pico de avenida: valor máximo del gasto a nivel de la superfície libre del agua durante la avenida, también llamado avenida máxima instantânea que pueden presentarse varias en un año.

Hidrograma de la avenida: gráfica que representa la variación en del gasto de la avenida a traves del tiempo

Avenida de proyecto: hidrograma de la avenida o gasto máximo adoptado para el proyecto de una estructura hidráulica, o para el control de un cauce, teniendo en cuenta los factores económicos e hidrológicos.

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

Características de la cuenca

La cuenca del río Dulce queda comprendida en la región hidrológica No.18 (Río Balsas) y la salida de la misma se localiza entre los paralelos 18.690636° de latitud norte y el meridiano 99.129590° de longitud oeste, elevación de 938.0 msnm. La cuenca del río Dulce es parte de la cuenca del río Yautepec. Figura 4

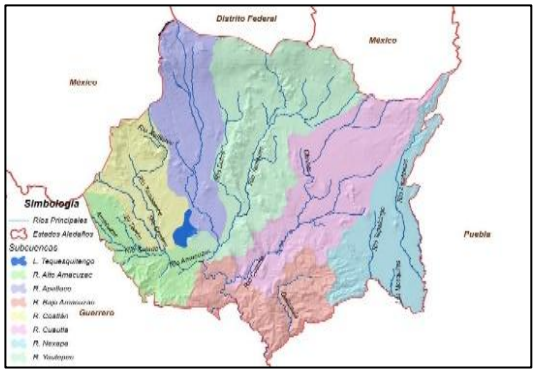


Figura 4 Cuencas hidrológicas de Morelos. Comisión Estatal del Agua, (CEAGUA), Morelos

Es importante mencionar las siguientes características del río en estudio, como son:

- El río Dulce tiene una cuenca que nace en dos volcanes, el Chichinautzin y el Cuespala, cruza la autopista a la altura de la pera y pasa por la carretera estatal Tepoztlán-Cuernavaca a la altura del poblado de santa Catarina, continua por terrenos comunales de Tepoztlán. Algunas comunidades de Cuernavaca son parte de su cuenca. Pasa también por la mayor parte de la zona industrial y urbana del municipio de Jiutepec y del municipio de Emiliano Zapata y Xochitepec. Cruza el poblado de Temimilcingo y continua por ejidos de Tlaltizapán de zapata.
- Finalmente entrega su escurrimiento al río Yautepec en las juntas de la cabecera Municipal de Tlaltizapán de Zapata, Morelos.
- El río Dulce actualmente ha perdido su cauce natural debido principalmente al depósito del transporte de sedimentos. Estas condiciones y la pendiente mínima del cauce han permitido el depósito de sedimentos, además el río se encuentra con obstáculos como troncos de árboles, basura, llantas, etc [1].

Tabla 1. Principales características físicas de la cuenca del río Dulce (SIATL – INEGI)

PROPIEDAD	VALOR
Elevación máxima	3386 m
Elevación media	2153 m
Elevación mínima	921 m
Longitud	63981 m
Pendiente media	3.85%
Tiempo de concentración	338.56 (min)
Área drenada	257.10 km2

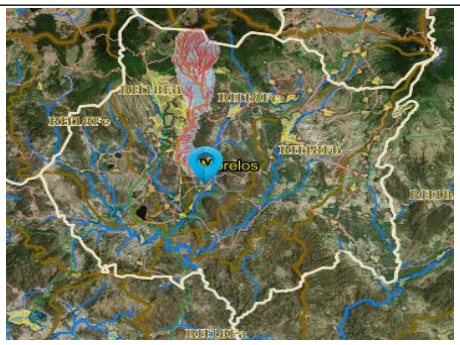


Figura 5 Localización cuenca río Dulce en el estado de Morelos (SIATL-INEGI)

Dentro de otra característica importante de la Cuenca donde se sitúa el río Dulce, se tiene que la topografía de la cuenca se puede localizar en cartas topográficas, con escala 1:50000 del Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI), carta topográfica de Milpa Alta E14A49, carta topográfica de Cuernavaca E14A59, y carta topográfica de Jojutla E14A69.

Respecto a la climatología e hidrometría dentro de la cuenca, se menciona que, fuera de la cuenca se localizan 7 estaciones climatológicas cercanas con registrados de precipitación y evaporación desde 1961. Mientras que el cauce del río Dulce no cuenta con estaciones hidrométricas.

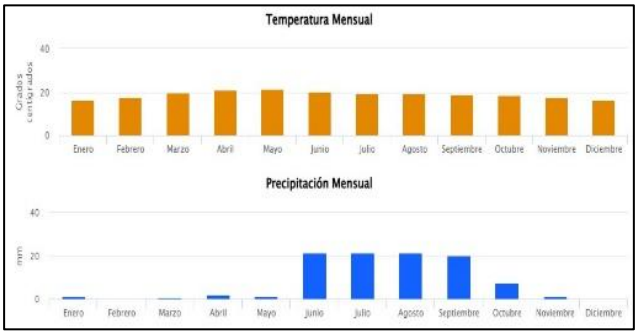


Figura 6 Temperatura y precipitación mensual (SIATL-INEGI)

Respecto al suelo y vegetación, se tiene que la que más abunda en la cuenca, se encuentra la vegetación secundaria arbórea de selva baja caducifolia, agricultura de temporal y agricultura de riego anual y semipermanente. Ver figura 7.

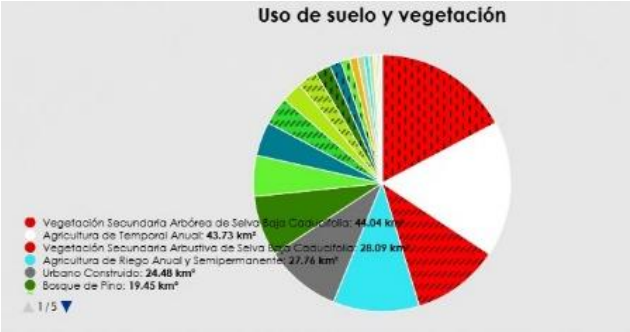


Figura 7 Uso del suelo y vegetación (SIATL-INEGI)

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

Respecto al coeficiente de escurrimiento de la cuenca, es importante citar, que Chow (1994) definió el coeficiente de escurrimiento como la relación entre el escurrimiento directo y la intensidad promedio de la precipitación en una tormenta [12]. Donde también puede interpretarse como la relación entre el volumen de escurrimiento directo y el volumen de precipitación en la cuenca, en un periodo de tiempo dado. Para nuestro caso se tiene la siguiente figura número 8 donde se tienen los siguientes valores.

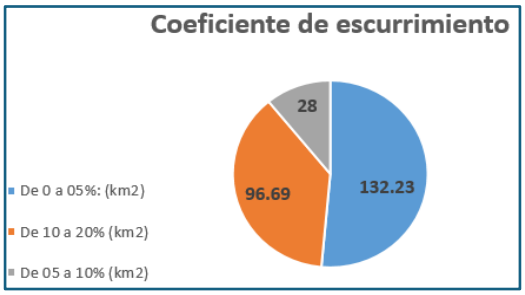


Figura 8 Coeficiente de escurrimiento SIATL-INEGI

La cuenca del río Dulce no cuenta con datos medición hidrométrica, por lo que se conoce como una *cuenca no aforada*. El conocimiento de la avenida máxima en cuencas no aforadas es de vital importancia para diseñar obras hidráulicas y de cruce de carreteras como un puente, un sistema de alcantarillado, una presa, bordos y terraplenes, etc.

Fórmula Racional

$$Q = 0.278CiA \qquad \text{… Ec (3)}$$

Donde:
Q = Gasto de pico de la avenida máxima (m^3/seg).
C = Coeficiente de escurrimiento que depende del tipo de área drenada.
i = Intensidad media de la lluvia para una duración igual al tiempo de concentración (tc) de la cuenca en mm/hr
A = Área de la cuenca en km^2.

Respecto a la intensidad de la lluvia, se define que esta, se refiere a la velocidad con que se precipita la lluvia, es decir es la relación de la altura de la precipitación entre la duración de la lluvia que corresponda:

$$i = \frac{hp}{d} \qquad \text{… Ec. (4)}$$

Donde:
hp = altura de precipitación en mm
d = duración de la precipitación en unidades de tiempo (hrs.).

Una vez conocido la información anterior se procede a realizar los cálculos para determinar el gasto que se presenta en una avenida máxima con la información citada.

DISCUSIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Para determinar la avenida máxima que se puede presentar en la cuenca del río Dulce, aplicaremos las fórmulas empíricas que presentamos en el marco teórico. Aplicando la Fórmula Racional se tiene:

DATOS
C = Coeficiente de escurrimiento que depende del tipo de área drenada.
A = 257.10 km^2.
curvas de hp-d-Tr.

Gasto pico
$Q = 0.278CiA$

El coeficiente de escurrimiento de la aplicación de software SIATL – INEGI se tiene: C_1=0.05, C_2=0.20 y C_3=0.40

$$C = \frac{\sum_1^n C_i A_i}{A_t} = \frac{C_1A_1 + C_2A_2 + C_3A_3}{A_t}$$
$$= \frac{(0.05 * 132.23km^2) + (0.20 * 95.69km^2) + (0.40 * 28km^2)}{255.92\ km^2}$$
$$= 0.15$$

La intensidad de lluvia para d = 24 hrs; Tr = 10 años; tenemos i = 16.20 mm/hrs.

Q = 0.278 CiA … Ec. (4)

Q = 0.278x0.15 (16.20mm/hrs.)(255.92 km^2)

Q = 173 m^3/ seg.

Este resultado de la avenida máxima es similar al obtenido por la aplicación de software SIATL-INEGI

A continuación, se muestran las figuras 9 y 10, en las que se aprecia el inicio de la avenida máxima y el cauce del río Dulce inundado.

Figura 9. Inicio de avenida máxima

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

Figura 10. Cauce del río Dulce inundado

En las figuras 11 y 12 se aprecian imágenes del río Dulce en los que se tienen inundación en el mismo, y en conexiones entre comunidades, como las vías de comunicación terrestre, haciendo con esto, que no pueda transitarse durante horas o días.

Figura 11. Puente carretera Tlaltizapán-Zacatepec incomunicado por inundación.

Figura 12 Nivel alcanzado Puente FFCC

De igual manera, en las figuras 13 y 14 se observa el nivel que alcanza el agua producto de la lluvia y escurrimiento, teniendo áreas de parcelas de campo inundadas (figura 13). Mientras tanto, en la figura 14, se aprecia el nivel máximo alcanzado sobre Puente y carretera Tlaltizapán – Zacatepec, lo que deja a estos dos municipios incomunicados y con grandes afectaciones por la inundación.

Figura 13 Nivel de parcelas inundadas en campo experimental CIMMYT (Tlaltizapán).

Figura 14 Nivel máximo alcanzado puente carretera Tlaltizapán-Zacatepec

CONCLUSIONES

Con base en los antecedentes y características de la cuenca y cauce del río Dulce, es necesario tomar medidas de acción inmediatas, de lo contrario una inundación provocada por un caudal superior al presentado el día 10 de septiembre de 2024 tendrá la posibilidad de ocasionar daños severos a la zona y posiblemente pérdidas de vidas humanas y afectaciones a la salud. [1]

De los métodos existentes para estimar la avenida máxima, el método racional tiene mejor aplicación práctica, para ello se contó con información de datos climatológicos de la aplicación del software SIATL - INEGI.

Para mitigar la problemática presentada, es urgente tomar acciones que pueden ser de carácter no estructural y estructural [1]:

1. Acciones no estructurales de inmediato

Las acciones no estructurales no interfieren con el escurrimiento del río ni lo modifican, únicamente permiten avisar o alertar con oportunidad a los habitantes de las comunidades cercanas a las márgenes del río que pueden ser afectadas [1]:

a) Instalar un sistema de Alarma mediante pluviógrafos y estaciones de radio. (Protección civil del estado y Municipal). [1]
b) Delimitación inmediata de la zona Federal del río (Comisión Nacional del Agua). [1]

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

c) Elaborar un plan y reglamento de protección civil orientado a la función, prevención, control y operación de acciones que garanticen la seguridad de bienes y personas que viven en las zonas de inundación del río Yautepec. [1]
d) Contar con un reglamento de protección civil aprobado por H. cabildo del Municipio de Tlaltizapán y por el H. Congreso Legislativo del Estado de Morelos [1].
e) Es conveniente definir un programa para la presentación del Plan y de su reglamento que, con base en las acciones que para este efecto se establezcan, se proceda a celebrar pláticas, seminarios, foros de consulta y decisión, etc. [1]
f) Emprender campañas de difusión mediante revistas, boletines, folletos, discusión en foros y paneles y en cualquier otro recurso de información que refuerce la aceptación y participación de la sociedad particularmente cuando se presenten las avenidas máximas. [1]

2. Acciones estructurales corto plazo

Acciones estructurales que se refieren a obras de protección contra inundaciones que evitan que zonas adyacentes al río Dulce sean inundadas año con año en época de lluvias. Estas obras se construyen para que interfieran directamente con el escurrimiento permitiendo el desvío o encauzamiento de la corriente. Las principales obras de protección que pueden realizarse son [1]:

a) Limpieza general del cauce. [1]
b) Bordos y terraplenes longitudinales localizados a lo largo o ambas márgenes del río. [1]
c) Bordos y terraplenes transversales a la corriente para riego, estanques psicolas y recarga de acuíferos.
d) Desvíos permanentes por medio de cauces de alivio.
e) Corte de meandros y rectificación del cauce.
f) Dragado y desazolve.
g) Puentes en cruces con carreteras con obras de protección, terraplenes y obras complementarias.
h) Presas derivadoras con estructuras de control de avenidas o rompe picos.

Es importante implementar una comisión de cuenca del río Dulce que incluya los gobiernos municipales de Tlaltizapán de Zapata, Emiliano Zapata, Jiutepec, Tepoztlán y Huitzilac para regular el uso racional del escurrimiento generado por la red de drenaje de la cuenca.

Las obras de protección permiten seguridad a la zona de inundación, sin embargo, dada la magnitud de los trabajos se requiere que intervenga la Comisión Nacional del Agua, el Gobierno del Estado a través de la Secretaría de Desarrollo Urbano, Vivienda y Obras Públicas, la Comisión Estatal del Agua y la Secretaría de Desarrollo Social. [1]

BIBLIOGRAFÍA

[1] Zuñiga Malpica, David (2010). Zona de inundación de la cuenca hidrológica del Río Yautepec. Asociación Mexicana de Hidráulica. Revista Digital Tlaloc AMH. Edición 46, enero – marzo 2010. https://amh.org.mx/wp-content/uploads/2024/10/TLALOC_46_baja.pdf

[2] Universidad Autónoma de Nayarit. Centro de Vinculación Empresarial y Desarrollo Sustentable. Análisis Regional de la Gestión del Agua en la región Centro Occidente. Parte II. Región Centro Occidente, Programa de Desarrollo. Fideicomiso para el Desarrollo de la región Centro Occidente (FIDERCO). https://www.centroccidente.org.mx/downloads/08%20Analisis-Gestion-Agua-2-3.pdf

[3] Vásconez Michelle, Mancheno Andrea, Álvarez César, Prehn Claudi, Cevallos Carina y Ortíz Liliana. Cuencas Hidrográficas 2019. Universidad Politécnica Salesiana, 1ra Edición. https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/19038/1/Cuencas%20hidrogr%C3%A1ficas.pdf

[4] Fundamentos de hidrología de superficie. Aparicio Mijares, Francisco Javier. Limusa Noriega Editores. 2001

[5] David Zúñiga Malpica, Apuntes del curso de "Hidrología Superficial", Tecnológico Nacional de México-Instituto Tecnológico de Zacatepec. 2015

[6].Hernández Huéramo David (2007). Manual de Prácticas de Hidrología Superficial 7º semestre. Laboratorio de Hidráulica de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Facultad de Ingeniería Civil. Departamento de Hidráulica. https://julianrojo.weebly.com/uploads/1/2/0/0/12008328/morfometria.pdf

[7] Secretaría de Infraestructura, Comunicaciones y Transportes. Instituto Mexicano del Transporte. M·PRY·CAR·1·06·003/24. Libro: PRY. PROYECTO Tema: car. Carreteras. Parte: 1 Estudios. Título: 06. Estudios hidráulico-hidrológicos para puentes. Capítulo: 003 Procesamiento de Información. https://normas.imt.mx/storage/normativa/M-PRY-CAR-1-06-003-24.pdf

[8] Sociedad Geográfica de Lima. Global Water Partnership South America. Foro Peruano para el agua. Que es una cuenca hidrológica. Cartilla Técnica "Contribuyendo al desarrollo de una Cultura del Agua y la Gestión Integral del Recurso Hídrico". Lima Perú 2011. https://www.gwp.org/globalassets/global/gwp-sam_files/publicaciones/varios/cuenca_hidrologica.pdf

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

[9] Pérez Morales, Guillermo Benjamín y Rodríguez Castro J. Alberto (2009). Apuntes de Hidrología Superficial, nuevo plan 2009. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Facultad de Ingeniería Civil. https://idoc.pub/documents/hidrologia-superf-8jlk6kg3q745

[10] Breña Puyol Agustín Felipe y Jacobo Villa Marco Antonio (2006). Principios y Fundamentos de la Hidrología Superficial. Universidad Autónoma Metropolitana. https://agua.org.mx/wp-content/uploads/2012/04/PrincipiosyFundamentosdelaHidrologiaSuperficial.pdf

[11] González Pérez Alejandro Ramón (2023). Análisis de Factibilidad técnica para la implementación de una central mini – hidroeléctrica en la presa José Antonio Álzate, en el municipio de Temoaya, Estado de México. Tesis de Ingeniería Civil. Facultad de Estudios Superiores Acatlán de la Universidad Nacional Autónoma de México. http://132.248.9.195/ptd2023/junio/0840669/0840669_A1.pdf

[12] Chow, Ven Te, (1980). Hidrología aplicada. Editorial Mc Graw Hill.

AUTORIZACIÓN Y RENUNCIA.

Los autores del presente artículo autorizan al TecNM/Instituto Tecnológico de Zacatepec para publicar el escrito en el libro electrónico del CITID 2025. El TecNM/ITZ o los editores no son responsables ni por el contenido ni por las implicaciones de lo que está expresado en el escrito.

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

CITID 2025 ISSN: 2992-8516

ANÁLISIS NORMATIVO DE LAS CONDICIONES DE REGULARIDAD DE LAS EDIFICACIONES PARA EL DISEÑO ESTRUCTURAL POR SISMO

Ing. Felipe Sánchez Sánchez[1], Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Zacatepec, Departamento de Ciencias de la Tierra, felipe.ss@zacatepec.tecnm.mx, 7341019671, Ing. Mayra Ortiz Gómez[1], Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Zacatepec, Departamento de Ciencias de la Tierra, mayra.og@zacatepec.tecnm.mx,777180 7826, Andrés Alfredo Pacheco López[2], Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Zacatepec, L20090687@zacatepec.tecnm.mx, 7773039498.

Resumen -- El artículo analiza las condiciones de regularidad necesarias para el diseño estructural de edificaciones ante sismos, basándose en manuales y normativas vigentes, como la Manual de Diseño de Obras Civiles de la CFE 2015, el libro Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures, las Normas Técnicas Complementarias (NTC) de diseño por viento, las NTC de diseño por sismo, así como normas y manuales de otras entidades de la República Mexicana. Su objetivo es establecer criterios claros que permitan clasificar una edificación según su nivel de regularidad, asegurando una respuesta sísmica óptima durante un terremoto. Se enfoca en aspectos como la simetría, uniformidad en la distribución de masas, rigidez y resistencia, así como la continuidad de los elementos estructurales. Estos factores son clave para determinar si una estructura es regular o irregular, lo que influye directamente en su comportamiento ante fuerzas sísmicas. Además, se realizó una evaluación de irregularidades en una edificación, lo que permitió contrastar la teoría con casos prácticos. El texto destaca la importancia de seguir normativas específicas y adaptar el diseño para garantizar la seguridad y reducir el riesgo de colapso.

Palabras Clave: Condiciones de regularidad, normativa, edificaciones, diseño por sismo, daños, estructura, edificación, sismo, manual, pandeos, volcamiento, pisos, columnas, inestabilidad, torsión, etc.

Abstract -- The article analyzes the regularity conditions necessary for the structural design of buildings in the face of earthquakes, based on current manuals and regulations, such as the Manual de Diseño de Obras Civiles by CFE 2015, the book Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures, the Complementary Technical Standards (NTC) for wind design, the NTC for seismic design, as well as standards and manuals from other entities in the Mexican Republic. Its objective is to establish clear criteria to classify a building according to its level of regularity, ensuring an optimal seismic response during an earthquake. It focuses on aspects such as symmetry, uniformity in mass distribution, stiffness and strength, as well as the continuity of structural elements. These factors are key to determining whether a structure is regular or irregular, which directly influences its behavior under seismic forces. Additionally, an evaluation of irregularities was conducted on a one building, allowing for a comparison between theory and practical cases. The text emphasizes the importance of following specific regulations and adapting the design to ensure safety and reduce the risk of collapse.

Key words – Conditions of regularity, regulations, buildings, earthquake design, damage, structure, building, earthquake, manual, buckling, overturning, floors, columns, instability, torsion, etc.

INTRODUCCIÓN

Los sismos son fenómenos naturales que provocan vibraciones en la tierra, estas van desde perceptibles hasta destructivas, y que son efecto de la liberación repentina de energía en la corteza terrestre. Esta energía se propaga en forma de ondas sísmicas.

El interés por los sismos data de miles de años, y ha sido uno de los fenómenos naturales que han acompañado a los seres humanos a través de su historia. La sismicidad es un reflejo de la evolución del conocimiento humano, que van desde la explicación mitológica, hasta una explicación científica de los procesos geológicos que dan origen a los sismos. México es un país que se ha caracterizado por su mayor actividad sísmica en el mundo, esto debido a su ubicación geográfica y su geología compleja, a lo largo de su historia ha experimentado sismos devastadores que han dejado huella en la sociedad, infraestructura y cultura.

México se encuentra en una zona de alta sismicidad debido a la interacción de cinco placas tectónicas (Placa de Cocos, Placa de Norteamérica, Placa del pacífico, placa de Rivera y Placa del Caribe). La subducción de la Placa de Cocos bajo la Placa de Norteamérica es principalmente la causa de los sismos en la costa del Pacífico.

Los sismos más significativos en la historia de México que han marcado su historia:

- Sismo de 1957, M 7.7, conocido como el "Terremoto del Ángel", causo daños en CDMX.
- Sismo de 1985, M 8.1, uno de los más destructivos, ocurrió el 19 de septiembre y dejó más de 10,000 muertos, y daños severos en CDMX.
- Sismo de 2017, M7.1, ocurrido el 19 de septiembre, afecto principalmente la CDMX,

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

Puebla y Morelos, dejando 300 muertos y daños significativos.

En toda la república mexicana no hay similitud de actividad sísmica, hay estados donde se tiene mayor peligrosidad sísmica y en otros una actividad nula, como se muestra en la ilustración 1. Siendo la zona A con una baja actividad sísmica, la zona B con intensidad moderada, la zona C una intensidad alta y la zona D una zona de intensidad muy alta.

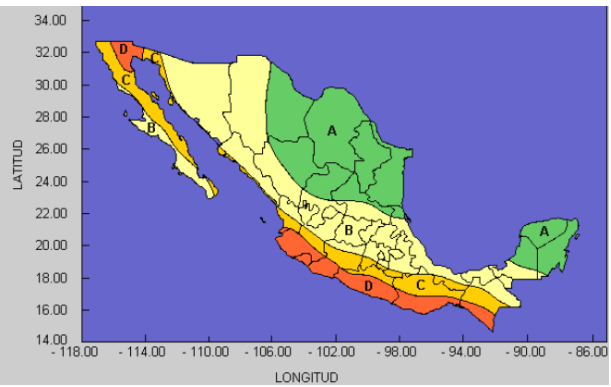


Ilustración 17 Regionalización Sísmica de la República Mexicana (CFE, 2008)

Una de las razones por la que México es clasificado como uno de los países, con mayor actividad sísmica es por su tectónica de placas que interceptan en territorio mexicano, como se muestra en la ilustración 2, la más activa es la placa tectónica de Cocos, seguida de la Placa de Rivera, la Placa Norteamérica y la placa del Caribe. La confluencia de las placas origina continuamente sismos de grandes magnitudes, principalmente de sismos de subducción de la placa de Rivera y Cocos bajo la placa de Norteamérica, sobre todo debido a sismos intraplaca.

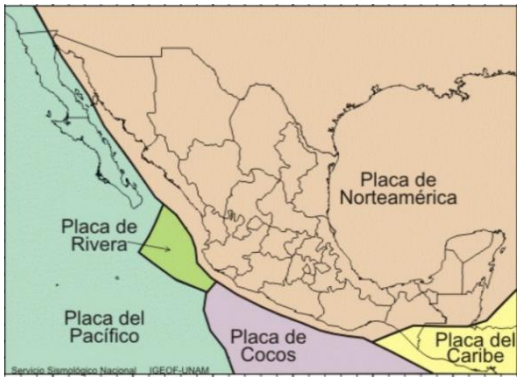


Ilustración 18 Placas tectónicas que interactúan en México (SSN & Instituto de Geofísica de ma UNAM, 2021)

En México, dada su alta actividad sísmica y el constante riesgo de que ocurra un sismo de magnitud significativa que pueda generar un desastre en las estructuras, el diseño de las edificaciones no debe tomarse a la ligera. Por ello, existen una serie de manuales y normativas que establecen lineamientos precisos para garantizar la seguridad de las construcciones. Estos documentos destacan la importancia de que las estructuras sean regulares, es decir, que presenten una distribución equilibrada de masas y rigideces, lo que permite una mejor respuesta ante los movimientos telúricos. Este enfoque no solo busca minimizar los daños en la estructura, sino también evitar su colapso y, sobre todo, prevenir la pérdida de vidas humanas, priorizando la seguridad y la integridad de las personas.

Más adelante se detallan cada una de las condiciones de regularidad que establecen los manuales y normativas de diseño estructural para zonas sísmicas, reflejando la importancia de diseñar y construir estructuras que cumplan con estos parámetros. Estas condiciones, que incluyen aspectos como la simetría, uniformidad en la distribución de masas y rigideces, continuidad de los elementos resistentes, y la correcta configuración estructural, son fundamentales para garantizar un comportamiento adecuado ante los efectos de un sismo. Se enfatiza que, al cumplir con estas condiciones de regularidad, se asegura que la estructura sea segura y estable, reduciendo significativamente el riesgo de daños severos o colapso. De esta manera, se prioriza la vida de los usuarios, asegurando que las edificaciones no solo cumplan con los requisitos técnicos, sino que también brinden protección y confianza ante eventos sísmicos de gran magnitud.

DESARROLLO

Metodología

El diseño estructural por sismo es un aspecto crítico en la ingeniería civil, ya que garantiza la seguridad y funcionalidad de las estructuras ante eventos sísmicos. Para lograr este objetivo, es fundamental comprender y aplicar las normativas vigentes que establecen las condiciones de regularidad y los criterios de diseño. Este artículo tiene como objetivo realizar un análisis normativo comparativo entre tres documentos clave: el Manual de Diseño de Obras Civiles. Diseño por Sismo de la Comisión Federal de Electricidad (CFE) 2015, el estándar ASCE 7-16 del American Society of Civil Engineers, y la Norma Técnica Complementaria por Sismo 2020 de México. Se abordarán los métodos y criterios utilizados en cada normativa para evaluar las condiciones de regularidad en el diseño estructural por sismo.

Condiciones de Regularidad en el Diseño Estructural por Sismo

Las condiciones de regularidad se refieren a las características geométricas, de masa y rigidez de una estructura que influyen en su comportamiento sísmico. Una estructura regular tiende a tener una respuesta más

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

predecible ante cargas sísmicas, lo que facilita su diseño y análisis. Por el contrario, las estructuras irregulares pueden presentar concentraciones de esfuerzos, torsiones no deseadas y modos de vibración complejos.

Las normativas analizadas establecen criterios específicos para evaluar la regularidad de una estructura, los cuales se dividen en dos categorías principales:

- *Regularidad en planta:* Relacionada con la simetría, distribución de masas y rigidez en el plano horizontal.
- *Regularidad en elevación:* Relacionada con la uniformidad en la distribución de masas, rigidez y resistencia a lo largo de la altura de la estructura.

Condiciones de regularidad del Manual de Diseño de Obras Civiles – Diseño por Sismo, CFE, 2015.

El Instituto Nacional de Electricidad y energías Limpias (INEEL) es una institución altamente capacitada para el estudio sísmico de estructuras, en conjunto con la Gerencia de Ingeniería Civil (GIC) han elaborado y actualizado por más de 40 años el capítulo de Diseño por Sismo del Manual de Obras Civiles de la CFE, dentro de este manual se encuentra la sección 3.3 que habla de estructuras tipo I: Edificios, en su sección 3.3.2 aborda el tema de las condiciones de regularidad.

Para que una estructura pueda considerarse regular, deberá cumplir con las siguientes condiciones, y se considerara irregular si no cumple con una o hasta tres de las condiciones de las siguientes condiciones:

1. Condición de Regularidad 1.

"La distribución en planta de masas, muros y otros elementos resistentes, es sensiblemente simétrica con respecto a dos ejes ortogonales. Estos elementos son sensiblemente paralelos a los ejes ortogonales principales del edificio." (Electricas, 2015)

2. Condición de Regularidad 2.

"La relación entre la altura y la dimensión menor de la base no es mayor que 2.5." (Electricas, 2015)

3. Condición de Regularidad 3.

"La relación entre largo y ancho de la base no excede de 2.5." (Electricas, 2015)

4. Condición de Regularidad 4.

"En planta no se tienen entrantes ni salientes cuya dimensión exceda 20% de la dimensión de la planta media paralelamente a la dirección en que se considera la entrante o saliente." (Electricas, 2015)

5. Condición de Regularidad 5.

"En cada nivel se tiene un sistema de techo o piso rígido y resistente, o que deberá justificarse con resultados de análisis de modelos simplificados del sistema de piso a utilizar." (Electricas, 2015)

6. Condición de Regularidad 6.

"No se tienen aberturas en los sistemas de techo o piso cuya dimensión exceda 20% de la dimensión de la planta medida paralelamente a la dirección en que se considera la abertura. Las áreas huecas no ocasionan asimetrías significativas ni difieren en posición de un piso a otro y el área total de aberturas no excede, en ningún nivel, 20% del área en planta." (Electricas, 2015)

7. Condición de Regularidad 7.

"El peso de cada nivel, incluyendo la carga viva que debe considerarse para diseño sísmico, no es mayor que 110% ni menor que 70% del correspondiente al piso inmediato inferior. El ultimo nivel de la construcción está exento de condiciones de peso mínimo." (Electricas, 2015)

8. Condición de Regularidad 8.

"Ningún piso tiene un área, delimitada por los paños exteriores de sus elementos resistentes verticales, mayor que 110% ni menor que 70% de la del piso inmediato inferior. El último piso de la construcción está exento de condiciones de área mínima. Además, el área de ningún entrepiso excede en más de 50% a la menor de los pisos inferiores." (Electricas, 2015)

9. Condición de Regularidad 9.

"En todos los pisos, todas las columnas están restringidas en dos direcciones ortogonales por diafragmas horizontales y por trabes o losas planas." (Electricas, 2015)

10. Condición de Regularidad 10.

"La rigidez y la resistencia al corte de cada entrepiso no excede en más de 50% a la del entrepiso inmediato inferior. El ultimo entrepiso queda excluido de esta condición." (Electricas, 2015)

11. Condición de Regularidad 11.

"En cada entrepiso, la excentricidad torsional calculada estáticamente no excede en más de 10% su dimensión en planta, medida paralelamente a la excentricidad torsional" (Electricas, 2015)

Se considerará Fuertemente irregular si las estructuras:

a) La excentricidad torsional calculada estáticamente en algún entrepiso excede más de 20% su dimensión en planta, medida paralelamente a la excentricidad.
b) La rigidez o resistencia al corte de algún entrepiso exceden en más de 100% a la del piso inmediato inferior
c) No cumple simultáneamente con las condiciones 10 y 11 de regularidad descritas anteriormente.
d) No cumple con cuatro o más de las condiciones de regularidad descritas anteriormente.

Condiciones de regularidad del libro Mínimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures, ASCE, 2016

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

El documento de análisis estructural dentro y fuera de Estados Unidos es el estándar ASCE 7 (Cargas Mínimas de Diseño y Criterios Asociados para edificios y otras estructuras), este manual indica los procedimientos para obtener las cargas mínimas que se deben considerar en el diseño estructural, actualmente es adoptado por referencia en el Código Internacional de Construcción (IBC), en la sección de diseño estructural.

En el capítulo 12 Requisitos de Diseño Sísmico para estructuras de edificación de este libro, se describen las características que deben presentar las edificaciones para clasificarlas como irregulares o extremadamente irregulares.

Las condiciones de irregularidad que maneja el libro son dos:

1. *Irregularidades verticales*
2. *Irregularidades horizontales*

Dentro de las irregularidades verticales tenemos:

a) Condición de irregularidad 1a.

"Irregularidad de Rigidez-Piso Blando: Se define una irregularidad de rigidez (piso blando) cuando existe un piso cuya rigidez lateral es menor al 70% de la rigidez en el piso superior o menor al 80% de la rigidez promedio de los tres pisos superiores." (ASCE, 2016).

b) Condición de irregularidad 1b.

"Irregularidad de Rigidez-Piso Extremadamente Blando: Se define una irregularidad de rigidez-piso extremadamente blando cuando existe un piso cuya rigidez lateral es menor al 60% de la rigidez en el piso superior o menor al 70% de la rigidez promedio de los tres pisos superiores." (ASCE, 2016).

c) Condición de irregularidad 2.

"Irregularidad de Peso (Masa): Se define una irregularidad de peso (masa) cuando la masa efectiva de cualquier piso es más del 150% de la masa efectiva de un piso adyacente. No es necesario considerar un techo que sea más liviano que el piso inferior." (ASCE,2016).

d) Condición de irregularidad 3.

"Irregularidad Geométrica Vertical: Se define una irregularidad geométrica vertical cuando la dimensión horizontal del sistema sísmico de resistencia lateral en cualquier piso es más del 130% de la de un piso adyacente." (ASCE, 2016).

e) Condición de irregularidad 4.

"Discontinuidad en el Plano de los Elementos Resistentes Laterales Verticales: Se define una irregularidad de discontinuidad en el plano de los elementos resistentes laterales verticales cuando hay un desplazamiento en el plano de un elemento sísmico vertical de resistencia lateral que resulta en demandas de vuelco en los elementos estructurales de soporte." (ASCE, 2016).

f) Condición de irregularidad 5a.

"Discontinuidad en la Resistencia Lateral-Irregularidad de Piso Débil: Se define una irregularidad de piso débil en la resistencia lateral cuando la resistencia lateral del piso es menor al 80% de la del piso superior. La resistencia lateral de todos los elementos resistentes sísmicos que comparten la cortante del piso para la dirección bajo consideración se toma en cuenta." (ASCE, 2016).

g) Condición de irregularidad 5b.

Discontinuidad en la Resistencia Lateral-Irregularidad de Piso Extremadamente Débil: Se define una irregularidad de piso extremadamente débil en la resistencia lateral cuando la resistencia lateral del piso es menor al 65% de la del piso superior. La resistencia lateral total de todos los elementos resistentes sísmicos que comparten la cortante del piso para la dirección bajo consideración se toma en cuenta." (ASCE, 2016).

Dentro de las irregularidades horizontales tenemos:

a) Condición de irregularidad 1a.

"Irregularidad Torsional: La irregularidad torsional se define como presente cuando el máximo desplazamiento lateral entre pisos, calculado incluyendo la torsión accidental con Ax= 1.0, en un extremo de la estructura transversal a un eje es más de 1.2 veces el promedio de los desplazamientos laterales en los dos extremos de la estructura. Los requisitos de irregularidad torsional en las secciones de referencia solo se aplican a estructuras en las que los diafragmas son rígidos o semirrígidos." (ASCE, 2016).

b) Condición de irregularidad 1b.

"Irregularidad Torsional Extrema: La irregularidad torsional se define como presente cuando el máximo desplazamiento lateral entre pisos, calculado incluyendo la torsión accidental con Ax= 1.0, en un extremo de la estructura transversal a un eje es más de 1.4 veces el promedio de los desplazamientos laterales en los dos extremos de la estructura. Los requisitos de irregularidad torsional extrema en las secciones de referencia solo se aplican a estructuras en las que los diafragmas son rígidos o semirrígidos." (ASCE, 2016).

c) Condición de irregularidad 2.

"Irregularidad de Esquina Reentrante: La irregularidad de esquina reentrante se define como presente cuando ambas proyecciones en planta de la estructura más allá de una esquina reentrante son mayores al 15% de la dimensión en planta de la estructura en la dirección dada." (ASCE, 2016).

d) Condición de irregularidad 3.

"Irregularidad de Discontinuidad del Diafragma: La irregularidad de discontinuidad del diafragma se define como presente cuando hay un diafragma con una discontinuidad o variación abrupta en la rigidez,

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

incluyendo cuando hay un corte o área abierta mayor al 50% del área cerrada del diafragma, o un cambio en la rigidez efectiva del diafragma mayor al 50% de un piso al siguiente." (ASCE, 2016).

e) Condición de irregularidad 4.
"Irregularidad de Desplazamiento Fuera de Plano: La irregularidad de desplazamiento fuera de plano se define como presente cuando hay una discontinuidad en una trayectoria lateral de resistencia a fuerzas, como un desplazamiento fuera de plano de al menos uno de los elementos verticales." (ASCE, 2016).

f) Condición de irregularidad 5.
"Irregularidad de Sistema No Paralelo: La irregularidad de sistema no paralelo se define como presente cuando los elementos verticales que resisten fuerzas laterales no son paralelos a los ejes ortogonales principales del sistema de resistencia sísmica." (ASCE, 2016).

Condiciones de regularidad de las Normas Técnicas Complementarias para diseño por sismo (2020)

Estas normas que son disposiciones oficiales establecidas por la Secretaría de Obras y Servicios fijan los requisitos mínimos para la correcta y eficiente ejecución de cualquier edificación, garantizando que el proceso se realice de manera correcta desde principio a fin.

Las Normas Técnicas no solo son importantes en la Ciudad de México, sino en cualquier estado de la república Mexicana. En el capítulo 5 se describe las condiciones de regularidad que debe presentar las edificaciones, en la versión NTC-2020, establece que para que una edificación sea regular debe satisfacer los siguientes requisitos:

a) Condición de regularidad 1.
"Los diferentes muros, marcos y demás sistemas sismo-resistentes verticales son sensiblemente paralelos a los ejes ortogonales principales del edificio. Se considera que un plano o elemento sismo-resistente es sensiblemente paralelo a uno de los ejes ortogonales cuando el ángulo que forma en planta con respecto a dicho eje excede 15 grados." (NTC-Sismo, 2020).

b) Condición de regularidad 2.
"La relación de su altura a la dimensión menor de su base no es mayor que cuatro". (NTC-Sismo, 2020).

c) Condición de regularidad 3.
"La relación de largo a ancho de la base no es mayor que cuatro". (NTC-Sismo, 2020).

d) Condición de regularidad 4.
"En planta no tiene entrantes ni salientes de dimensiones mayores que 20 por ciento de la dimensión de la planta medida paralelamente a la dirección en que se considera el entrante o saliente." (NTC-Sismo, 2020).

e) Condición de regularidad 5.
"Cada nivel tiene un sistema de piso cuya rigidez y resistencia en un plano satisfacen lo especificado en la sección 2.7 para un diafragma rígido." (NTC-Sismo, 2020).

f) Condición de regularidad 6.
"El sistema de piso no tiene aberturas que en algún nivel excedan 20 por ciento de su área en planta en dicho nivel, y las áreas huecas no difieren en posición de un piso a otro. Se exime de este requisito la azotea de la construcción." (NTC-Sismo, 2020).

g) Condición de regularidad 7.
"El peso de cada nivel, incluyendo la carga viva que debe considerarse para diseño sísmico, no es mayor que 120 por ciento del correspondiente al piso inmediato inferior." (NTC-Sismo, 2020).

h) Condición de regularidad 8.
"En cada dirección, ningún piso tiene una dimensión en planta mayor que 110 por ciento de la del piso inmediato inferior. Además, ningún piso tiene una dimensión en planta mayor que 125 por ciento de la menor de las dimensiones de los pisos inferiores en la misma dirección." (NTC-Sismo, 2020).

i) Condición de regularidad 9.
"Todas las columnas están restringidas en todos los pisos en las dos direcciones de análisis por diafragmas horizontales o por vigas. Por consiguiente, ninguna columna pasa a través de un piso sin estar ligada con él." (NTC-Sismo, 2020).

j) Condición de regularidad 10.
"Todas las columnas de cada entrepiso tienen la misma altura, aunque esta pueda variar de un piso a otro. Se exime de este requisito al último entrepiso de la construcción." (NTC-Sismo, 2020).

k) Condición de regularidad 11.
"La rigidez lateral de ningún entrepiso difiere en más de 20 por ciento de la del entrepiso inmediatamente inferior. El ultimo entrepiso queda excluido de este requisito." (NTC-Sismo, 2020).

l) Condición de regularidad 12.
"En ningún entrepiso el desplazamiento lateral de algún punto de la planta excede en más de 20 por ciento el desplazamiento lateral promedio de los extremos de esta." (NTC-Sismo, 2020).

m) Condición de regularidad 13.
"En sistema diseñados para Q= 4, en ningún entrepiso el cociente de la capacidad resistente a carga lateral entre

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

la acción de diseño debe ser menor que 85 por ciento del promedio de dichos cocientes para todos los entrepisos. En sistemas diseñados para Q≤ 3, en ningún entrepiso el cociente antes indicado debe ser menor que 75 por ciento del promedio de dichos cocientes para todos los entrepisos. Para verificar el cumplimiento de este requisito, se calculará la capacidad resistente de cada entrepiso teniendo en cuenta todos los elementos que puedan contribuir apreciablemente a ella. Queda excluido
de este requisito el último entrepiso." (NTC-Sismo, 2020).

Dentro de las estructuras irregulares tenemos:
Las estructuras serán irregulares si no cumplen con uno de los requisitos 5,6,9,10,11,12 y 13, o dos o más de los requisitos 1,2,3,4,7 y 8 de las condiciones de regularidad descritas anteriormente.

Estructuras muy Irregulares.
Las estructuras se consideran muy irregulares a todas aquellas que no cumplan con dos o más requisitos 5, 6, 9, 10, 11, 12 y 13 y otros.

Condiciones de regularidad de las Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo (2023).

La actualización de las NTC y del Reglamento de Construcciones atendía principalmente a eventos sísmicos relevantes, como los ocurridos en 1957, 1985 y 2017. Ahora la actualización es cada 6 años, teniendo como objetivo anticiparse a los riesgos y promover seguridad y resiliencia de las edificaciones de manera proactiva. La última versión que se tiene de las Normas Técnicas Complementarias para el Diseño Estructural por Sismo es precisamente la del año 2023. Dentro del Capítulo 5 de dicha normativa, se describirán las condiciones o criterios que se deben cumplir para considerar una estructura irregular (o muy irregular según sea el caso que se dicte). En esta nueva versión se simplifico de 13 condiciones a solo 8 de irregularidad, de las cuales 5 son irregularidades de planta y 3 de elevación.

Irregularidades de planta.

1. Irregularidad de torsión.

"Se considerará que una estructura es irregular en torsión cuando en cualquiera de las plantas de la estructura existe un punto que bajo las acciones de diseño presente un desplazamiento lateral que excede en más de 15 por ciento el desplazamiento lateral promedio de los extremos de la planta en la dirección de análisis." (Mexico, 2020).

2. Fuerte irregularidad de torsión.

"Se considerará que una estructura es fuertemente irregular en torsión cuando en cualquiera de las plantas de la estructura existe un punto que bajo las acciones de diseño presente un desplazamiento lateral que excede en más de 30 por ciento el desplazamiento lateral promedio de los extremos de la planta en la dirección de análisis." (Mexico, 2020)

3. Irregularidad por forma geométrica en planta.

"Se considerará con fines estructurales que una estructura es irregular geométricamente en planta cuando tiene entrantes o salientes de dimensiones mayores que 40 por ciento de la dimensión de la planta medida paralelamente a la dirección en que se considerará el entrante o saliente." (Mexico, 2020)

4. Irregularidad por flexibilidad excesiva en el diafragma.

"Se considerará que una estructura es irregular por tener una flexibilidad excesiva en el diafragma cuando en una estructura modelada considerando la flexibilidad de sus diafragmas existe un punto en cualquiera de las plantas que tiene un desplazamiento lateral que excede en más de 30 por ciento el desplazamiento lateral en el mismo punto en otro análisis en que la estructura se modele ahora suponiendo al diafragma como rígido." (Mexico, 2020)

5. Irregularidad por discontinuidad en el diafragma.

"Se considerará que una estructura es irregular por discontinuidad en el diafragma cuando en cualquiera de las plantas de la estructura exista una reducción brusca de más de 40 por ciento en el ancho de diafragma provocado por aberturas en el mismo." (Mexico, 2020)

Irregularidades en elevación.

1. Irregularidad por reducciones geométricas en elevación.

"Se considerará que una estructura es irregular por reducciones geométricas de la estructura en elevación cuando una o más plantas tengan una reducción brusca en el ancho de la planta en la dirección paralela a la dirección de análisis de más de 25 por ciento del ancho de la misma dirección en nivel inmediatamente superior o bien una reducción brusca de más del 40 por ciento respecto al ancho en el nivel inmediatamente inferior. Una excepción son los niveles de elevadores y otras instalaciones en el nivel de azotea cuya dimensión puede ser significativamente menor que la del nivel inferior sin que se considere a la estructura como irregular (sin embargo, es necesario evaluar su respuesta como apéndice)." (Mexico, 2020)

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

2. Irregularidad por reducciones bruscas de rigidez lateral.

"Se considerará que una estructura tiene una irregularidad en elevación por cambios bruscos de rigidez lateral en la altura cuando la rigidez lateral de un entrepiso es 15 por ciento menor que la rigidez lateral del entrepiso inmediatamente superior o bien 30 por ciento mayor que la rigidez del entrepiso inmediatamente superior." (Mexico, 2020)

3. Fuerte irregularidad por reducciones bruscas de rigidez lateral.

"Se considerará que una estructura es fuertemente irregular por reducciones bruscas de rigidez lateral cuando la rigidez lateral de un entrepiso es menor que 50 por ciento de la rigidez lateral del entrepiso inmediatamente superior o bien menor que 50 por ciento del promedio de rigideces laterales de los niveles inmediatamente inferior y superior a un entrepiso." (Mexico, 2020)

Normativas y/o manuales de Diseño Estructural por sismo de otras entidades de la República Mexicana.

Se realizó un análisis de las condiciones de regularidad para el diseño estructural por sismo en las entidades de los estados de Tamaulipas, Baja california, Puebla y Tlaxcala, basada en las normativas antes mencionadas, a continuación, se muestra una tabla comparativa:

Las condiciones de regularidad son prácticamente idénticas en las cuatro entidades, lo que refleja un consenso en los criterios de diseño sísmico a nivel nacional. Aunque la intensidad sísmica varía, lo que influye en el nivel de riesgo y medidas adicionales que se puedan requerir.
Estos estados la clasificación de las zonas sísmicas son las siguientes:
Tamaulipas (Reynosa): Zona sísmica C (Alta intensidad)
Baja California: Zona sísmica C (Alta intensidad) y D (Muy alta intensidad en Mexicali y Tecate)
Puebla: Zona sísmica C (Alta intensidad)
Tlaxcala: Zona sísmica C (Alta intensidad)

Evaluación de las irregularidades en edificaciones.
Las condiciones de regularidad que determinan la clasificación de edificaciones como regulares, irregulares o muy irregulares, según las Normas Técnicas Complementarias para el Diseño por Sismo (2023). Se analizarán aquí un proyecto de casa-habitación para ilustrar las 8 condiciones de irregularidad (5 en planta y 3 en elevación) establecidas en la normativa.

Tabla 6 Tabla de condiciones de regularidad en los estados de Tamaulipas, Baja California, Puebla y Tlaxcala

Condición de Regularidad	Tamaulipas (Reynosa)	Baja California	Puebla	Tlaxcala
Planta sensiblemente simétrica respecto a dos ejes ortogonales (masas y elementos resistentes)	Sí	Sí	Sí	Sí
Relación altura/dimensión menor de la base ≤ 2.5	Sí	Sí	Sí	Sí
Relación altura/dimensión menor de la base ≤ 2.5	Sí	Sí	Sí	Sí
Relación largo/ancho de la base ≤ 2.5	Sí	Sí	Sí	Sí
Entrantes o salientes en planta ≤ 20% de la dimensión paralela	Sí	Sí	Sí	Sí
Sistema de techo o piso rígido y resistente en cada nivel	Sí	Sí	Sí	Sí
Aberturas en techo o piso ≤ 20% de la dimensión paralela y área total ≤ 20% de la planta	Sí	Sí	Sí	Sí
Peso de cada nivel ≤ 110% del piso inferior y ≥ 70% (excepto último nivel)	Sí	Sí	Sí	Sí
Columnas restringidas en dos direcciones ortogonales por diafragmas y trabes/losas	Sí	Sí	Sí	Sí
Rigidez/resistencia al corte de ningún entrepiso difiere ≤ 50% del entrepiso inferior	Sí	Sí	Sí	Sí
Excentricidad torsional ≤ 10% de la dimensión en planta	Sí	Sí	Sí	Sí

Evaluación de las irregularidades del proyecto Rumania.
El proyecto Rumania es un edificio de viviendas de 16 apartamentos en tres niveles, con estacionamiento en semisótano. Estará construido de mampostería, alcanzará una altura de 15.14 metros. Ubicado en la calle Rumania No. 308, Col. Portales Norte, Ciudad de México, en zona sísmica C de alta intensidad.

El edificio en cuestión fue modelado y analizado utilizando el software ETABS 21, siguiendo los lineamientos establecidos en la NTC para diseño por sismo (NTC- SISMO 2023), el objetivo principal fue evaluar la presencia de irregularidades estructurales que afecten el comportamiento sísmico del edificio.

Se creó un modelo tridimensional del edificio en ETABS 21 (ilustración 3), considerando geometría, materiales, cargas y condiciones de apoyo, se definieron las propiedades de los elementos (columnas, vigas, losas, muros, etc) y se le asignaron cargas de diseño correspondientes.

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

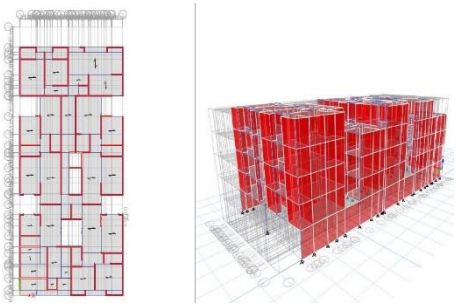


Ilustración 19 Modelos ETABS de proyecto Rumania.

El edificio fue sometido a las acciones de diseño (servicio y falla) para evaluar los desplazamientos de cada planta (Δ1 yΔ2), a continuación, se evaluaron las irregularidades de planta y de elevación.

Irregularidad de torsión.
Se modelo la edificación y se sometió a los efectos de las acciones de diseño, para recabar los datos de los desplazamientos en sus diferentes niveles, considerando que se clasificará como irregular cuando el desplazamiento máximo (máximum) sea mayor al 15% que el promedio de los desplazamientos obtenidos. (Tabla 2)

Tabla 7 Irregularidad por torsión proyecto Rumania.

Story Max Over Avg Displacements							
SspecX							
Story	Output Case	Step Type	Direction	Maximum (mm)	Average (mm)	Ratio	IRREGULAR/NO IRREGULAR
4_AZ	SSpecX	Max	X	3.209	3.073	1.044	NO IRREGULAR
3_N3	SSpecX	Max	X	3.204	2.912	1.1	NO IRREGULAR
2_N2	SSpecX	Max	X	2.467	2.218	1.113	NO IRREGULAR
2_N1	SSpecX	Max	X	1.63	1.443	1.129	NO IRREGULAR
1_PB	SSpecX	Max	X	0.994	0.952	1.044	NO IRREGULAR
SspecY							
4_AZ	SSpecY	Max	X	0.248	0.169	1.462	IRREGULAR
3_N3	SSpecY	Max	X	0.215	0.147	1.466	IRREGULAR
2_N2	SSpecY	Max	X	0.154	0.107	1.444	IRREGULAR
2_N1	SSpecY	Max	X	0.087	0.063	1.373	IRREGULAR
1_PB	SSpecY	Max	X	0.04	0.035	1.148	NO IRREGULAR
4_AZ	SSpecY	Max	Y	0.81	0.776	1.044	NO IRREGULAR
3_N3	SSpecY	Max	Y	0.641	0.613	1.045	NO IRREGULAR
2_N2	SSpecY	Max	Y	0.446	0.426	1.046	NO IRREGULAR
2_N1	SSpecY	Max	Y	0.233	0.222	1.046	NO IRREGULAR
1_PB	SSpecY	Max	Y	0.051	0.048	1.071	NO IRREGULAR
CSpecX S.V							
4_AZ	CSpecX S.V	Max	X	20.803	19.915	1.045	NO IRREGULAR
3_N3	CSpecX S.V	Max	X	20.763	18.871	1.1	NO IRREGULAR
2_N2	CSpecX S.V	Max	X	15.987	14.371	1.112	NO IRREGULAR
2_N1	CSpecX S.V	Max	X	10.565	9.36	1.129	NO IRREGULAR
1_PB	CSpecX S.V	Max	X	6.463	6.191	1.044	NO IRREGULAR
CSpecY S.V							
4_AZ	CSpecY S.V	Max	X	1.764	1.183	1.491	IRREGULAR
3_N3	CSpecY S.V	Max	X	1.519	1.017	1.494	IRREGULAR
2_N2	CSpecY S.V	Max	X	1.083	0.735	1.473	IRREGULAR
2_N1	CSpecY S.V	Max	X	0.607	0.434	1.398	IRREGULAR
1_PB	CSpecY S.V	Max	X	0.281	0.241	1.165	IRREGULAR
4_AZ	CSpecY S.V	Max	Y	5.945	5.693	1.044	NO IRREGULAR
3_N3	CSpecY S.V	Max	Y	4.701	4.496	1.045	NO IRREGULAR
2_N2	CSpecY S.V	Max	Y	3.273	3.129	1.046	NO IRREGULAR
2_N1	CSpecY S.V	Max	Y	1.709	1.634	1.046	NO IRREGULAR
1_PB	CSpecY S.V	Max	Y	0.378	0.353	1.071	NO IRREGULAR

Se revisó para cada condición de irregularidad, obteniendo tablas como la tabla 2, para cada una de las condiciones de irregularidad, tanto en elevación como en planta y se obtuvieron los siguientes resultados, Tabla 3.

Tabla 3 Resumen de las condiciones de regularidad establecidas en las normativas y manuales analizados

Tipo de irregularidad	Condición	Resultado
Irregularidad de torsión	ΔMAX > 1.15 * (Δ1 + Δ2) / 2	Irregular en eje Y del nivel 1 a azotea
Fuerte irregularidad de torsión	ΔMAX > 1.3 * (Δ1 + Δ2) / 2	Fuertemente irregular en eje Y del nivel 1 a azotea
Irregularidad por forma geométrica en planta	a > 0.4A o b > 0.4B	No irregular
Irregularidad por flexibilidad excesiva en diafragma	$\Delta semirrígido$ > 1.3 * $\Delta rígido$	Irregular
Irregularidad por discontinuidad en diafragma	a > 0.4A o b > 0.4B	No irregular
Irregularidad por reducciones geométricas en elevación	Reducción > 25% del ancho en nivel superior o > 40% en nivel inferior	No irregular
Irregularidad por reducciones bruscas de rigidez lateral	Ki < 0.85Ki+1 o Ki > 1.3Ki+1	Irregular en ambos ejes
Fuerte irregularidad por reducciones bruscas de rigidez lateral	Ki < 0.5Ki+1 o Ki < 0.5 * (Ki+1 + Ki-1) / 2	Fuertemente irregular en eje Y en el nivel 1

DISCUSIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

La normatividad analizada comparte un objetivo común: garantizar la seguridad y residencia de las estructuras ante en eventos sísmicos. Sin embargo, cada una tiene enfoques y criterios específicos (ver tabla 4) que reflejan las condiciones locales. La aplicación de estas normas debe ser estricta y adaptada a las particularidades de cada proyecto y según su región.

Tabla 4 Comparativa de las condiciones de regularidad establecidas en las normativas y manuales analizados

Condición de regularidad	MDOC (CFE, 2015)	ASCE 7 (2016)	NTC (2020)	NTC (2023)
Simetría en planta	Distribución simétrica de masas y elementos resistentes respecto a dos ejes ortogonales.	No aplica	Sistemas sismo-resistentes paralelos a ejes ortogonales (ángulo ≤ 15°).	No aplica
Relación altura/ base	≤ 2.5	No aplica	≤ 4	No aplica
Relación largo/ancho base	≤ 2.5	No aplica	≤ 4	No aplica
Entrantes o salientes en planta	≤ 20% de la dimensión de la planta.	Irregularidad de esquina reentrante (proyecciones > 15% de la dimensión en planta).	≤ 20% de la dimensión de la planta.	Irregularidad geométrica en planta (entrantes o salientes > 40% de la dimensión de la planta).
Resistencia lateral	Resistencia no excede en más del 50% la del entrepiso inferior.	Irregularidad de piso débil (resistencia < 80% del piso superior) o extremadamente débil (< 65%).	No aplica	No aplica
Criterios adicionales	Estructura fuertemente irregular si no cumple 4 o más condiciones o excentricidad torsional > 20%.	Irregularidades verticales y horizontales específicas (geometría, discontinuidad,	Estructura irregular si no cumple requisitos 5, 6, 9, 10, 11, 12 o 13, o dos o más de 1, 2, 3, 4, 7, 8.	Estructura muy irregular si no cumple dos o más condiciones de irregularidad en

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

Rigidez del diafragma	Sistema de techo o piso rígido y resistente.	Irregularidad de discontinuidad del diafragma (cortes o áreas abiertas > 50% del área cerrada).	Diafragma rígido según sección 2.7.	Irregularidad por flexibilidad excesiva o discontinuidad en el diafragma (reducción brusca > 40%).
Aberturas en el sistema de piso	≤ 20% del área en planta.	No aplica	≤ 20% del área en planta.	No aplica
Peso de cada nivel	Peso no mayor al 110% ni menor al 70% del piso inferior.	Irregularidad de peso (masa efectiva > 150% de un piso adyacente).	Peso no mayor al 120% del piso inferior.	No aplica
Área de cada piso	Área no mayor al 110% ni menor al 70% del piso inferior.	No aplica	Dimensión en planta no mayor al 110% del piso inferior.	Irregularidad por reducciones geométricas en elevación (reducción brusca > 25% o 40%).
Condición de regularidad	MDOC (CFE, 2015)	ASCE 7 (2016)	NTC (2020)	NTC (2023)
Restricción de columnas	Columnas restringidas en dos direcciones ortogonales por diafragmas o trabes.	No aplica	Columnas restringidas en dos direcciones por diafragmas o vigas.	No aplica
Rigidez lateral entre pisos	Rigidez no excede en más del 50% la del entrepiso inferior.	Irregularidad de rigidez (piso blando: rigidez < 70% del piso superior o < 80% del promedio de 3).	Rigidez no difiere en más del 20% de la del entrepiso inferior.	Irregularidad por reducciones bruscas de rigidez lateral (rigidez < 15% o > 30% del piso superior).
Torsión	Excentricidad torsional ≤ 20% de la dimensión en planta	Irregularidad torsional extrema (desplazamiento > 1.4 veces el promedio en los extremos).	Desplazamiento lateral ≤ 20% del promedio en los extremos.	Irregularidad de torsión (desplazamiento > 15% del promedio) o fuerte irregularidad (> 30%).

Todas las normativas coinciden en la importancia de la simetría, la relación altura/ base, y la rigidez del diafragma, sin embargo, las irregularidades torsionales y relacionadas con la rigidez lateral con criterios comunes en todas las normas.

En la evaluación de las irregularidades del proyecto Rumania, se identificaron irregularidades en varios aspectos, en particular , se encontró que el edificios presenta irregularidad por torsión y fuerte irregularidad de torsión en el eje y que va desde el nivel 1 a la última planta, también se detectó irregularidad por flexibilidad excesiva en el diafragma y una irregularidad por reducciones bruscas de rigidez lateral en ambos ejes, y se confirmó una fuerte irregularidad por reducciones bruscas de rigidez lateral, así como irregularidades significativas en aspectos de forma geométrica en planta, discontinuidad en el diafragma.

CONCLUSIONES

La importancia de las condiciones de regularidad en el diseño estructural para edificaciones sujetas a sismos. Estas condiciones, que incluyen simetría, sencillez y uniformidad en planta y elevación, son fundamentales para evitar concentraciones de esfuerzos, amplificación de vibraciones y respuestas impredecibles ante eventos sísmicos. Las estructuras regulares tienden a tener un mejor desempeño sísmico, con menos daños y colapsos, mientras que las irregularidades aumentan la vulnerabilidad, pudiendo causar pérdidas económicas, heridos y muertes.

Las normativas y manuales de diseño sísmico no buscan limitar la creatividad arquitectónica, sino garantizar la seguridad y eficiencia estructural. Estas normas se actualizan constantemente basándose en estudios de eventos sísmicos pasados que han causado daños significativos. Su objetivo es proporcionar criterios para un diseño óptimo que minimice los daños ante sismos.

El análisis en ETABS 21 permitió identificar las irregularidades estructurales presentes en el edificio proyecto Rumania, lo cual es fundamental para proponer medidas correctivas y garantizar un comportamiento adecuado de la estructura ante eventos sísmicos.

Cuando una estructura no cumple con las condiciones de regularidad, se clasifica como irregular y requiere análisis detallados y refuerzos para asegurar su resistencia.

Además, se enfatiza la importancia de que esta información sea accesible al público y se integre en la cultura de la construcción, ya que la falta de conocimiento sobre estas condiciones ha llevado a fallas estructurales y colapsos.

BIBLIOGRAFÍA

[1] Engineers, A. S. (2017). Seismic Design Requirements for Building Structure. En A. S. Engineers, Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures (págs. 89- 119). Reston, Virginia : American Society of Civil Engineers.

[2] Engineers, A. S. (2017). Seismic Design Requirements for Building Structure. En A. S. Engineers, Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures (págs. 89- 119). Reston, Virginia: American Society of Civil Engineers.

[3] Esteva, L. (s/n). *Ductilidad y Comportamiento Sísmico.* Ciudad de México: Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México

[4]Luis Arnal Simón, M. B. (2020). Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal. Ciudad de México: Trillas.

[5] Orrego, D. J. (2017). *Identificación de la condición de diafragma rígido o flexible a partir deinstrumentación sísmica y modelación de losas tipo shell o membrana en sistemas de resisntencia lateral.* Medellín: Universidad EAFIT.

[6] Hernández, U. M. (2008). *Manual de Diseño de Obras Civiles. Diseño por Sismo. Ciudad de México: Comisión Federal de Electricidad.*

[7] HILTI. (2023). *Proceso de actualización de las NTC para las construcciones en la Ciudad de México*. Obtenido de https://ask.hilti.com.pa/article/proceso-de-

actualizacion-de-las-ntc-para-las- construcciones-en-la-ciudad-de-mexico/jatu7b

[8] Ingeniero, L. L. (2024). *Criterios de Diseño Sísmico en Edificios.* Obtenido de: https://www.libreriaingeniero.com/2019/03/criterios-de-diseno-sismico-en-edificios.html#google_vignette

[9] Donnadieu, A. (2024). IMCA. *Diferencia entre diafragmas rígidos y flexibles* Obtenido de: https://www.imca.org.mx/newsletters/news19.php

[10] Arancibia, F. (2012). Diseño Sísmico Estructural. Obtenido de: https://ingenieriasismicaylaconstruccioncivil.blogspot.com/2012/12/dano-sismico-estructural.htmlhttps://repositorio.uvg.edu.gt/bitstream/handle/123456789/3340/Reducci%c3%b3n%20de%20derivas%20en%20una%20edificaci%c3%b3n%20de%2015%20niveles%20mediante%20la%20implementaci%c3%b3n%20de%20un%20sistema%20dual%20en%20concreto%20reforzado~1.pdf?isAllowed=y&sequence=1

[11] California, G. d. (2017). *Normas Técnicas Complementarias de la Ley de Edificaciones del Estado de Baja California, de Seguridad Estructural en materia de Diseño Sísmico*. Obtenido de http://www.sidurt.gob.mx/doctos/NORMAS_TECNICAS_COMOPLEMENTARIAS_LEY_EDIF_BC/02%20NORMAS%20TECNICAS%20ESTRUCTURALES/DISE%C3%91O%20SISMICO-2017.pdf

[12] Coello, A. (2015). *Sensiblemente simétrica* . Obtenido de https://es.slideshare.net/slideshow/sensiblemente-simetrica/52766568

[13] México, G. d. (2023). *Normas Técnicas Complementarias para el Diseño por Sismo.* Obtenido de https://data.consejeria.cdmx.gob.mx/portal_old/uploads/gacetas/b3c4f4ff37241d0a93cc6742a8b0bf2f.pdf

[14] Morales, J. P. (2024). *Excentricidad y torsión.* Obtenido de: https://www.academia.edu/7031155/EXCENTRICIDAD_Y_TORSION

[15] Puebla, G. C. (2017). *Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo*. Obtenido de https://gobiernoabierto.pueblacapital.gob.mx/transparencia_file/Gobierno.Abierto/desarrollo_urbano_2018/Dictamen_CDU_Expide_Norm_tecnicas.pdf

[16] Sánchez, L. M. (2020). *Análisis de los daños en viviendas y edificios comerciales durante la ocurrencia del sismo del 19 de septiembre del 2017*. Obtenido de https://smis.mx/index.php/RIS/article/view/RIS-101-2/502

[17] slideshare. (2015). *Irregularidad en estructura en planta y elevación.* Obtenido de https://es.slideshare.net/slideshow/irregularidad-de-estructura-en-planta-y- elevacin/47224437

[18] Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica, A. C. (2023). *Condiciones de Regularidad Estructural. Conceptos para mejorar la respuesta sísmica de los edificios.* Obtenido de https://knestructuras.com/wp-content/uploads/2024/01/Libro-Condiciones-de-regularidad-_Estructural.-Conceptos-para-mejorar-la-respuesta-sismica-de-los-edificios.pdf

[19] Tamaulipas, G. d. (2012). *Reglamento de Construcciones para el Estado de Tamaulipas*. Obtenido de https://www.congresotamaulipas.gob.mx/Parlamentario/Archivos/Reglamentos/Reg%20de%20Construcciones%20del%20edo.pdf

[20] Technology, Z. G. (2019). *Configuración estructural y su problemática.* Obtenido de https://www.e- zigurat.com/es/blog/configuracion-estructural-problematica/

[21] CDMX, G.d (2023). *Normas Técnicas complementaria para el diseño por sismo (NTC-Sismo),* de construcción del Estado la Ciudad de México. Obtenido de: https://data.consejeria.cdmx.gob.mx/portal_old/uploads/gacetas/b3c4f4ff37241d0a93cc6742a8b0bf2f.pdf

[22] Tlaxcala, G. d. (2018). Normas Técnicas de la Ley de la Construcción del Estado de Tlaxcala. Obtenido de https://sfp.tlaxcala.gob.mx/pdf/normateca/Normas%20T%C3%A9cnicas%20de%20la%20Ley%20de%20la%20Construcci%C3%B3n%20del%20Estado%20de%20Tlaxcala..pdf

[23] NTC- SISMO (2015). *Comisión Federal de Electricidad Manual de Diseño de Obras Civiles*. Unam1. https://www.academia.edu/37098742/Comisi%C3%B3n_Federal_de_Electricidad_Manual_de_Dise%C3%B1o_de_Obras_Civiles

[24] NTC-Sismo (2023). Instituto para la seguridad de las construcciones en la Ciudad de México. *Norma Técnica Complementaria para el diseño por sismo*. Ciudad de México. https://data.consejeria.cdmx.gob.mx/portal_old/uploads/gacetas/b3c4f4ff37241d0a93cc6742a8b0bf2f.pdf

[25] piedeplano. (2023). *Norma técnica complementaria para el diseño por sisimo* 2023. Obtenido de: https://piedeplano.com/wp-

content/uploads/2023/11/10.-ntc-sismo-2023.pdf https://ru.dgb.unam.mx/bitstream/20.500.14330/TES01000839343/3/0839343.pdf

[26] Consejería. CDMX (2020). *Norma técnica complementaria*. Gaceta Oficial CDMX. Obtenido de:https://data.consejeria.cdmx.gob.mx/portal_old/uploads/gacetas/1d5e89dc4af705e74147078a93484290.pdf

[27] ASCE. (2016). *Cargas Mínimas de diseño y Criterios asociados para edificios y Otras Estructuras*. (2017). Obtenido de:https://pdfcoffee.com/norma-asce-7-16-3-pdf-free.html

[28] Tena. C (2010). *Irregularidad estructural y su efecto en la respuesta sísmica de edificios*. Obtenido de: https://www.researchgate.net/publication/262180547_Irregularidad_estructural_y_su_efecto_en_la_respuesta_sismica_de_edificios/citations

[29] CFE & Instituto de investigaciones Eléctricas. (2015). *Manual de Diseño de Obras Civiles.* Obtenido de: https://www.academia.edu/37098742/Comisi%C3%B3n_Federal_de_Electricidad_Manual_de_Dise%C3%B1o_de_Obras_Civiles

[30] Calvillo, A. S. (2021). *Vulnerabilidad sísmica y la pérdida de la vivienda de adobe en Jojutla, Morelos*, México, tras los sismos de 2017. Obtenido de https://www.redalyc.org/journal/6651/665170467001/html/#:~:text=La%20localidad%20de%20Jojutla%2C%20en,de%20adobe%20del%20centro%20hist%C3%B3rico.

[31] Fernández, P. R. (2017). *Entre 2009 y 2016 construyeron un departamento con mármol y acero sobre Colegio Rébsamen.* Obtenido de https://www.sinembargo.mx/3314784/entre-2009-y-2016- se-construyeron-un-departamento-con-marmol-y-acero-sobre-el-rebsamen/

[32] Gavilán, J. J. (2018). *Sismicidad y seguridad estructural en las construcciones: lecciones aprendidas en México.* Obtenido de https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0036- 36342018000700041

[33] Nájar, A. (2017). BBC NEWS MUNDO. *Las razones por las que colapsaron tantos edificios en Ciudad de México* Obtenido de: https://www.bbc.com/mundo/noticias-america-latina-41481250 https://repositorio.uvg.edu.gt/bitstream/handle/123456789/3340/Reducci%c3%b3n%20de%20derivas%20en%20una%20edificaci%c3%b3n%20de%2015%20niveles%20mediante%20la%20implementaci%c3%b3n%20de%20un%20sistema%20dual%20en%20concreto%20reforzado~1.pdf?isAllowed=y&sequence=1

[34] Eléctricas, C. F. (2015). *Manual de Diseño de Obras Civiles.* México: CFE. Obtenido de https://www.academia.edu/37098742/Comisi%C3%B3n_Federal_de_Electricidad_Manual_de_Dise%C3%B1o_de_Obras_Civiles

[35]ASCE. (2016). *Cargas mínimas de diseño y criterios asociados para edificios y otras estructuras.* Reston, Virginia: Sociedad Americana de Ingenieros Civiles .

[36] México, G. d. (2020). *Normas Técnica Complementarias para Diseño por Sismo.* Gaceta Oficial de la Ciudad de México, 53-65.

AUTORIZACIÓN Y RENUNCIA.

Los autores del presente artículo autorizan al TecNM/Instituto Tecnológico de Zacatepec para publicar el escrito en el libro electrónico del CITID 2025. El TecNM/ITZ o los editores no son responsables ni por el contenido ni por las implicaciones de lo que está expresado en el escrito.

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

LIMITANTES PARA LA CUANTIFICACIÓN DE EMISIONES ATMOSFÉRICAS DE METANO EN LA ELABORACIÓN DEL INEGYCEI

Sanjuan-Galindo René[1], Contró-Esparza Elsa-Michelle[2], Errasquin-Barradas María del Carmen[3], Benavides-Bravo Francisco-Gerardo[4], Martínez-Peón Dulce-Citlalli[5]

[1] Doctorado. Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico de Nuevo León, Centro de Investigación e Innovación Tecnológica. rene.sg@nuevoleon.tecnm.mx. 8181570500, Av. Eloy Cavazos 2001, Col. Tolteca, CP Guadalupe, Nuevo León.
[2] Maestría. Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico de Nuevo León. Departamento de Ciencias Económico-Administrativas. elsa.ce@nuevoleon.tecnm.mx. 8181570500, Av. Eloy Cavazos 2001, Col. Tolteca, CP Guadalupe, Nuevo León.
[3] Maestría. Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico de Nuevo León, Departamento de Ciencias Económico-Administrativas. carmen.eb@nuevoleon.tecnm.mx. 8181570500, Av. Eloy Cavazos 2001, Col. Tolteca, CP Guadalupe, Nuevo León.
[4] Doctorado. Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico de Nuevo León, Departamento de Ciencias Básicas. francisco.bb@nuevoleon.tecnm.mx. 8181570500, Av. Eloy Cavazos 2001, Col. Tolteca, CP Guadalupe, Nuevo León.
[5] Doctorado. Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico de Nuevo León, Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica. dulce.mp@nuevoleon.tecnm.mx. 8181570500, Av. Eloy Cavazos 2001, Col. Tolteca, CP Guadalupe, Nuevo León.

Resumen – Los inventarios nacionales de las emisiones de gases de efecto invernadero son herramientas elementales y de referencia para la adopción de estrategias adecuadas de adaptación y mitigación de riesgos de los efectos causados por el cambio climático, se realizan como parte de la política climática gubernamental. Para la elaboración de los inventarios de emisiones se siguen las metodologías marcadas en las directrices del Panel Intergubernamental de expertos sobre Cambio Climático. Sin embargo, la cuantificación de emisiones se limita a la disponibilidad de datos, a las declaratorias de los actores emisores, o a las estimaciones realizadas mediante un modelo genérico. En la práctica, no se realizan mediciones de las emisiones directas, por lo que los reportes de emisiones pueden presentar sesgo, incertidumbre o subestimación. En el presente trabajo se exploran las opciones de los sistemas de instrumentación para la cuantificación de las emisiones del gas metano, y se identifican las limitantes para su efectiva aplicación *in situ* en la vecindad de las fuentes emisoras. Entre los sistemas posibles de medición de metano emitido están los sensores catalíticos o electrónicos, las técnicas de espectroscopía, modelos de simulación computacional y de soporte satelital. Las limitantes encontradas se clasificaron en dos grupos: de gestión o de carácter técnico. Las limitantes se generan por la falta de instrumentos de política climática, débil identificación de fuentes emisoras, insuficiente entrenamiento y formación de expertos y falta de aplicación de sistemas técnicos para medir las emisiones de gas metano, de estos últimos, destaca su limitada portabilidad, la falta de sensibilidad en la medición y alto costo.

Palabras Clave: Metano, Emisiones atmosféricas, Inventarios Nacionales, Efecto invernadero, Sistemas de medición.

Abstract – The greenhouse gas emissions national inventories become fundamental and reference tools for the adoption of adequate adaptation and mitigation strategies to address the risks from the effects caused by climate change, as part of the governmental climate politics. For the elaboration of the emissions inventories the Intergovernmental Panel on Climate Change methodologies are followed. However, the emissions quantification is limited to data availability, to the emitting actor's statements, or to the estimations made through a generic model. In practice, direct emissions are not measured, so reports may present bias, uncertainty or underestimation. In the present work the options of the instrumentation systems for the quantification of methane gas emissions are explored, and the limitations for its effective *in situ* application in the vicinity of the emitter sources are identified. Among the possible systems for the methane measurement are the catalytic or electronic sensors, spectroscopy techniques, simulation and satellite support. The identified limitations were classified in two groups: those ones management-related and those ones of technical-type. Limitations are caused by the lack of climate policy instruments, unidentified emission sources, scarce number of experts and lack of applied technical systems to measure methane emissions, which could face limited portability, not enough sensibility and high cost.

Key words – Methane, Atmospheric emissions, National inventories, Greenhouse effect, Measurement systems.

INTRODUCCIÓN

Las emisiones de gases de efecto invernadero (GyCEI), el calentamiento global y el cambio climático son temas que han ganado prioridad en la agenda mundial por el riesgo que representan en la ocurrencia y magnitud de eventos meteorológicos de alto impacto en rubros como la formación de huracanes, en la producción de alimentos, en la disponibilidad de recursos naturales, etc. En 1992, a través de la Convención Marco de Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC), las partes signatarias acordaron elaborar, actualizar y publicar de manera periódica sus inventarios nacionales

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

[1]. En México, la Ley General de Cambio Climático refiere la integración de información para la elaboración de los inventarios estatales de emisiones y considera los programas de las Entidades Federativas como instrumentos de planeación en materia climática [2]. Una de las funciones del INECC es el desarrollo del Inventario Nacional de Emisiones de Gases y Compuestos de Efecto Invernadero (INEGyCEI), documento que registra el total estimado de emisiones GyCEI provenientes de las actividades humanas. En este registro se incluyen también las estimaciones de absorción, secuestro de carbono, que se realiza mediante la fotosíntesis en las reservas forestales. Los GyCEI con mayor presencia en la atmósfera, resultantes de la actividad antropogénica e incluidos en el INEGyCEI son CO_2, CH_4, N_2O, PFC, HFC, NF_3, SF_6 y carbono negro. Cada uno se caracteriza por su potencial de calentamiento global (GWP) que estima el impacto que tendrán en un plazo futuro (100 años, por ejemplo) [3]. Al respecto, el Panel Intergubernamental de expertos sobre Cambio Climático (IPCC) estima los valores siguientes: $GWP_{CO_2} = 1$, $GPW_{CH_4} \approx 28$, $GWP_{N_2O} \approx 273$, $GWP_{SF_6} \approx 24{,}300$ [4]. El GWP es una referencia para expresar las emisiones, sin importar el gas o compuesto de que se trate, como CO_{2eq} (equivalente de dióxido de carbono). A nivel global, en 2023 la concentración de CH_4 en la atmósfera registrada fue de 1,922 ppb, con una tasa de incremento que ya supera las 10 ppb por año [5]. En 2021, el INEGyCEI reportó el total de emisiones netas de metano de 198,041,615 Gg de CO_{2eq} [6], con lo que México se colocó en la décima posición respecto a los países con mayores emisores de metano [5].

Para la realización del INEGyCEI, se contabiliza el total de emisiones (E) en Gg de CO_{2eq} emitidos por categoría (1-Energía, 2-Industria, 3-Agricultura y 4-Manejo de residuos) o subcategoría, siguiendo las directrices del IPCC [6]. La Ec. (1) es la expresión genérica del modelo para el cálculo de las emisiones y se ajusta de acuerdo con la fuente de emisión.

$$E = \sum_i^n (A_i \cdot EF_i) \qquad \text{Ec. (1)}$$

Donde A se refiere a los datos de actividad (expresada en unidades de masa: kg), EF es el factor de emisión correspondiente de la actividad (adimensional) y el subíndice i refiere el consecutivo de la actividad que se cuantifica (1, 2, … n).

Entre las fuentes que liberan CH_4 a la atmosfera están los humedales, que representan fuentes emisoras naturales, pero al estar intervenidas por actividades humanas registran tasas altas de emisiones. Otras fuentes incluyen los sectores de agricultura, la industria de gas y petróleo y el tratamiento de residuos o de aguas residuales [5].

Para la preparación del INEGyCEI, el IPCC define 3 niveles de aproximación en la realización de estimaciones, diferenciados por la precisión de los EF. El Nivel 1 es el más básico debido a que utiliza valores EF basados en referencias. Es el nivel con mayor incertidumbre, con posibilidades altas de subestimar la magnitud real de las emisiones [8]. En el Nivel 2, los valores EF que se utilizan están basados en datos específicos de las subcategorías. En contraste, en el Nivel 3 se usan valores EF determinados con mayor detalle, basados en datos específicos de la actividad. En la práctica, difícilmente se tienen elementos suficientes para realizar inventarios de emisiones con la certeza que exigen los Nivel 2 o 3, por lo que persiste el sesgo y la incertidumbre en la información reportada, con sospecha de haber subestimaciones en las emisiones.

La implementación de acciones de adaptación y mitigación al cambio climático deben corresponder a la magnitud de las emisiones a fin de minimizar las afectaciones. Para aumentar la precisión en la cuantificación de emisiones y cumplir con lo señalado en la Ley General de Cambio Climático y en los compromisos adquiridos a través del Acuerdo de Paris se requiere la implementación de sistemas de medición en las fuentes emisoras que no tengan solamente carácter estimativo. Por lo anterior, el objetivo de la presente investigación es identificar los factores limitantes, de tipo tecnológico o de gestión gubernamental, que afectan la cuantificación certera de emisiones atmosféricas de metano, requeridas para la elaboración del INEGyCEI.

DESARROLLO

Se describen los procedimientos seguidos para el desarrollo del presente trabajo y se ilustra el seguimiento en el diagrama de la Figura 1.

Reconocimiento de la problemática.
Se revisaron registros de la Organización Meteorológica Mundial que describen las afectaciones atribuibles al calentamiento global y al cambio climático.

Identificación de las fuentes emisoras de metano.
Se revisó el archivo histórico de los INEGyCEI de México y los estándares que marcan las directrices del IPCC para la elaboración de los mismos.

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

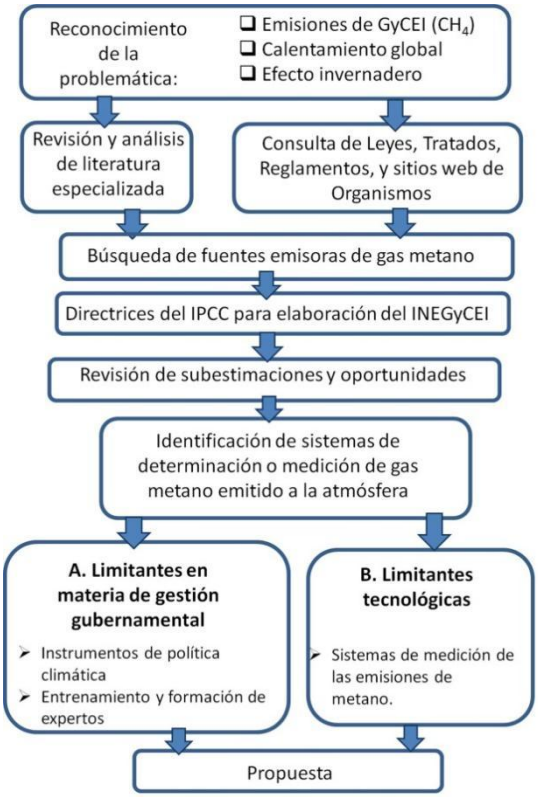


Figura 1. Análisis desarrollado para la identificación de limitantes para la cuantificación de emisiones atmosféricas de metano en la elaboración del INEGyCEI.

Fuente: Construcción propia.

Revisión de los sistemas de medición y contraste de las limitantes para la cuantificación de emisiones de metano. Se revisó literatura científica especializada en el análisis de emisiones de metano y sus fuentes. Se visitaron los sitios electrónicos de venta de fabricantes de sistemas de medición de metano; en su totalidad, todos ofertan aplicaciones de seguridad industrial. Se revisaron los sistemas y tecnologías que aplican organizaciones e instituciones para realizar mediciones *in situ*, en su mayoría para fines de investigación. Se contrastaron los reportes de las fuentes encontradas. Se identificaron oportunidades de mejora para la medición de emisiones y su registro en el INEGyCEI.

Planteamiento.
Se presenta una propuesta que deriva del análisis desarrollado con ventajas para su implementación en mediciones en campo.

DISCUSIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Las limitantes encontradas para la cuantificación de emisiones atmosféricas de metano en la elaboración del INEGyCEI se clasificaron en dos grupos, las que se refieren a la gestión gubernamental y las de carácter tecnológico.

A. Limitantes en materia de gestión gubernamental
Instrumentos de política climática.
En México, se tienen 17 instrumentos normativos de política climática (IPC) de carácter estatal que se rigen por la Ley General de Cambio Climático (LGCC) y las leyes de la materia en el orden estatal [9]. Su implementación es parte de la mitigación y adaptación al cambio climático (CC) que se demanda a través de las COP celebradas anualmente [10]. Sin embargo, algunos de los instrumentos estatales menos abordados incluyen el Reglamento de Cambio Climático (RCC), el Fondo Estatal de Cambio Climático (FCC) y los Programas Estatales de Movilidad (PM). Solamente 7 estados ya disponen de su RCC y 19 estados cuentan con un FCC. En contraste, 18 estados aún no tienen su PM. De las tres entidades a nivel nacional con mayor actividad económica e industrial, solamente la CDMX cumple con su normativa, Nuevo León y Jalisco carecen de 4 y 3 instrumentos, respectivamente. Respecto a la publicación y actualización de los inventarios de emisiones de GyCEI se observa que no son prioridad para las dependencias. No hay información disponible de parte de la mayoría de las entidades estatales, y a su vez, tampoco de las alcaldías.

Por lo anterior, se observan vacíos en materia de política climática de parte de las entidades para la actualización de los inventarios y también para implementar acciones de control que permitan atender de manera sectorial las fuentes de emisión de GyCEI [9].

Identificación de las fuentes.
Las fuentes emisoras registradas por el INEGyCEI con mayor cantidad de emisiones se comparan en la Figura 2. La crianza de ganado, inherente al proceso de fermentación entérica [11, 12], se posiciona como la fuente con mayores emisiones de metano ($CO_{2eq} > 10^5$ Gg). La ganadería supera en al menos un orden de magnitud a las emisiones de cualquier otro tipo de actividad. También destaca la cuantificación proveniente de emisiones fugitivas, de la eliminación de residuos y del tratamiento de aguas residuales con magnitudes similares entre sí (e.g. $CO_{2eq} \cong 2 \times 10^4$ Gg).

De acuerdo al Censo Agropecuario 2022 del INEGI, los estados de Veracruz, Jalisco, Chihuahua, Chiapas, Durango, Tabasco, Sonora y Michoacán son los principales productores de ganado. En conjunto, los 8 estados albergan más de 24 millones de cabezas, es decir, más del 50% de la población nacional de bovinos conformada por vacas, reses (de trabajo), vaquillas, animales en engorda, sementales y becerros [15]. Solamente el estado de Veracruz concentra el 11 % del total nacional, cifra que sugiere una elevada contribución de emisiones de metano. Sin embargo, la regulación estatal carece de suficientes instrumentos IPC, tales como el RCC, la Evaluación de la Política Estatal de

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

Cambio Climático y no ha integrado una Comisión Intersecretarial de Cambio Climático [9]. Asimismo, el Inventario Estatal de Emisiones disponible para el estado no ha sido actualizado a los estándares nacionales que fueron establecidos conforme a las directrices del IPCC. Otros estados ganaderos como Chihuahua, Durango, Tabasco y Sonora aún no cuentan con un RCC propio. Chihuahua y Durango presentan rezago de hasta 6 IPC. La cría y explotación de animales en conjunto representa el 35 % del aporte de las actividades primarias a la economía nacional, pero solamente el 1 % del total del PIB nacional [14]. En contraste, la contribución nutricional de este sector a la alimentación poblacional es alta en términos del aporte proteico, vitaminas y minerales como Ca y Fe, que se obtienen a partir de la ingesta de lácteos y de sus derivados, o de productos cárnicos.

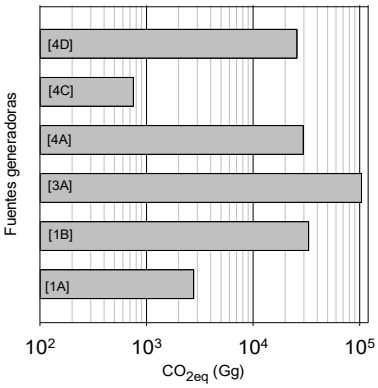


Figura 2. Comparación de las fuentes con mayores emisiones de CH_4 de acuerdo al INEGyCEI: [1A] Quema del combustible, [1B] Emisiones fugitivas relacionados a combustibles, [3A] Ganado, [4A] Residuos sólidos, [4C] Incineración de residuos, [4D] Tratamiento de aguas residuales. Fuente: Construcción propia con datos del INEGyCEI 2021.

La segunda fuente con más emisiones de metano o biogás son las plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR). En México se tiene registro de 2,928 PTAR que acumulan tratamiento de caudal residual de más de 143 m^3/s [15]. Debido a la digestión anaerobia implicada en el proceso de las PTAR, el metano o biogás es uno de los subproductos. Sin embargo, mediante una reacción de combustión, puede utilizarse para producir energía mecánica, y a su vez, energía eléctrica, pero con la desventaja que el metano de las PTAR tiene un potencial calorífico neto inferior (solo el 50 %) del que posee el gas natural (≈ 40 MJ/m^3 a 0 °C y 1 atm de presión).

A nivel nacional, la infraestructura y los desarrollos con suficientes capacidades para llevar a cabo la recuperación del biogás generado a través de procesos de confinamiento de residuos o de PTAR, sigue siendo limitada. Las PTAR en México tienen baja captación y aprovechamiento del mismo. Para el abatimiento de esta causal podrían realizarse cambios en la política gubernamental; sin embargo, se requieren grandes inversiones, además de la participación de centros especializados o universidades.

Entrenamiento y formación de expertos.
Por avenencia global a través de la CMNUCC y del Acuerdo de Paris, los inventarios de GyCEI se realizan de acuerdo con las directrices que marca el IPCC; sin embargo, aún no es extensiva la disponibilidad de programas de entrenamiento en la materia. La participación conjunta de entidades federales como la Secretaría de Gobernación, del Instituto Nacional para el Federalismo y el Desarrollo Municipal, la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales y el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático mantienen una oferta de entrenamientos en línea para el conocimiento de la preparación de inventarios, con enfoque a las entidades municipales [16]. Sin embargo, su alcance no cubre aún todas las subcategorías señaladas en las directrices y su aplicación sigue un proceso lento, así se apreció al haber realizado la búsqueda y rastreo del inventario de emisiones GyCEI de los estados y de los municipios, no se publican, no se actualizan o no se realizan.

Entre otras alternativas, el Programa de educación en cambio climático ofertado de manera altruista por el Centro Mario Molina brinda las bases para la comprensión de la problemática climática [17]. La Agencia de Protección al Ambiente de Estados Unidos (USEPA) tiene disponible el uso en línea de una calculadora de equivalencias de las emisiones de GyCEI la cual permite comparar el impacto de la energía en sus diferentes formas [18].

Se ofertan cursos formales para la preparación de inventarios en sitios de internet, pero no existe una calendarización sistematizada y su disponibilidad para la población en general es limitada, por lo que impera el desconocimiento en la identificación de los GyCEI, estos gases y compuestos con frecuencia son confundidos con los contaminantes criterio que son mayormente conocidos y son monitoreados y regulados de manera obligatoria por normativas. Asimismo, se requiere la disponibilidad de programas de entrenamiento para la identificación de las fuentes generadoras de GyCEI, para la cuantificación de emisiones, para la preparación de inventarios de emisiones y de la apreciación del ciclo del carbono a través del papel de los recursos forestales. A su vez, la comprensión de las directrices podría dificultarse y resultar poco atractiva, debido a la cantidad extensa de los capítulos que conforman cada uno de los 5 volúmenes y de sus anexos agregados [19].

B. Limitantes tecnológicas
Sistemas de medición de las emisiones de metano.

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

Para cuantificar emisiones de metano en la crianza de ganado se han usado cámaras de respiración, cajas de cabeza, sistemas GreenFeed (uso de sensores de medición de los gases de exhalación mientras el animal se alimenta), usando un gas trazador o una frecuencia láser, pero principalmente con fines de investigación y su aplicación masiva presenta limitaciones como tiempo o costo [12]. En la literatura se citan diferentes mecanismos para la detección de metano que podrían permitir conocer su concentración de manera directa y en tiempo real en el sitio de emisión: Espectroscopia, Sensores electroquímicos y Sensores electrónicos, y también tecnologías recientemente adoptadas como la detección de fugas por aeronaves [20]. También están las tecnologías de Imágenes Ópticas de Das (OGI) [21] y los modelos computacionales, como FEAST de la USEPA.

La espectroscopia se basa en el estudio de absorción y emisión de luz por parte de las estructuras moleculares, incluyendo las interacciones entre la materia y la energía radiada. La identificación y cuantificación de metano se basa en la absorción de radiación en diferentes longitudes de onda (λ), incluyendo el infrarrojo medio (e.g. $2.3\ \mu m < \lambda < 3.26\ \mu m$), el efecto Raman o el método de Detección de Doble Modulación (TDLAS). Aunque estos métodos pueden tener alta sensibilidad, entre sus dificultades para la cuantificación de metano *in situ* están el alto costo, la demanda de espacio y su poca portabilidad, limitada selectividad, dificultades para el manejo de muestras y su susceptibilidad a los cambios fisicoquímicos ambientales. En el trabajo de Robles Cedillo [22] se utilizó un sensor Geotech Portable Gas Monitor: Biogas5000 para medir en el infrarrojo y comparar las emisiones de metano de diferentes plantas de tratamiento de aguas residuales.

Los sensores electroquímicos funcionan con base a la oxidación o reducción del metano en un electrodo y producen una señal eléctrica (e.g. corriente faradaica) proporcional a la concentración del gas. Hay sensores de tipo amperométrico, potenciométrico y electroanalíticos (Espectroscopía de Impedancia Electroquímica - EIS). Entre sus ventajas están su simplicidad y costo bajo, pero ofrecen limitaciones como la necesidad de que el metano se disuelva en un electrolito líquido, su medición puede ser interferida en presencia de otros gases. Los sensores como los de estado sólido operan solo en temperaturas cercanas a 400 °C, requieren calibración regular y preparación de la muestra, la medición depende del diseño del electrodo y su costo puede resultar elevado. Entre los desafíos encontrados están, la detección de concentraciones bajas de metano y sus tiempos de respuesta pueden ser largos.

Los sensores electrónicos son independientes de alguna reacción electroquímica, pueden ser de tipo piezoeléctrico (se genera una carga eléctrica producida por presión, tensión o deformación), pellistor (utilizan un catalizador que adsorbe el metano y produce calor provocando un cambio en su resistencia eléctrica) y de tipo semiconductor, cuya conductividad eléctrica está afectada por la presencia de metano. Algunas limitantes del uso de estos dispositivos son su limitada selectividad debido a que la medición puede afectarse ante la presencia de hidrocarburos.

En la Tabla 1 se compara la sensibilidad de detección del gas metano en mediciones mediante sensores catalíticos, infrarrojo y fotoacústicos. La aplicación principal de dichos sensores es el resguardo de la seguridad industrial en plantas donde se opera metano, por lo que su venta y distribución no es el seguimiento climático o el cumplimiento de normativa y procedimientos ambientales. Los sensores listados son usados para la detección de fugas y la prevención de explosiones causadas por concentración de metano. La concentración de gas medido se expresa como fracción del LEL (Low Explosive Limit). Por lo tanto, su aplicación ampliada a la medición de emisiones atmosférica de metano es un área de oportunidad para aprovechar su tecnología y portabilidad en la cuantificación de emisiones atmosféricas. No se tienen reportes de su aplicación en la elaboración de los inventarios.

Un cuarto grupo de metodologías de medición de metano incluyen a la cromatografía de gases (GC) en la que se determina la fracción de metano contenida en una mezcla de gases, el sistema de sensor de metano submarino (METS) que utiliza un sensor semiconductor para la medición del metano disuelto en agua, los métodos espectroscópicos como el de absorción ultravioleta (UV), infrarrojo cercano (NIR) o la espectroscopia basada en la dispersión inelástica de la luz (efecto Raman) que también permite detectar compuestos volátiles. Sin embargo, la GC no es portátil, requiere tiempos de análisis prolongados y técnicos capacitados para su operación, además de su alto costo. Asimismo, las técnicas basadas en espectroscopía también requieren equipos fijos, no portátiles, costosos y requieren condiciones controladas para su funcionamiento por lo que también están limitadas en las estimaciones para la elaboración de inventarios.

Tabla 1. Comparación de la sensibilidad de sensores usados para medición in situ *de gas metano.*

Tipo de instrumento	Sensibilidad	Fabricantes
Telemetría mediante sensores de Espectroscopía de Absorción Láser de Diodo Sintonizable (TDLAS)	0 - 99,999 ppm·m*	Liwin-China

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

Catalíticos	0-100 % LEL**	Oldham-RU
		Nenvitech-China
Sensores Infrarrojos	0-100 % LEL	Teledyne Gas and Flame Detection-EUA
		Nenvitech-China
Sensores de semiconductores de óxido metálico (MOS)	200 - 10,000 ppm 1 - 25 % LEL	Figaro-EUA
	300 - 10,000 ppm	Hanwei Electronics
Sensores fotoacústicos	0.5 - 10,000 ppm	Thorlabs-EUA

* La expresión ppm·m expresa la concentración de gas (ppm) a través de una distancia (m), se utiliza en mediciones de telemetría.
** LEL = Lower Explosive Limit (Límite Inferior de Explosividad). Para gas metano (% base volumen): LEL = 5% (50,000 ppm). UEL (Upper Explosive Limit) para gas metano es 15% (150,000 ppm). Según las normativas OSHA (EUA) y ATEX (UE).

El Sistema Sensor de Metano Submarino (METS) experimenta un retraso prolongado en la medición, y no opera en condiciones atmosféricas.

La cámara por infrarrojo es una de las tecnologías OGI aplicada en el monitoreo de fugas de metano en tuberías u otras instalaciones petroquímicas [21].

Se mencionan tecnologías recientes de soporte satelital, poco citadas en la estimación de emisiones. La plataforma Carbon Mapper, disponible en línea, utiliza técnicas de espectrometría de imágenes usando aeronaves y soporte del AVIRIS-NG de la NASA y ofrece de manera pública los registros a nivel global de las tasas de emisión de metano (e.g. ton/h de CH_4) [23]. La resolución espacial de la medición está en el rango de 3 m a 5 m pero sus registros se enfocan en fuentes de grandes emisiones solamente. La información de la plataforma resulta de gran utilidad para la toma de acciones técnicas y operativas. Sin embargo, una de sus limitantes es la falta de registros de modo continuo. Se analizó la información disponible en la plataforma para las emisiones de metano en México y se observó que se concentran en los sectores de petroquímica, residuos y agricultura, mientras que en EUA las fuentes encontradas con mayor frecuencia son pozos o complejos petroquímicos.

En la Figura 3 se reportan los flujos porcentuales de emisiones. Para la República Mexicana se identificaron 30 fuentes con altas emisiones de los sectores según se indica: gas y petroquímica (5), rellenos sanitarios (o manejo y disposición de residuos) (20), producción de electricidad (1) y 4 sectores que no fue posible identificarlos. Los datos encontrados para el sector de gas y petroquímica incluyen la operación *off shore* en el Golfo de México de una plataforma situada en las costas de Campeche y Tabasco, que registra emisiones de hasta de 17 ton/h de CH_4. Las tasas de emisión por cada relleno sanitario oscilan desde 0.157 ton/h de CH_4 hasta 4.8 ton/h de CH_4.

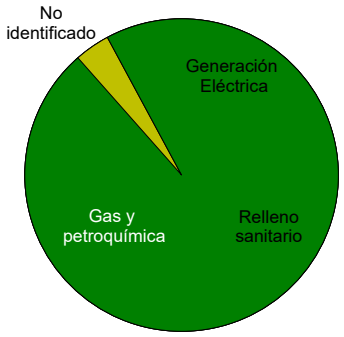


Figura 3. Comparación de los flujos de emisiones máximos históricos de CH_4 registrados por sector en México: Gas y petroquímica (39 %), Relleno sanitario (31 %), Generación eléctrica (26 %) y otras fuentes no identificadas (4 %). Fuente: Construcción propia con datos de Carbon Mapper.

TROPOMI es un sistema de monitoreo satelital de gases que registra datos globales de la concentración de metano atmosférico, sin enfocarse en la identificación de la fuente emisora, dicha organización colabora con el Observatorio Atmosférico Altzomoni (UNAM, ubicado a 4,000 msnm en el Estado de México) y con el Satelite Copernicus Sentinel-5P [24, 25, 26]. MethaneSAT es una institución privada que ofrece servicios avanzados y de precisión para el monitoreo aéreo y satelital, mediantes imágenes tomadas en el infrarrojo, de las emisiones de metano, provenientes de fuentes petroquímicas, entre otras [27]. No obstante, el costo alto de sus servicios limita el acceso a información satelital en la preparación de inventarios. Las mediciones y colección de datos a través de instrumentos satelitales representan un avance significativo en el monitoreo de metano, sin embargo, se identificaron algunos factores limitantes a las mediciones, e.g. nubosidades o bancos de nubes, el albedo superficial, viento y/o los píxeles faltantes en el procesamiento de imágenes. Otros factores de menor relevancia que también pueden afectar son la presencia de aerosoles, la latitud y el terreno de la superficie de estudio [28].

Asimismo, mediante modelado computacional (FEAST) ha sido posible realizar simulaciones de las emisiones fugitivas de metano posibilitando la adopción de medidas para su reducción, sus aplicaciones han sido principalmente para determinar emisiones provenientes de refinerías o de otras instalaciones petroquímicas [21]. Aunque la legislación mexicana continúa la construcción y fortalecimiento de su marco normativo en materia de adaptación y mitigación del cambio climático

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

y de reducción de emisiones GyCEI que permitan cumplir las metas y compromisos adoptados a través del Acuerdo de Paris y de las Conferencias de las Partes, aún es endeble y requiere mayor impulso. Hay áreas de oportunidad que requieren atención, además de completar la expedición de los IPC de las alcaldías y entidades estatales, la realización de los inventarios debe consolidarse para lograr avances en materia climática. Otras naciones ya han emprendido la implementación de normativas enfocadas a emisiones negativas, es decir, implementación de procesos para captura y secuestro de GyCEI. Sin embargo, son tecnologías aún en desarrollo y con limitaciones técnicas, con pocas opciones para su escalamiento, presentan bajos rendimientos en la determinación, no han sido reconocidas todavía en la legislación, son desconocidas por los actores en los sitios de emisión, demandan alta inversión y pueden consumir grandes cantidades de energía, lo que contradice el propósito inicial. Entre estas: i) Reducción de emisiones mediante procesos de energía solar, ii) Sistemas de bioenergía, iii) Energía eólica y iv) Energía geotérmica, v) Fotocatalizadores construidos con zeolitas y redes poliméricas porosas, vi) Eliminación biológica de metano y vii) Formación de aerosoles de sales de hierro [29, 30].

Propuesta.
La incertidumbre planteada en la cuantificación de emisiones para la preparación de inventarios es resultado de múltiples variables en un escenario complejo con más de una posible salida. El amortiguamiento de las emisiones y la mejora de los mecanismos de determinación de emisiones concentran alternativas que deben replantearse en la gestión de GyCEI, para lograr reducir emisiones, mejorar los sistemas de captura y secuestro de metano, aprovechar el biogas en sistemas de cogeneración y prevenir fugas en el sector petroquímico. Las estrategias propuestas en la literatura para reducir emisiones de metano en rumiantes incluyen la modificación de la dieta, la selección de la raza en la crianza y producción masiva de ganado, el uso de aditivos alimentarios como inhibidores de metano tales como plantas, lípidos, aceites esenciales y algas.

En materia de gestión gubernamental, es viable evaluar la transición sistematizada de los métodos de estimación, para que estén soportados en mecanismos de medición y monitoreo de las fuentes emisoras, considerando el desarrollo e implementación de modelos de las emisiones y su predicción, que mejoren la trazabilidad de las emisiones, inclusive.

Se propone la implementación de sensores de bajo costo y de arquitectura simple, de tipo electroquímico, portables, calibrados mediante estándares certificados, con altas posibilidades para escalarse en red y permitir el monitoreo masivo, simultáneo y continuo de emisiones *in situ* de las fuentes emisoras, con la ventaja de hacer posible la rastreabilidad de los datos para mejorar la elaboración del INEGyCEI. Actualmente, los autores del presente trabajo implementan un sistema de sensores de este tipo y realizan mediciones *in situ*, y se comparan con los registros obtenidos con un sistema portable de calibración certificada, una vez que madure la propuesta se podrá proporcionar más información.

CONCLUSIONES

Se identificaron factores limitantes para la elaboración del INEGyCEI. Los hallazgos se diferenciaron de acuerdo a su carácter de gestión, indicados en leyes y reglamentos relativos al cambio climático, o por su origen en limitaciones técnicas, como la viabilidad de implementación de instrumentos para la medición directa de emisiones en los sitios de generación de emisiones. Puede señalarse que la adopción de estrategias para el cumplimiento de normativas, la formación de personal entrenado y la implementación del uso de instrumentos y uso de plataformas disponibles para la colección, seguimiento y análisis de datos puede disminuir el sesgo o incertidumbre en la preparación de los inventarios, ya sean de tipo municipal, estatal o federal. Los autores del presente trabajo están desarrollando e implementando actualmente un sistema de sensores de bajo costo, portables, calibrados con gases de concentración certificada, y escalables, a fin de cumplir una agenda de mediciones *in situ*, en polígonos circundantes a sitios industriales que realizan actividades de potencial emisión de metano, soportadas por mediciones realizadas usando un sistema de uso industrial, también con calibración certificada.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece el financiamiento PRODEP-TecNM a través de la Convocatoria de Apoyo para el Fortalecimiento de Cuerpos Académicos 2024.

BIBLIOGRAFÍA

[1] Naciones Unidas (1992). Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático.
[2] DOF, Diario Oficial de la Federación (2024). Ley General de Cambio Climático.
[3] Fuglestvedt, J., Reisinger, A. Korecha, D. (2023). Overview: Greenhouse gas metrics in IPCC reports. IPCC technical workshop on common metrics. UN Climate Change Conference. Bonn.
[4] Smith, C., et al. (2021). The earth's energy budget, climate feedbacks, and climate sensitivity supplementary material. En: Climate Change 2021: The physical science basis. Contribution of working group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental

Panel on Climate Change. Masson-Delmotte, V., et al. (Eds.). Disponible en: https://www.ipcc.ch/. (última consulta: febrero 2025).

[5] International Agency of Energy. Global methane tracker 2024. Disponible en: www.iea.org (última consulta: febrero 2025).

[6] INECC. Inventario Nacional de Emisiones de Gases y Compuestos de Efecto Invernadero. Disponible en: www.datos.gob.mx (última consulta: febrero 2025).

[7] Calvo, E. B., Tanabe, K., et al., (Eds.) (2019). 2019 Refinement to the 2006 IPCC guidelines for national greenhousegas inventories. Task Force on National Greenhouse Gas Inventories. Published: IPCC, Switzerland. ISBN 978-4-88788-232-4.

[8] Xia, H., Strayer, A., Ravikumar, A. P. (2024). The role of emission size distribution on the efficacy of new technologies to reduce methane emissions from the oil and gas sector. Environmental Science and Technology 58: 1088-1096.

[9] INECC. Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. México ante el cambio climático. Disponible en https://cambioclimatico.gob.mx/ (última consulta: febrero 2025).

[10] Conferencia de las Partes. United Nations. Climate Change. Disponible en: https://unfccc.int (última consulta: febrero 2025).

[11] Børsting, C. F. Brask, M., Hellwing, A. L. F., Weisbjerg, M. R., Lund, P. (2020). Enteric methane emission and digestion in dairy cows fed wheat or molasses. Journal of Dairy Science, 103: 1448 - 1462

[12] Tedeschi, L. O. et al. (2022). Quantification of methane emitted by ruminants: a review of methods. Journal of Animal Science. 100: 1–22.

[13] INEGI. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. Censo Agropecuario 2022. Sitio web www.inegi.org.mx (última consulta: Febrero 2025).

[14] INEGI. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. Economía y Sectores Productivos. Disponible en: https://tinyurl.com/3hzxe8nb (última consulta: Febrero 2025)

[15] CNA, Comisión Nacional del Agua (2023) Inventario Nacional de Plantas Municipales de Potabilización y de Tratamiento de Aguas Residuales en Operación, Diciembre 2023. Comisión Nacional del Agua. México.

[16] INAFED. Instituto Nacional para el Federalismo y el Desarrollo Municipal. Disponible en: https://www.gob.mx/inafed. (última consulta: febrero 2025).

[17] Centro Mario Molina. Disponible en: https://centromariomolina.org/ (última consulta: febrero 2025).

[18] USEPA. Greenhouse gas equivalencies calculator. Disponible en: https://tinyurl.com/yc8pc26h. (última consulta: febrero 2025).

[19] Buendia, E. C., et al. (eds). 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Suiza. ISBN 978-4-88788-232-4. Disponible en: https://tinyurl.com/34snbbmt. (última consulta: febrero 2025).

[20] Kamieniak, J., Randviir, E. P., Banks, C. E. (2015). The latest developments in the analytical sensing of methane. Trends in Analytical Chemistry. 73: 146-157.

[21] Ravikumar, A. P., et al. (2018). Good versus good enough? Empirical tests of methane leak detection sensitivity of a commercial infrared camera. Environmental Science Technology. 52: 2368–2374.

[22] Robles, C. R. (2022) Estimación de las emisiones de gases de efecto invernadero (Metano) por las plantas de tratamiento de aguas residuales en la Ciudad de México. Tesis. FES-Zaragaoza, UNAM. México.

[23] Carbon Mapper. Open Data Portal. Disponible en: https://carbonmapper.org (última consulta: febrero 2025).

[24] TROPOMI. Tropospheric Monitoring Instrument. Disponible en: www.tropomi.eu (última consulta: febrero 2025).

[25] Instituto de Ciencias de la Atmósfera y Cambio Climático. UNAM. Disponible en: www.atmosfera.unam.mx (última consulta: febrero 2025).

[26] Copernicus Sentinel-5P Mapping Portal. Disponible en: https://maps.s5p-pal.com/ch4/ (última consulta: febrero 2025).

[27] MethaneSAT©. Environmental Defense Fund. Disponible en: www.methanesat.org/ (última consulta: febrero 2025).

[28] Cooper, J., Dubey, L. Hawkes, A. (2022). Methane detection and quantification in the upstream oil and gas sector: the role of satellites in emissions detection, reconciling and reporting. Environmental Science: Atmospheres. 2022: 9–23.

[29] Jackson, R. B. et al. (2021). Atmospheric methane removal: a research agenda. Philosophical Transaction. Royal Society. A. 379: 20200454.

[30] Quan, D. V., Milani, D., Zahra, M. A. (2023). A review of potential routes to zero and negative emission technologies via the integration of renewable energies with CO_2 capture processes. International Journal of Greenhouse Gas Control 124: 103862.

AUTORIZACIÓN Y RENUNCIA.

Los autores del presente artículo autorizan al TecNM/Instituto Tecnológico de Zacatepec para publicar el escrito en el libro electrónico del CITID 2025. El TecNM/ITZ o los editores no son responsables ni por el contenido ni por las implicaciones de lo que está expresado en el escrito.

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

ANÁLISIS DE LAS CONDICIONES DE OPERACIÓN DE UN CONCENTRADOR CILINDRO PARABÓLICO PARA DIFERENTES CIUDADES DE LA REPÚBLICA MEXICANA

D. Briseño Garduño [1], Yuridiana R. Galindo Luna [2]

[1] Ingeniero en energía, Lic. Ingeniería en Energía, Universidad Autónoma Metropolitana
[2] Doctora en Ingeniería y Ciencias Aplicadas, Universidad Autónoma Metropolitana Departamento de ingeniería de Procesos e Hidráulica, Av. San Rafael Atlixco No.186 Col. Vicentina
C.P. 09340 Del. Iztapalapa DF México
Tel 5548489357, 5524980027, correo: cbi2173048356@izt.uam.com, ygalindol@izt.uam.mx

Resumen. Este estudio presenta la simulación de un Concentrador Cilindro Parabólico (CCP) a escala, empleando el software de trazado de rayos Tonatiuh. Se utilizaron datos de la irradiancia solar de los estados de Baja California, Campeche, Chihuahua, Coahuila, Quintana Roo y Yucatán para determinar condiciones adecuadas de operación. El CCP analizado, se encuentra instalado en la UAM Iztapalapa, utilizando su geometría para desarrollar la simulación, empleando características específicas del diseño. La metodología incluyo la recopilación de datos de fuentes como SENER y la NASA, así como el análisis del trazado de rayos del CCP en diferentes condiciones de irradiancia, la división de secciones en el tubo receptor para analizar de forma precisa la distribución del flujo de calor. Los resultados indican que Baja California tiene el mayor flujo de calor máximo de 30,000 W/m², mientras que Campeche presenta valores más estables. Chihuahua y Coahuila muestran alta variabilidad, y Quintana Roo y Yucatán mantienen un comportamiento más moderado. Los resultados permiten determinar la viabilidad de la aplicación del CCP en otras localidades. La simulación con Tonatiuh demuestra ser una herramienta útil para determinar las condiciones de operación y aplicación de sistemas solares térmicos en México.

Palabras Clave: Concentrador cilindro parabólico, Tonatiuh, trazado de rayos, energía solar térmica.

Abstract -- This study presents the simulation of a Parabolic Trough Concentrator (PTC) at scale, using the Tonatiuh ray tracing software. Solar irradiance data from the states of Baja California, Campeche, Chihuahua, Coahuila, Quintana Roo and Yucatán were used to determine suitable operating conditions. The PTC analyzed is installed at the UAM Iztapalapa, using its geometry to develop the simulation, using specific design characteristics. The methodology included the collection of data sources such as SENER and NASA, as well as the analysis of the PTC ray tracing in different irradiance conditions, the division of sections in the receiver tube to accurately analyze the distribution of the heat flow. The results indicate that Baja California has the highest maximum heat flow of 30,000 W/m², while Campeche presents more stable values. Chihuahua and Coahuila show high variability, and Quintana Roo and Yucatán maintain a more moderate behavior. The results allow determining the viability of the application of the PTC in other locations. Simulation with Tonatiuh proves to be a useful tool to determine the operating and application conditions of solar thermal systems in Mexico.

Key words – Parabolic trough concentrator, Tonatiuh, ray tracing, solar thermal energy.

INTRODUCCIÓN

Los concentradores solares han sido una tecnología clave en la evolución de la energía solar térmica, permitiendo la captura y concentración de la radiación solar para convertirla en energía térmica de alta potencia. Desde sus orígenes en la antigüedad, hasta los modernos sistemas empleados en plantas solares a gran escala, estos dispositivos han experimentado un progreso significativo.

Entre las tecnologías más exitosas en este campo se encuentran los Concentradores Cilindro Parabólicos (CCP), que utilizan espejos con forma de parábola para concentrar la radiación solar en un receptor lineal, donde se convierte en energía térmica. Esta energía puede ser utilizada para generar electricidad o en procesos industriales. Desde los trabajos pioneros de H. Tabor en la década de 1950, los CCP han alcanzado un alto nivel de desarrollo tecnológico, con mejoras en materiales, sistemas de control y fluidos térmicos. [1]

Uno de los principales desafíos en el uso de los concentradores cilindro parabólicos (CCP) es la optimización de su rendimiento óptico y térmico. La eficiencia de estos sistemas depende de la capacidad de los espejos para concentrar la radiación solar en el receptor y de la transferencia de calor al fluido térmico. Sin embargo, diversos factores pueden afectar este rendimiento, como la calidad y alineación de los espejos, las pérdidas térmicas en el receptor y la eficiencia del sistema de seguimiento solar. [2]

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

Además, la eficiencia de conversión energética y la adaptación a diversas condiciones climáticas representan barreras adicionales, ya que factores como la radiación solar incidente, la temperatura ambiente y las condiciones meteorológicas pueden influir en la estabilidad y desempeño del sistema. En este sentido, estudios recientes han demostrado que mejorar la eficiencia de los CCP requiere estrategias de optimización que incluyan el diseño geométrico del colector, el recubrimiento selectivo del receptor y el análisis del rendimiento óptico en diferentes ubicaciones geográficas. Asimismo, el desarrollo de materiales con mejores propiedades reflectantes y absorbentes, junto con avances en fluidos térmicos de alta eficiencia, son aspectos clave para mejorar el desempeño de estos sistemas. [3]

Aunque se han desarrollado métodos avanzados para analizar y simular estos procesos, como el método de trazado de rayos de Monte Carlo (MCRT), aún existen limitaciones en la precisión y eficiencia de estas simulaciones, especialmente en sistemas complejos o bajo condiciones variables de radiación solar. Herramientas como el software Tonatiuh, un simulador de código abierto basado en MCRT, han demostrado ser útiles para evaluar el rendimiento óptico de concentradores solares. Tonatiuh permite modelar la geometría de distintos sistemas solares de concentración y calcular parámetros clave como la cantidad de rayos interceptados por el receptor y la distribución de flujo sobre su superficie. [4]

Sin embargo, la precisión de los resultados obtenidos con Tonatiuh depende de múltiples factores, como la calidad de los modelos geométricos, la caracterización óptica de los materiales y la cantidad de rayos trazados en la simulación. [5]

El uso de herramientas como Tonatiuh facilita la evaluación de diferentes configuraciones en función de la ubicación geográfica y las condiciones de radiación solar disponibles, lo que resulta crucial para la implementación de estos sistemas en entornos con variaciones climáticas significativas. Así, la combinación de simulaciones ópticas avanzadas con modelos térmicos y experimentación en campo sigue siendo una estrategia clave para mejorar la eficiencia y viabilidad de los sistemas solares de concentración. [6]

Este trabajo se busca evaluar la recolección de flujo de calor en un CCP, mediante simulaciones en el software Tonatiuh, con el objetivo de determinar las condiciones de operación y su aplicación en localidades con alto potencial de aprovechamiento solar.

DESARROLLO

Descripción del sistema (Concentrador Cilíndrico Parabólico)

La configuración geométrica se basa en el concentrador cilindro parabólico (CCP) instalado en la azotea del edificio AT de la Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Iztapalapa (UAM-I). Este CCP está orientado en dirección Este-Oeste y cuenta con un sistema de seguimiento solar manual en el eje Norte-Sur.

En la Figura 1. Se muestra el concentrador cilindro parabólico (CCP), su estructura óptica está compuesta por un espejo de aluminio pulido de alta reflectividad, diseñado para concentrar la radiación solar en un tubo absorbente de cobre con recubrimiento selectivo.

Este concentrador cuenta con las siguientes características:

1. Dimensiones: Con una longitud de 2.44 m y un ancho de 1.22 m.
2. Material del espejo: Aluminio pulido de alta reflectividad.
3. Un tubo absorbente: Material de cobre con un recubrimiento selectivo.
4. Recubrimiento. Cubierta de vidrio de una aleación de borosilicato.
5. Sistema de seguimiento: Un brazo mecánico de un solo eje que mueve el concentrador en base a las condiciones horarias necesitadas.
6. Fluido de transferencia de calor: Agua

Eficiencia óptica: Alrededor de 65%

Además, el concentrador está equipado con un sistema hidráulico impulsado por una bomba de medio caballo de potencia como se muestra en la Figura 2.

Este sistema incluye:

1. Un dispositivo de medición de presión,
2. Un flujómetro para monitorear el caudal
3. Dos válvulas de control
4. Un termotanque donde se almacena el flujo de trabajo requerido, que en este caso es el agua.

Figura 1. Concentrador Cilindro Parabólico.

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

Este conjunto de componentes asegura la correcta operación del sistema y permite un control preciso de las condiciones de trabajo, optimizando la eficiencia del concentrador cilindro parabólico.

Figura 2. Componentes del sistema hidráulico.

Metodología de la simulación

Se llevó a cabo una búsqueda de datos climatológicos de los últimos cinco años (2019-2023) en los estados de Baja California, Campeche, Chihuahua, Coahuila, Quintana Roo y Yucatán, enfocándose específicamente en los valores de radiación solar. El objetivo de esta recopilación fue obtener un conjunto de datos integral y preciso que permita analizar las variaciones en la irradiancia solar y las temperaturas máximas registradas en días específicos.

Los datos se obtuvieron de fuentes confiables como la Secretaría de Energía (SENER) y la National Aeronautics and Space Administration (NASA). La NASA destacó como la fuente principal debido a su base de datos robusta y bien estructurada, que facilita el acceso a información histórica detallada.[7]

Entre los datos recopilados se incluyen la irradiancia total (cantidad de energía solar recibida por unidad de superficie) y las temperaturas máximas diarias. La Tabla 1 muestran los valores para cada estado entra las 12 y 13 horas con su irradiancia máxima.

Tabla 1. Datos de Irradiancias máximas y temperaturas de los diferentes estados seleccionados en el año 2023.

Estado	Mes	Día	R.Total (W/m²)	Tmax (°C)	Tmin (°C)
Baja California	8	1	1036.11	40.9	23.08
Campeche	8	11	1052.77	32.19	25.19
Chihuahua	7	18	1063.88	38.26	22.49
Coahuila	8	2	1102.78	37.7	23.06
Quintana Roo	8	10	1036.11	32.81	25.58
Yucatán	8	11	1069.44	33	25.85

La Tabla 2 también se muestran los valores mínimos registrados para cada estado entre las 12:00 y 13:00 horas, específicamente en la radiación total para tener un panorama amplio sobre sus condiciones mínimas esperadas durante el día.

Tabla 2. Datos de Irradiancias mínimas y temperaturas de los diferentes estados seleccionados.

Estado	Mes	Día	R. Total (W/m²)	Tmax (°C)	Tmin (°C)	Año
Baja California	1	6	125.00	21.41	15.52	2019
Campeche	12	25	161.11	21.5	17.61	2022
Chihuahua	12	30	108.33	13.41	0.37	2020
Coahuila	11	12	100	12.88	4.44	2019
Quintana Roo	6	2	119.44	26.87	23.76	2020
Yucatán	1	3	122.22	24.34	19.62	2022

Estos datos permiten comparar el potencial solar para realizar simulaciones precisas en software especializado Tonatiuh. La información recopilada servirá como insumo para configurar las condiciones iniciales de la simulación, garantizando que los resultados reflejen escenarios realistas y aplicables a cada región.

Para realizar la simulación de un Concentrador Cilindro Parabólico (CCP) en el software Tonatiuh, se siguió un procedimiento estructurado que incluye la definición de los parámetros geométricos y ópticos del sistema, permitiendo así una comparación precisa de la radiación solar en diferentes días del año.[8]

Las características principales del CCP utilizado en la simulación son las siguientes:

Cilindro receptor: Un tubo de 1.22 m de largo, que actúa como el elemento donde se concentran los rayos solares reflejados por el paraboloide.

Radio del cilindro receptor: 0.0127 m, dimensiones que permiten una captura eficiente de la radiación concentrada.

Reflectividad del material del paraboloide: 0.92, valor que indica una recolección de datos con la que la superficie reflectante redirige los rayos solares hacia el receptor.

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

En la Figura 3 se muestra un ejemplo de simulación con las características descritas anteriormente.

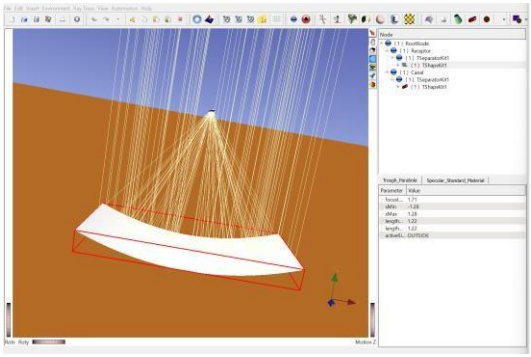


Figura 3. Geometría de la simulación para el diseño de un CCP.

DISCUSIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

En total, se seleccionaron seis estados de la república Mexicana para realizar una comparación y verificar su potencial para el aprovechamiento de la energía solar. Para llevar a cabo esta evaluación, se utilizaron los datos de irradiancia máxima y mínima para generar las simulaciones, permitiendo así una comparación precisa de la recolección de radiación solar bajo condiciones puntuales.

Para analizar con mayor precisión la distribución de la radiación solar en la superficie del tubo, este se dividió en cuatro secciones de 90° cada una. En la Figura 4 y la Tabla 3 se presenta la configuración de las secciones que componen el tubo.

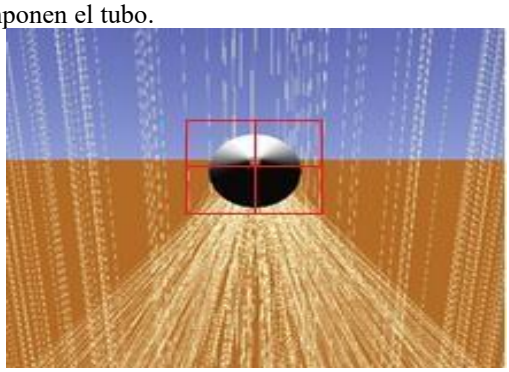


Figura 4. Distribución de secciones del tubo receptor.

Sección 1 (0° - 90°): Baja Irradiación
En la Figura 5 del tubo receptor dividido, esta zona se ubica con un área mayormente opaca, indicando mínima absorción de flujo térmico. Debido a su posición en la parte superior, está menos expuesta a los rayos reflejados del concentrador parabólico.

Sección 2 (90° - 180°): Irradiación Media
Se observa un aumento gradual del flujo térmico conforme se desplaza hacia una mayor longitud. Recibe una parte de la radiación reflejada, aunque no es la región donde se concentra la mayor cantidad de flujo de calor.

Sección 3 (180° - 270°): Máxima Irradiación
Representada en la imagen del tubo receptor con una franja verde-amarilla, con algunos segmentos tendiendo al rojo, señalando altas concentraciones de flujo térmico. Corresponde al área donde los rayos reflejados convergen con mayor intensidad, alcanzando el pico de absorción térmica.

Sección 4 (270° - 360°): Disminución del Flujo
Aunque todavía recibe radiación reflejada, se observa un descenso progresivo en la cantidad de calor absorbido.

Los valores representados en la Tabla 3 abarcan desde 0 m hasta aproximadamente 0.08 m, ya que corresponden al perímetro ocupado por cada una de las secciones del tubo. Esta medición permite analizar de manera precisa la distribución del flujo de calor a lo largo de la superficie del tubo receptor, facilitando la identificación de variaciones en la intensidad del calor en cada segmento.

Tabla 3. Distribución especifica en metros de las secciones del tubo receptor

Nombre	Ubicación	Longitud(m)
Sección 1	0° - 90°	0.0 - 0.01995
Sección 2	90° - 180°	0.01995 - 0.0399
Sección 3	180° - 270°	0.0399 - 0.05985
Sección 4	270° - 360°	0.05984 - 0.0798

Inicialmente, se obtuvieron los valores del flujo individual a partir del software Tonatiuh, tal como se presenta en la metodología y se observa en la Figura 5, la cual identifica la cantidad de energía recolectada en el tubo. Esto proporciona una representación clara del comportamiento del flujo de calor en el tubo absorbedor de acuerdo la simulación. Cabe mencionar que la Figura 5 muestra la imagen en función del número de nodos, en este caso 50x50 nodos.

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

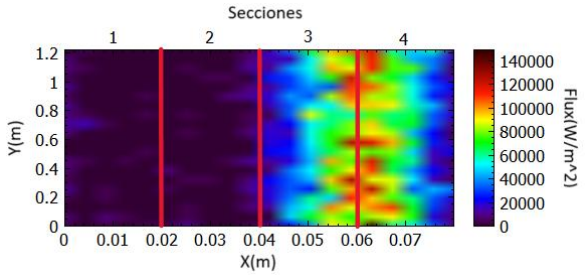


Figura 5. Distribución del flux de calor obtenido a partir de la simulación de un CCP.

Con respecto a la distribución del flujo máximo, la Figura 6 presenta la esta distribución en función del perímetro del receptor para diversas regiones de México, incluyendo Yucatán, Baja California, Campeche, Chihuahua, Coahuila y Quintana Roo. En el eje horizontal se representa el perímetro en metros, mientras que en el eje vertical se muestra el flujo de calor en unidades de W/m².

Los datos revelan un comportamiento similar en todas las regiones analizadas. A partir de las secciones 2 y 3 (Tabla 3), cerca de los 0.04 m, el flujo de calor experimenta un aumento significativo. Destaca que la curva correspondiente a Baja California registra el valor más alto de flujo de calor, alcanzando un pico de aproximadamente 120,000 W/m² entre la sección 3 y 4 de 0.06 m. Estos comportamientos resaltan las diferencias regionales en la distribución del flujo de calor y sugiere un mayor impacto de la radiación solar en dicha zona.

Las demás regiones, incluyendo Campeche, Chihuahua, Coahuila, Quintana Roo y Yucatán, muestran comportamientos similares, aunque con valores máximos ligeramente menores. Entre ellas, las curvas de Coahuila y Quintana Roo presentan picos cercanos a los de Baja California, mientras que Chihuahua y Yucatán exhiben valores ligeramente más bajos. Esta información es clave para seleccionar las ubicaciones más favorables para la instalación de CCP, maximizando la recolección de energía solar con el objetivo de optimizar el rendimiento del sistema en función de la disponibilidad solar.

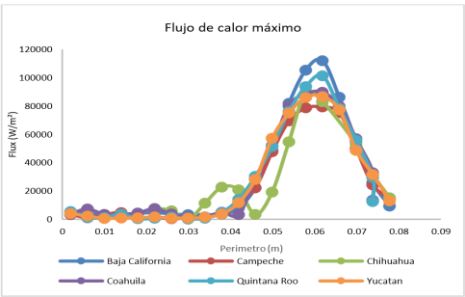


Figura 6. Flux máximos obtenidos a partir de la simulación de un CCP.

También se obtuvieron resultados del flujo mínimo (considerando las condiciones mínimas de temperatura, Tabla 1 y 2) correspondiente a los diferentes estados analizados, con el objetivo de proporcionar una visión amplia sobre las condiciones mínimas posibles para cada uno de ellos. Los resultados indican que el comportamiento general es similar entre las distintas ubicaciones.

En la Figura 7, se observa un incremento significativo en el flujo de calor a partir de la sección 2 cercana a 0.04 m, alcanzando un valor máximo (16,000 W/m²) alrededor de las secciones 3 y 4 correspondientes a 0.06 m, seguido de una disminución progresiva.

Destaca la curva correspondiente a Campeche, la cual presenta el mayor flujo de calor mínimo, con un pico aproximado de 16,000 W/m², logrando la distribución más constante.

Por otro lado, las curvas de Baja California, Coahuila y Quintana Roo muestran valores máximos cercanos entre sí, mientras que Chihuahua y Yucatán presentan flujos ligeramente inferiores. A pesar de las variaciones en la magnitud del flujo de calor entre las distintas ubicaciones, la tendencia general es consistente, lo que sugiere una respuesta uniforme del sistema bajo condiciones de irradiancia mínima.

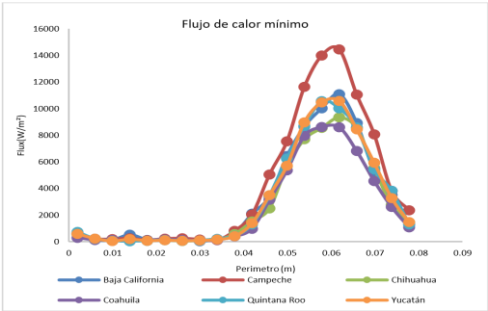


Figura 7. Flux mínimos obtenidos a partir de la simulación de un CCP.

Por último, se expone una comparativa de la distribución del flujo de irradiancia para cada uno de los estados analizados. En la Tabla 4 se agrupan tres parámetros clave obtenidos de la simulación:

Los puntos máximos (W/m²) representan los valores pico de flujo de calor alcanzados en cada estado, lo que permite identificar las condiciones de concentración de energía solar. Por otro lado, el promedio (W/m²) indica el valor medio del flujo durante el periodo evaluado. Finalmente, la comparativa (%) se establece al contrastar el valor máximo registrado con el segundo mayor, expresando en porcentaje la diferencia relativa entre

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

ellos, lo que ayuda a analizar los contrastes en la irradiancia.

Tabla 4. Valores máximos determinados en la simulación.

Estados	Puntos Máximos (W/m²)	Promedio (W/m²)	Comparativa
Baja California	112096.10	31025.05	0
Campeche	79335.02	24776.32	20%
Chihuahua	89856.26	23302.37	25%
Coahuila	88697.10	28515.62	8%
Quintana Roo	93759.72	27427.76	12%
Yucatán	88091.59	26709.71	14%

La Tabla 5 presenta los valores mínimos registrados en la simulación, destacando tanto los picos mínimos (en W/m²) como los promedios correspondientes, y se incluye una comparativa porcentual que indica la variación con respecto al valor más alto, que en este caso corresponde a Campeche.

Tabla 5. Valores mínimos registrados en la simulación

Estados	Puntos Máximos (W/m²)	Promedio (W/m²)	Comparativa
Baja California	11078.09	3159.45	24%
Campeche	14450.49	4144.79	0%
Chihuahua	9341.84	2772.33	33%
Coahuila	8616.01	2692.58	35%
Quintana Roo	10556.92	3069.88	26%
Yucatán	10574.24	3079.89	26%

Las diferencias porcentuales permiten identificar la variabilidad en cada región, lo que resulta crucial para el diseño y la optimización de sistemas de captación solar, especialmente en situaciones donde se requiere garantizar un rendimiento aceptable incluso en los escenarios de menor radiación.

La Figura 8 presenta la comparativa general, en el eje Y se representa el de flujo de calor obtenido en las simulaciones (W/m²). Y en el eje X, los seis estados analizados: Baja California, Campeche, Chihuahua, Coahuila, Quintana Roo y Yucatán. Cada estado presenta dos barras: la barra azul nos indica la magnitud más alta de flujo de calor promedio obtenido en las simulaciones, mientras que la barra naranja indica el flujo de calor promedio más bajo.

Baja California se distingue por mostrar el resultado más alto en cuanto a sus máximos, superando los 30,000 W/m², lo cual evidencia que es el estado con el flujo de calor más elevado. Sin embargo, los resultados mínimos cercanos a los 3,000 W/m², indican una marcada diferencia entre los valores máximos y mínimos. Por su parte, Campeche presenta el segundo resultado más alto, cercano a los 25,000 W/m², pero sobresale con un valor mínimo más alto (más de 4,000 W/m²).

Esto indica que, aunque no alcance el pico de Baja California, sus valores mínimos de flujo de calor se mantienen por encima del resto de los estados.

En el caso de Chihuahua, el valor máximo se aproxima a 23,000 W/m², mientras que el mínimo está alrededor de 2,700 W/m². Esta diferencia refleja un contraste notable. Coahuila, por otro lado, alcanza los 28,000 W/m² en la barra máxima y se ubica en torno a los 2,700 W/m² en la barra mínima. Si bien el intervalo entre máximo y mínimo es considerable, no alcanza la amplitud observada en Baja California. En Quintana Roo, su máximo se acerca a los 27,000 W/m², mientras que el mínimo esta alrededor de los 3,000 W/m². Esto sugiere una variabilidad moderada en el flujo de calor, al no existir una brecha tan marcada entre ambos extremos.

Finalmente, Yucatán exhibe un máximo de alrededor de 26,000 W/m² y un mínimo próximo a los 3,000 W/m², mostrando un comportamiento similar al de Quintana Roo en cuanto a la magnitud de la diferencia entre sus valores máximos y mínimos.

Al analizar las variaciones en los niveles de radiación solar entre diferentes regiones, que pueden influir en la planificación de proyectos solares y la evaluación del potencial energético en distintas zonas del país.

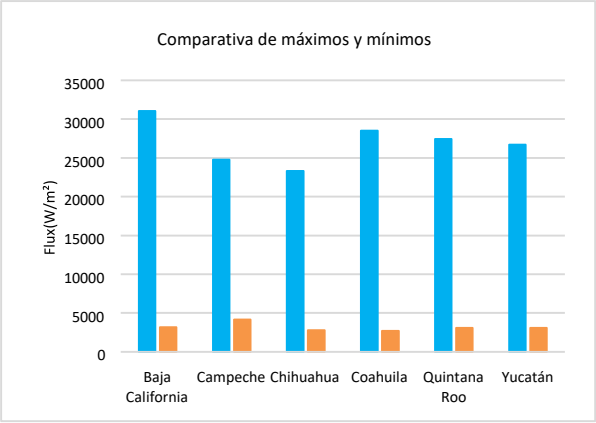


Figura 8. Comparativa entre los mínimos y máximos.

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

CONCLUSIONES

A partir del análisis de la base de datos y la simulación correspondiente para los estados en estudio, se obtuvieron las siguientes conclusiones:

- En conjunto, los resultados obtenidos evidencian que todas las regiones estudiadas poseen condiciones aptas para el aprovechamiento de la energía solar mediante sistemas CCP, debido a que los valores de flux promedios en condiciones estándar son aproximadamente entre 3000 W/m² y 8000 W/m².
- De acuerdo con los resultados, Baja California se posiciona como la región con el mayor potencial en términos de flujo de calor máximo promedio, con valores de 30,000 W/m². El valor mínimo determinado fue 3,000 W/m².
- Campeche sobresale al presentar el valor mínimo más alto 4,000 W/m², lo que lo convierte en una opción atractiva para aplicaciones que requieran estabilidad en la captación de energía solar.
- En el caso de Chihuahua y Coahuila, ambos estados presentan una diferencia significativa entre sus valores máximos y mínimos en un rango de 28,000 W/m² y 2,700 W/m².
- Finalmente, Quintana Roo y Yucatán muestran una variación más moderada, con valores máximos de 27,000 W/m² y mínimos de 3,000 W/m².

El uso del software Tonatiuh permitió obtener estimaciones aproximadas del comportamiento de los CCP en distintas ubicaciones del país. Esto refuerza la utilidad del trazado de rayos de Monte Carlo como una metodología confiable para evaluar la viabilidad de proyectos solares.

Finalmente, la posibilidad de utilizar CCP en los estados evaluados es factible y puede ser una estrategia efectiva para aprovechar la energía solar térmica en México. No obstante, su éxito depende de un diseño adecuado, estrategias de mantenimiento apropiadas y un monitoreo constante para optimizar su desempeño según las características climáticas específicas de cada estado. El desarrollo de tecnologías eficientes para la conversión de energía solar tiene implicaciones significativas en la reducción de la dependencia de combustibles fósiles y la mitigación del cambio climático.

BIBLIOGRAFÍA

[1] H. Tabor. (1958). Stationary mirror systems for solar collectors, Solar Energy, 2, 27-33.

[2] Duffie, J. A., Beckman, W. A. (1975). *Solar energy thermal processes*. John Wiley & Sons.

[3] Fernández-García, A., Zarza, E., Valenzuela, L., Pérez, M. (2010). Parabolic-through solar collectors and their applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *14*(7), 1695–1721.

[4] Blanco, Manuel., Amieva, Juana., Mancillas, Azael. (2005). The Tonatiuh Software Development Project: An Open-Source Approach to the Simulation of Solar Concentrating Systems.

[5] Agagna, Belkacem., Smaïli, Arezki., Falcoz, Quentin. (2017). Coupled simulation method by using MCRT and FVM techniques for performance analysis of a parabolic trough solar collector. Energy Procedia. 141. 34-38.

[6] Tonatiuh - Monte Carlo ray tracer for the optical simulation of CSP systems. (s/f). Google.com.https://groups.google.com/g/tonatiuh raytracer?pli=1

[7] Stackhouse, P. (s/f). POWER.Nasa.gov. https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/

[8] Narváez-Romo, Beethoven. (2022). Simulación óptica de un concentrador solar.

AUTORIZACIÓN Y RENUNCIA.

Los autores del presente artículo autorizan al TecNM/Instituto Tecnológico de Zacatepec para publicar el escrito en el libro electrónico del CITID 2025. El TecNM/ITZ o los editores no son responsables ni por el contenido ni por las implicaciones de lo que está expresado en el escrito.

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

DESTILACIÓN POR MEMBRANA PARA LA DESALINIZACIÓN DE SALMUERAS

Jonathan Ibarra Bahena[1], Ulises Dehesa Carrasco[2], Yuridiana Rocio Galindo Luna[3], Wilfrido Rivera[4]

[1]Doctorado. Instituto de Energías Renovables, Universidad Nacional Autónoma de México, Privada Xochicalco S/N, Temixco, 62580, Morelos, México. jibarra@ier.unam.mx, 7341135199.
[2]Doctorado. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, Paseo Cuauhnáhuac 8532, Jiutepec, 62550, Morelos, México. ulises_dehesa@tlaloc.imta.mx, 7772065049.
[3]Doctorado. Universidad Autónoma Metropolitana-Iztapalapa, San Rafael Atlixco 186, Iztapalapa, 09340, Ciudad de México, México. ygalindol@izt.uam.mx, 5524980027.
[4]Doctorado. Instituto de Energías Renovables, Universidad Nacional Autónoma de México, Privada Xochicalco S/N, Temixco, 62580, Morelos, México. wrgf@ier.unam.mx, 77736200 Ext. 90.

Resumen -- El aumento de la demanda de agua potable es un problema mundial, particularmente acentuado por el crecimiento de la población y el calentamiento global. Una de las alternativas para aumentar la disponibilidad de agua dulce es la desalinización. En el presente trabajo se describe un desalinizador que utiliza la configuración de destilación por membrana con espacio de aire. Se evaluó el desempeño del dispositivo con 2 tamaños de poro de membrana (0.22 y 0.45 µm), 4 temperaturas de solución (50,60,70, y 80°C), 2 temperaturas de enfriamiento (30 y 40°C) y una concentración salina de 100,000 ppm. Los valores máximo y mínimo de producción de agua destilada fueron de 20.0 y 1.6 $kg/m^2 \cdot h$, respectivamente. Los resultados muestran que la destilación por membrana con espacio de aire es una tecnología prometedora para la desalinización de salmueras altamente concentradas que otras tecnologías no pueden tratar y que pueden tener un efecto negativo en el medio ambiente.

Palabras Clave: Desalinización; Destilación por membrana con espacio de aire; Salmuera.

Abstract -- Currently, the scarcity of freshwater is an overall issue, notably increased by population growth and global warming. An alternative to provide freshwater is the desalination process. In this paper, a desalination device based on the air gap membrane distillation is described. An experimental evaluation was performed using membranes with pore diameters of 0.22 y 0.45 µm, four saline solution temperatures (50,60,70, y 80°C), two cooling temperatures (30 y 40°C) and a saline concentration of 100,000 ppm. The highest and lower values of distilled water production were 20.0 y 1.6 $kg/m^2 \cdot h$, respectively. According to the results, the air gap membrane distillation is a promising technology to desalinate brines which conventional desalination techniques are limited.

Key words – Desalination, Air gap membrane distillation, Brines.

INTRODUCCIÓN

Actualmente, el cambio climático, el crecimiento poblacional y las actividades económicas provocan escasez de agua dulce en muchas regiones del mundo. De las diferentes alternativas para atender este problema, la desalinización es una de las más prometedoras, ya que las fuentes salinas o salobres disponibles, como el océano o corrientes subterráneas, son abundantes. En un sistema convencional de desalinización se suministra una cantidad de energía o trabajo mecánico para que, de una corriente de agua salina o salobre, se produzca agua dulce. Sin embargo, dependiendo de la tecnología utilizada, el consumo de energía suele ser alto y conllevan serios impactos ambientales. Las aguas de rechazo generadas por las plantas de desalinización (llamadas salmueras) generalmente son mucho más cálidas y saladas que el agua de mar inicial, por lo que puede alterar los aspectos fisicoquímicos de la fuente original sí son vertidas sin tratarlas [1,2]. A este respecto, el enfoque de "cero descargas líquidas" está siendo impulsado para la gestión de salmueras, minimizando el volumen de aguas de rechazo y aumentando la producción de agua dulce [3,4]. La destilación por membrana es una alternativa que puede integrarse en el enfoque de cero descargas líquidas, ya que tiene alto rechazo de componentes no volátiles (sales), por lo que su factor de concentración es elevado, además de esto, presenta otras ventajas, tales como: no requiere presión aplicada, las temperaturas de operación son relativamente bajas, se pueden evitar problemas de corrosión al usar materiales poliméricos, la operación y mantenimiento de los equipos es simple e ideal para aplicaciones a pequeña escala en zonas remotas [5]. La destilación por membrana es un proceso de separación impulsado térmicamente y ocurre de la siguiente manera: una cantidad de agua se evapora en la interfase líquido-membrana en el lado caliente, pasa a través de la membrana porosa e hidrófoba y se condensa sobre una superficie fría. La diferencia de temperatura entre ambos lados de la membrana genera una diferencia de presión parcial la cual es la fuerza impulsora del proceso. La función de la membrana es mantener la interfase vapor/líquido y, debido a su naturaleza hidrófoba, solo el vapor de agua la atraviesa [6,7]. En la configuración de destilación de membrana con espacio de aire, una capa de aire estancado separa la membrana y la superficie de condensación [8]. La Figura 1 muestra un

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

diagrama esquemático del proceso de destilación por membrana con espacio de aire.

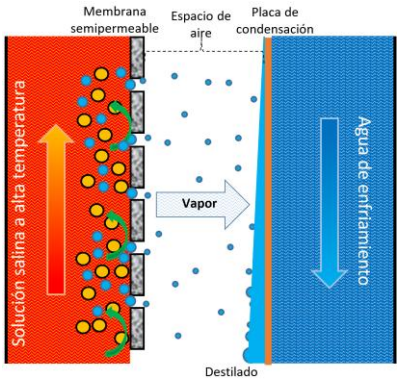


Figura 1. Proceso de destilación por membrana con espacio de aire.

En este trabajo se presenta la evaluación experimental de un destilador de membrana con espacio de aire. Se analiza el impacto sobre la producción de agua dulce que tienen los diferentes parámetros de operación. El objetivo de esta investigación es demostrar la viabilidad técnica y el desempeño del dispositivo propuesto para el proceso de desalinización de salmueras altamente concentradas.

DESARROLLO

El desalinizador de membrana utilizado está integrado por dos tapas de Nylamid de 80 mm de ancho, 180 mm de longitud y 25.4 mm de grosor, una membrana porosa hidrófoba de PTFE (politetrafluoroetileno), 3 sellos de silicón de alta temperatura de 3 mm de grosor, 2 sellos de neopreno de 1 mm de grosor, una malla metálica para evitar la deformación de la membrana debido al flujo de la solución salina y una placa de aluminio de 0.3 mm de grosor para la condensación de vapor. Se utilizó una solución acuosa de NaCl + $CaSO_4$. De la masa total de sales, 98% era de NaCl y el resto de $CaSO_4$. Como fuente de calor se utilizó un baño térmico de 1 kW de potencia eléctrica. Un intercambiador de calor de placas de acero inoxidable 316 L se usó para calentar la solución salina. La temperatura del agua de enfriamiento se mantuvo constante con un baño térmico de 2 kW. El caudal másico de la solución salina se cuantificó con un medidor tipo Coriolis. Los caudales volumétricos del fluido de calentamiento y del agua de enfriamiento se midieron con dos flujómetros analógicos. La cantidad de agua destilada se midió con una balanza electrónica. Se colocaron sensores de temperatura RTD pt100 en los puertos de entrada y salida del desalinizador y del intercambiador de calor. El dispositivo es descrito en detalle por Ibarra-Bahena et al. [9]. En la Figura2 se muestra un diagrama esquemático del desalinizador utilizado. La Tabla 1 muestra las condiciones de operación evaluadas durante las pruebas experimentales de desempeño.

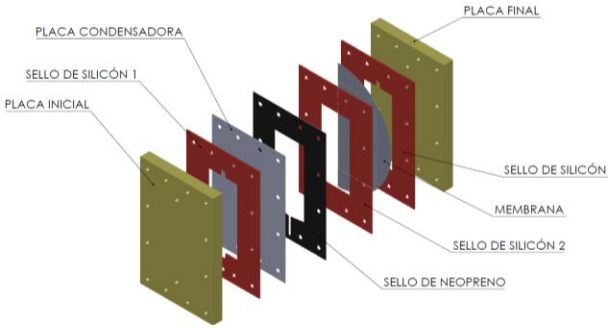


Figura 2. Diagrama esquemático del desalinizador evaluado.

Tabla 1. Condiciones de operación experimentales.

Parámetro	Valor
Tamaño de poro	0.22 µm 0.45 µm
Concentración salina (ppm)	100 000 ± 300
Caudal volumétrico de agua de enfriamiento (l/min)	2.4 ± 0.15
Caudal másico de la solución salina (kg/s)	$4.00 \times 10^{-2} \pm 5.44 \times 10^{-5}$
Temperatura de la solución salina (°C)	80.1 ± 0.1 70.2 ± 0.1 60.2 ± 0.1 50.2 ± 0.1
Temperatura del agua de enfriamiento (°C)	40.1 ± 0.1 30.1 ± 0.1

DISCUSIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

La Figura 3 muestra la producción de agua destilada respecto a la temperatura de la solución salina, para cada temperatura de agua de enfriamiento, para cada uno de los tamaños de poro de las membranas utilizadas. Los marcadores sólidos corresponden al tamaño de poro de 0.22 µm mientras que los vacíos a 0.45 µm.

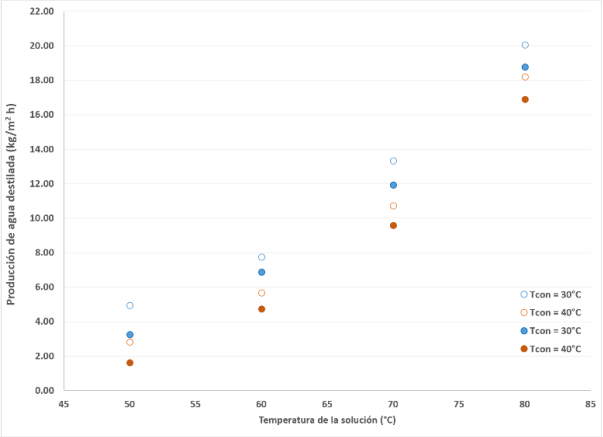


Figura 2. Diagrama esquemático del desalinizador evaluado.

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

La cantidad de agua destilada, con una membrana con tamaño de poro de 0.45 µm fue de 4.9 a 20.0 kg/m^2·h, con una temperatura de condensación de 30°C, mientras que, con una temperatura de condensación de 40°C, fue de 2.8 a 18.2 kg/m^2·h. Por otro lado, con la cantidad de agua destilada, con una membrana con tamaño de poro de 0.22 µm fue de 3.2 a 18.8 kg/m^2·h, con una temperatura de condensación de 30°C y, con una temperatura de condensación de 40°C fue de 1.6 a 16.9 kg/m^2·h. Como se puede apreciar en la Figura 3, a medida que aumenta la temperatura de la solución aumenta la producción de agua destilada, esto se debe a que, con el aumento de la temperatura, la diferencia de presión parcial entre ambos lados de la membrana también aumenta [10-12]. Sin embargo, las temperaturas excesivamente altas pueden aumentar la polarización de la concentración salina y polarización de la temperatura en la superficie de la membrana, lo que reduce la diferencia de presión de vapor de agua y, por lo tanto, disminuye la fuerza impulsora [13-15]. De acuerdo con los resultados mostrados en la Figura 1, la membrana con el tamaño de poro de 0.45 µm produce, en promedio, 12% más destilado que la membrana con tamaño de poro de 0.22 µm, a excepción de la condición de temperatura de solución más baja y con la temperatura del agua de enfriamiento más alta (50°C y 40°C, respectivamente), en estas condiciones de operación, el aumento es de hasta 50%.

CONCLUSIONES

En el presente trabajo se presentó la evaluación experimental de un desalinizador de membrana que utiliza la configuración de destilación por membrana con espacio de aire. Se analizó el efecto de los diferentes parámetros de operación sobre la producción de agua destilada. De acuerdo con los resultados de la evaluación del dispositivo desalinizador, la cantidad de agua destilada producida aumenta a medida que la temperatura de la solución salina aumenta y la temperatura del agua de enfriamiento disminuye. La cantidad de agua destilada, con una membrana con tamaño de poro de 0.45 µm fue de 4.9 a 20.0 kg/m^2·h, con una temperatura de condensación de 30°C, mientras que, con una temperatura de condensación de 40°C, fue de 2.8 a 18.2 kg/m^2·h. Por otro lado, con la cantidad de agua destilada, con una membrana con tamaño de poro de 0.22 µm fue de 3.2 a 18.8 kg/m^2·h, con una temperatura de condensación de 30°C y, con una temperatura de condensación de 40°C fue de 1.6 a 16.9 kg/m^2·h. Los resultados mostraron que, la membrana con tamaño de poro de 0.45 µm produce, en promedio, 12% más destilado que la membrana con tamaño de poro de 0.22 µm, a excepción de la condición de temperatura de solución más baja y con la temperatura del agua de enfriamiento más alta, en estas condiciones de operación, el aumento es de hasta 50%. Los resultados muestran que la destilación por membrana con espacio de aire es una tecnología prometedora para la desalinización de salmueras altamente concentradas que otras tecnologías no pueden tratar.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al proyecto UNAM-PAPIITIT102224 por el financiamiento otorgado. Jonathan Ibarra Bahena agradece a la SECIHTI por la beca posdoctoral otorgada a través de la convocatoria “Estancias Posdoctorales por México para la Formación y Consolidación de las y los Investigadores por México”.

BIBLIOGRAFÍA

[1] Salehi, A. A., Ghannadi-Maragheh M., Torab-Mostaedi M., Torkaman R., Asadollahzadeh M. (2020). A Review on the water-energy nexus for drinking water production from humid air. Renew. Sust. Energ. Rev. 120, 109627. Doi: 10.1016/j.rser.2019.109627

[2] Portillo, E., Ruiz de la Rosa, M., Louzara, G., Ruiz, J.M., Marín-Guirao, L., Quesada, J., González, J.C., Roque, F., González, N., Mendoza, H. (2014). Assessment of the abiotic and biotic effects of sodium metabisulphite pulses discharged from desalination plant chemical treatments on seagrass (Cymodocea nodosa) habitats in the Canary Islands. Mar. Pollut. Bull. 80, 222–233. Doi: 10.1016/j.marpolbul.2013.12.048

[3] Garg, R., Singh, S.K., Vijay Kumar, T. (2024). A review of zero liquid discharge and solvent driven aqueous phase processes for brine treatment. Clean Techn. Environ. Policy. Doi:10.1007/s10098-024-02949-1

[4] Yaqub, M., Lee, W. (2019). Zero-liquid discharge (ZLD) technology for resource recovery from wastewater: A review. Sci. Total Environ. 681, 551-563. Doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.05.062

[5] Subramani, A., Jacangelo, J.G. (2015). Emerging desalination technologies for water treatment: a critical review. Water Res. 75, 164-187. Doi: 10.1016/j.watres.2015.02.032

[6] Alkhudhiri, A., Darwish, N., Hilal, N. (2012) Membrane distillation: a comprehensive review, Desalination, 287, 2–18, Doi: 10.1016/j.desal.2011.08.027

[7] Drioli, E., Ali, A., Macedonio, F. (2015). Membrane distillation: Recent developments and perspectives. Desalination, 356, 56-84. Doi: 10.1016/j.desal.2014.10.028

[8] Izquierdo-Gil, M. A., García-Payo, M. C., Fernández-Pineda C. (1999). Air gap membrane distillation of sucrose aqueous solutions. J. Membr. Sci. 155, 291-307, Doi: 10.1016/S0376-7388(98)00323-8

[9] Ibarra-Bahena, J., Dehesa-Carrasco, U., Romero, R.J., Rivas-Herrera, B., Rivera, W. (2017). Experimental assessment of a hydrophobic

membrane-based desorber/condenser with H2O/LiBr mixture for absorption systems. Exp. Therm. Fluid Sci. 88, 145–159, Doi: 10.1016/j.expthermflusci.2017.05.024

[10] Dehesa-Carrasco, U., Pérez-Rábago, C.A., Arancibia-Bulnes, C.A. (2013). Experimental evaluation and modeling of internal temperatures in an air gap membrane distillation unit, Desalination, 326, 47–54. Doi: 10.1016/j.desal.2013.07.014

[11] Alsaadi, A.S., Ghaffour, N., Li, J.D., Gray, S., Francis, L., Maab, H., Amy, G.L. (2013). Modeling of air-gap membrane distillation process: a theoretical and experimental study, J. Membr. Sci. 445, 53–65. Doi: 10.1016/j.memsci.2013.05.049

[12] Alklaibi, A., Lior, N. (2005). Transport analysis of air-gap membrane distillation. J. Membr. Sci. 255, 239-253. Doi: 10.1016/j.memsci.2005.01.038

[13] Alkhudhiri, A., Hilal N. (2017) Air gap membrane distillation: A detailed study of high saline solution. Desalination 4031, 79–186. Doi: 10.1016/j.desal.2016.07.046

[14] Shahu, V.T., Thombre, S.B. (2019). Air gap membrane distillation: a review, J. Renew. Sustain. Energy 11, 045901. Doi: 10.1063/1.5063766

[15] Xu, J., Singh, Y. B., Amy, G. L., Ghaffour, N. (2016). Effect of operating parameters and membrane characteristics on air gap membrane distillation performance for the treatment of highly saline water. J. Membr. Sci. 512, 73-82. Doi: 10.1016/j.memsci.2016.04.010

AUTORIZACIÓN Y RENUNCIA.

Los autores del presente artículo autorizan al TecNM/Instituto Tecnológico de Zacatepec para publicar el escrito en el libro electrónico del CITID 2025. El TecNM/ITZ o los editores no son responsables ni por el contenido ni por las implicaciones de lo que está expresado en el escrito.

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

POTENCIAL DE EXTRACCION DE AGUA ATMOSFÉRICA EN LA CIUDAD DE PUEBLA

Alva Herrera Noe[1], Alvarado-Flores Miguel[2], Hernández-Solís Iris Lizeth[3], Santa Maria Juarez Juana Deisy[4], Vargas Galarza Zully[5]

[1]Alumno en Ingeniería Química. Benemérita Universidad de Puebla. Facultad de Ingeniería Química. Correo: Noealva@correo.buap.mx, teléfono: 221 691 77 12; San Claudio S/N, esquina con Avenida San Manuel, C.P. 72570, Puebla, Pue.
[2]Maestro en Ingeniería Química. Benemérita Universidad de Puebla. Facultad de Ingeniería Química. Correo: miguelalvarado@correo.buap.mx, tel: 221 691 77 12; San Claudio S/N, esq. con Avenida San Manuel, C.P. 72570, Puebla, Pue.
[3]Maestra en Ciencias de la Ingeniería. Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Zacatepec. Departamento de Ingeniería Industrial. Correo electrónico: iris.hs@zacatepec.tecnm.mx, teléfono: 7341262779, Calzada Tecnológico No.27, Plan de Ayala, C.P. 62780, Zacatepec de Hidalgo Morelos, México.
[4]Doctora en Ciencias en Polimeros. Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. Facultad de Ingeniería Química. Correo: deisy.santamaria@correo.buap.mx, teléfono: 2226534240; San Claudio S/N, esq. con Avenida San Manuel, C.P. 72570, Puebla, Pue.
[2]Doctora en Ciencias en Química. Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Zacatepec. Departamento de Ingeniería Química y Bioquímica. Correo electrónico: zully.vg@zacatepec.tecn.mx , Calzada Tecnológico No.27, Plan de Ayala, C.P. 62780, Zacatepec de Hidalgo Morelos, México.

Resumen -- El agua es un recurso vital que escasea en función del aumento de la población, la recarga de los acuíferos es sometida a una gran presión por la alta demanda del líquido por lo que es necesario explorar nuevas formas de obtener el agua para su uso doméstico. El objetivo de este estudio fue determinar el potencial de extracción de agua de la atmosfera en la ciudad de Puebla mediante un deshumidificador (Marca De'Longhi, modelo DDX250PEF). Se realizó un diseño en bloques completamente aleatorizado (DBCA) en el que se utilizó el deshumidificador en los horarios: 12:00 am, 07:00 am, 12:00 pm, 7:00 pm como variables de entrada y como variable de salida la cantidad de agua que se obtuvo en cada horario. El experimento se repitió durante 5 días del 7 al 11 de abril del año 2023 por lo que cada día se consideró como un bloque experimental. Se usó un sensor de carga (Marca Haofy en KWh) para determinar el gasto energético, para determinar el Ph se utilizaron tiras reactivas y se usó un sensor Hasfine para medir en partes por millón (ppm) los sólidos disueltos totales (TDS) de las muestras. Los resultados revelan que la mayor recolección de agua se dio en el horario de las 07:00 am, se obtuvo un promedio de 0.8360 litros de agua extraída por día, el sensor de carga indico que no hay diferencia significativa en el gasto energético, el pH resulto ser de 7.45 y 30.7 ppm. De tal forma que el agua se puede potabilizar para uso doméstico.

Palabras Clave: Diseño en bloque, extracción de agua, deshumidificador, gasto energético.

Abstract – Water is a vital resource that is becoming scarce due to population growth. The recharge of aquifers is subjected to great pressure due to the high demand for water, so it is necessary to explore new ways of obtaining water for domestic use. The objective of this study was to determine the potential for extracting water from the atmosphere in the city of Puebla using a dehumidifier (De'Longhi brand, model DDX250PEF). A completely randomized block design (DBCA) was carried out in which the dehumidifier was used: 12:00 am, 07:00 am, 12:00 pm, 7:00 pm as input variables and the amount of water obtained at each time as the output variable. The experiment was repeated for 5 days from April 7 to 11, so each day was considered as the blocking factor. A load sensor (Haofy brand in KWh) was used to determine the energy expenditure and test strips to determine the pH and a Hasfine sensor to measure the total dissolved solids (TDS) of the samples in parts per million (ppm). The results obtained indicated that the greatest collection of water occurred at 07:00, a average of 0.8360 liters of water extracted per day, the load sensor indicated that there is no significant difference in energy expenditure, the pH was 7.45 and 30.7 ppm. In such a way that the water can be made potable for domestic use.

Key words – Block design, water extraction, dehumidifier, energy consumption.

INTRODUCCIÓN

El exiguo de agua dulce se ha convertido en un reto para la sociedad, con cuatro mil millones de personas aproximadamente, quienes experimentan estrés hídrico año con año [1]. Así mismo, de acuerdo con la UNESCO, 2023 hay un aumento global de la demanda por este vital líquido y que tan solo el 0.3 % es agua dulce y está disponible para el consumo humano.

La asamblea General de las Naciones Unidas en el año 2010, reconoció la importancia del agua como "el derecho al agua potable y al saneamiento como un derecho humano esencial para el pleno disfrute de la vida y de todos los derechos humanos". Por otro lado, la Comisión Nacional del Agua (Conagua) reportó que la huella hídrica promedio de México es de 1,978 metros cúbicos por habitante por año, ligeramente superior al promedio mundial de 1,385 metros cúbicos [2].

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

En México, el uso principal del agua es para actividades agrícolas con un 76.72 %, mismo sector que es el principal en desperdiciar este vital líquido por riego ineficiente, 14.13 % para uso público urbano y doméstico, 3.97 % a la industria, agroindustria, servicios y comercio, 5.18 % en la generación de energía eléctrica [3].

Los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), adoptados por las Naciones Unidas en 2015, buscan abordar diversas problemáticas globales. El ODS 6, titulado "Agua limpia y saneamiento", tiene como meta garantizar la disponibilidad y gestión sostenible del agua y el saneamiento para todos, reconociendo el agua como un derecho humano esencial para la salud, el desarrollo económico y la calidad de vida. A pesar de los esfuerzos, en 2022, más de la mitad de la población mundial, aproximadamente 4400 millones de personas, carecen de acceso a agua potable segura, lo que duplica las estimaciones previas de la ONU y refleja una crisis hídrica significativa en las regiones más vulnerables [4].

En la Figura 1, se muestran los países con mayor extracción anual de agua para la agricultura, México ocupa el séptimo lugar a nivel mundial [1].

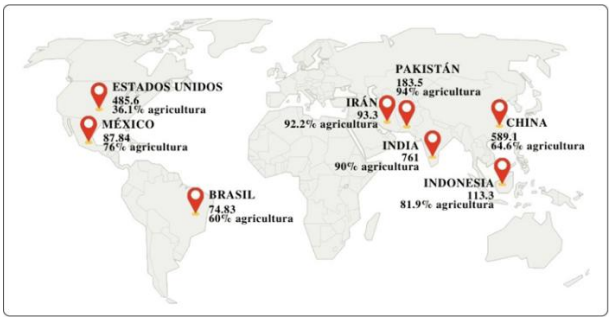


Figura 1. Países con mayor extracción de agua en miles de millones de m^3 al año con porcentaje usado a la actividad agrícola.

Más del cincuenta por ciento de la población actualmente radica en las grandes ciudades y se estima que para el año 2050 este porcentaje aumente en un dieciocho por ciento más, por lo que, dado este escenario de incremento poblacional se generará una mayor demanda de recursos como el agua [5].

Actualmente la ciudad de Puebla tiene una población aproximada de 1,692,18, que sumando las 18 entidades de la zona metropolitana: Acajete, Amozoc, Coronango, Cuautlancingo, Chiautzingo, Domingo Arenas, Huejotzingo, Juan C. Bonilla, Ocoyucan, Puebla, San Andrés Cholula, San Felipe Teotlalcingo, San Gregorio Atzompa, San Jerónimo Tecuanipan, San Miguel Xoxtla San Pedro Cholula, Santa Isabel Cholula, Tepatlaxco de Hidalgo, Tlaltenango más 18 municipios de Tlaxcala es la cuarta zona más poblada de México con una población mayor a los 4 millones de habitantes y debido a este crecimiento y todas las actividades industriales involucradas, el agua se ha convertido en un recurso sobreexplotado, logrando así su reducción y disponibilidad promedio anual de 44.64 mm^3 en 2015 a 20.66 mm^3 en el 2020 [5].

El agua que se capta en la ciudad de Puebla se usa principalmente en uso doméstico con un 42 %, el 29 % para otros usos y el resto se desperdicia en la red de distribución, en la Tabla 1 se muestra el caudal de agua consumida en la zona centro de la ciudad de Puebla por usos de acuerdo lo reportado por [5].

A nivel mundial el 80 % de las enfermedades se presentan por la escasez de agua, principalmente en países subdesarrollados, lo cual genera que la personas vivan con estrés hídrico debido a la falta de este recurso.

Tabla 1. Caudal de Agua Consumida

Consumo	Porcentaje
Doméstico	58.96 %
Público	14.65 %
Comercial	10.77 %
Industrial	8.61 %
Servicios	4.92 %
Acuacultura	0.49 %
Diversos usos	0.42 %
Uso doméstico no registrados	0.04 %
Ganadería	0.03 %
Agua embotellada en usos no domésticos	0.22 %

El suministro de agua es muy importante para garantizar el desarrollo económico, que lamentablemente por falta de una cultura hídrica, se han activado varias alertas por el gran desperdicio y la escasez de este recurso. Por lo que indica una alerta para comenzar a tomar acciones sobre esta problemática, dado que el agua es un recurso natural indispensable para el desarrollo de la vida, sin embargo, la actividad humana tiene una correlación directa en su contaminación. Por otro lado, no se promueve de forma suficiente en la población de una cultura del cuidado del uso del agua y como consecuencia se observa escasez de ella en varias colonias del municipio de Puebla varios pozos se encuentran en agotamiento, es recurrente las fugas en la red de agua potable, además de la falta de mantenimiento en la red de agua potable. El cambio climático también afecta la recarga de los mantos freáticos por lo que es necesario el desarrollo de estrategias para el cuidado y preservación del vital líquido.

Extracción de agua atmosférica. La recolección de agua atmosférica (AWH Atmospheric water harvesting) se

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

presenta como una de las estrategias más efectivas, sostenibles, económicas y prometedoras para enfrentar la crisis del agua a nivel global. Actualmente, más de 4,300.00 millones de personas en el mundo enfrentan dificultades para obtener agua potable que sea limpia, abundante y segura. Además, cada año, más de 3.3 millones de personas pierden la vida debido al consumo de agua de mala calidad. A pesar de esto, nuestra atmósfera alberga alrededor de 13,000.00 billones de litros de agua en forma de vapor. Por lo tanto, la AWH representa una alternativa viable para satisfacer la creciente necesidad de agua potable, incluso en áreas áridas o con alta humedad. Esta recolección se puede llevar a cabo mediante técnicas como la captura de niebla, la recolección de rocío y los métodos basados en sorción (SBAWH, Sorption-Based Atmospheric Water Harvestin) [6].

La extracción de agua atmosférica depende en gran medida de factores como la humedad relativa (HR), la temperatura y las condiciones climáticas locales. En el contexto de la ciudad de Puebla y sus alrededores, se identifican varias zonas con potencial para esta práctica.

Sierra Norte de Puebla. De acuerdo con datos del INEGI esta región se caracteriza por su alta humedad y abundantes precipitaciones, con registros que alcanzan hasta 4,000.00 mm anuales. La presencia de bosques nubosos y frecuentes nieblas la convierte en un entorno propicio para la extracción de agua atmosférica.

Región Centro-Oriente: Sierra de Quimixtlán y Pico de Orizaba. Las áreas montañosas de la Sierra de Quimixtlán y las laderas del Pico de Orizaba presentan climas templados y húmedos, con una temperatura media anual que varía entre 5°C y 12°C. Estas condiciones favorecen la condensación de humedad atmosférica, especialmente en altitudes elevadas.

Parque Nacional la Malinche. Ubicado al noreste de la ciudad de Puebla, este parque presenta un clima semifrío subhúmedo con lluvias en verano. Las elevaciones superiores a 3,000.00 metros suelen estar envueltas en niebla y humedad, lo que podría ser aprovechado para la captación de agua atmosférica. El Parque Nacional Izta-Popo, situado en el centro de México y abarcando territorios de Puebla, Morelos y el Estado de México, presenta un entorno con un clima templado-frío y una topografía montañosa que favorece condiciones específicas de humedad relativa. Este parque no solo es un refugio ecológico, sino que también tiene un notable potencial para la extracción de agua atmosférica. La variabilidad de la humedad relativa en el parque depende de factores como la altitud, la época del año y las condiciones meteorológicas. Durante la temporada de lluvias, los niveles de humedad son más altos, lo que podría ser aprovechado para tecnologías de recolección de agua atmosférica. En contraste, durante la temporada seca, la humedad disminuye, por lo que es necesario implementar estrategias eficaces para capturar y utilizar el agua disponible [7].
Dentro de la ciudad de Puebla, la humedad relativa varía según la estación del año. Por ejemplo, en septiembre, la humedad relativa promedio es del 82 %, mientras que en abril desciende al 50 %. Estas variaciones indican que la eficiencia de los sistemas de extracción de agua atmosférica sería estacional, siendo más efectiva durante los meses húmedos [8].

En Jin et al. (2024) diseñaron un dispositivo de múltiples etapas para la recolección de agua atmosférica, que incluye una sección de alimentación caliente, un espacio de aire, una membrana hidrófoba y una sección de refrigerante. La sección de alimentación caliente y el espacio de aire están separados por una membrana hidrófoba de politetrafluoroetileno, mientras que el espacio de aire y la sección de refrigerante están separados por una placa de condensación. El vapor de agua se genera a medida que las sales higroscópicas se mueven a través de la sección de alimentación caliente, luego pasa a través de la membrana hacia el espacio de aire y se condensa en la placa. El dispositivo alcanzó tasas de producción de agua de [0.82,6.27] kg/m2 con una HR entre el [19,69] % y 25°C [9].

Luo et al. (2023) creo un dispositivo recolección de agua atmosférica (AWH Atmospheric water harvesting) accionado por energía solar basado en estructuras Metalorgánicas (MOF metal-organic Frameworks) y capas de polidopamina/quitosano combinadas en un sustrato de fibra de vidrio. El dispositivo demostró una alta capacidad de adsorción de [0.440,56] g/g al 30 % y 90 % de HR, respectivamente [10].

Song et al. (2022) combino MOF con un material carbonoso poroso para crear un colector de agua de ciclo rápido, lo que resultó en una buena capacidad de adsorción de 0.18 L/kg·h al 30 % de HR y una cinética de desorción rápida [11].

Feng et al. (2024) desarrollo una estructura MIL-101(Cr) con adsorción asistida por enfriamiento, que ofrece una alta sorción, una gran capacidad de adsorción y una baja temperatura de desorción. La productividad de agua de este dispositivo osciló entre 7.75 y 22.81 L/kg·día, HR del [20, 80] %, temperatura de [10, 35]°C, y produjo hasta 990.4 mL/día incluso con baja HR (26 %), lo que corresponde a una productividad de 9.9 L/kg·día con un gasto energético de 2.96 kWh por litro de agua [12].

Li et al. (2024) creo una espuma compuesta hecha de $CaCl_2$, MIL-101 y celulosa bacteriana (BC). La estructura evita la fuga de sal, mientras que sus micro y macroporos facilitan la captura de agua, el transporte y

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

la liberación de vapor. La red hidrófila de BC actúa como una matriz huésped, beneficiándose de múltiples funcionalidades de oxígeno. Al adsorber cantidades significativas de vapor de agua, este material cambia a verde oscuro y demuestra una capacidad de adsorción de agua de 0.78 g/g al 30 % de HR [13].

En la ciudad de Puebla, el desafío de garantizar un suministro adecuado de agua para sus habitantes es un problema urgente. Es fundamental explorar todas las alternativas posibles para preservar este recurso valioso. Por eso, nos preguntamos: ¿cuál es el potencial de extracción de agua atmosférica en Puebla y si es posible potabilizarla?

Para evaluar el potencial de extracción de agua atmosférica se aplicó un diseño de bloques completos al azar (DBCA), cada día de extracción constituyo un bloque experimental. Se utilizó un deshumidificador marca De'Longhi DDX250PEF para cosechar el agua que opera en un intervalo de 5°C a 32°C, tiene filtro de carbón y filtro de aire para eliminar impurezas del aire, utiliza como refrigerante R410A [14]. Este equipo trabaja extrayendo la humedad del aire, condensando el vapor de agua en una superficie fría y recolectando el agua resultante en un depósito [15,16]. El rendimiento de estos dispositivos depende de factores como la temperatura y la humedad relativa del ambiente.

Se consideran los siguientes aspectos:

El agua se caracteriza por presentar tres estados físicos naturales: líquido, sólido y gaseoso. Estos cambios de estado se deben a modificaciones en la estructura molecular del agua causados por cambios de temperatura y presión. En el estado sólido el agua alcanza su máximo ordenamiento molecular [17].
La disminución de la temperatura del aire hasta el punto de roció, condensa el agua contenida en la atmosfera formando pequeñas gotas, estas pueden atraparse en una superficie sólida [18]. El agua que contiene la atmósfera en estado líquido o gaseoso recibe el nombre de agua atmosférica [19].
La Humedad Relativa (HR) representa el porcentaje de agua en el ambiente es decir indica la capacidad máxima del aire para retener vapor de agua. El punto de saturación que corresponde a el 100 % de la humedad relativa condensa el vapor de agua [20].
Las partes por millón (ppm) del agua expresa la cantidad de sólidos disueltos en agua mientras menor sea el valor de ppm mayor es la pureza del agua [21].

DESARROLLO

Metodología. Se aplicó un diseño de bloques completamente aleatorizado (DBCA) [22]. El experimento se desarrolló del 7 al 11 de abril, es decir, cada día correspondió a un bloque experimental, se consideró como unidad experimental la atmosfera. Los tratamientos consistieron en la extracción de agua realizada durante una hora por el deshumidificador de la marca De'Longhi, modelo DDX250P en los horarios: 12:00 a.m., 07:00 a.m., 12:00 p.m. y 7:00 p.m. el agua cosechada se tomó como variable de salida y se midió la conductividad, el pH y temperatura. Se tomaron las lecturas de la humedad relativa y temperatura ambiental, se midió el gasto energético en kWh utilizando para ello un sensor de carga Haofy, este dato se utilizó para determinar la eficiencia en la extracción de agua atmosférica, definida como la razón entre la cantidad de agua extraída y la energía utilizada (l/kWh). Un valor más alto indica que el sistema extrae más agua con menos energía; un valor más bajo indica que el sistema consume más energía para extraer la misma cantidad de agua (menor eficiencia).

DISCUSIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

La Tabla 2 presenta los datos registrados del muestreo realizado el 7 de abril, de esta misma forma se realizó el registro de los bloques del sábado al martes.

Tabla 2. Registro del Muestreo

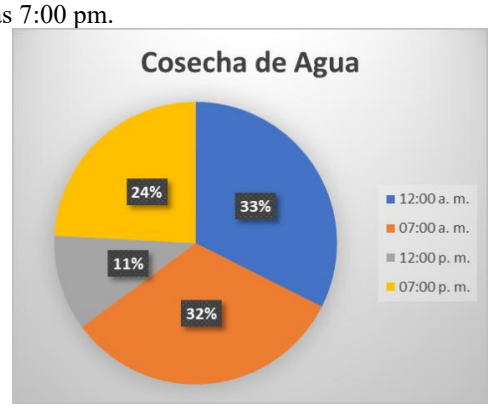
	7 de abril 2023			
Hora de inicio	12:00 a. m.	07:00 a. m.	12:00 p. m.	07:00 p. m.
Hora de fin	01:00 a. m.	08:00 a. m.	01:00 p. m.	08:00 p. m.
Agua L	0.725	0.725	0.245	0.54
KWh	0.668	0.611	0.58	0.603
Agua/kWh	1.085	1.187	0.422	0.896
Ph	7	7	7	8
ppm	27	35	38	31
Humedad D. %	73	80	44	59
Temp. Agua °C	19.8	23.2	24	20.5
Temp. D °C	23	23	24	24
Costo MXN	2.26	2.07	1.97	2.04

En este experimento se cosecho un total de 13.04 litros, el promedio del pH fue de 7.45, el promedio de los sólidos disueltos en agua fue de 30,7 ppm que es una conductividad similar a la del agua de lluvia y un ph cercano a 7 que es lo deseable para el agua de uso doméstico.

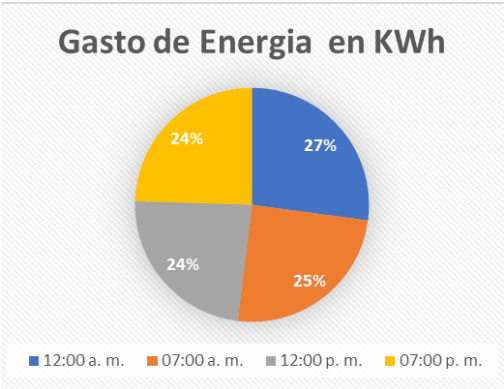
La Gráfica 1. Cosecha de Agua Atmosférica muestra que el 33 % del agua cosechada corresponde a el horario de las 12:00 am, mientras que el 32 % corresponde a el horario de las 7:00 am es decir que el 65 % del agua se cosecho durante la noche, por otro lado, en el día solo se

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

cosecho el 35 % del total cosechado siendo a las 12:00 pm el momento menos eficiente para la cosecha con apenas un 11 % del total del agua y el 24 % en el horario de las 7:00 pm.

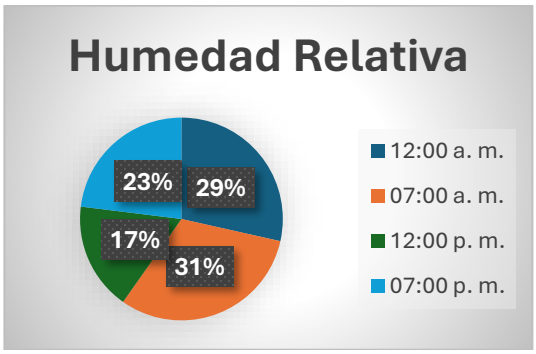


Gráfica 1. Cosecha de Agua Atmosférica



Gráfica 2. Gasto de Energía

La Gráfica 2, muestra que el gasto energético fue el mismo independientemente del horario, esto nos indica que el equipo de deshumidificación no tiene retroalimentación para regular su funcionamiento, lo que significa que solo tiene un modo de operación es decir que trabaja en lazo abierto.



Gráfica 3. Humedad Relativa Total

La Gráfica 3. Humedad Relativa Total, muestra en porcentaje el 100 % del agua atmosférica disponible. El horario de las 12:00 am se tuvo un promedio de 73.6 % de humedad relativa lo que correspondió al 29 % de la humedad total, el horario de las 7:00 am tuvo un promedio de 76.6 % de humedad y corresponde al 31 % de la humedad relativa total, el horario de las 12:00 pm tuvo un promedio de 52 % de humedad relativa lo que contribuyo al 17 % de la humedad relativa total, finalmente el horario de las 7:00 pm tuvo una humedad relativa promedio del 66.4 % que contribuyo con el 23 % de la humedad relativa.

Tabla 3. Eficiencia de Extracción de Agua Atmosférica

	Eficiencia en L/kWh
12:00 a. m.	1.133978581
07:00 a. m.	1.160488841
12:00 p. m.	0.685704276
07:00 p. m.	0.946856296

La Tabla 3. Eficiencia de Extracción de Agua atmosférica muestra que en los horarios nocturnos la eficiencia fue mayor respecto a los horarios diurnos, se observa que el proceso de extracción es menos eficiente a las 12:00 pm y mucho más eficiente en el horario de las 7:00 am. Cada kWh tiene un costo de 3.3 pesos por lo que el costo de extracción por hora fue de 2.3 pesos.

Los datos se trataron mediante el uso del software Minitab para determinar el análisis de varianza (ANOVA). En la Tabla 4 se muestra el análisis de varianza (ANOVA), con el valor-p es mayor que la significancia prefijada $\alpha = 0.05$ por lo tanto se rechaza la Hipótesis Nula, es decir que si hay un efecto debido a los tratamientos.

Tabla 4. Análisis de Varianza

Análisis de Varianza

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Tratamientos	3	0.5351	0.17837	13.82	0.000
Error	16	0.2065	0.01291		
Total	19	0.7416			

En la Gráfica 5, se muestra el diagrama de caja y bigotes que muestra los resultados de la cosecha de agua se observa que hay traslapes entre los tratamientos de las 12:00 am y 7:00 am y de forma similar se traslapan los tratamientos de las 12:00 pm y 7:00 pm.

Gráfica 5. Cosecha de Agua

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

Se realiza la prueba de Tukey para determinar si existen diferencias significativas entre los tratamientos como se observa en la Tabla 5. Prueba de Tukey.

Tabla 5. Prueba de Tukey

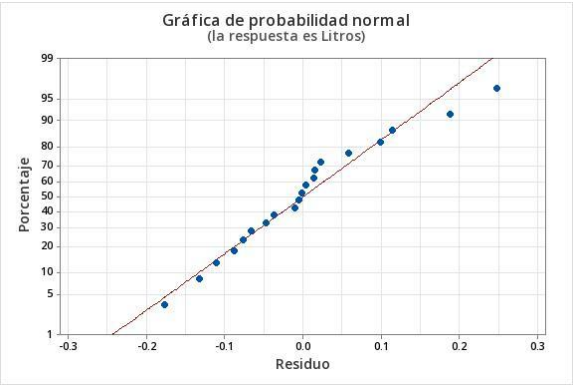
Agrupar información utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%

Hora	N	Media	Agrupación	
07 h	5	0.836	A	
00 h	5	0.773	A	
19 h	5	0.577		B
12 h	5	0.422		B

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

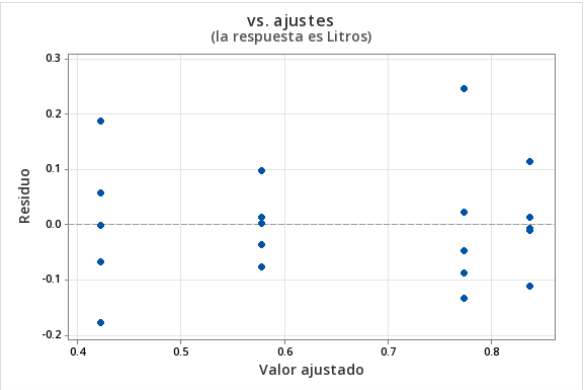
Diferencia Significativa de los Experimentos. La prueba de Tukey compara las medias de los tratamientos para determinar si los tratamientos tienen diferencias significativas. Observamos que entre los tratamientos de las 12:00 am y las 7:00 am no hay diferencia significativa. Igualmente se aprecia que no hay diferencia significativa entre los tratamientos de las 12:00 pm y las 7:00 pm, sin embargo, si hay diferencia entre los tratamientos de las 7:00 am y las 12:00 am (nocturnos) respecto a los tratamientos de las 12:00 pm y 7:00 pm (nocturnos).

Verificación de los supuestos. La validez de los resultados experimentales depende de que se apliquen correctamente los principios de diseño experimental: bloqueo, repetición y aleatorización, estos principios están bien aplicados si se satisfacen las pruebas de Normalidad, Varianza constante e Independencia de los eventos.



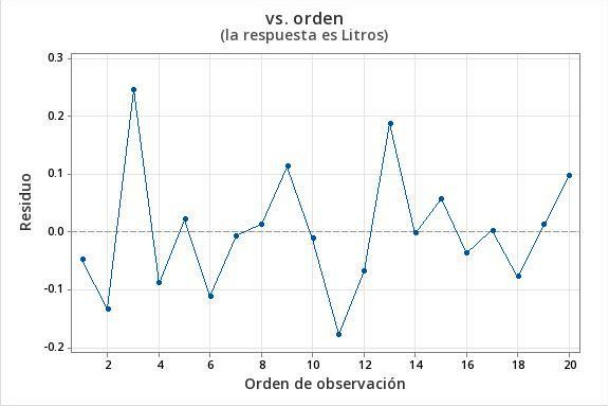
Gráfica 6. Prueba de Normalidad

La prueba de Normalidad se presenta en la Gráfica 6. garantiza que el muestreo satisface los requisitos de una distribución monticular es decir que el 68 % de los datos se encuentran en el intervalo de $\bar{x} \mp s$. Y que el total de los datos no está a más menos 3 desviaciones estándar de la media, s es la desviación estándar y $\bar{x}$ es la media del muestreo.



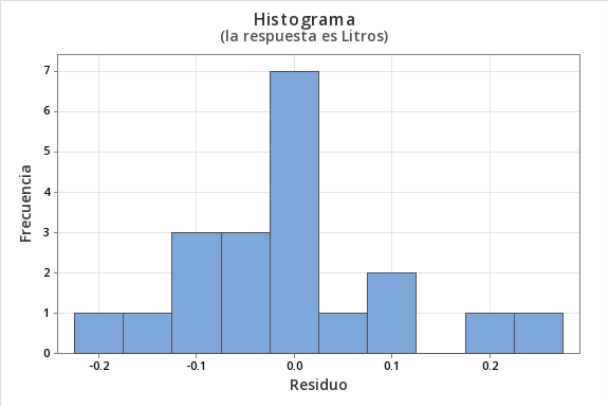
Grafica 7. Prueba de Varianza

La Prueba de Varianza constante mostrada en la Gráfica 7 indica que la varianza del error es constante en todos los tratamientos por lo que las estimaciones de los efectos de los factores son más precisas.



Gráfica 8. Independencia de los Eventos

La Prueba de Independencia de la Gráfica 8, señala que se realizó la aleatorización de los experimentos para distribuir los efectos no controlables en todos los tratamientos y que dicho efecto se distribuya en todos los eventos. En este caso se observa que no hay un patrón definido, es decir que la ocurrencia de un evento no afecta la ocurrencia de otro, es decir son eventos independientes.



Gráfica 9. Distribución Normal

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

El histograma mostrado en la Gráfica 9 de los residuales muestra que hay una distribución normal por lo que es válido los resultados del ANOVA.

CONCLUSIONES

Los resultados experimentales muestran que la mayor eficiencia en la captación de agua se logra en los horarios nocturnos esto es en los horarios de las 12:00 am a 7:00 am, cosechando el 33 y 32 % del total de agua cosechada, en estos horarios la HR fue del 29 y 31 % en comparación los horarios de las 12:00 pm y las 7:00 pm solo se obtuvo 11 y 24 % del total del agua cosechada con 17 y 23 % de HR.

El análisis de varianza (ANOVA) muestra el rechazo de la hipótesis nula por lo que se acepta que los tratamientos tienen un efecto. La prueba de Tukey indica diferencias significativas en la cantidad de agua recolectada entre los tratamientos nocturnos y diurnos sin embargo no hay diferencia significativa entre el horario de las 12:00 am y 7:00 am, igualmente no hay diferencia significativa entre los tratamientos de las 12:00 pm y 7:00 pm.

El estudio también verificó la calidad del agua obtenida mediante pruebas de pH y conductividad eléctrica, obteniendo un pH promedio de 7.45 y de 30.7 ppm, valores comparables a los del agua de lluvia y dentro de los rangos adecuados para su potabilización. Esto sugiere que el agua recolectada puede ser tratada para su uso doméstico con procesos simples de filtración y desinfección.

En cuanto al consumo energético, los resultados muestran que el deshumidificador a pesar de que este funciona en lazo abierto es decir sin una retroalimentación que permita reducir el gasto de energía entre los distintos horarios, si muestra que la cosecha de agua será más eficiente en un horario nocturno.

La verificación de los supuestos experimentales confirma que el diseño de bloques completamente aleatorizado (DBCA) utilizado en este estudio cumple con los principios de normalidad, varianza constante e independencia de eventos, asegurando la validez de los resultados obtenidos.

La extracción de agua atmosférica en la ciudad de Puebla es factible durante en el horario nocturno sin embargo según datos del INEGI existen regiones con una alta HR durante todo el año como la falda de la Malinche y la zona norte del estado.

Aún se carece de tecnología adecuada para la extracción de agua atmosférica por lo que el desarrollo de tecnologías sostenibles es un área de oportunidad.

BIBLIOGRAFÍA

[1] Vera, L. H., Unterholzner, E. S., Lorenzo, H. G., Cáceres, M., & Firman, A. (2024, September). ANÁLISIS COMPARATIVO DE TECNOLOGÍAS DE DESALINIZACIÓN PARA APLICACIONES EN PEQUEÑA ESCALA. In Anais Congresso Brasileiro de Energia Solar-CBENS.Bagheri, F. (2018). Investigación del desempeño de los sistemas de captación de agua atmosférica. Surrey, BC, Canadá

[2] Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (s.f.). Infografía: Huella hídrica. Gobierno de México. Recuperado el [fecha de consulta], de https://www.conagua.gob.mx/conagua07/contenido/documentos/infografía%20huella%20hídrica.pdf

[3] Neria, B. L., & Badillo, I. C. El servicio de agua potable en México: ¿Qué explica su nivel de satisfacción por parte del usuario? Agua para la vida, 52

[4] Instituto Federal Suizo de Ciencia y Tecnología Acuáticas. (2022). Estudio sobre el acceso al agua potable segura a nivel mundial. Recuperado de https://elpais.com/planeta-futuro/2024-08-15/mas-de-la-mitad-de-la-poblacion-mundial-no-tiene-acceso-a-agua-potable-segura-segun-un-estudio-que-duplica-las-cifras-de-la-onu.html

[5] Pérez-González, D., Delgado-Ramos, G. C., Cedillo Ramírez, L., Loreto López, R., Ramos Cassellis, M. E., Tamariz Flores, J. V. R., & Peña Moreno, R. D. (2023). Puebla City Water Supply from the Perspective of Urban Water Metabolism. Sustainability, 15(19), 14549.

[6] Ehtisham, M., Saeed-Ul-Hassan, M., & Poater, A. (2025). A comprehensive review of approaches, systems, and materials used in adsorption-based atmospheric water harvesting. Science of The Total Environment, 958, 177885.

[7] Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (s.f.). *Clima de Puebla*. Cuentame INEGI. https://cuentame.inegi.org.mx/monografias/informacion/pue/territorio/clima.aspx

[8] Weather Atlas. (s.f.). Clima de Puebla, México. Weather Atlas. https://www.weather-atlas.com/es/mexico/puebla-clima

[9] Jin, Y., & Ghaffour, N. (2024). Boosting atmospheric water harvesting with a solar-driven humidity-adaptable membrane device. Device, 2(8).

[10] Luo, F., Liang, X., Chen, W., Wang, S., Gao, X., Zhang, Z., & Fang, Y. (2023). High-efficient and scalable solar-driven MOF-based water collection unit: From module design to concrete implementation. Chemical Engineering Journal, 465, 142891.

[11] Song, Y., Xu, N., Liu, G., Qi, H., Zhao, W., Zhu, B., ... & Zhu, J. (2022). High-yield solar-driven atmospheric water harvesting of metal–organic-framework-derived nanoporous carbon with fast-

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

diffusion water channels. Nature Nanotechnology, 17(8), 857-863.

[12] Feng, Y., Ge, L., Zhao, Y., Li, Q., Wang, R., & Ge, T. (2024). Active MOF water harvester with extraordinary productivity enabled by cooling-enhanced sorption. Energy & Environmental Science, 17(3), 1083-1094.

[13] Li, M., Shu, L., Zhang, X. F., Peng, X., Ding, M., & Yao, J. (2024). Efficient atmospheric water harvesting enabled by hierarchically structured cellulose foam. Chemical Engineering Journal, 499, 155932.

[14] De'Longhi. (s.f.). *Energy Star 5.0 50 Pint Dehumidifier with Pump and Carbon Filter*. Recuperado el [fecha de consulta], de https://www.delonghi.com/en-us/manuals/energy-star-5-0-50-pint-dehumidifier-with-pump-and-carbon-filter/p/DDX250PEF

[15] Whitco Sales. (s.f.). *Energy Star Dehumidifier with Pump, 50 pt.* Recuperado el [fecha de consulta], de https://www.whitcosales.com/products/Delonghi/dlg/ddx250pef.html

[16] Manua.ls. (s.f.). *User manual DeLonghi DDX250PEF (English - 26 pages)*. Recuperado el [fecha de consulta], de https://www.manua.ls/delonghi/ddx250pef/manual

[17] Chang, R. (2002). Quimica General-7ma Edicion-Raymond Chang. pdf (pp. 1–977).

[18] Bagheri, F. (2018). Investigación del desempeño de los sistemas de captación de agua atmosférica. Surrey, BC, Canadá

[19] Wallace, J. M., & Hobbs, P. V. (2006). Atmospheric science: an introductory survey (Vol. 92). Elsevier.

[20] Seinfeld, J. H., & Pandis, S. N. (2016). *Atmospheric chemistry and physics: from air pollution to climate change*. John Wiley & Sons.

[21] American Public Health Association, American Water Works Association & Water Environment Federation. (2017). Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (23ª ed.). APHA.

AUTORIZACIÓN Y RENUNCIA.

Los autores del presente artículo autorizan al TecNM/Instituto Tecnológico de Zacatepec para publicar el escrito en el libro electrónico del CITID 2025. El TecNM/ITZ o los editores no son responsables ni por el contenido ni por las implicaciones de lo que está expresado en el escrito.

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

EVALUACIÓN EXPERIMENTAL DE UN SISTEMA DE ENFRIAMIENTO ABSORCIÓN-DIFUSIÓN DE PEQUEÑA ESCALA

Javier Delgado-Gonzaga[1], María Fernanda Díaz-Ayala[1], Augusto Ariel Aguilar-Ayala[1], José Luis Labra-Liborio[1], Rajagopal Saravanan[2]

[1]Doctor en Ingeniería y Ciencias Aplicadas, Javier Delgado Gonzaga. Universidad Politécnica del Estado de Morelos, México. Ingeniería en Tecnologías de la Información. jdelgadog@upemor.edu.mx, 777 103 51 63, C. P. 62574.
[1]Doctora en Ingeniería y Ciencias Aplicadas, María Fernanda Díaz Ayala. Universidad Politécnica del Estado de Morelos, México. Ingeniería en Informática y de la Ingeniería en Electrónica y Telecomunicaciones. mdiaz@upemor.edu.mx, 777 219 52 96 C. P. 62574.
[1]Maestro en Administración, Augusto Ariel Aguilar Ayala. Universidad Politécnica del Estado de Morelos, México. Ingeniería Industrial. aaguilara@upemor.edu.mx, 777 790 24 48 C. P. 62574.
[11]Doctor en Ingeniería y Ciencias Aplicadas, José Luis Labra Liborio. Universidad Politécnica del Estado de Morelos, México. Ingeniería Industrial. jlabra@upemor.edu.mx, 777 287 41 57 C. P. 62574.
[2]Professor of Mechanical Engineering, Rajagopal Saravanan. Anna University, India. Mechanical Engineering. rsaravanan@annauniv.edu, 09176794329, 600 025.

Resumen – En este trabajo se presenta el estudio teórico experimental de un sistema de enfriamiento por absorción-difusión (SEA-D) de pequeña escala que opera con la mezcla de trabajo amoniaco-agua e hidrógeno como ecualizador de presión. El SEA-D utiliza un absorbente para captar calor y un refrigerante que se difunde dentro del sistema para generar enfriamiento.
Este tipo de sistema se usa en refrigeración sin compresores, aprovechando la transferencia de calor entre diferentes fluidos. Con el objetivo de registrar el desempeño del SEA-D a lo largo de un año en una localidad de clima tropical como es característico en varias regiones de México, la temperatura ambiente fue controlada y variada entre 25-33 °C. Además, el suministro de potencia eléctrica fue variado entre 20-200 W, lo que permitirá en la siguiente etapa del proyecto, evaluar la posible integración de un sistema de energía solar fotovoltaica o térmica. Los resultados obtenidos indican que el SEA-D es capaz de alcanzar: temperatura en el evaporador (EV) (T_{EV}) de -6 °C, potencia térmica en el evaporador (Q_{EV}) de 15 W y coeficiente de rendimiento (COP) de 0.15 a partir del suministro de potencia eléctrica (W_e) igual a 120 W y temperatura ambiente (T_{amb}) de 25 °C. El SEA-D resulta en una alternativa interesante de aplicar en localidades de clima tropical, especialmente en aquellas donde no es accesible el suministro de la red local.

Palabras Clave: Enfriamiento solar, Refrigeración por absorción, Sistema de enfriamiento de pequeña escala.

Abstract This paper presents the theoretical and experimental study of a small-scale absorption-diffusion cooling system (SEA-D) that operates with an ammonia-water working mixture and hydrogen as a pressure equalizer. The SEA-D utilizes an absorbent to capture heat and a refrigerant that diffuses within the system to generate cooling. This type of system is used in refrigeration without compressors, relying on heat transfer between different fluids. To assess the performance of the SEA-D over a year in a tropical climate location, typical of various regions in Mexico, ambient temperature was controlled and varied between 25–33 °C. Additionally, the electrical power supply was varied between 20–200 W, which will allow, in the next stage of the project, the evaluation of the potential integration of a photovoltaic or thermal solar energy system. The results obtained indicate that the SEA-D is capable of achieving: an evaporator temperature (T_{EV}) of -6°C, thermal power at the evaporator (Q_{EV}) of 15 W, and a coefficient of performance (COP) of 0.15, with an electrical power supply (W_e) of 120 W and ambient temperature (T_{amb}) of 25 °C. The SEA-D presents an interesting alternative for application in tropical climate areas, particularly in regions where local grid power supply is not accessible.

Keywords – Solar cooling, Absorption cooling, Small-scale cooling system.

INTRODUCCIÓN

Hoy en día se estima que la población mundial oscila en 7,600 millones de personas y se estima que la cifra supere 8,500 millones para el año 2030 [1]. Este incremento constante trae consigo un mayor consumo de recursos energéticos por parte de una población cada vez más exigente de servicios que satisfagan sus necesidades básicas y complementarias. En este contexto, el enfriamiento es un proceso que ha contribuido al desarrollo económico y social del mundo moderno. Sin embargo, la producción de enfriamiento demanda una importante cantidad de energía a nivel global. El Instituto Internacional de Refrigeración estima que existen más de 3 mil millones de sistemas de enfriamiento y aire acondicionado operando en todo el mundo, con un consumo aproximado del 20 % de la energía eléctrica [2,3]. En los próximos se prevé que este porcentaje se incremente [4,5]. Ante el reto que implica esta ostensible creciente demanda de energía, resulta imprescindible realizar investigación sobre tecnologías

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

que hagan frente a esta problemática. En los últimos años, los sistemas de enfriamiento por absorción han ganado interés de estudio ya que son dispositivos de ahorro de energía que pueden reutilizar energía de baja calidad como el calor residual industrial o una fuente de energía renovable. Además, los sistemas por absorción consumen poca energía eléctrica y generalmente utilizan fluidos de trabajo que no suponen riesgo para el ambiente. Entre los sistemas por absorción, el sistema de enfriamiento por absorción-difusión (SEA D) inventado por Platen y Munters en la década de 1920 [6], es una atractiva opción de refrigeración ya que puede ser impulsado con energía térmica, lo que lo hace eficiente en términos de consumo eléctrico, atractivo para aplicaciones en lugares sin acceso a electricidad y con un menor impacto ambiental debido a su uso de refrigerantes naturales. Además, su diseño simple y duradero con menor mantenimiento lo convierte en una opción viable para diversas aplicaciones industriales y domésticas de variada capacidad térmica. La principal limitación del SEA-D es su bajo rendimiento, que regularmente es inferior al 0.3. Sin embargo, este sistema de enfriamiento puede ser una opción factible cuando se dispone de una fuente de calor de bajo costo como lo es el calor de desecho industrial o en regiones donde es accesible el aprovechamiento de la energía solar.

En la literatura especializada existen numerosos trabajos reportados en cuanto a sistemas de enfriamiento por absorción-difusión (SEA-D) que abarcan diversas investigaciones y avances. A continuación, se describen algunos de ellos. Yousuf et al. [7] presentaron el estudio de factores clave que influyen la eficiencia de los SEA-D. A través de un análisis paramétrico exhaustivo, ellos identificaron las condiciones óptimas para maximizar el rendimiento de estos sistemas. Los autores concluyen que las futuras investigaciones deben enfocarse en la mejora de materiales absorbentes, la optimización de los diseños de los componentes clave y la integración con fuentes de energía renovable para hacer estos sistemas más sostenibles y competitivos en aplicaciones industriales y comerciales. Elsayed et al. [8] reportaron una mejora significativa en los SEA-D mediante la modificación de su ciclo de operación y la optimización de sus componentes. Las simulaciones numéricas en estado estacionario mostraron un aumento en la eficiencia y el rendimiento del ciclo modificado. Para futuras investigaciones, los autores recomiendan la exploración de nuevas soluciones absorbentes para mejorar aún más la eficiencia del sistema. En un estudio experimental de Choi et al. [9] se muestra el potencial de los SEA-D alimentados con fuentes de calor de baja temperatura. A pesar de que el COP obtenido es modesto (0.2), los resultados son prometedores en términos de sostenibilidad y eficiencia energética para aplicaciones de pequeña escala o donde se utilicen fuentes de calor residual. La investigación subraya la importancia de seguir optimizando el diseño y el rendimiento de estos sistemas para que puedan competir más eficazmente con los sistemas convencionales de compresión. Valiyandi y Thampi [10] reportaron un estudio donde proponen una innovadora aproximación para optimizar el rendimiento de los SEA-D mediante el uso de redes neuronales para predecir el comportamiento de distintas mezclas de fluidos. Al optimizar la mezcla de fluidos, el sistema puede operar de manera más eficiente, mejorando su coeficiente de rendimiento (COP). Esta investigación subraya el potencial de la inteligencia artificial, específicamente las redes neuronales, para diseñar y optimizar sistemas de refrigeración más eficientes, especialmente cuando se utiliza una mezcla óptima de fluidos y fuentes de calor de baja temperatura. Gürbüz [11] en un estudio teórico-experimental proporciona una visión integral del funcionamiento termodinámico de las regiones del boiler y la bomba de burbujas en los SEA-D. A través de un análisis detallado y validación experimental, se identificaron factores clave que afectan la eficiencia de estos componentes, y se ofrecieron recomendaciones para optimizar su diseño y operación. Las mejoras en el boiler y la bomba de burbujas podrían resultar en sistemas de refrigeración más eficientes. Abuhabaya et al. [12] evaluaron experimentalmente el potencial de la mezcla amoníaco-agua-hidrógeno como fluido de trabajo en SEA-D, mostrando mejoras significativas en la eficiencia y el rendimiento en comparación con las mezclas tradicionales. La inclusión de hidrógeno facilita la difusión del refrigerante y mejora la transferencia de calor, lo que resulta en un sistema de refrigeración más eficiente. Freeman et al. [13] presentaron un estudio sobre la viabilidad de un sistema de refrigeración solar basado en tecnología de difusión absorción para proporcionar soluciones de bajo costo y eficiencia energética en India, donde el acceso a electricidad es limitado. A través de simulaciones numéricas y pruebas experimentales de un prototipo, los autores evaluaron el rendimiento del sistema, que utiliza energía solar para activar un ciclo de absorción de calor sin necesidad de compresores, lo que reduce costos y mantenimiento. Los resultados mostraron que el sistema es capaz de generar suficiente capacidad de refrigeración para aplicaciones como la conservación de alimentos y medicamentos, aunque su eficiencia depende de la radiación solar disponible. El estudio concluye que, aunque el sistema presenta ventajas como bajo costo y sostenibilidad, aún es necesario optimizar su rendimiento y diseño para mejorar su eficiencia y adaptabilidad a diversas condiciones climáticas y de operación en India. Wael et al. [14] evaluaron la eficiencia de un SEA-D al utilizar esta fuente de calor residual, que de otro modo se desperdiciaría, para generar enfriamiento. Se examinan parámetros clave como el coeficiente de rendimiento (COP), la capacidad de refrigeración y las temperaturas de operación en

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

diferentes condiciones de carga del motor. Los resultados muestran que el sistema puede operar eficientemente con el calor residual, alcanzando valores de COP aceptables y demostrando su viabilidad como una solución sostenible para la recuperación de energía en aplicaciones de motores diésel. Además, se discuten las limitaciones y los factores que afectan el rendimiento, como la temperatura de los gases de escape y la configuración del sistema. En general, el estudio concluye que este enfoque tiene un potencial significativo para mejorar la eficiencia energética y reducir el impacto ambiental en sistemas de transporte y generación de energía. Con base a la revisión bibliográfica queda de manifiesto que existen varias oportunidades técnicas para incrementar el rendimiento de los sistemas de enfriamiento por absorción difusión (SEA-D). El uso de tecnologías de captación solar como suministro de energía a los sistemas por absorción difusión es una opción que en México resulta accesible debido a que nuestro país es uno de los países con mayor disponibilidad de energía solar con una radiación promedio de 5.5 kWh/m^2 [15]. En el presente estudio se realizó el análisis de un SEA-D de baja capacidad de enfriamiento que opera con la mezcla de trabajo de amoniaco-agua e hidrógeno como gas ecualizador de presión (Ver Figura 1). Se estudió el desempeño del SEA-D a diferentes condiciones de temperatura ambiente y el suministro de energía de entrada a la GE (bomba de burbujeo y caldera) para determinar su capacidad de enfriamiento y rendimiento (COP). Con la finalidad de solucionar la desventaja que representa el bajo rendimiento, con base a los resultados experimentales del presente estudio, en la siguiente etapa del proyecto se evaluará la integración del SEA-D con un sistema de captación solar térmica o eléctrica.

Figura 1. Sistema de enfriamiento por absorción-difusión.

DESARROLLO

En esta sección se describe el funcionamiento del SEA-D, el análisis termodinámico y el análisis paramétrico

Descripción del SEA-D

Con ayuda del diagrama esquemático del sistema de enfriamiento por absorción-difusión (SEA-D) presentado en la Figura 2, se presenta a continuación la descripción del ciclo. La alimentación eléctrica en el generador se realiza mediante una resistencia eléctrica que calienta la solución rica de amoniaco que ingresa por la parte inferior de la bomba de burbujeo (2) hasta generar burbujas que ascienden para producir vapor de amoniaco con un alto grado de pureza (4). El vapor de amoniaco continúa ascendiendo hacia el rectificador donde una pequeña fracción de agua removida por calor liberado al ambiente regresa al generador (6). En la parte superior del generador, además del vapor de amoniaco, también hay una solución débil (3) que pasa a la caldera donde se evapora más amoniaco (5). La solución débil, que también es el absorbente fuerte, sale del generador (7) hacia el absorbedor, después de haber intercambiado calor con la solución rica de amoniaco en el intercambiador de calor líquido (LHE) (8). El vapor de amoniaco casi puro ingresa al condensador (9). En el condensador, el vapor de amoniaco se condensa por convección natural a través del aire del ambiente. El amoniaco líquido sale del condensador (10.a) en la misma concentración del estado (9). Mientras que el vapor de amoniaco no condensado fluye hacia el depósito a través de un gas de derivación (10.b). El amoniaco condensado antes de entrar al evaporador (11) es subenfriado por la mezcla de gases rica en amoniaco (amoniaco/hidrógeno) que sale del evaporador. El subenfriamiento se lleva a cabo en el intercambiador de calor de gases (GHE) que tiene una configuración de carcasa y tubos. En el evaporador, la presión parcial del amoniaco líquido subenfriado disminuye al mezclarse con la mezcla de gases pobre en amoniaco (hidrógeno/amoniaco) que proviene del absorbedor (12) a través del GHE (13). La mezcla resultante que sale del evaporador (14) es mezcla de gases rica en amoniaco que se dirige al depósito (15), después de haber intercambiado calor con las corrientes (10.a) y (12). Finalmente, en el absorbedor, la solución débil de amoniaco fluye a contracorriente (absorbente fuerte) (8) en forma descendente con la mezcla de gas rica en amoniaco que sube desde el depósito. A medida que el gas amoniaco presente en la mezcla rica en amoniaco sube, se disuelve en la solución débil de amoniaco que desciende a contracorriente desde la parte superior del absorbedor. Como resultado de la absorción, la solución fuerte de amoniaco se deposita en el depósito para ser enviada al generador a través del LHE (1). Mientras que en la parte superior del absorbedor, el gas inerte en la parte superior del absorbedor, el gas inerte hidrógeno más una pequeña fracción de amoniaco gaseoso (mezcla de gas pobre en amoniaco) se dirige al GHE y posteriormente ingresa al evaporador.

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

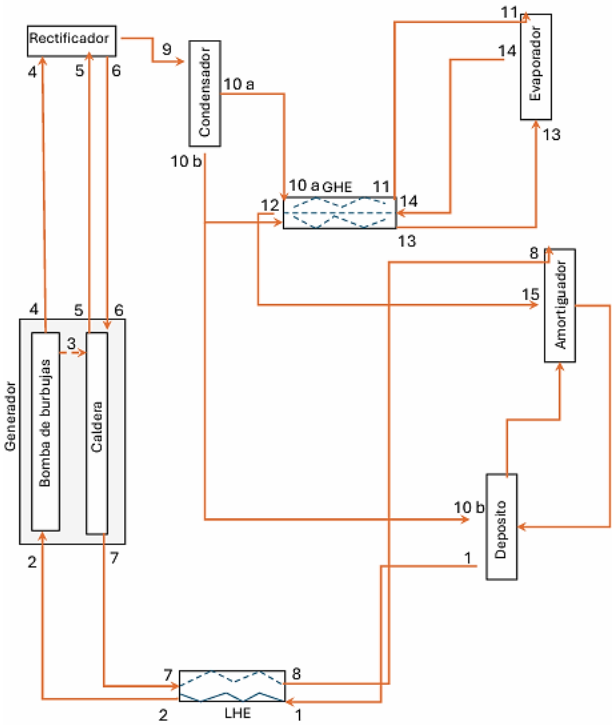


Figura 2. Diagrama esquemático del SEA-D

Análisis termodinámico

Las siguientes consideraciones fueron tomadas en cuenta para el análisis termodinámico del sistema:

- El SEA-D funciona de forma continua
- Las propiedades termofísicas se calculan en la entrada y la salida de cada componente del SEA-A.
- La presión en el sistema es constante.
- No se tienen en cuenta los pequeños efectos viscosos e hidrostáticos.
- No se condensa amoníaco en el rectificador.
- La temperatura del vapor de amoníaco y de la solución semidesgasificada es la misma en la salida de la bomba de burbujeo (estados 3 y 4 mostrados en la Figura 2).
- La temperatura del vapor de amoníaco y del gas inerte es la misma en la salida de la EV (estado 15 mostrado en la Figura 2).
- El gas inerte solo circula en la región de baja presión.

El análisis termodinámico del SEA-D se obtuvo aplicando los principios de conservación de masa y energía:

$$\sum_{i=1}^{n} \dot{m}_{in} = \sum_{i=1}^{n} \dot{m}_{out} \qquad \text{Ec. (1)}$$

$$\sum_{i=1}^{n} \dot{Q} - \sum_{i=1}^{n} \dot{W} = \sum_{i=1}^{n} \dot{m}_{out} h_{out} - \sum_{i=1}^{n} \dot{m}_{in} h_{in} \qquad \text{Ec. (2)}$$

Generador

La caldera y la bomba de burbujeo se consideran como una sola unidad. Relación entre el caudal de solución débil y la unidad de masa de vapor de amoniaco producida en la salida del rectificador:

$$F = (x_9 - x_2)/(x_2 - x_7) \qquad \text{Ec. (3)}$$

Relación entre el caudal de solución rica y la unidad de masa de vapor de amoniaco producida en la salida del rectificador:

$$\dot{m}_2/\dot{m}_9 = F + 1 \qquad \text{Ec. (4)}$$

Masa de vapor de amoniaco necesaria en el rectificador para producir una unidad de masa de vapor de amoniaco en la salida del rectificador:

$$(\dot{m}_4 + \dot{m}_5)/\dot{m}_9 = (x_9 - x_3)/(x_4 - x_3) \qquad \text{Ec. (5)}$$

Masa de líquido en equilibrio con el vapor que desciende del rectificador a la caldera (por unidad de masa de vapor de amoniaco en el punto 7):

$$\dot{m}_6/\dot{m}_9 = [(\dot{m}_4 + \dot{m}_5)/\dot{m}_9] - 1 \qquad \text{Ec. (6)}$$

Entrada de calor teórica al generador por kg de vapor de amoniaco a la salida del rectificador:

$$q_{GE} = h_4[(\dot{m}_4 + \dot{m}_5)/\dot{m}_9] + F h_8 - h_6(\dot{m}_6/\dot{m}_9) - (F+1)h_1 \qquad \text{Ec. (7)}$$

Pérdida de calor en el generador aislado:

$$Q_{GE,loss} = \emptyset\, \Delta T_{ins} \qquad \text{Ec. (8)}$$

Donde $\emptyset$ igual a 0.246 W/°C, este es el factor de fuga de calor del generador aislado. Y ΔT_{ins} es la diferencia de temperatura promedio a lo largo del generador aislado:

$$\Delta T_{ins} = [(T_2 + T_4 + T_7)/3] - T_{ins} \qquad \text{Ec. (9)}$$

Donde T_{ins} es la temperatura promedio de la superficie externa del aislamiento del generador. El voltaje de suministro neto al generador es:

$$Q_{GE} = Q_{GE,ip} - Q_{GE,loss} \qquad \text{Ec. (10)}$$

Donde $Q_{GE,ip}$ es la potencia de entrada suministrada al generador.

Caudal másico de vapor de amoniaco a la salida del rectificador:

$$\dot{m}_9 = Q_{GE}/q_{GE} \text{ Ec.} \qquad \text{Ec. (11)}$$

Caudal másico de solución débil:

$$\dot{m}_7 = \dot{m}_8 = F\, \dot{m}_9 \qquad \text{Ec. (12)}$$

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

Caudal másico de solución fuerte:

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_2 = (F + 1)\, \dot{m}_9 \qquad \text{Ec. (13)}$$

Rectificador

$$Q_{RE} = \{[h_4\,(\dot{m}_4 + \dot{m}_5)/\dot{m}_9] - (h_6\ \dot{m}_6/\dot{m}_9) - h_9\,\}\,\dot{m}_9 \qquad \text{Ec.(14)}$$

Condensador

$$Q_{CO} = \dot{m}_9 h_9 - \dot{m}_{10.a} h_{10.a} - \dot{m}_{10.b} h_{10.b} \qquad \text{Ec. (15)}$$

Evaporador

$$Q_{EV} = \dot{m}_{12,NH3} h_{12,NH3} + \dot{m}_{12,H2} h_{12,H2} - \dot{m}_{10.a} h_{10.a} - \dot{m}_{11,NH3} h_{11,NH3} - \dot{m}_{11,H2} h_{11,H2} \qquad \text{Ec . (16)}$$

Absorbedor

$$Q_{AB} = \dot{m}_{12,NH3} h_{12,NH3} + \dot{m}_{12,H2} h_{12,H2} + \dot{m}_1 h_1 - \dot{m}_{15,NH3} h_{15,NH3} - \dot{m}_{15,H2} h_{15,H2} - \dot{m}_{10.b} h_{10.b} - \dot{m}_8 h_8) \qquad \text{Ec. (17)}$$

Coeficiente de rendimiento

El coeficiente de rendimiento del sistema (COP) se define como la relación entre la capacidad de enfriamiento y la potencia total suministrada al sistema.

$$COP = {}^{Q_{EV}}/_{Q_{GE}} \qquad \text{Ec. (18)}$$

Metodología experimental

Los datos experimentales para determinar la transferencia de calor en cada uno de los componentes, así como el COP del SEA-D, se obtuvieron en condición de estado estacionario. Este estado se verifica cuando en la salida de cada componente las temperaturas tienen variaciones de ± 1°C durante 20 min.

Para determinar la variable temperatura, se instalaron dieciocho termopares tipo "T" a lo largo del SEA-D en las entradas y salidas de cada uno de los componentes principales. Los valores de temperatura se monitorearon registraron mediante un sistema de adquisición de datos con un módulo multiplexor de dos canales.

DISCUSIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Con el propósito de estimar el desempeño del SEA-D, se varió la temperatura ambiente entre 25-33 °C, recreando así las temperaturas de las diferentes estaciones de un año en una localidad de clima tropical. La potencia eléctrica se varió entre 20-200 W, con la intención de evaluar la posibilidad de integrar un sistema de suministro de energía solar en la siguiente etapa del proyecto.

La Figura 3 muestra las tendencias de la temperatura de enfriamiento a diferentes temperaturas ambiente y potencias eléctricas de entrada. Con excepción de las pruebas a 25 y 27 °C, los valores de 20 y 40 W de potencia de entrada como suministro de energía al generador, no fueron suficientes para generar enfriamiento en el evaporador. A partir de 60 W de potencia de entrada, las tendencias en todos los casos están fuera de los límites hasta 140 W. Después de 140 W de potencia de entrada, la temperatura de enfriamiento se mantiene prácticamente constante. La temperatura de enfriamiento más baja registrada fue de -6,5 °C para la prueba realizada a temperatura ambiente de 27 °C y potencia de entrada de 140 W. Al aumentar la temperatura ambiente, el sistema disminuye su capacidad de generar enfriamiento debido a que la presión absoluta aumenta y, por lo tanto, la temperatura de saturación del amoniaco en el evaporador se lleva a cabo a temperaturas más altas.

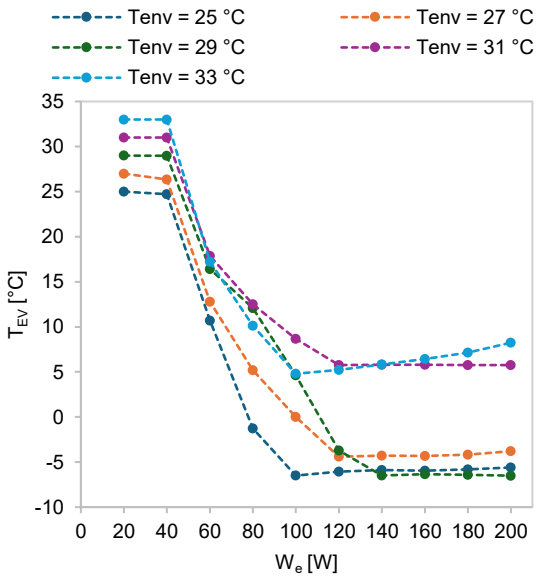


Figura 3. Comportamiento de las temperaturas de enfriamiento (T_{EV}) a diferentes valores de potencia eléctrica de entrada (W_e) y temperaturas del ambiente (Tenv).

La Figura 4 muestra el comportamiento de la capacidad de refrigeración del SEA-D a diferentes potencias de entrada y temperaturas ambiente. A excepción de la prueba a 33 °C, se observó que a 120 W de potencia de entrada se obtuvieron las mayores cargas térmicas en el evaporador. A valores superiores a 120 W de potencia de entrada, los valores se mantienen hasta los 140 W. A partir de 140 W de potencia de entrada la capacidad de refrigeración es prácticamente constante. Lo anterior se debe porque el sistema ha alcanzado su límite de diseño frigorífico.

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

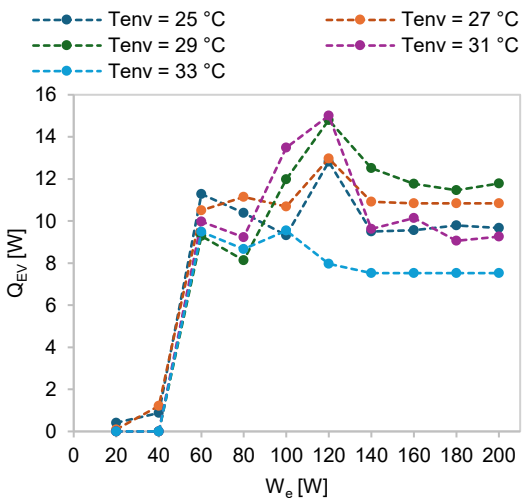


Figura 4. Comportamiento de la potencia frigorífica (Q_{EV}) a diferentes valores de potencia eléctrica de entrada (W_e) y temperaturas del ambiente (T_{env}).

La Figura 5 muestra el comportamiento del coeficiente de rendimiento (COP) del SEA-D a diferentes valores de potencia eléctrica de entrada (20-200 W). Las tendencias se han agrupado a diferentes valores de temperatura ambiente (25-33 °C). En general, se observa que el sistema tiene un mejor rendimiento a 60 W. A valores inferiores a 60 W el COP del SEA-D disminuye debido a que la potencia eléctrica de suministro aumenta en mayor proporción a la capacidad de refrigeración generada en el evaporador. También se observa que los valores de COP más altos se obtuvieron a temperaturas del ambiente más bajas, esto se debe a que el condensador reduce la cantidad de calor liberado, lo cual genera una menor demanda de trabajo en el compresor.

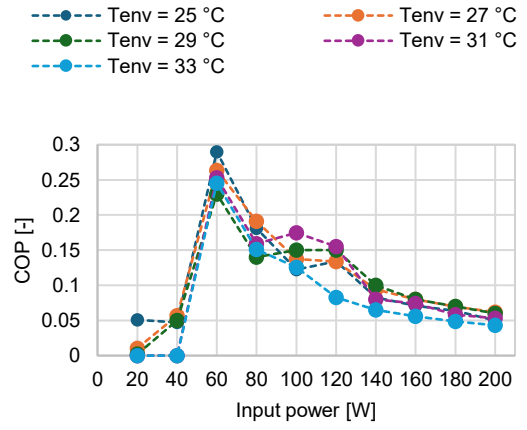


Figura 5. Comportamiento del coeficiente de rendimiento (COP) a diferentes valores de potencia eléctrica de entrada (W_e) y temperaturas del ambiente (T_{env}).

CONCLUSONES

En este trabajo se llevó a cabo un análisis detallado del rendimiento de un sistema de enfriamiento por absorción-difusión (SEA-D) de pequeña escala, con el objetivo de evaluar su comportamiento bajo diferentes condiciones operativas. La evaluación del SEA-D consistió en la variación de la temperatura ambiente a lo largo de un periodo representativo de un año, permitiendo así emular las condiciones térmicas características de regiones con clima cálido. Adicionalmente, se llevó a cabo un análisis de la variación en la potencia eléctrica de suministro, la cual se ajustó en un rango de 200 a 1200 W, de acuerdo con la capacidad de diseño del SEA-D.

Se obtuvo un amplio registro del rendimiento del SEA-D bajo diversas condiciones operativas, lo que permitió un análisis detallado de su comportamiento. A partir de los datos recopilados, se observó que el sistema fue capaz de generar enfriamiento en un amplio rango de potencias eléctricas cuando la temperatura ambiente se mantuvo entre 25 y 27 ºC. Este comportamiento sugiere que el SEA-D podría operar de manera eficiente durante la temporada de invierno o en entornos con temperaturas moderadas, asegurando un desempeño estable sin requerimientos energéticos elevados. En términos de las temperaturas de enfriamiento y los coeficientes de rendimiento alcanzados por el sistema, se identificó que la mejor condición operativa se obtuvo cuando la temperatura ambiente (T_{env}) fue de 25 ºC y la potencia eléctrica suministrada (W_e) fue de 120 W. En estas condiciones, el sistema logró alcanzar una temperatura en el evaporador (T_{EV}) de -6 ºC, lo que indica una capacidad significativa de generación de frío. Por otro lado, el coeficiente de rendimiento obtenido bajo estas condiciones fue de 0.15, lo que representa el mejor desempeño del SEA-D en la gama de variables evaluadas. Este resultado evidencia que, con una temperatura ambiente moderada y un suministro de potencia eléctrica adecuado, el sistema puede operar de manera más eficiente, optimizando el aprovechamiento de la energía suministrada. Con base a los resultados obtenidos, su pudo constatar que el SEA-D puede ser una alternativa para generar enfriamiento en regiones con difícil acceso a la red de distribución de energía eléctrica.

TRABAJO FUTURO

En la siguiente etapa del proyecto, con base a los resultados experimentales obtenidos en el presente trabajo, se evaluará la integración de un sistema de captación solar térmica o fotovoltaica como suministro de energía al SEA-D. Se realizará un caso de estudio en el cual se evalúe el rendimiento del SEA-D con diferentes tecnologías de captación solar, esto con base a las condiciones climatológicas características en diferentes regiones de México. Para la integración de los sistemas se usará el software TRNSYS. Posteriormente, a partir de los resultados obtenidos de la simulación, se realizará un análisis de factibilidad de la configuración propuesta en términos costo-beneficio para su posible experimentación. Con la integración de los sistemas se

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

pretende obtener una configuración que pueda ser opción para generar enfriamiento en regiones de México con difícil acceso a la red eléctrica. Cabe señalar que el desarrollo de proyectos de energía solar en México es altamente atractivo debido a su abundante radiación solar, una de las más altas del mundo. Además, el país cuenta con un marco regulatorio en evolución que fomenta las energías renovables, incentivos fiscales y una creciente demanda de energía limpia por parte de empresas y consumidores. La reducción en costos de tecnología fotovoltaica y la posibilidad de generar ahorros significativos en tarifas eléctricas hacen que la inversión en este sector sea cada vez más competitiva, impulsando la transición hacia un modelo energético más sustentable.

BIBLIOGRAFÍA

[1] United Nations. World Population Prospects: The 2017 Revision, Key Findings and Advance Tables. New York: 2017.

[2] International Institute of Refrigeration. IIR Argues the Essential Role of Refrigeration in the Fight Against COVID-19, April 15, 2020. https://www.refrigeratedfrozenfood.com/keywords/ 1603 2-international-institute-of-refrigeration

[3] Coulomb D, Dupont JL, Pichard A. The role of refrigeration in the global economy. 29th Inf Note Refrig Technol Tech Report; Int Inst Refrig Paris, Fr 2015.

[4] Petri, Y., & Caldeira, K. (2015). Impacts of global warming on residential heating and cooling degree-days in the United States. Scientific reports, 5(1), 12427.

[5] Shahzad, M. W., Burhan, M., & Ng, K. C. (2019). A standard primary energy approach for comparing desalination processes. NPJ Clean Water, 2(1), 1.

[6] Yousfi ML, Saighi M, Dalibard A, Schneider D, Eicker U. Performance of a 5kW hot water driven diffusion absorption chiller. Appl Therm Eng.

[7] Yousuf, N. U., Anderson, T., & Nates, R. (2022). A Parametric Examination of the Factors Affecting the Performance of a Diffusion Absorption Refrigeration System. Journal of Thermal Science and Engineering Applications, 14(7), 071004.

[8] Elsayed, M., Attia, A., & Tawfeek, S. (2022). Steady state numerical simulation and studying performance of a modified diffusion absorption refrigeration cycle. Alexandria Engineering Journal, 61(4), 2591-2600.

[9] Choi, H. W., Lee, J. W., & Kang, Y. T. (2022). Experimental study on diffusion absorption refrigerator achieving 0.2 coefficient of performance using low global warming potential refrigerant and low-grade heat source. Applied Thermal Engineering, 201, 117803.

[10] Valiyandi, S., & Thampi, G. (2022). Forecasting the performance of a diffusion absorption refrigeration system using optimal fluid blend—A neural network approach. Environmental Progress & Sustainable Energy, 41(6), e13890.

[11] Gürbüz, E. Y. (2023). Detailed thermodynamic analysis of the boiler-bubble pump region of a diffusion absorption refrigeration system: experimental and numerical study. Heat and Mass Transfer, 59(10), 1837 1853.

[12] Abuhabaya, A., Rady, M., Aljahdli, M., Almatrafi, E., Al Batati, F., & Attar, A. (2023). Experimental characterization of an ammonia–water–hydrogen diffusion absorption refrigeration system. Case Studies in Thermal Engineering, 52, 103802.

[13] Freeman, J., Najjaran, A., Edwards, R., Reid, M., Hall, R., Ramos, A., & Markides, C. N. (2017). Testing and simulation of a solar diffusion-absorption refrigeration system for low-cost solar cooling in India. Gas, 10, 8b.

[14] Aly, W. I., Abdo, M., Bedair, G., & Hassaneen, A. E. (2017). Thermal performance of a diffusion absorption refrigeration system driven by waste heat from diesel engine exhaust gases. Applied Thermal Engineering, 114, 621-630.

[15] Agencia Internacional de Energías Renovables (IRENA). (2024, 21 de febrero). Energía solar en México: potencial para un futuro sostenible. PV Magazine México. Recuperado de https://www.pv-magazine mexico.com/2024/02/21/energia-solar-en-mexico potencial-para-un-futuro-sostenible/

AUTORIZACIÓN Y RENUNCIA

Los autores del presente artículo autorizan al TecNM/Instituto Tecnológico de Zacatepec para publicar el escrito en el libro electrónico del CITID 2025. El TecNM/ITZ o los editores no son responsables ni por el contenido ni por las implicaciones de lo que está expresado en el escrito.

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

EVALUACIÓN EXPERIMENTAL PRELIMINAR DE LA EFICIENCIA TÉRMICA EN UN CONCENTRADOR CILÍNDRO PARABÓLICO A DOS FLUJOS MÁSICOS

S. Flores Cajero [1], Yuridiana R. Galindo Luna [2]

[1] Lic. Ingeniería en Energía Universidad Autónoma Metropolitana
[2] Doctora en Ingeniería y Ciencias Aplicadas, Universidad Autónoma Metropolitana Departamento de Ingeniería de Procesos e Hidraulica[2] Av. San Rafael Atlixco No.186 Col.Vicentina C.P. 09340 Del. Iztapalapa DF México.
Tel 5573642591, Correo: cbi2162014808@izt.uam.mx
Tel 5524980027, Correo: ygalindo@izt.uam.mx

Resumen – En el siguiente trabajo se analiza la eficiencia térmica preliminar de un Concentrador Cilindro Parabólico (CCP) mediante pruebas experimentales realizadas durante el mes de Enero del año 2025, utilizando dos caudales de fluido másico de 0.067 kg/s y 0.100 kg/s. Se midieron las temperaturas de entrada y salida del fluido, así como la irradiancia difusa y global, utilizando pirómetros y multímetros. Posteriormente, se realizaron las conversiones necesarias para calcular la radiación directa incidente sobre el sistema.
Las pruebas se realizaron en un periodo de 10:00 am a 13:00 pm, los datos obtenidos muestran que la eficiencia térmica disminuye conforme avanza el tiempo, debido a la variación de la irradiancia en un rango de 578.11 W/m^2 y 752.89 W/m^2 y las condiciones ambientales. Se encontró que la eficiencia térmica máxima alcanzada fue de 0.53 para el flujo de 0.100 kg/s, mientras que para el flujo de 0.067 kg/s la eficiencia térmica máxima fue de 0.45.

Palabras Clave: Concentrador cilindro parabólico, eficiencia térmica, energía solar, irradiancia, transferencia de calor.

Abstract - In the following work, the preliminary thermal efficiency of a parabolic trough concentrator (PCC) is analyzed through experimental tests carried out during the month of January, using two mass fluid flow rates of 0.067 kg/s and 0.100 kg/s. The fluid inlet and outlet temperatures were measured, as well as the diffuse and global irradiance, using pyrometers and multimeters. Subsequently, the necessary conversions were made to calculate the direct radiation incident on the system. The tests were carried out in a period from 10:00 am to 1:00 pm, the data obtained show that the thermal efficiency decreases as time progresses, due to the variation of the irradiance in a range of 578.11 W/m2 and 752.89 W/m2 and the environmental conditions. The maximum thermal efficiency achieved was found to be 0.53 for the flow rate of 0.100 kg/s, while for the flow rate of 0.067 kg/s the maximum thermal efficiency was 0.45.

Key words – Parabolic trough collector, thermal efficiency, solar energy, irradiance, heat transfer.

INTRODUCCIÓN

La transición hacia fuentes de energía renovables es altamente importante, debido a los cambios climáticos los cuales siguen presentes en la actualidad lo que nos lleva a reducir la dependencia hacia los combustibles fósiles [1]. En este contexto, el aprovechamiento de la energía solar es relevante, para promover el desarrollo de tecnologías más eficientes y sostenibles.

Existen diversas tecnologías para el aprovechamiento de la energía solar, las cuales se pueden clasificar como: fotovoltaicas y térmicas. Las tecnologías fotovoltaicas convierten directamente la energía solar en electricidad mediante celdas solares. Se reconocen dos tipos; sistemas autónomos: aquellos que no están conectados a la red eléctrica y los sistemas conectados a la red [2]. Las tecnologías térmicas aprovechan la radiación solar para generar calor, dentro de esta clasificación se encuentran los colectores de baja temperatura como: el colector placa plana (FPC) que son los más comunes y están diseñados para temperaturas de operación menores a los 150 °C, se emplean en procesos industriales que requieren calentamiento de agua o fluidos [3]. Seguidos de los colectores de tubos de vacío (ETC), ofrecen una mayor eficiencia térmica al minimizar las pérdidas de calor por convección y conducción. Se utilizan principalmente en aplicaciones de temperatura en un rango de 150 °C a 250°C [4]. Colector parabólico compuesto (CPC) este diseño permite un mejor aprovechamiento de la radiación solar difusa y alcanza temperaturas mayores a 150°C [5].

Por otra parte se encuentran los colectores de mediana temperatura en donde se clasifica el colector de placa plana evacuado (EFPC) este diseño es la combinación del FPC y el ETC, el vacío nos permite obtener una mayor eficiencia térmica, logrando temperaturas de 120°C a 180 °C. Colector lineal Fresnel (LFC) se compone de dos partes; un tubo absorbente estacionario por donde circula el fluido y espejos reflectores alineados horizontalmente, cuentan con un sistema de seguimiento y llegan a alcanzar intervalos de temperatura de 60 °C a 250 °C. Finalmente, el concentrador cilindro parabólico (CCP), dispone de una lámina en forma de parábola en la cual refleja la

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

radiación solar directa y la concentra en el tubo receptor, el cual está ubicado a lo largo de la línea focal, la orientación del colector es Norte-Sur con seguimiento Este-Oeste para una mejor captación [6].

Chamorro Páez et.al. [7] analizaron el calentamiento de agua como fluido de trabajo en un concentrador cilíndrico parabólico en Ecuador. El CCP tiene las siguientes características: el ancho del concentrador es de 1 m su longitud de 2.44 m, diámetro del receptor es de 0.0254 m. La experimentación se realizó en un periodo de 9:00 am a 4:00 pm, hasta obtener 50 L al día de agua caliente, la velocidad del fluido fue menor de 2 kg/s. De acuerdo a los resultados se determinó una eficiencia térmica máxima del 35.84%.

Polo Bravo, Sacari Sacari [8] determinaron la eficiencia térmica CCP en Tacna, Perú, con las siguientes características: un ancho de 1.25 m y un largo de 2.42 m. utilizaron dos flujos de agua de 0.016 kg/s y 0.094 kg/s, obteniendo como resultado una eficiencia máxima térmica máxima del 27%.

Carbajal Cano [9] se analizó el calentamiento de agua como fluido de trabajo en concentrador solar cilíndrico parabólico. El CCP tiene las siguientes características el área de 1.712 m^2, la experimentación se realizó en un periodo de 9:00 y 16:00 horas, logrando una temperatura de 44.3 °C. Se determinó un flujo másico de 0.00467 kg/s y una eficiencia térmica máxima de 71%. Guanoluisa Tenorio [10] analizo el calentamiento de agua como fluido de trabajo en un CCP en Ambato, Ecuador. Las características del CCP son con un área de 1.712 m^2. Re realizaron las pruebas entre las 10:00 y las 14:00 horas, obteniendo temperaturas de salida del agua de hasta 76°C. La eficiencia térmica máxima alcanzada fue del 60%, considerando diferentes condiciones climáticas (soleado, parcialmente nublado y nublado).

Este trabajo se enfoca en determinar la eficiencia del concentrador cilindro parabólico en los primeros meses de este año considerando las variaciones de las climáticas del sitio experimental donde se está llevando a cabo la parte experimental del sistema con mediciones detalladas de temperaturas, flujos y radiación solar.

El problema de investigación se centra en entender el desempeño de estos sistemas bajo diferentes condiciones y así determinar la eficiencia máxima del sistema, considerando dos flujos másicos, 0.067 kg/s y 0.100 kg/s (4 LPM y 6 LPM).

DESARROLLO

Descripción del sistema

El presente estudio se centra en la evaluación de la eficiencia térmica de un concentrador cilindro parabólico (CCP) mediante pruebas experimentales bajo diferentes condiciones climáticas.

El sistema consiste en una superficie reflectante con forma parabólica, un tubo receptor por donde circula el fluido de trabajo, este fluido al pasar por el tubo tiene un aumento en su temperatura.

El CCP posee una estructura de soporte orientada en dirección Norte-Sur con seguimiento Este-Oeste. En la Figura 1, se aprecia el CCP instalado en la azotea del edificio AT, orientado Este-Oeste dentro de las instalaciones de UAM-Iztapalapa. El sistema de seguimiento esta implementado por un brazo mecánico manual.

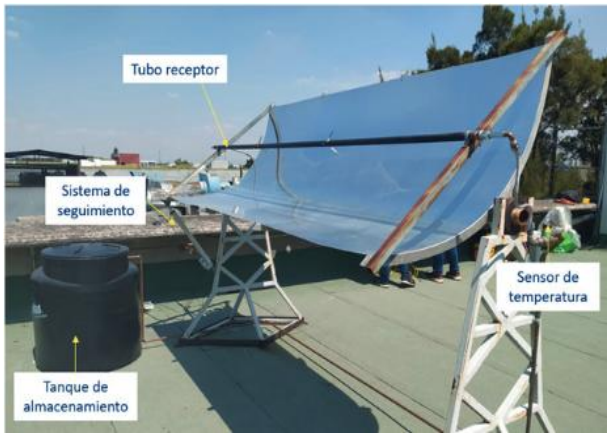


Figura 1. Concentrador cilindro parabólico [11].

En la siguiente Tabla 1, se muestra las especificaciones del sistema.

Tabla 1.Especificaciondes del CCP.

Dimensiones del concentrador	Descripción
Ancho	2.44 [m]
Largo	1.22 [m]
Radio del tubo receptor	0.0127 [m]
Capacidad de termotanque	80 [L]

Pruebas experimentales

La evaluación experimental se llevó a cabo durante el mes de enero del 2025, en un horario de trabajo de las 10:00 a las 13:00 h, Sin embargo, cuando se presentan viento o nubosidad, el registro de datos comienza minutos más tarde, para evitar errores de lectura. Se realizaron mediciones de temperatura, flujo másico y la irradiación solar. Los materiales utilizados son dos piranómetros para obtener la radiación solar global y difusa, además de dos termómetros, los cuales miden la temperatura de entrada y salida del fluido, y un flujometro para fijar el flujo másico.

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

El fluido de trabajo utilizado fue agua, se registraron los datos durante cuatro días, los dos primeros con un flujo de 0.067 kg/s y los últimos con un flujo de 0.100 kg/s.

Modelo matemático
Para determinar el valor de la irradicacia se necesita el dato específico de la sensibilidad del piranómetro utilizado, además del cálculo con la siguiente ecuación:

$$I = \frac{V}{S} \left[\frac{W}{m^2}\right] \qquad \text{Ec. (1)}$$

Donde I es la irradicancia solar en W/m^2, V es el voltaje medido en milivoltios (mV) y S es la sensibilidad del piraómetro en mV/ (W/m^2).

Para este análisis se calculó la eficiencia térmica ($\eta_{termica}$), definido como la relación del calor útil (Q_u) y el calor absorbido (Q_a), se expresa de la siguiente forma:

$$\eta_{Termica} = \frac{Qu}{Qa} \qquad \text{Ec.(2)}$$

Para determinar el calor útil del sistema (Q_u), se realiza un balance de energía del fluido de trabajo, se representa de la siguiente manera:

$$Q_u = \dot{m} C_p (T_{salida} - T_{entrada}) \qquad \text{Ec.(3)}$$

Se determinó el flujo másico del agua ($\dot{m}$), realizando las conversiones correspondientes. En este caso, el caudal en litros por minuto (LPM) se consideró con valores de 4 LPM y 6 LPM.

- Calculo del volumen de agua

$$V = LPM \left(\frac{0.001}{60}\right) \left[\frac{m^3}{s}\right] \qquad \text{Ec.(4)}$$

- Fujo másico

$$\dot{m} = V * \rho \left[\frac{kg}{s}\right] \qquad \text{Ec.(5)}$$

Tomando en cuenta la tabla de las propiedades del agua [12] se desarrolló un promedio en las temperaturas de entrada y salida del sistema para la obtención de la capacidad calorífica del agua (Cp).
El calor absorbido del sistema (Q_a) es el producto de la irradiación solar directa (G_b) y el área del CCP (A_c):

$$Q_a = G_b \, . A_c \qquad \text{Ec.(6)}$$

DISCUSIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Las pruebas fueron realizadas el primer mes del año en curso, donde se consideraron dos flujos másicos, 0.100 kg/s y 0.067 kg/s, la irradiancia directa máxima fue de 597.10 W/m^2 y 768.78 W/m^2 para cada flujo, respectivamente. La diferencia de temperatura máxima alcanzada fue de 3.5 °C en el primer caso y de 2.2 °C en el segundo.

Los valores registrados durante la prueba se listan en la Tabla 2. El registro se realizó cada minuto, sin embargo, se promedian en periodos de 10 minutos y se determina la eficiencia térmica para cada periodo de tiempo del día correspondiente. El primer día la evaluación comenzó a las 10:37 am y el segundo día por presencia de nubosidad, comenzó a las 11:03 am.

Tabla 2. Promedio de eficiencia térmica para 0.067 kg/s día 1 y2

Hora	ηtermica	Hora	ηtermica
10:37	0.42	11:03	0.44
10:47	0.45	11:13	0.42
10:57	0.41	11:23	0.42
11:07	0.38	11:33	0.40
11:17	0.37	11:43	0.35
11:27	0.34	11:53	0.32
11:37	0.35	12:03	0.34
11:47	0.34	12:13	0.35
11:57	0.33	12:23	0.35
12:07	0.32	12:33	0.31
12:17	0.31	12:43	0.30
12:27	0.29	12:53	0.29
12:37	0.28	13:03	0.29

En la Figura 2 se presenta, el comportamiento de la eficiencia térmica, correspondientes a los días de prueba con mejores resultados, bajo un flujo másico de 0.067 kg/s. En el eje X se representa el tiempo local en minutos, abarcando un horario de 10:37 am a 13:03 pm, mientras en el eje Y, se indica la eficiencia térmica, con valores máximos de 0.45 y 0.44, durante la prueba.

Durante la experimentación, la irradiancia directa fluctuó entre 513.19 W/m^2 y 706.87 W/m^2 en el primer día, mientras que en el segundo día se registraron valores entre 705.36 W/m^2 a 866.80 W/m^2.

Se observa una tendencia decreciente en la eficiencia térmica con el paso del tiempo. Lo anterior debido a que los valores de irradiación disminuyen después del medio día solar y a la presencia de viento.

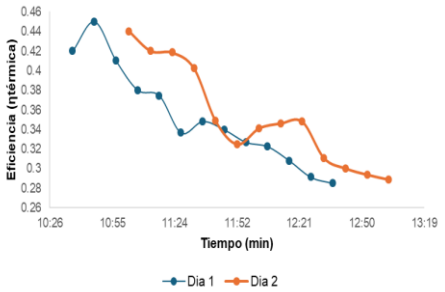


Figura 2. Comparativa de la eficiencia térmica con respecto al tiempo de los días 1 y 2.

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

La Tabla 3 presenta los datos promediados cada 10 minutos y la eficiencia térmica correspondiente, utilizando un flujo másico de 0.100 kg/s, para los siguientes dos días de evaluación experimental. Cabe mencionar que la evaluación del día 3 comenzó a las 10:43 am debido a la presencia de viento, mientras que la prueba 4 inicio a las 10:34 am.

Tabla 3. Promedio de eficiencia térmica para 0.100 kg/s día 3 y 4

Hora	ηtermica	Hora	ηtermica
10:43	0.53	10:34	0.39
10:53	0.46	10:44	0.47
11:03	0.42	10:54	0.49
11:13	0.44	11:04	0.46
11:23	0.39	11:14	0.46
11:33	0.41	11:24	0.44
11:43	0.40	11:34	0.44
11:53	0.39	11:44	0.38
12:03	0.38	12:04	0.39
12:13	0.38	12:14	0.39
12:23	0.35	12:24	0.36
12:33	0.34	12:34	0.33
12:43	0.35		

En la Figura 3 se muestra el comportamiento de la prueba experimental para el flujo de 0.100 kg/s. En este caso, la eficiencia térmica máxima alcanzada fue de 0.53 y la mínima es de 0.33, con un valor promedio de 0.40, correspondientes a los días 3 y 4. El eje X representa el tiempo en minutos, abarcando un horario de 10:34 am a 12:43 pm, mientras el eje Y, indica la eficiencia térmica del concentrador.

En cuanto a la irradiancia, durante el tercer día se registraron valores en un rango de 578.11 W/m^2 a752.89 W/m^2, mientras para el cuarto día, la irradiancia solar fluctuó entre 476.04 W/m^2 a 588.36 W/m^2. Se observa una tendencia general decreciente en la eficiencia térmica conforme avanza el tiempo, con un pico máximo alrededor de las 10:48 a.m. Posteriormente, la eficiencia experimenta una ligera estabilidad en ciertos periodos antes de continuar con su disminución hasta el final del intervalo analizado, lo anterior debido a la presencia de nubosidad y viento.

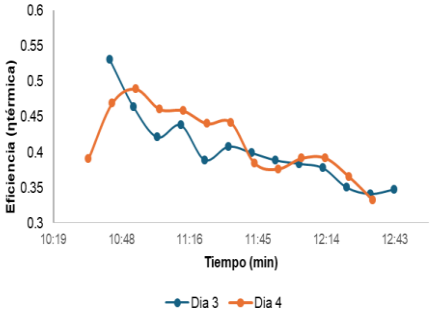


Figura 3. Comparativa de la eficiencia térmica con respecto al tiempo de los días 3 y 4.

CONCLUSIONES

En este estudio se evaluó la eficiencia térmica de un CCP bajo dos caudales másicos, permitiendo analizar el impacto de la irradiancia y las condiciones ambientales en su desempeño. A partir de los datos obtenidos se destacan las siguientes conclusiones:

- Al utilizar un flujo de 0.067 kg/s, la máxima eficiencia térmica alcanzada fue de 0.45 con valores de irradiancia de en un rango de 513.19 W/m^2 y 706.87 W/m^2.
- Al utilizar un flujo de 0.100 kg/s, la eficiencia máxima alcanzada fue de 0.53 con valores de irradiancia en un rango de 578.11 W/m^2 a752.89 W/m^2.
- La variabilidad de las condiciones ambientales durante la evaluación experimental influye significativamente en el rendimiento del sistema. Una tendencia decreciente en la eficiencia térmica está relacionada con la disminución de la irradiancia y la presencia de nubosidad y viento.

Con el objetivo de mejorar la eficiencia térmica, se continuara con la experimentación durante todo el año, de tal manera que se caracterice el dispositivo durante las épocas del año, esto tendrá un impacto positivo para realizar proyecciones en otras localidades.

AGRADECIMIENTOS

Las autoras, expresamos nuestro reconocimiento a la Universidad Autónoma Metropolitana, por las instalaciones para realizar los experimentos.
Un agradecimiento especial a Daniel Briseño Garduño por su valiosa colaboración en la realización en las pruebas experimentales, cuya ayuda fue fundamental para la obtención de los datos.

BIBLIOGRAFÍA

[1]Huerta Carrera, R. (2015) Cálculo de Concentrador Solar de Canal Parabólico para Calentamiento de Agua. [Tesis de maestría]. Centro de Investigación en Materiales Avanzados (CIMAV), Chihuahua, México.

[2]Alonso Abella. M. (s.f.). Sistemas fotovoltaicos. CIEMAT - Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas.

[3] Barone, G., Buonomano, A., Forzano, C., & Palombo, A. (2019). *Solar thermal collectors*. En F. Calise, M. D. D'Accadia, M. Santarelli, A. Lanzini, & D. Ferrero (Eds.), *Solar hydrogen production* (pp. 151–178). Academic Press. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814853-2.00006-0

[4] Veera Kumar, A., Arjunan, T., Seenivasan, D., Venkatramanan, R., & Vijayan, S. (2021). Thermal performance of an evacuated tube solar collector

with inserted baffles for air heating applications. *Solar Energy, 215*, 131–143. https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.12.037

[5] Jiang, C., Yu, L., Yang, S., Li, K., Wang, J., Lund, P. D., & Zhang, Y. (2020). A review of the compound parabolic concentrator (CPC) with a tubular absorber. *Energies,13*(3),695. https://doi.org/10.3390/en13030695

[6]Carrión-Chamba, W., Murillo-Torres, W., & Montero-Izquierdo, A. (2022). Una revisión de los últimos avances de los colectores solares térmicos aplicados en la industria. Ingeniería Mecánica, Universidad Politécnica Salesiana. Recuperado de SciELO

[7]Chamorro Páez, A. L., Arellano Mancheno, V. P., Ordoñez Viñán, M. A., Orozco Cantos, L. S., Viteri Núñez, E. F., & Jácome Domínguez, E. A. (2017). Rev. Pol. Conocimiento, Volumen 2, No. 7, p. 958-979.

[8]Polo Bravo, C., & Sacari Sacari, E. J. (s.f.). Evaluación experimental de un concentrador solar cilíndrico parabólico (CCP). En Centro de Energías Renovables de Tacna (CERT), Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann de Tacna.

[9]Carbajal Cano, J. K. (2018). Construcción e implementación de un concentrador solar cilíndrico parabólico para el pre-calentamiento de agua requerida por el intercambiador de calor a contraflujo del Laboratorio de Termo-Fluidos de la Universidad Nacional del Santa. [Tesis de licenciatura inédita]. Universidad Nacional del Santa, Facultad de Ingeniería, Perú.

[10]Guanoluisa Tenorio, S. R. (2015). Estudio de la geometría del absorbedor del colector solar parabólico compuesto y su incidencia en la eficiencia para calentamiento de agua de uso sanitario. [Tesis de licenciatura inédita]. Universidad Técnica de Ambato, Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica, Ecuador.

[11] Galindo Luna, Y. R., Luna Jaime, J. J., & Ramos Sierra, J. (2024). Comparación de la eficiencia térmica de un concentrador cilindro parabólico con distintas mezclas. Contactos, Revista De Educación En Ciencias E Ingeniería, (138), 15 - 21.

[12]Cengel, Y. A. (2007). Termodinámica. McGraw-Hill Interamericana.

AUTORIZACIÓN Y RENUNCIA.

Los autores del presente artículo autorizan al TecNM/Instituto Tecnológico de Zacatepec para publicar el escrito en el libro electrónico del CITID 2025. El TecNM/ITZ o los editores no son responsables ni por el contenido ni por las implicaciones de lo que está expresado en el escrito.

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

EFECTO DEL CuO INCORPORADO AL POLÍMERO SEMICONDUCTOR P3HT MEDIANTE EL MÉTODO OXIDATIVO

Atalia Gómez-Cortez[1], María Elena Nicho-Díaz[2], Alejandro Baray-Calderón[3], Marcos Fuentes-Pérez[4], Diego Hernández-Martínez[5].

[1]Doctorado en Ingeniería y Ciencias Aplicadas. Universidad Autónoma del Estado de Morelos, Centro de Investigación en Ingeniería y Ciencias Aplicadas. Laboratorio de Síntesis de Polímeros, gomezatalia@gmail.com, 7771268006, Av. Universidad 1001, Col. Chamilpa, Cuernavaca Morelos, México 62209. *https://orcid.org/0000-0002-7955-7383*
[2]Doctorado en Ciencias Químicas. Universidad Autónoma del Estado de Morelos, Centro de Investigación en Ingeniería y Ciencias Aplicadas. Laboratorio de Síntesis de Polímeros, menicho@uaem.mx, 7771621713, Av. Universidad 1001, Col. Chamilpa, Cuernavaca Morelos, México 62209. *https://orcid.org/0000-0002-0835-0078*
[3]Doctor en Ingeniería en Energía. Universidad Autónoma del Estado de Morelos, Centro de Investigación en Ingeniería y Ciencias Aplicadas. Laboratorio de Síntesis de Polímeros, abaray@ier.unam.mx, 4421316431, Av. Universidad 1001, Col. Chamilpa, Cuernavaca Morelos, México 62209. *https://orcid.org/0000-0002-9867-5238*
[4]Doctorado en Ingeniería y Ciencias Aplicadas. Universidad Autónoma del Estado de Morelos, Centro de Investigación en Ingenierías y Ciencias Aplicadas. Laboratorio de Síntesis de Polímeros, marcos.fuentesper@uaem.edu.mx, 7351782499, Av. Universidad 1001, Col. Chamilpa, Cuernavaca Morelos, México 62209. *https://orcid.org/0000-0002-7749-9685*
[5]Doctorado en Ingeniería y Ciencias Aplicadas. Universidad de Sonora, Departamento de Investigación en Polímeros y Materiales. diego.hernandez@unison.mx, 7772100708, Blvd. Luis Encinas y Rosales s/n, Colonia Centro, Hermosillo Sonora, México 83000. *https://orcid.org/*0000-0002-5734-8097

Resumen – Se realizó la síntesis del P3HT y compositos de P3HT:CuO por el método de polimerización oxidativa del monómero 3-hexiltiofeno en presencia de diferentes concentraciones de CuO (Relación de peso 3HT/CuO: 1/0, 1/0.03 1/0.05 y 1/0.08). Los compositos se caracterizaron mediante difracción de rayos X (DRX), espectroscopia infraroja (FTIR), espectroscopia UV-Vis, microscopia electrónica de barrido (SEM) y voltametría cíclica. Se observó un mejor ordenamiento de las cadenas del polímero al incorporar el CuO. Se determinó la incorporación del óxido metálico al P3HT y una interacción entre los átomos de azufre del P3HT con el CuO además se observó que a mayor concentración de CuO se presentaba una mayor interacción. Los compositos mostraron propiedades adecuadas para su aplicación en dispositivos optoelectrónicos.

Palabras Clave: Compositos, dispositivos electrocrómicos, síntesis oxidativa.

Abstract – The synthesis of P3HT and P3HT:CuO composites was carried out by the oxidative polymerization method of the 3-hexylthiophene monomer in the presence of different concentrations of CuO (weight ratio 3HT/CuO: 1/0, 1/0.03, 1/0.05 and 1/0.08). The composites were characterized by X-ray diffraction (XRD), infrared spectroscopy (FTIR), UV-Vis spectroscopy, scanning electron microscopy (SEM) and cyclic voltammetry. A better ordering of the polymer chains was observed when CuO was incorporated. The incorporation of the metallic oxide into P3HT and an interaction between the sulfur atoms of P3HT and CuO were determined. It was also observed that a higher CuO concentration resulted in a greater interaction. The composites showed suitable properties for their application in optoelectronic devices.

Key words: Composites, electrochromic devices, Oxidative synthesis

INTRODUCCIÓN

Los polímeros conductores han atraído la atención en los últimos años debido al desarrollo en aplicaciones fotovoltaicas [1,2], sensores [3-5], y principalmente en dispositivos electrocrómicos, ya que tienen la capacidad de presentar diferentes tonalidades de color cuando son sometidos a reacciones redox [6-8]. Sin embargo, estos materiales orgánicos carecen de buena estabilidad, contraste óptico relativamente bajo, velocidad de conmutación lenta y el rendimiento del ciclado es deficiente limitando sus aplicaciones como polímeros electrocrómicos [9]. Existen diferentes formas para contrarrestar estos inconvenientes que presentan los polímeros conductores, una de ellas y la más común es crear nanocompuestos electrocrómicos basados en polímeros conductores mediante la incorporación de nanopartículas, nanotubos, nanobarras, nanoesferas, nanoláminas etc [10-14]. Se ha comprobado que la incorporación de nanopartículas tales como el TiO_2 [15], Cu_2O [16], CdS [17], V_2O_5 [11], CuO [18,19], etc., en polímeros conductores pueden mejorar el contraste de coloración, presentar una mejor estabilidad y un tiempo de conmutación más rápido en los dispositivos electrocrómicos [20,21].

Por otro lado, el óxido de cobre (CuO), se encuentra de forma natural como un mineral (tenorita) y presenta una estructura monoclínica [22]. El CuO es un excelente candidato para crear materiales compuestos ya que es de bajo costo, es abundante y además presenta excelentes

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

propiedades físicas y químicas [23], es un material tipo p y sus valores de brecha de banda (Eg) están en el rango de 1.2 a 2.16 eV [24,25], haciéndolo un buen candidato para aplicaciones ópticas, cabe mencionar, que estos valores de brecha de banda dependerán de diferentes factores como: el tratamiento de recocido, las dimensiones del grano, dopaje [26, 27], y morfología, ya que se han obtenido morfologías en forma de nanoagujas, nanoalambres, nanohojas, nanovarillas, nanocintas, nanotubos, nanowhiskers y nanopartículas [26].

Trabelsi y colaboradores [19], crearon una película polimérica nanocompuesta de PMMA/PVDF a diferentes concentraciones de nanopartículas de CuO, mediante el método de colada, en donde observaron que la adición de CuO en PMMA/PVDF mejora la cristalinidad y conduce a una disminución de la banda de energía, además, se presenta un aumento en la constante dieléctrica y la conductividad eléctrica. Se mejoran los valores de la conductividad en los compositos en comparación con aquellos sin la incorporación de CuO. Athisayaraj y Vedhi [18] realizaron un composito de PANI:CuO mediante la técnica de baño químico, observaron la interacción entre la PANI y CuO mediante enlaces de hidrógeno, este composito mostró ser un buen semiconductor fotoeléctrico.

En este trabajo, las nanopartículas de CuO se sintetizaron mediante la técnica deposito químico en medio acuoso, las cuales se incorporaron a la matriz de un polímero conductor poli(3-hexiltiofeno) (P3HT). El P3HT presenta excelentes propiedades optoelectrónicas, eléctricas y estabilidad ambiental [28-30]. Al combinar estos dos materiales se pretende obtener propiedades mejoradas para poderse aplicar en dispositivos electrocrómicos con mejores propiedades ópticas, cambios de conmutación más rápidos y estables.

DESARROLLO

Metodología

"Síntesis del CuO"

El CuO fue sintetizado por la técnica de baño químico [31], se utilizó como agente de iones de Cu^{2+}, 0.1 M de cloruro de cobre ($CuCl_2$), 5 M de hidróxido de amonio (NH_4OH) que proporciona la especie de OH^-, y 0.1 M de hexametilentetramina (HMTA) como fuente de agente complejante. La mezcla se dejó en agitación constante durante 2 h a 65 °C. Las partículas obtenidas fueron lavadas tres veces con alcohol isopropílico en una centrifuga a 3500 rpm y se sometieron a tratamiento térmico de 400 °C.

"Síntesis del P3HT"

El P3HT se obtuvo mediante la oxidación del monómero destilado 3-hexiltiofeno (3HT) usando como oxidante el $FeCl_3$, la reacción se llevó a cabo en una atmósfera de N_2, en agitación constante durante 24 h a 0°C [32]. El producto obtenido se precipitó en metanol. Para su purificación se realizaron lavados con diferentes solventes orgánicos (metanol, ácido clorhidrico al 10 %, acetona, hidróxido de amonio al 10%, acido etilendiaminotetraacético (EDTA) al 1 % y agua destilada, usando un mezclador Vortex. El P3HT se secó en un horno eléctrico durante 24 h a 55 °C.

Se eliminó la parte insoluble mediante extracción Soxhlet usando cloroformo como solvente.

"Síntesis de compositos de P3HT:CuO"

La polimerización del monómero 3HT se llevó a cabo mediante la oxidación química del monómero (empleando $FeCl_3$ como oxidante) en presencia de las nanopartículas de CuO. Se varió la concentración del CuO (0.03, 0.05 y 0.08 %). El procedimiento fue el utilizado para el P3HT.

DISCUSIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

El análisis de difracción de rayos X para el CuO en forma de polvo se muestra en la Figura 1. El CuO presenta picos de difracción correspondientes a los índices de Miller 110, -111, 111, -112, -202, 112, 020, 202, -113, -311 y 220 con número de tarjeta: 01-089-5897 con sistema cristalino monoclínico. Se obtuvieron picos muy intensos lo cual nos indica que el CuO sintetizado presenta buena cristalinidad.

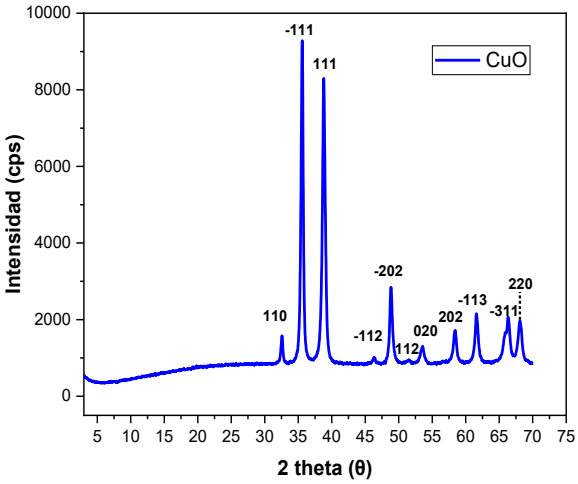


Figura 1. Difractograma del CuO con sistema cristalino monoclínico.

La Figura 2, presenta el difractograma de las muestras de película delgada del P3HT con sistema cristalino ortorrómbico, con picos de difracción en 2 theta a 5.3°, 10.6°, 16° y 22.8°, pertenecientes a los índices de Miller: 100, 200, 300 y 002 (número de tarjeta: 00-054-2080).

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

Se obtuvo la presencia del pico a 5.3 ° (100) que corresponde a la constante de red *a*, que sugieren la orientación de las cadenas conjugadas π paralelas al sustrato, mientras que las cadenas alquílicas están perpendiculares al sustrato a lo largo del eje a [33].

El pico 002 que se encuentra a 22.8°, está asociado con la distancia de apilamiento π-π en el plano [34], según Prosa et al. [35] esta distancia es muy cercana a la distancia entre los anillos de tiofeno.

Por otro lado, se observó un aumento en la intensidad en el pico 5.3° (100) al incorporar CuO al P3HT. El composito cuando se incorporó CuO (0.03%) en P3HT mostró la mayor intensidad, la cual decrece un poco al incrementar la concentración de CuO en P3HT, sin embargo, la intensidad aún es mayor en comparación con el P3HT.

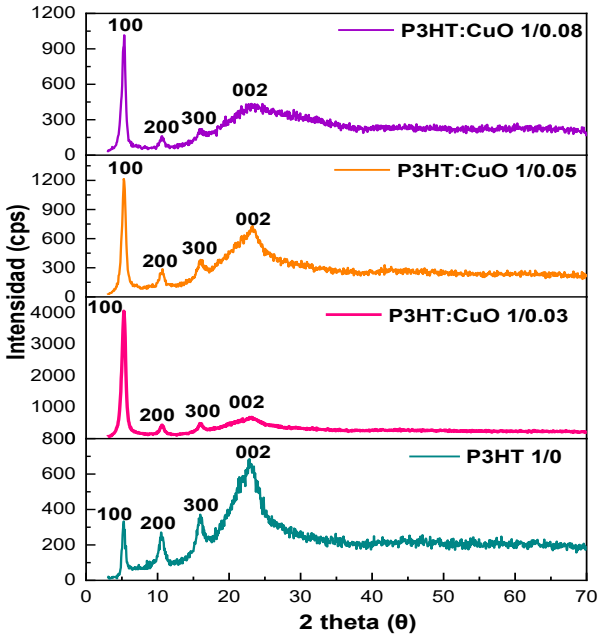


Figura 2. Difractograma del P3HT y P3HT:CuO con sistema cristalino ortorrómbico.

En la muestra del P3HT puro (P3HT 1/0), el pico (002) se encuentra en un ángulo ~22.8°. A medida que aumenta el contenido de CuO el pico se desplaza hacia ángulos mayores ~23.4° para el P3HT:CuO 1/0.08% (Figura 3). De acuerdo con Prosa et al. [36], una concentración de dopantes en el P3HT puede causar un aumento de 0.2° a ángulos más altos (desplazamiento a la derecha), lo que implica una disminución del 1% en la constante de red. En base a esto, el desplazamiento que observamos podría sugerirnos una reducción en la distancia de apilamiento π-π, lo que nos indica que las nanopartículas del CuO comprimen las cadenas del polímero, provocando fuertes interacciones entre los átomos de azufre de las principales cadenas del P3HT con el CuO.

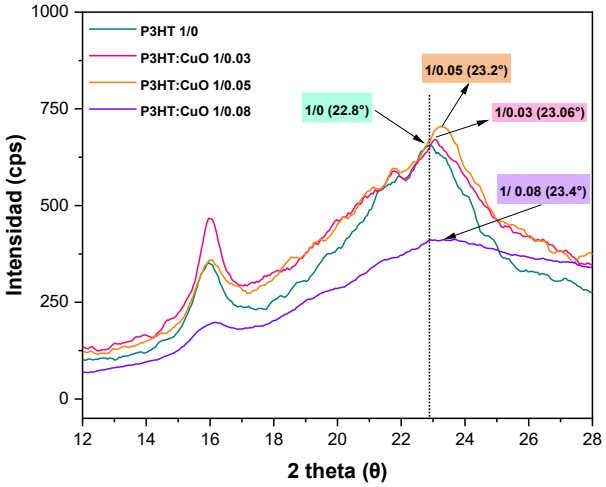


Figura 3. Difractograma del desplazamiento del pico 22.8° del P3HT a ángulos mayores cuando se incorpora CuO en P3HT.

El espectro infrarrojo del CuO mostrado en la figura 4 presenta los principales grupos funcionales y sus frecuencias vibracionales en un rango de 400 a 600 cm^{-1} perteneciente a las vibraciones del CuO monoclínico. Se obtiene la presencia de dos señales a 487 y 609 cm^{-1} atribuidos a las vibraciones de los enlaces Cu(II)-O [37], y una señal a 406 cm^{-1} correspondiente a la vibración del Cu-O [38].

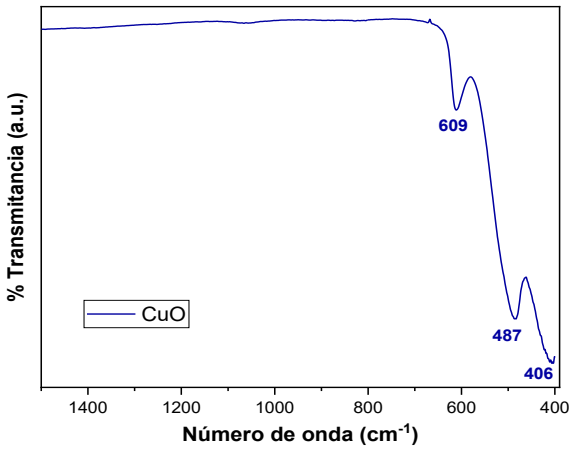


Figura 4. Espectro IR del CuO.

El espectro infrarrojo del P3HT y compositos se muestra en la figura 5. El P3HT y compositos presentan varias bandas principales correspondientes a los grupos funcionales del P3HT [39]. Se presentan picos en 1507 y 1455 cm^{-1} que se asocian a las vibraciones de estiramiento asimétrica y simétrica del enlace C=C del anillo de tiofeno. La banda 1373 cm^{-1} está asociado con la deformación de C-H, la banda a 1114 cm^{-1} asociada al estiramiento C-S del tiofeno, la banda 817 cm^{-1} corresponde al anillo de tiofeno trisustituido, lo que confirmó la polimerización exitosa del monómero 3HT [40]. Así mismo, la banda a 723 cm^{-1} corresponde a la

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

vibración oscilante de los grupos metileno sustituyentes hexilo -$(CH_2)_5$-). En el espectro del P3HT puro (1/0), se presentan tres bandas (1737, 1240 y 1021 cm^{-1}) correspondientes a los solventes usados en la purificación [41]. La banda a 1735 cm^{-1} está relacionada con el alargamiento de los enlaces de C=O.

Al incorporar el CuO en el P3HT observamos ligeros desplazamientos de picos, ensanchamiento o cambio en la intensidad de las señales, estos cambios nos sugieren interacciones físicas entre el P3HT y CuO. Cuando se incorpora el CuO en P3HT las bandas debidas a los solventes usados durante la purificación de los polímeros (1737, 1240 y 1021 cm^{-1}) desaparecen en los compositos P3HT:CuO, esto podría asociarse a la interacción del CuO con la cadena polimérica antes de llevar a cabo los lavados.

Para los compositos de P3HT:CuO (0.03, 0.05 y 0.08%), se observa que la banda 1114 cm^{-1} del estiramiento de C-S del anillo de tiofeno se desplaza a número de onda más alto y que la banda 1092 cm^{-1} aumentó en intensidad cuando se incorporó CuO, lo anterior indica una interacción entre los átomos de azufre del anillo de tiofeno con el CuO. A una mayor concentración se presenta una mayor interacción. Esto nos indica que el CuO afecta el empaquetamiento molecular del polímero comprimiendo las cadenas del polímero provocando una mayor interacción entre los átomos azufre y el CuO. Un empaquetamiento más comprimido puede mejorar la movilidad del portador.

Se confirmo la presencia del CuO en P3HT mediante la señal de banda a 613 cm^{-1}.

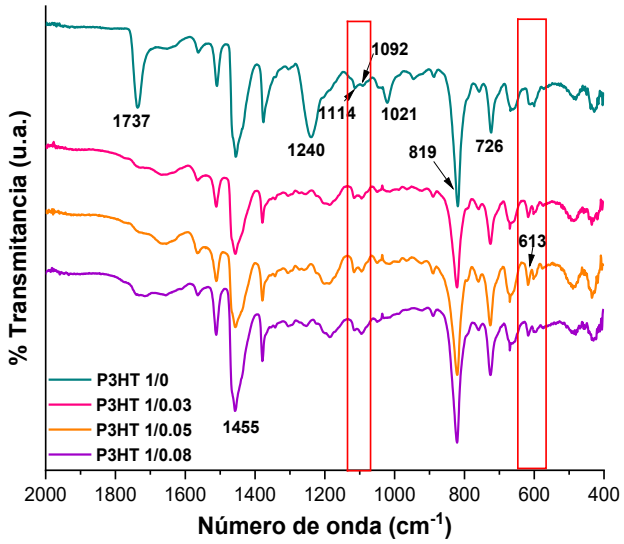


Figura 5. Espectro IR del P3HT y compositos de P3HT:CuO.

Los estudios de absorción UV-Vis de las películas delgadas (Figura 6), se realizaron en un espectrofotómetro Genesys 10 UV Scanning en un rango de 300 a 1100 nm de longitud de onda. Todas las curvas fueron normalizadas con respecto al espesor (absorbancia/espesor) de las películas. El P3HT muestra un pico de absorción a 507 nm correspondiente a la transición π-π*.

Al agregar CuO dentro del P3HT:CuO 1/0.03% se presenta un ligero incremento en la absorbancia, sin embargo, disminuye a medida que aumenta la concentración de las nanopartículas de CuO (0.05 y 0.08 %) en la matriz del polímero. Este decremento podría deberse a un menor contenido de cadenas poliméricas en el P3HT respecto a una concentración mayor de 0.05% de CuO.

Por otro lado, los compositos de P3HT:CuO presentaron un ligero desplazamiento hacia el azul. El CuO provoca un desplazamiento hacia longitudes menores debido a que presenta una fuerte absorción en esa región. La distribución del CuO en P3HT puede conducir a cambios en la cristalinidad, y en consecuencia a un cambio en la estructura de la banda y el porcentaje de la absorción [42].

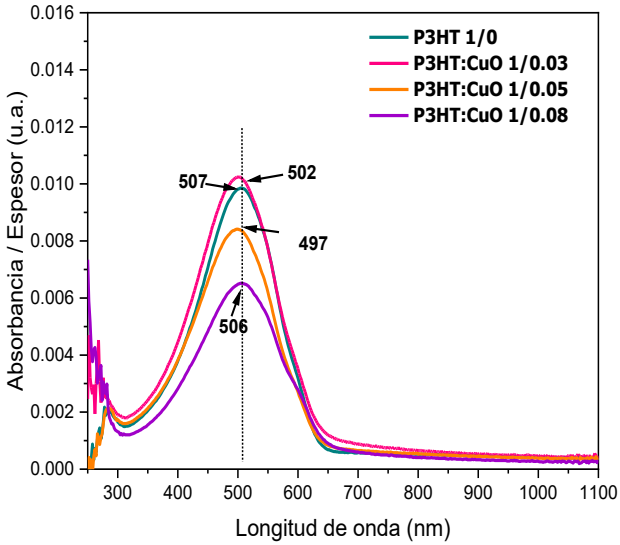


Figura 6. Espectro de absorbancia del P3HT y compositos de P3HT:CuO.

Se calculó el bandgap mediante la ecuación de Tauc Plot [43], los resultados se presentan en la Tabla 1.

$$\alpha = \frac{1}{d}\left(\frac{100}{T}\right) \qquad \text{Ec (1)}$$

El P3HT presenta una brecha de banda de 1.97 eV, para el caso de los compositos al insertar el CuO en la matriz del polímero se presenta una disminución de la brecha de energía, esto indica que una pequeña porción de nanopartículas de CuO puede provocar una alteración en el ordenamiento de las cadenas del P3HT disminuyendo

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

la energía necesaria para saltar a un nivel de energía más alto.

Tabla 1. Brecha de banda para el P3HT y compositos.

Muestra	Brecha de banda (eV)
P3HT 1/0	1.97
P3HT:CuO 1/0.03	1.94
P3HT:CuO 1/0.05	1.95
P3HT:CuO 1/0.08	1.93

Se realizó análisis SEM y elemental para observar la morfología y la incorporación del cobre con el anillo de azufre de tiofeno. En la figura 7, podemos observar que el CuO presenta una morfología en forma de pequeñas flores apiladas.

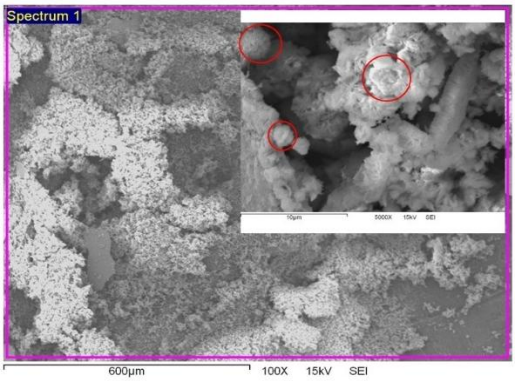


Figura 7. Morfología del CuO en forma de pequeñas flores.

El P3HT presenta una estructura homogénea y uniforme; esta misma estructura la presentan los compositos de P3HT:CuO (figura 8). Sin embargo, podemos observar pequeñas partículas que se encuentran depositadas sobre la superficie del polímero, a medida que incrementa la concentración de CuO se observan más pronunciadas estás partículas. Se realizó un análisis EDS para determinar la composición química que presentan nuestros materiales (Tabla 2).

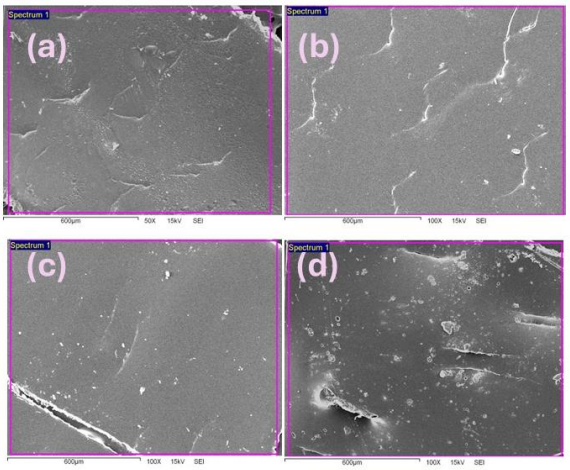


Figura 8. Morfología del P3HT y composito de P3HT:CuO obtenidas mediante el método in-situ sometidos a extracción Soxhlet (obtenidas en forma de película polimérica).

Los resultados de la Tabla 2, confirman la incorporación de CuO en P3HT. El composito de P3HT:CuO 0.08% presenta una mayor incorporación de cobre en el anillo de tiofeno, por lo cual la relación entre el azufre y el cobre es menor. Para el caso del P3HT:CuO 0.05% suponemos que se obtuvo una mayor pérdida del CuO al extraer la parte insoluble (extracción Soxhlet).

Tabla 2. Análisis microcomposicional.

Muestra	S % atómico	Cu % atómico	S/Cu Razón atómica
CuO	-	21.15	
P3HT 1/0	2.57	-	
P3HT:CuO 1/0.03	3.48	0.01	348
P3HT:CuO 1/0.05	3.76	0.01	376
P3HT:CuO 1/0.08	3.28	0.01	328

La caracterización electroquímica (voltametría cíclica) se realizó mediante una celda electroquímica conectada a tres electrodos (electrodo de trabajo: ITO con película de P3HT o P3HT:CuO, electrodo de referencia: $Ag/AgNO_3$ y contraelectrodo: Malla de platino), en un medio no acuso 0.1 M de $LiClO_4$ en acetonitrilo. Las pruebas se midieron a una velocidad de barrido de 20 mV/s durante 5 ciclos en un potensiotato Epsilon.

La figura 9 corresponde al segundo ciclo del voltamograma cíclico. Podemos observar que aumenta la densidad de corriente con incorporando el CuO en P3HT, siendo proporcional a la concentración de CuO (mayor concentración de CuO en P3HT, mayor será el almacenamiento de carga).

El P3HT presenta un pico de oxidación a 603.83 mV y su correspondiente pico de reducción a 508.20 mV. Para el composito de 0.03% de CuO se observa un incremento en el almacenamiento de carga más notable, además este composito presenta un corrimiento del pico de oxidación hacia voltajes menores a 592.74 mV. Caso contrario sucedió con los compositos de 0.05 y 0.08%, estos presentaron un desplazamiento del pico de oxidación a voltajes más altos siendo de 610.39 mV para el primero y 696.99 mV para el segundo.

Los compositos de 0.03 y 0.05% de CuO, presentan un pequeño pico de oxidación alrededor de los 200 mV, mientras el composito a 0.08% de CuO no lo presenta, lo cual nos sugiere un mayor desorden generado por una mayor concentración de CuO en la interfaz del polímero, provocando una desestabilización en los estados bipolaronicos.

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

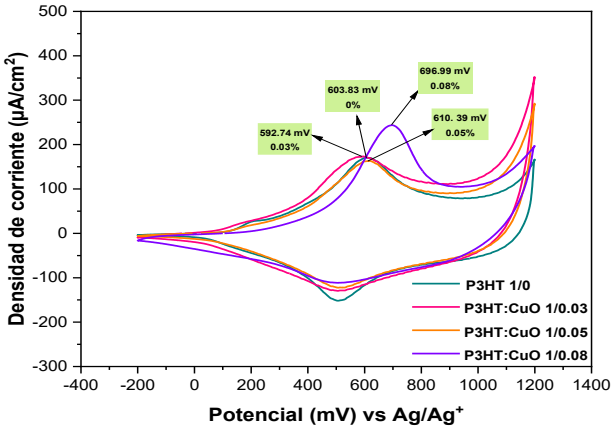


Figura 9. Voltametría cíclica del P3HT y P3HT:CuO a 20 mV/s en medio no acuoso.

Se ensamblaron dispositivos electrocrómicos simples, los cuales tienen una estructura tipo sándwich y constan de la configuración ITO / P3HT o P3HT:CuO / polielectrolito / ITO, los cuales se midió la transmitancia a voltaje positivo (+1.4 V) y negativo (-1.4 V) figura 10. Las muestras se caracterizaron en un espectrofotómetro UV-Vis (Thermo Electron Corporation Genesys 10 UV) y una fuente de poder conectada a los dispositivos electrocrómicos y al espectrofotómetro. Los espectros se obtuvieron a una longitud de onda de 300 – 1100 nm, donde el polo positivo se conectó al P3HT y P3HT:CuO, mientras el polo negativo se conectó al ITO.

Cuando se le aplica un voltaje negativo a los dispositivos electrocrómicos (P3HT o P3HT:CuO) la transmitancia disminuye provocando que la película se coloré (reduce), por el otro caso cuando se aplica un voltaje positivo la transmitancia aumenta provocando que la película se blanque (oxide). La transmitancia para los compositos de P3HT:CuO aumenta en la región visible (tabla 3).

El P3HT tiene un ΔT=21.63% a 514 nm, mientras que el composito P3HT:CuO presenta ΔT= 25.98 a 510 nm, a una mayor incorporación del CuO a 0.05% se obtiene un contraste óptico ΔT= 26.04% a 506 nm, para la concentración de 0.08% de CuO en P3HT se presenta un ΔT= 19.07% a 512 nm. Los compositos de 0.03 y 0.05% de CuO en P3HT presentan un mayor contraste óptico en la región visible, además también se observa un corrimiento hacia longitudes de onda menores, este mismo comportamiento lo observamos en los resultados de absorbancia (figura 6). Sin embargo, a una concentración de 0.08% de CuO en P3HT se obtiene una disminución del polímero.

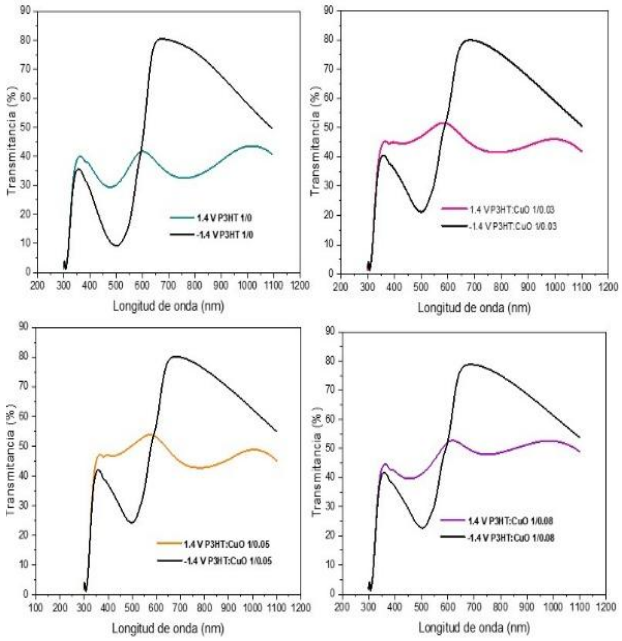


Figura 10. Espectros de transmitancia para el P3HT y P3HT:CuO.

La figura 11, presenta los resultados de cinética óptica del dispositivo electrocrómico del P3HT y P3HT:CuO. Para los dispositivos de 0.03 y 0.05% presentan una transmitancia similar o igual al P3HT, mientras el dispositivo (0.08%) tiene una transmitancia menor.

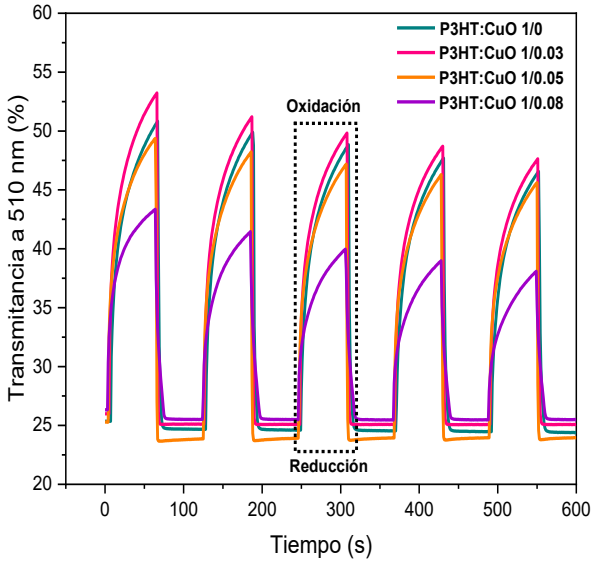


Figura 11. Espectros de cinética óptica.

El tiempo que tardan en llevarse a cabo los procesos de oxidación y reducción, o bien en producirse los estados blanqueado/coloreado es un factor importante, por ello se calculó el tiempo de conmutación mediante un ajuste numérico en el tercer ciclo (mejor estabilidad, línea punteada) con una modulación óptica a 510 nm (longitud donde se obtuvo el máximo contraste óptico en

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

transmitancia), mediante un potencial cuadrado de ±1.4 V durante 60 s cada ciclo, durante 5 ciclos.

Se calculó el tiempo de oxidación mediante la siguiente ecuación [44]:

$$T = T0 + A1 * (1 - \exp(-t/\tau 1)) + A2 * (1 - \exp(-t/\tau 2)) \quad \text{Ec(3)}$$

De acuerdo con la ecuación anterior, mientras los tiempos de τ_1 y τ_2 sean menores, menor será el tiempo en que ocurran los procesos de oxidación y reducción en nuestros dispositivos. Los procesos de reducción en todos los dispositivos se dan de forma casi inmediata, sin embargo, el P3HT y el dispositivo del P3HT:CuO 0.08% son los que presentan menor tiempo para llevar a cabo los procesos redox, por el contrario los dispositivos de P3HT:CuO (0.03 y 0.05%) la oxidación y reducción se da de manera más lenta que el P3HT. A una mayor concentración de 0.08% de CuO en P3HT podría incrementar el área de contacto disminuyendo el tiempo de conmutación (Tabla 3).

Tabla 3. Tiempos de conmutación.

Dispositivo	τ_1	$\tau 2$
P3HT 1/0	2.27 ± 0.07	35.20 ± 0.67
P3HT:CuO 0.03%	4.07 ± 0.12	37.84 ± 0.75
P3HT:CuO 0.05%	5.43 ± 0.18	48.64 ± 0.75
P3HT:CuO 0.08%	1.09 ± 0.06	27.97 ± 0.72

CONCLUSIONES

Se determinó que el CuO interacciona con el átomo de azufre del anillo de tiofeno, mejora la cristalinidad, reduce el band gap e incrementa el almacenamiento de carga del P3HT. Lo anterior podría mejorar el transporte de cargas a lo largo de la cadena polimérica y beneficiar por tanto el contraste óptico en los dispositivos electrocrómicos.

Esto determina que los compositos de P3HT:CuO es excelente material que podría aplicarse no solamente en ventanas inteligentes, sino también en dispositivos optoelectrónicos como: celdas solares, sensores, transistores, baterías, supercapacitores, etc.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a la Dra. Hailin Hu del IER-UNAM por las facilidades proporcionadas para realizar las mediciones de los dispositivos electrocrómicos.

BIBLIOGRAFÍA

[1] Hou W., Xiao Y., Han G., y Lin J.Y., (2019). The Applications of Polymers in Solar Cells: A Review, polymers vol.

[2] Murad R., Iraqi A., Aziz S.B., Abdullah S.N. y Mohamad A., (2020). Conducting Polymers for Optoelectronic Devices and Organic Solar Cells. A Review, Polymers 12,2627.

[3] Ren Z., Yang J., Qi D., Sonar P., Liu L., Lou Z., Shen G.,y Wei Z., (2021). Flexible sensor based on organic-ionrganic hybrid materials. Adv Materials Technologies 6, 2000889.

[4] Bescher E., y Mackenzie J. D., (1998). Hybrid organic-inorganic sensor. Materials Science and Engieering. C 6, 145-154.

[5] Shurong Wang ∗, Yanfei Kang, Liwei Wang, Hongxin Zhang, Yanshuang Wang, Yao Wang. (2013). Organic/inorganic hybrid sensors; A review. Sensor and Actuators B: Chemical 182, 467-481.

[6] Salaneck W. R., (1991). Photoelectron spectrocopy of polyconjugated polymer surfaces and interfaces. Rep. Prog, Phys. 54, 1215-1249.

[7] Granqvist, C., G., (2005). Electrochromic devices. Journal of the European Ceramic Society. 25, 2907-2912.

[8] Hyodo K., (1994). Electrochromism of conducting polymers. Electrochimica Acta 39, 265-272.

[9] Wenzhi Zhang, Xianghong Chen, Ge Zhang, Sumin Wang, Shengbo Zhu, Xinming Wu, Yan Wang, Qiguan Wang, Chenglong Hu., (2019). Conducting polymer/silver nanowires stacking composite films for high-performance electrochromic devices. Solar Energy Materials and Solar Cells, 200, 109919.

[10] Gomez-Cortez A., Hernández-Martínez D., Baray-Calderón A., Altuzar-Coello P., Resendiz-González M.C., y Nicho M., E., (2023). Synthesis and characterization of novel P3HT-CuO composites for their application in electrochromic devices. *Synthetic Metals* 300, 117487.

[11] Zhongqiu Tong, Na Li b, Haiming Lv, Yanlong Tian, Huiying Qu, Xiang Zhang, Jiupeng Zhao, Yao Li, (2016). Annealing synthesis of coralline V2O5 nanorod architecture for multicolor energy-efficient electrochromic device. *Solar Energy Materials and Solar Cells* 146, 135–143

[12] Guofa Cai, Jiangping Tu, Ding Zhou, Jiaheng Zhang, Qinqin Xiong, Xuyang Zhao, Xiuli Wang, and Changdong Gu (2013). Multicolor Electrochromic Film Based on TiO_2 @Polyaniline Core/Shell Nanorod Array. *J. Phys. Chem. C* 117, 15967–15975

[13] Pengtao Jia, Avni A. Argun, Jianwei Xu, Shanxin Xiong, Jan Ma, Paula T. Hammond, and Xuehong Lu, (2010). High-Contrast Electrochromic Thin Films via Layer-by-Layer Assembly of Starlike and Sulfonated Polyaniline. *Chem. Mater.* 22, 6085–6091

[14] Q. Zhang, C. Y. Tsai, T. Abidin, J. C. Jiang, W. R. Shie, L. J. Lib and D. J. Liaw, (2016). Enhancement of the crosslink density, glass transition temperature, and strength of epoxy resin by using functionalized graphene oxide co-curing agents. *Polym. Chem.* 7, 36–43

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

[15] Lu, M.-D. y Yang, S.-M. (2009). Synthesis of poly(3-hexiltiophene) grafted TiO2 nanotube composite. *Journal of Colloid and Interface Science* 333, 128–134

[16] Hussien, A., Gawish, S., Mosleh, S., Ramadan, A. and Sayed, G., (2019). Antimicrobial Polypropylene Loaded by Cubic Cuprous Oxide Micro Particles. *Egypt. J. Chem.* 62, 1445–1453

[17] Agrawal, V., Jain, K., Arora, L. and Chand, S., (2013). Synthesis of CdS nanocrystals in poly(3-hexylthiophene) polymer matrix: optical and structural studies. J Nanopart Res 15, 1697

[18] Athisayaraj, E. P. P. and Vedhi, C., (2019). Composites of copper oxide and polyaniline for solar cell applications.

[19] Amira Ben Gouider Trabelsi, Ayman M. Mostafa, Fatemah H. Alkallas, W. B. Elsharkawy, Ameenah N. Al-Ahmadi, Hoda A. Ahmed, Sherif S. Nafee, Rami Adel Pashameah and Eman A. Mwafy. (2023). Effect of CuO Nanoparticles on the Optical, Structural, and Electrical Properties in the PMMA/PVDF Nanocomposite. *Micromachines* 14, 1195

[20] Singh, P. and Shukla, S. K. (2020). Advances in polyaniline-based nanocomposites. *J Mater Sci* 55, 1331–1365.

[21] Suchita Kandpal, Tanushree Ghosh, Chanchal Rani, Manushree Tanwar, Meenu Sharma, Sonam Rani, Devesh K. Pathak, Ravi Bhatia, I. Sameera, Jesumony Jayabalan, and Rajesh Kumar, (2022). Bifunctional Application of Viologen-MoS_2 -CNT/Polythiophene Device as Electrochromic Diode and Half-Wave Rectifier. *ACS Mater. Au* 2, 293–300

[22] Asbrink, S. and Norrby, L. J., (1970). A refinement of the cristal structure of copper (II) oxide with a discusión of some exceptional e.s.d.´s. Acta Crystalogr B Struct Crystallogr Cryst Chem 26, 8-15.

[23] Hojat Veisi, Bikash Karmakar, Taiebeh Tamoradi, Saba Hemmati, Malak Hekmati and Mona Hamelian. (2021). Biosynthesis of CuO nanoparticles using aqueous extract of herbal tea (Stachys Lavandulifolia) flowers and evaluation of its catalytic activity. *Sci Rep* 11, 1983

[24] Serin, N., Serin, T., Horzum, Ş., and Çelik, Y., (2005). Annealing effects on the properties of copper oxide thin films prepared by chemical deposition. *Semicond. Sci. Technol.* 20, 398–401.

[25] Pauldurai, J., Perumal, A. M., Jeyaraja, D. and Amal, P. V. R., (2021). Facile Synthesis of Spherical Flake-shaped CuO Nanostructure and Its Characterization towards Solar Cell Application. *Walailak J Sci & Tech* 18.

[26] Qiaobao Zhang, Kaili Zhang, Daguo Xu, Guangcheng Yang, Hui Huang, Fude Nie, Chenmin Liu, Shihe Yang, (2014). CuO nanostructures: Synthesis, characterization, growth mechanisms, fundamental properties, and applications. *Progress in Materials Science* 60, 208–337

[27] Al-Kuhaili, M. F. (2008). Characterization of copper oxide thin films deposited by the thermal evaporation of cuprous oxide (Cu2O). *Vacuum* 82, 623–629

[28] Hai, T. A. P. and Sugimoto, R. (2017). Effect of molar ratio of oxidizer/3-hexylthiophene monomer in chemical oxidative polymerization of poly(3-hexylthiophene). *Journal of Molecular Structure* 1146, 660–668

[29] Joshi, S., Grigorian, S. and Pietsch, U. (2008). X-ray structural and crystallinity studies of low and high molecular weight poly(3-hexylthiophene). *Physica Status Solidi (a)* 205, 488–496.

[30] McCullough, R. D. (1998). The Chemistry of Conducting Polythiophenes. *Adv. Mater.* 10, 93–116.

[31] K. Jhansi, S. Chandralingam, N. Manohar Reddy, Padma Suvarna, Ch.Ashok, K. Venkateswara Rao. (2016). CuO nanoparticles synthesis and characterization for humidity sensor application. *JNMS* 3, 1–5

[32] Liu, Y., Nishiwaki, N., Saigo, K. and Sugimoto, R. (2015). Polymerization of 3-hexylthiophene with FeCl3 in aromatic solvents. *Polym. Bull.* 72, 1817–1826.

[33] Keisuke Sugiyama, Takashi Kojima, Hisashi Fukuda, Hisashi Yashiro, Toshihiko Matsuura, Yuhei Shimoyama, (2008). ESR and X-ray diffraction studies on thin films of poly-3-hexylthiophene: Molecular orientation and magnetic interactions. *Thin Solid Films* 516, 2691–2694.

[34] Colle, R., Grosso, G., Ronzani, A. and Zicovich-Wilson, C. M. (2011). Structure and X-ray spectrum of crystalline poly(3-hexylthiophene) from DFT-van der Waals calculations. *Physica Status Solidi (b)* 248, 1360–1368.

[35] Prosa, T. J., Moulton, J., Heeger, A. J. and Winokur, M. J. (1999). Diffraction Line-Shape Analysis of Poly(3-dodecylthiophene): A Study of Layer Disorder through the Liquid Crystalline Polymer Transition. *Macromolecules* 32, 4000–4009.

[36] Prosa, T. J., Winokur, M. J., Moulton, J., Smith, P. and Heeger, A. J., (1993). X-ray diffraction studies of iodine-doped poly(3-alkylthiophenes). *Synthetic Metals* 55, 370–377.

[37] Manyasree, D., Peddi, K. M. and Ravikumar, R. (2017). CuO Nanoparticles: Synthesis and characterization and their bactericidal efficacy. *Int J App Pharm* 9, 71.

[38] Varughese, G., Rini, V., Suraj, S. P. and Usha, K. T. (2014). Characterisation and Optical Studies of Copper Oxide Nanostructures Doped with Lanthanum Ions. *Advances in Materials Science* 14, 49–60.

[39] Dobrucka, R. (2018). Antioxidant and Catalytic Activity of Biosynthesized CuO Nanoparticles Using

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

Extract of Galeopsidis herba. *J Inorg Organomet Polym* 28, 812–819.

[40] Ahmed, I., Hussein, H. F. and Al-luaibi, S. S. (2024). Novel Insights into the optical Properties of Poly (3-Hexylthiophene-co-Thiophene) with Varying Monomer Percentages. *J. Basrah Res. (Sci.)* 50, 99–119.

[41] Sasano, J., Motomura, K., Nagai, M., Mohamad, F. B. and Izaki, M. (2011). Pulse Electrodeposition of CuO Thin Films to Improve Crystallinity for the Enhancement of Photoelectrochemical Response. *Electrochemistry* 79, 831–837.

[42] Al-Muntaser, A. A., Abdelghany, A. M., Abdelrazek, E. M. and Elshahawy, A. G. (2020). Enhancement of optical and electrical properties of PVC/PMMA blend films doped with Li4Ti5O12 nanoparticles. *Journal of Materials Research and Technology* 9, 789–797.

[43] Tauc, J., Grigorovici, R. and Vancu, A. (1996). Optical Properties and Electronic Structure of Amorphous Germanium. *Physica Status Solidi (b)* 15, 627–637.

[44] Baray-Calderón, A., Camacho-Cáceres, J., Hernández-Guzmán, F., Hu, H. & Nicho, M. E., (2023). Enhanced performance of poly(3-hexylthiophene)-based electrochromic devices by adding a mesoporous TiO2 layer. *Synthetic Metals* 293, 117274

AUTORIZACIÓN Y RENUNCIA.

Los autores del presente artículo autorizan al TecNM/Instituto Tecnológico de Zacatepec para publicar el escrito en el libro electrónico del CITID 2025. El TecNM/ITZ o los editores no son responsables ni por el contenido ni por las implicaciones de lo que está expresado en el escrito.

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

CITID 2025 ISSN: 2992-8516

CALENTAMIENTO DE AGUA PARA PROCESOS DE BAJA TEMPERATURA UTILIZANDO UN CONCENTRADOR CILINDRO PARABÓLICO

Yuridiana Rocio Galindo Luna [1], Jonathan Ibarra Bahena[2]

[1]Doctora en Ingeniería y Ciencias Aplicadas, Universidad Autónoma Metropolitana-Iztapalapa, Ciencias Básicas e Ingeniería, Departamento de Ingeniería de Procesos e Hidráulica. ygalindol@izt.uam.mx, +52 55 58044600 Ext. 2260, Av. Ferrocarril 186, San Rafael Atlixco Col. Leyes de Reforma 1 A sección, Iztapalapa, C.P. 09310. Ciudad de México, México.
[2]Doctor en Ingeniería y Ciencias Aplicadas, Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Energías Renovables. jibarra@ier.unam.mx, +52 777 362 0090, Xochicalco s/n, Col. Azteca, C.P. 625810, Temixco, Morelos, México.

Resumen- Un Concentrador Cilindro Parabólico (CCP) es un dispositivo capaz de alcanzar temperaturas por encima de los 300 °C, sin embargo, a escala estos dispositivos pueden ser una opción viable para cubrir demandas de baja temperatura cercano a los 100 °C, en funciones de las condiciones climáticas. El presente análisis se enfoca en un caso de estudio para el calentamiento de agua utilizando un CCP a escala, con el objetivo de aumentar la temperatura del fluido de trabajo cercano a los 70 °C. El sistema fue evaluado durante los primeros tres meses del año, los cuales no cuentan con los mejores valores de irradiancia, con la finalidad de demostrar que el proceso se puede llevar a cabo durante casi todo el año, a excepción de la temporada de lluvias. Durante la evaluación experimental fueron registrados los valores de irradiancia directa (G_b), a lo largo del periodo de tres horas durante la evaluación, así como el comportamiento de las temperaturas, a la entrada y salida del tubo receptor, así como la temperatura al interior del termotanque. Los resultados muestran dos pruebas realizadas durante el mes de marzo, la mejor prueba registró una máxima temperatura de 66.10 °C, comenzando a temperatura ambiente, bajo condiciones de irradiancia directa en un rango de 803.3 W/m^2 y 949.6 W/m^2.

Palabras Clave: Calentamiento de agua, Concentrador Cilindro Parabólico, Energía solar, Nixtamalización.

Abstract – A Parabolic Trough Concentrator (PTC) is a device capable of reaching temperatures above 300 °C, however, at scale these devices can be a viable option to cover low temperature demands close to 100 °C, depending on the climatic conditions. This analysis focuses on a case study for water heating using a scaled CCP, with the aim of increasing the temperature of the working fluid close to 70 °C. The system was evaluated during the first three months of the year, which do not have the best irradiance values, in order to demonstrate that the process can be carried out almost all year round, except for the rainy season. During the experimental evaluation, the direct irradiance values (G_b) were recorded throughout the three-hour period during the evaluation, as well as the behavior of the temperatures at the inlet and outlet of the receiving tube, as well as the temperature inside the water heater. The results show two tests carried out during the month of March, the best test recorded a maximum temperature of 66.10 °C, under irradiance conditions in a range of 803.3 W/m^2 and 949.6 W/m^2.

Key words –. Water heating, Parabolic Trough Collector, Solar energy, Nixtamalization.

INTRODUCCIÓN

El uso eficiente de la energía nos invita a buscar alternativas en las energías renovables, la energía solar ha demostrado tener una amplia gama en sus aplicaciones, así como en los dispositivos que se utilizan para cubrir las necesidades de la demanda energética [1]. El proceso de nixtamalización es un tratamiento térmico alcalino para ablandar los granos de maíz, con el objetivo de obtener masa de maíz. Este proceso es crucial para aumentar las propiedades nutritivas del grano y prolonga su periodo de almacenamiento [2]. La dieta de los mexicanos se encuentra basada en alimentos a base de maíz, sin embargo, también se incluyen países de Centroamérica y Estados Unidos [3].

De acuerdo con Santos et. al. [4] Se reconocen las siguientes etapas del proceso de nixtamalización: 1) Cocer al maíz bajo condiciones alcalinas (concentración de la solución de Ca $(OH)_2$ debe ser de entre 1 a 4 %), por un periodo de tiempo de entre 25 a 45 minutos con el objetivo de ablandar el grano; 2) Reposar el maíz cocido por un tiempo de 12 a 20 horas; 3) Lavar el maíz cocido (nixtamal) con la finalidad de eliminar los residuos de cal del paso 1; 4) Moler el nixtamal para conseguir la masa o bien se puede deshidratar para conseguir harina de maíz. El proceso de cocimiento requiere agua a temperatura de entre 92 °C [5, 6] y 98 °C [7] durante 30 minutos. Alcanzar esta temperatura involucra una demanda de energía que generalmente se cubre mediante la quema de combustibles fósiles. Sin embargo, este nivel de temperatura es susceptible de ser cubierta mediante colectores solares, específicamente utilizando sistemas a pequeña escala de concentración solar, como el Concentrador Cilindro Parabólico (CCP).

Un CCP está constituido por un espejo parabólico, el cual refleja los rayos recolectados en la superficie

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

reflectora, hacia el tubo receptor, al interior del cual fluye un fluido de trabajo, generalmente agua, el cual incrementa su temperatura [8]. Sus aplicaciones abarcan desde el calentamiento de aire para procesos [9,10], acoplados para proveer energía a procesos de desalinización por membrana [11,12], y para sistemas de refrigeración [13,14].

La aplicación del CCP con el objetivo de calentar agua para llevar a cabo el proceso de nixtamalización son los siguientes: Fernandez Valdespino [15] reportó el diseño de un CCP casero de 2 m^2 de área de recolección, la evaluación experimental fue realizada durante el mes de julio, en el Estado de México. El periodo de prueba fue 3.5 horas, comenzando a las 10:00 am, la irradiancia máxima fue alrededor de 1100 W/m^2, para una olla de 20 L. Los resultados muestran que la máxima temperatura alcanzada fue de 83 °C, durante la temporada más calurosa.

En el presente trabajo se analiza el caso de estudio del proceso de nixtamalización utilizando un CCP, para proveer agua con una temperatura cercana a los 60°C, bajo condiciones de operación que presentan alguna nubosidad y viento, con la finalidad de determinar la máxima temperatura en estas condiciones que no corresponden al periodo de mayor radiación y demostrar que se puede llevar a cabo el proceso de calentamiento de agua. Se realizaron pruebas experimentales durante tres meses, de enero a marzo, en Iztapalapa, Ciudad de México.

DESARROLLO

Descripción del sistema

El CCP se encuentra instalado en la azotea del edificio AT, dentro de las instalaciones de UAM-Iztapalapa, este prototipo emplea una superficie reflectante con forma parabólica, la lámina del material toma la forma parabólica para formar un canal reflectante con un área total de 2.12 m^2. La radiación solar es recolectada en la superficie y los rayos solares son redirigidos hacia la línea focal, en esta línea se encuentra ubicado el tubo receptor, dentro de él fluye agua a temperatura ambiente en un principio. El fluido de trabajo recolecta energía, incrementando así su temperatura. En la Figura 1, se aprecia el CCP instalado. El concentrador cuenta con un sistema hidráulico y un tanque de almacenamiento con capacidad de 25 L.

Metodología: Caso se estudio

De acuerdo con los experimentos realizados por Silva-Fernández et. al. [7] para la preparación de 9 kg de maíz teosinte se utilizaron 27 litros de agua a una temperatura de 98 °C y 180 g de cal. Se considera un termotanque con 25 litros con el cual cuenta el sistema solar, el cual debe alcanzar la temperatura cercana a los 60 °C, con el objetivo de utilizar el agua caliente para realizar el proceso de nixtamalización. Las pruebas experimentales fueron realizadas durante los meses de enero, febrero y marzo, donde el nivel de irradiancia se mantiene cercano a los 700 W/m^2, con el objetivo de asegurar que es posible llevar a cabo al proceso bajo condiciones con nubosidad. El periodo de la evaluación fue de alrededor de tres horas diarias, cercanas al mediodía solar. Durante este periodo de tiempo fueron registrados los valores de irradiancia directa (G_b), temperatura de entrada, salida del agua, al final del tubo receptor y la temperatura en el termotanque, cada minuto. El flujo se mantuvo fijo a 6 L/m, para todas las pruebas reportadas.

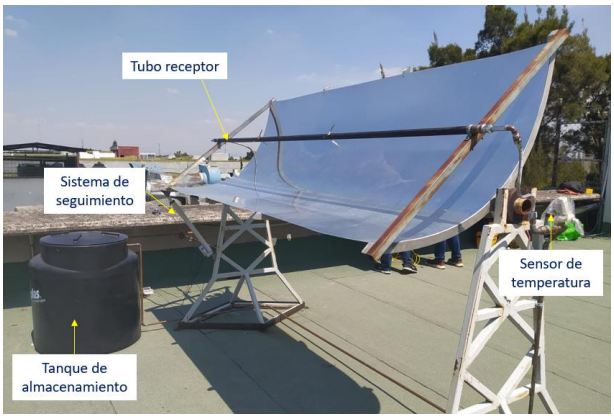


Figura 1. Concentrador cilindro parabólico.

DISCUSIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

A continuación, se presentan las dos mejores pruebas registradas durante el periodo de evaluación. En la Figura 2, se observa la radiación correspondiente al 7 de marzo del año 2024, en esta se observa la hora local con respecto al valor de irradiancia en un día típico sin presencia de nubosidad. La prueba comenzó cercana a las 10:30 am, y se observa un comportamiento un incremento en el G_b, mientras se acerca al mediodía solar, los valores oscilaron en un rango de 695.46 W/m^2 y 875.38 W/m^2.

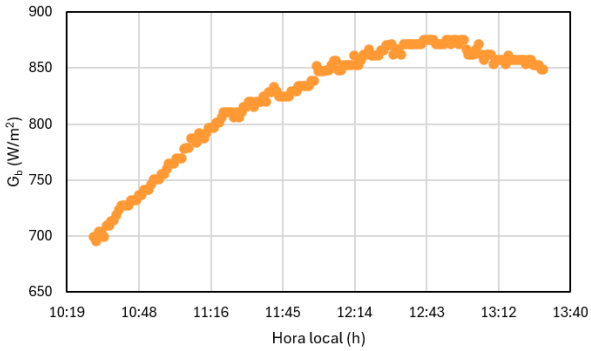


Figura 2. Comportamiento del G_b durante el 7 de Marzo del 2024.

En la Figura 3, se observa la temperatura registrada al inicio, salida y dentro del termotanque durante la prueba

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

del 7 de marzo. En la cual podemos observar el incremento de las temperaturas a lo largo del día, el cual corresponde al aumento del G_b, visto en la Figura 1. La temperatura del agua al inicio de la prueba fue 28.22 °C y alcanza una temperatura máxima de 61.20 °C, mientras que la temperatura de salida oscila en un rango de 31.98 °C a 65.18 °C, el aumento promedio fue de 2.87 °C. La temperatura del termotanque máxima alcanzada fue de 63.4 °C, alrededor de la 13:30 h.

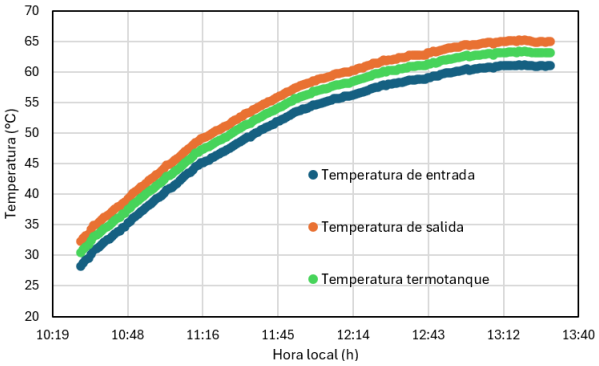


Figura 3. Comportamiento de las temperaturas del sistema, durante la prueba del 7 de Marzo.

En la Figura 4 se presenta la radiación directa (G_b), durante la prueba realizada el 8 de marzo del año 2024. En la cual se observa como el G_b aumenta mientras avanza el día, en un periodo a partir de las 10:30 am y hasta las 13:30 pm. Durante el cual se registraron algunos valores bajos, correspondientes a alguna nube presente, sin embargo, el día se mantuvo despejado, con un valor promedio de 913.0 W/m^2.

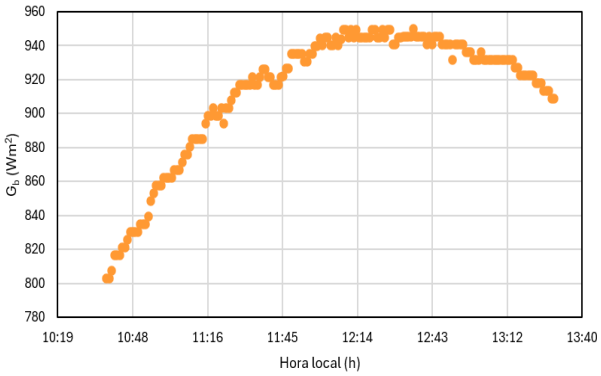


Figura 4. Comportamiento del G_b durante el 8 de Marzo del 2024.

La Figura 5, muestra las temperaturas de entrada al tubo receptor, la temperatura de salida y la temperatura correspondiente al termotanque, durante la prueba del 8 de marzo. En esta se observa como el aumento obedece al aumento de G_b vista anteriormente. Durante esta evaluación se logro alcanzar una temperatura máxima de 66.10 °C dentro del termotanque, el aumento de las temperaturas fue en promedio de 3.12 °C para la temperatura de salida, y la variación en el termotanque de 1.32 °C. La diferencia entre la temperatura de salida y la del termotanque se debe a que la tubería no cuenta con un sistema de aislamiento y la estratificación en su interior, debido a la interacción con la temperatura ambiente.

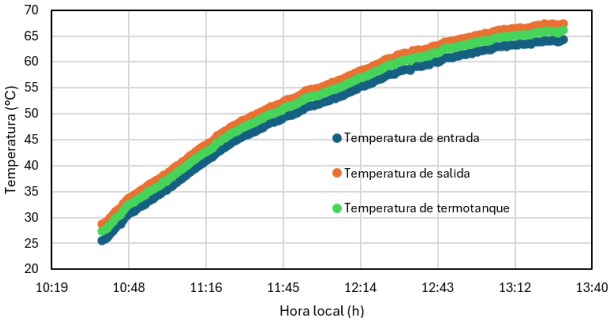


Figura 5. Comportamiento de las temperaturas del sistema, durante la prueba del 8 de Marzo.

Cabe mencionar que después del mediodía solar, las pruebas fueron detenidas, por la presencia de viento, lo cual dificultaba continuar con el aumento de las temperaturas, debido a las pérdidas por convección.

El análisis demuestra que el concentrador a escala es capaz de elevar la temperatura del fluido cercano a los 70 °C, sin embargo, con niveles de irradiancia más elevados, la temperatura podría superar el resultado alcanzado. Vale la pena mencionar, que es más sencillo aumentar 25 °C a partir de los 70°C, que a partir de la temperatura ambiente.

CONCLUSIONES

El análisis presentado se enfoca en un caso de estudio descrito en literatura, el cual hace referencia al proceso de nixtamalización a una temperatura superior a los 92 °C. Los mejores resultados fueron registrados durante el mes de marzo, las principales observaciones fueron las siguientes:

- La evaluación experimental consideró un flujo fijo de 0.1 kg/s, para todas las pruebas reportadas.
- La prueba realizada el 7 de marzo del 2024, alcanzo una temperatura máxima en el termotanque de 61.20 °C, con valores de irradiancia directa en un rango de 695.5 W/m^2 y 785.4 W/m^2.
- Durante la prueba del 8 de marzo del mismo año, la temperatura alcanzada fue de 66.10 °C, iniciando con una temperatura ambiente de 25.6 °C, bajo condiciones de G_b desde 803.03 W/m^2 hasta 949.62 W/m^2.
- La diferencia entre el nivel de temperatura de salida y el del termotanque se debe a las pérdidas convectivas al ambiente, provocado

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

por la falta de aislamiento térmico de las tuberías.

- Este análisis demuestra que, bajo condiciones no ideales (G_b alrededor de los 1000 W/m^2), el concentrador es capaz de elevar la temperatura alrededor de los 66 °C.

Cabe mencionar que el trabajo a futuro contempla el análisis de costos para determinar la energía que se consumiría para alcanzar los 92 °C, necesarios para el proceso de nixtamalización.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al proyecto UNAM-PAPIITIT102224 por el financiamiento otorgado. Jonathan Ibarra Bahena agradece a la SECIHTI por la beca posdoctoral otorgada a través de la convocatoria "Estancias Posdoctorales por México para la Formación y Consolidación de las y los Investigadores por México".

BIBLIOGRAFÍA

[1] Juárez-Salinas, C., González-García, F., Barrera-Calva, E., Galindo-Luna, Y.R. (2024). Experimental analysis of pyrolytic ultrasonic spray grown solar selective coatings under real operation in a parabolic trough collector. Optical Material, 157, pp. 116218.

[2]Corrales-Bañuelos, A.B., Cuevas-Rodríguez, E.O., Gutiérrez-Uribe, J.A., Milán-Noris, E.M., Reyes-Moreno, J. (2016). Carotenoid composition and antioxidant activity of tortillas elaborated from pigmented maize landrace by traditional nixtamalization or lime cooking extrusion process. Journal of Cereal Science, 69, pp. 64-70.

[3] Fernández- Muñoz, J., Rodríguez, M.E., Pless, R.C., Martínez-Flores, H.E., Leal, M., Martínez, J.L. (2002). Changes in nixtamalization corn flour dependent ton postcooking steeping time. Cereal Chemistry, 79 (1), pp. 162-166.

[4] Santos, E.M., Quintanar-Guzmán, A.B., Solorza-Feria, J., Sánchez-Ortega, I., Rodríguez, J.A., Wang, Y.J. (2014). Thermal and rheological properties of masa from nixtamalized corn subjected to a sequential protein extraction. Journal of Cereal Science, 60(3), pp. 490-496.

[5] Mariscal Moreno, R.M., Figueroa, J.D.C., Santiago-Ramos, D., Arámbula Villa, G., Jiménez Sandoval, S., Rayas-Duarte, P., Véles-Medina, J.J., Martínez Flores, H. E. (2015). The effects of different nixtamalisation processes on some physicochemical properties, nutritional composition and glycemic index. Journas of Cereal Science, 65, pp. 140-146.

[6] Gutiérrez-Cortez, E., Hernandez-Becerra, E., Londoño-Restrepo, S.M., Millán-Malo, B.M., Morales-Sánchez, E., Gaytán-Martínez, M., Rodriguez-García, M.E. (2022). Changes in the physicochemical properties of maize endoperm, endosperm fraction, and isolated starches because of nixtamalization. Journal of Cereal Science, 108, pp. 103583.

[7] Silva-Fernández, S.E., García-Lara, S., Serna-Saldivar, S.O. (2025). Production and characterization of nixtamalized teosinte-nixtamalized maize tortillas. Journal of Cereal Science, 121, pp. 104093.

[8] Juaréz-Salinas, C., González-García, F., Barrera-Calva, E., Galindo-Luna, Y.R. (2024) Experimental analysis of pyrolytic ultrasonic spray grown solar selective coatings under real operation in a parabolic trough collector. Optical Material, 157, pp. 116218.

[9] Tyagia, V.V., Panwar, N.L., Rahim, N.A., Richa, K. (2012). Review on solar air heating system with and without thermal energy storage system. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 16 (4), pp. 2289-2303.

[10] Enibe, S.O. (2002). Performance of a natural circulation solar air heating system with phase change material energy storage. Renewable Energy, 27, pp. 69-86.

[11] Mohamed Essam, S.H., Papadakis, G. (2004). Desing simulation and economic analysis of a stand alone reverse osmosis desalination unit power by wind turbine and photovoltaic. Desalination, 164, pp. 87-97.

[12] Bruno Joan, C., Lopéz-Villada, J., Letelier E., Romera, S., Coronas, A. (2008). Modelling and optimization of solar rankine cycle engines for reverse osmosis desalination. Applied Thermal Engineering, 28, pp. 2212-2216.

[13] Fujisawa, T., Tani, T. (2001). Optimum design for residential photovoltaic-thermal binary utilization system by minimizing auxiliary energy. Electrical Engineering in Japan, 137, pp. 28-35.

[14] Sandnes, B., Rekstad, J. (2002). A photovoltaic/termal collector with a polymer absorber plate: experimental study and analitycal model. Solar Energy, 72, pp. 63-73.

[15] Fernández Valdespino, J.A. (2018) Diseño y construcción de un concentrador solar para nixtamalización de maíz acahuazintle (zea mays). [Tesis de licenciatura]. Universidad Autónoma del Estado de México, México.

AUTORIZACIÓN Y RENUNCIA.

Los autores del presente artículo autorizan al TecNM/Instituto Tecnológico de Zacatepec para publicar el escrito en el libro electrónico del CITID 2025. El TecNM/ITZ o los editores no son responsables ni por el contenido ni por las implicaciones de lo que está expresado en el escrito.

EFECTOS DE PRETRATAMIENTOS BASADOS EN PROPIONALDEHÍDO EN LA ESTABILIZACIÓN DE LIGNINA CONTENIDA EN CÁSCARA DE COCO

Juan Pablo Navarro Uribe [1], Francisco Javier Hernández Campos [2], Macdiel Emilio Acevedo Quiroz [3] y Alfredo Quinto Hernández [4]

[1] Ingeniero Bioquímico, MG14090327@zacatepec.tecnm.mx
Tecnológico Nacional de México - Instituto Tecnológico de Zacatepec, División de Estudios de Posgrado e Investigación, Zacatepec, Morelos, México, 62780
[2] Doctor en Ciencias en Alimentos, francisco.hc@zacatepec.tecnm.mx,
[3] Doctor en Ciencias Naturales, macdiel.aq@zacatepec.tecnm.mx,
[4] Doctor en Química, alfredo.qh@zacatepec.tecnm.mx,
Tecnológico Nacional de México - Instituto Tecnológico de Zacatepec, Departamento de Ingeniería Química y Bioquímica, Zacatepec, Morelos, México, 62780

Resumen -- Este trabajo reporta la extracción y estabilización con grupo acetal ($R_2C(OR')_2$) de lignina contenida en cáscara de coco usando pretratamientos basados en Propionaldehído o Propanal (CH_3CH_2CHO). La aparición del grupo acetal a partir de la eliminación de grupos hidroxifenólicos (Ar-OH) es un efecto característico de la estabilización de la lignina usando aldehídos. Aquí, el procedimiento utilizado incluye el uso de Propionaldehído, lo que evita la degradación de los enlaces β-O-4 en la lignina, mejorando así su reactividad química y previniendo su repolimerización. La estabilización de lignina se estudió mediante pretratamientos de un diseño experimental considerando la proporción de volumen de Propionaldehído vs masa de cáscara de coco (9.6, 14.4 y 19.2 mL en 4.5 g cáscara de coco) y temperatura de ensayo (85 y 90°C). El contenido de los grupos hidroxifenólicos (Ar-OH) fue cuantificado usando un método UV, pues estos grupos son sustituidos por grupos acetal. La estabilización de lignina promete encontrar rutas que valoricen este tipo de residuos agroindustriales.

Palabras Clave: Componentes hidroxifenólicos, Lignocelulosa, Repolimerización.

Abstract -- This work reports the extraction and stabilization with acetal group ($R_2C(OR')_2$) of lignin contained in coconut shell using Propionaldehyde-based pretreatments. Presence of the acetal group after elimination of hydroxyphenolic groups (Ar-OH) is a characteristic effect of lignin stabilization using aldehydes. Here, the procedure used includes the use of Propionaldehyde, which avoids the degradation of β-O-4 bonds in lignin, thus improving its chemical reactivity and preventing its repolymerization. Lignin stabilization was studied by pretreatments of an experimental design considering the ratio for volume of Propionaldehyde vs. coconut shell mass (9.6, 14.4 and 19.2 mL in 4.5 g) and essay temperature (85 and 90 °C). Content of hydroxyphenolic groups (Ar-OH) was quantified using a UV method, since these groups are replaced by the acetal group. Lignin stabilization promises to find routes that valorize this type of agroindustrial waste.

Key words – Hydroxyphenolic components, Lignocellulose, Repolymerization.

INTRODUCCIÓN

La lignina es uno de los constituyentes principales de la biomasa lignocelulósica de plantas, árboles y frutos [1, 2]. La cáscara de coco contiene ~46% de lignina, un contenido superior a otras fuentes vegetales [2,3,4,5,6] y su obtención en el sur de México, incluyendo el Estado de Morelos, es de fácil acceso. Cuando es extraída por método kraft, el procedimiento más utilizado para su extracción a escala industrial, es sometida a condiciones altas de presión y temperatura, la lignina experimenta condensación o repolimerización, degradando los enlaces β–O–4, lo que reduce su aprovechamiento como producto intermedio o final de valor agregado [7, 8, 9, 10]. Para evitar repolimerización se emplean estrategias alternativas que incrementan su reactividad, tal como pretratamiento con aldehídos, que estabilizan la estructura de la lignina mediante formación de acetales. A diferencia de la lignina kraft, la lignina estabilizada conserva los enlaces β–O–4, esenciales para aumentar su reactividad química [7, 9].

Una manera de cuantificar la estabilidad adquirida por la lignina es por medio de la presencia de grupos hidroxifenólicos vía metodología UV [11]. La lignina absorbe luz en la región UV debido a la presencia de

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

estructuras aromáticas conjugadas, como anillos fenólicos y enlaces insaturados. Las bandas de absorción características suelen encontrarse ~ 200 – 350 nm. Se pueden calcular relaciones de absorción en diferentes longitudes de onda para evaluar el grado de condensación o degradación [11, 12, 13, 14, 15].

METODOLOGÍA

Extracción y Estabilización de lignina

La cáscara de coco fue recolectada, sometida a secado solar, y molida hasta alcanzar tamaños de partícula malla 100 (0.149 mm). Para evaluar el efecto de la temperatura y la concentración del Propionaldehído utilizado (relación volumen del Propionaldehído/masa de cáscara de coco) en la estabilización de la lignina, se diseñó un experimento a dos niveles para la temperatura (85 y 90°C) y tres concentraciones diferentes (9.6, 14.4 y 19.2 mL Propionaldehído en 4.5 g cáscara de coco). Ver Tabla 1. Nuestro pretratamiento con Propionaldehído consistió en someter la biomasa en un proceso de extracción de extractos con soxhlet utilizando agua destilada y C_2H_5OH (1:3 v/v) durante 3 h. Después de ser secado a temperatura ambiente se separó una muestra de 4.5 g y se diluyó con 50 mL de 1,4-dioxano a las concentraciones diferentes de propionaldehído arriba ya indicadas. La mezcla se agitó durante 20 min, y se le añadió 1.7 mL del catalizador HCl (36.5%) agitándolo nuevamente durante 10 min. Una vez terminado este proceso se sometió 3 h a temperaturas de 85 o 90 °C, y se enfrió a temperatura ambiente. Para la extracción de la lignina estabilizada, previamente se separaron los componentes lignocelulósicos (celulosa, hemicelulosa) por filtración simple y se neutralizó por medio de CH_3OH y una solución saturada de $NaHCO_3$. Después de neutralizarlo, el $NaHCO_3$ fue recuperado por filtración simple y el CH_3OH fue recuperado con rotaevaporador. La lignina estabilizada contenida todavía en 1,4-dioxano fue solubilizada nuevamente con acetato de etilo, seguido de una precipitación con hexano. La lignina estabilizada precipitada fue filtrada con membrana de nylon (0.45 μm). La lignina estabilizada no filtrada se recuperó por rotaevaporador, para finalmente secarse al vacío por 24 h [7].

Tabla 1. Diseño experimental desarrollado para la extracción y estabilización de lignina contenida en cáscara de coco, en este trabajo.

Temperatura (°C)	Volumen de propionaldehído en 4.5g de cáscara de coco (mL)		
85	9.6	14.4	19.2
90	9.6	14.4	19.2

Cuantificación de grupos hidroxifenólicos usando UV

El rendimiento de la extracción y estabilización de la lignina desde la cáscara de coco se realizó usando el método UV referido en [11]. Este método nos brinda la cuantificación de grupos hidroxifenólicos de la lignina estabilizada, donde la presencia de estos grupos impacta la disminución de la reactividad química y causa repolimerización de este biopolímero. Para éste método UV se deben someter las muestras de lignina estabilizadas a una etapa de secado, posteriormente se disuelven 10 mg de la cáscara de coco en 5 mL de 1, 4, dioxano y 5 mL de 0.2M NaOH, se aplica un filtrado por medio de un filtro de membrana de PVDF de 0.45 μm. Cada solución de lignina se diluyó de 2 mL a 25 mL utilizando una solución amortiguadora de pH=6, pH=12 y una solución de 0.2M NaOH. Esto dio a cada solución una concentración de lignina ~0.8 g/L.

La solución de pH = 6 se utilizó como referencia y las absorbancias de las dos soluciones alcalinas se midieron en comparación con ella. Los valores de absorbancia a 300 y 350 nm, se obtuvieron para las mediciones de 0.2 M NaOH, (identificadas como A300 nm (NaOH) y A350 nm (NaOH)), y para la solución de pH = 12 (como A300 nm (pH 12) y A350 nm (pH 12)), de acuerdo a las ecuaciones de identificación de grupos hidroxilos (OH) mostrados en la Figura 1 [11].

Las ecuaciones para identificar la cantidad de grupos hidroxilos fenólicos en lignina por medio del método UV-modificado [11] son las siguientes, indicadas con la numeración relacionada con la Figura 1.

Ecuación (1). Estructura fenólica No-conjugados (I+III)

$$\mathrm{OH(I+III)} = (0.250 * A_{300\,\mathrm{nm}}(\mathrm{NaOH}) + 0.0595 * A_{350\,\mathrm{nm}}(\mathrm{NaOH})) * \frac{1}{c*1}\frac{\mathrm{mmoles}}{\mathrm{g}} \qquad \text{Ec. (1)}$$

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

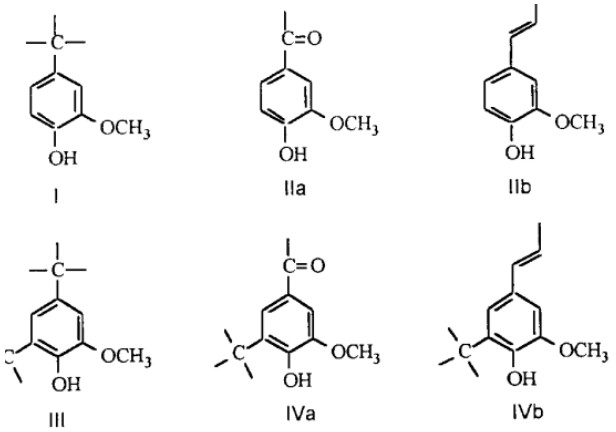


Figura 1. Estructuras fenólicas en lignina ionizadas, de acuerdo a [11].

Ecuación (2). Estructura fenólica conjugadas (II+IV)

$$\mathrm{OH(II+IV)} = 0.0476 * \mathrm{A}_{350\,\mathrm{nm}}\,(\mathrm{NaOH}) * \frac{1}{c*1}\frac{\mathrm{mmoles}}{\mathrm{g}} \qquad \text{Ec. (2)}$$

Ecuación (3). Conteo total de grupos hidroxilos fenólicos OH(Total)

$$\mathrm{OH(T)} = \mathrm{OH(I+II+II+IV)} = \left(0.250 * \mathrm{A}_{300\,\mathrm{nm}}(\mathrm{NaOH}) + 0.107 * \mathrm{A}_{350\,\mathrm{nm}}(\mathrm{NaOH})\right) * \frac{1}{c*1}\frac{\mathrm{mmoles}}{\mathrm{g}} \qquad \text{Ec. (3)}$$

Ecuación (4). Estructuras fenólicas ionizadas en la solución de pH=12 (I,II)

$$\mathrm{OH(I)} = \left(0.250 * A_{300\,nm}(pH12) + 0.0595 * A_{350\,nm}(\mathrm{pH}=12)\right) * \frac{1}{c*1}\frac{mmoles}{g} \qquad \text{Ec. (4)}$$

Ecuación (5). Estructuras fenólicas ionizadas en la solución de pH=12 (II)

$$\mathrm{OH(II)} = 0.0476 * \mathrm{A}_{350\,\mathrm{nm}}(\mathrm{pH}=12) * \frac{1}{c*1}\frac{\mathrm{mmoles}}{\mathrm{g}} \qquad \text{Ec. (5)}$$

Ecuación (6). Estructura fenólica débilmente ácida (III)

$$\mathrm{OH(III)} = (\mathrm{A}_{300\,\mathrm{nm}}(\mathrm{NaOH}) - \mathrm{A}_{300\,\mathrm{nm}}(\mathrm{pH}=12)) * \frac{0.250}{c*1}) + (\mathrm{A}_{350\,\mathrm{nm}}(\mathrm{NaOH}) - \mathrm{A}_{350\,\mathrm{nm}}(\mathrm{pH}=12)) * \frac{0.0595}{c*1}\frac{\mathrm{mmoles}}{\mathrm{g}} \qquad \text{Ec. (6)}$$

Ecuación (7). Estructura fenólica débilmente ácida (IV)

$$OH(IV) = \left(A_{350\,nm}(NaOH) - A_{350\,nm}(\mathrm{pH}=12)\right) * \frac{0.046}{c*1}\frac{mmoles}{g} \qquad \text{Ec. (7)}$$

DISCUSIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Los espectros UV de las muestras de lignina extraída y estabilizada de cáscara de coco se muestran en las Figuras 2 y 3. Todos los espectros muestras las características bandas de abosrción de los materiales lignocelulósicos, incluyendo la banda centrada cerca de 300 nm. Estos espectros permiten cuantificar la cantidad de grupos hidroxilo fenólicos para las condiciones experimentales a 85 °C (Figura 2), y 90 °C (Figura 3). Cada espectro UV fue obtenido en el rango de 240 a 380 nm, observándose una banda de absorción centrada en ~300 nm que identifica la exitación electrónica de los grupos fenólicos no conjugados y otra más a 350 nm que señala los grupos fenólicos conjugados, no apreciable en todos los espectros. Cada figura contiene dos espectros UV, como indica la referencia [11], correspondientes a la diferencia de absorbancia entre las soluciones de 0.2 M NaOH y de pH=6 (línea continua color negra) y entre las soluciones de pH=12 y pH=6 (línea continua color rojo). Los máximos de absorbancia identificados permiten hacer uso de la ecuaciones (1) a (7) para determinar la concentración de grupos hidroxilo fenólicos. La Tabla 2 muestra los valores de las absorbancias máximas, y sus correspondientes λ_{max}, en nm, identificadas para los ensayos de muestras de lignina a 85 °C, y la Tabla 3, para los ensayos a 90 °C. Se presentan para todos los volúmenes de Propionaldehído empleados en la cáscara de coco. Los valores de las Tablas 2 y 3 fueron obtenidos de las Figuras 2 y 3, respectivamente.

La Tabla 2 muestra una clara tendencia de que las absorbancias son mayores a 300 nm cuando la adición de volumen de propionaldehído es de 9.6 mL, independientemente de la λ_{max}, y de la diferencia de las absorbancias de las soluciones. Esta tendencia se observa de manera similar en la Tabla 3, sin embargo, cuando el volumen usado es de 14.4 mL, seguido de las absorbancias desde 9.6 y 19.2 mL. Tales valores fueron utilizados para el cálculo de las concentraciones de grupos presentes de hidroxilo fenólicos en las diversas muestras de lignina extraída y estabilizada. Estas concentraciones se presentan en la Tabla 4, estimadas a partir de las Ecuaciones (1) a (3), y en la Tabla 5, de las Ecuaciones (4) a (7).

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

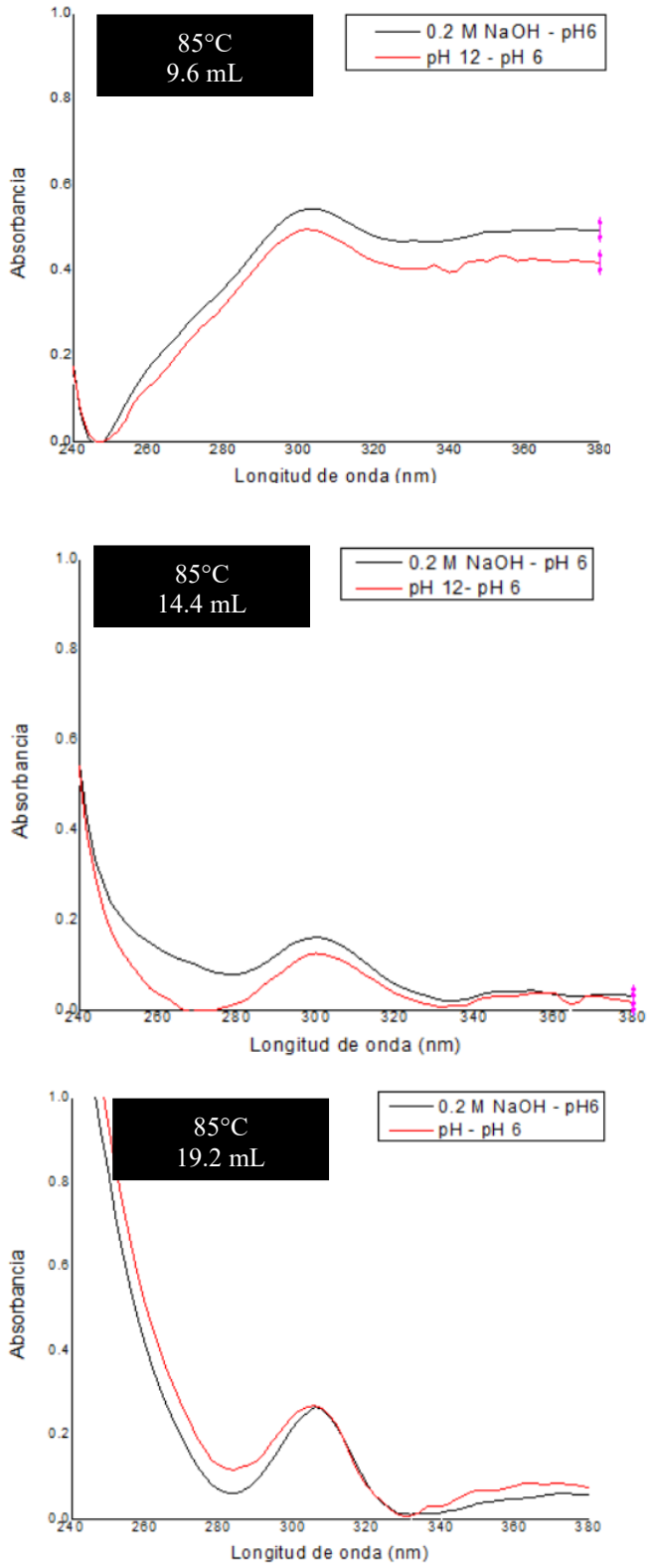


Figura 2. Resultados del análisis de Espectroscopía UV a la temperatura de 85 °C.

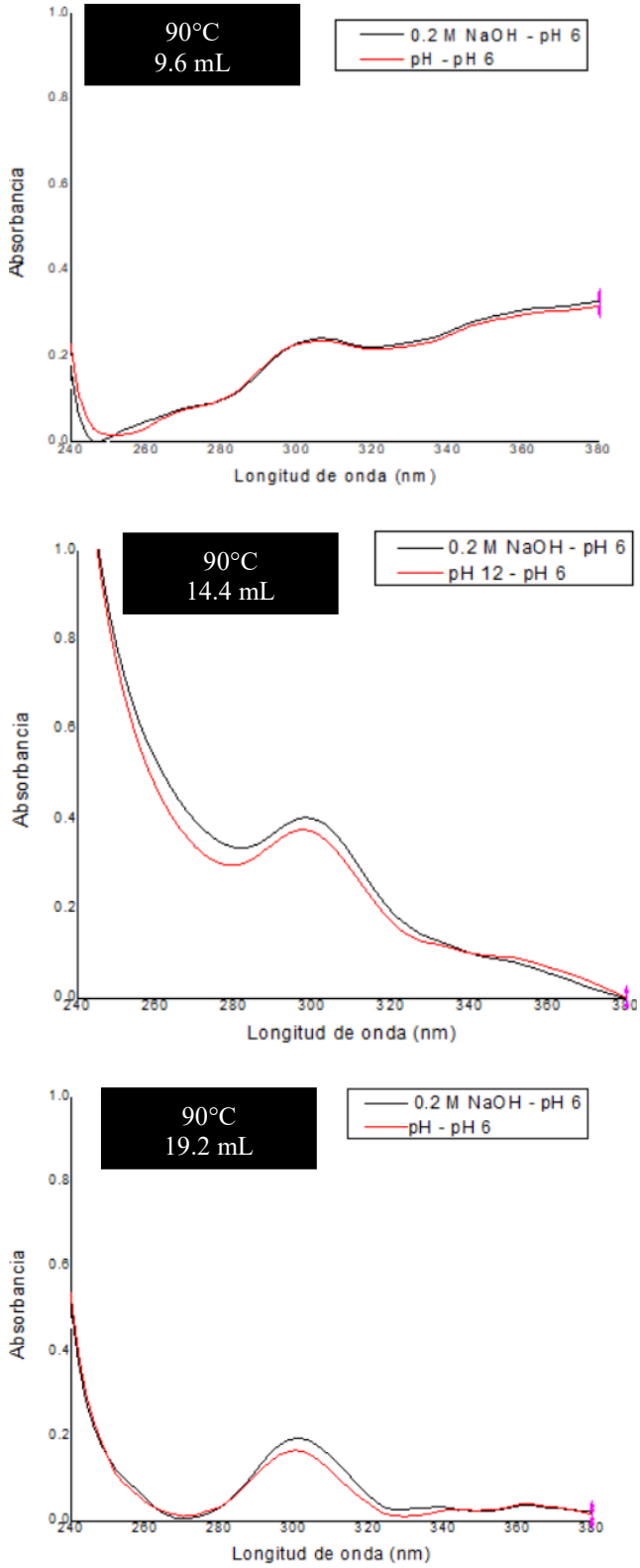


Figura 3. Resultados del análisis de Espectroscopía UV a la temperatura de 90 °C.

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

Tabla 2. Absorbancia en la longitud de onda en 300 nm y 350 nm del análisis UV de las muestras del diseño experimental a 85 °C.

A. 85 °C, 9.6 mL			
λ(nm)	pH = 12	λ(nm)	0.2 M NaOH
302	0.495	302	0.546
354	0.446	356	0.492
B. 85 °C, 14.4 mL			
λ(nm)	pH = 12	λ(nm)	0.2 M NaOH
300	0.128	300	0.236
356	0.039	348	0.115
C. 85 °C, 19.2 mL			
λ(nm)	pH = 12	λ(nm)	0.2 M NaOH
306	0.277	306	0.271
350	0.075	350	0.046

Tabla 3. Absorbancia en la longitud de onda en 300 nm y 350 nm del análisis UV de las muestras del diseño experimental a 90 °C.

A. 90 °C, 9.6 mL			
λ(nm)	pH = 12	λ(nm)	0.2 M NaOH
304	0.237	304	0.244
354	0.289	3 54	0.297
B. 90 °C, 14.4 mL			
λ(nm)	pH = 12	λ(nm)	0.2 M NaOH
296	0.378	296	0.403
350	0.096	348	0.087
C. 90 °C, 19.2 mL			
λ(nm)	pH = 12	λ(nm)	0.2 M NaOH
302	0.167	302	0.197
358	0.043	358	0.041

Cada una de las ecuaciones nos brindan los cálculos de estructuras diferentes, excepto una, la Ecuación (3) nos proporciona el Total de grupos hidroxilos fenólicos OH(I+II+III+IV), observados en la Figura 1. Los datos de la Tablas 4 y 5 se entienden mejor si representamos su comportatmiento gráfico, como el presentado en la Figura 4. Esta figura nos brinda una mejor observación del comportamiento de cada una de las muestras y entender su tendencia con respecto los grupos hidroxilos fenólicos.

Considerando estos resultados podemos observar las tendencias de los resultados obtenidos de cada ecuación, permitiendo identificar las condiciones experimentales en las que se pudo haber extraído y estabilizado las muestras de lignina de cáscara de coco, bajo las diversas condiciones de este estudio.

Tabla 4. Concentraciones para las diversas estructuras fenólicas identificadas en las muestras de ligninan extraída y estabilizada, calculadas de las Ecuaciones (1) a (3).

Muestra	Estructura Fenólica No Conjugada OH(I+III) Ec. (1) (mmol/g)	Estructura Fenólica Conjugada OH(II+IV) Ec. (2) (mmol/g)	Total de Grupos Hidroxilos Fenólicos OH(I+II+III+IV) Ec. (3) (mmol/g)
85 °C 9.6 mL	2.072	0.293	2.364
85 °C 14.4 mL	0.823	0.068	0.891
85 °C 19.2 mL	0.881	0.027	0.908
90 °C 9.6 mL	0.983	0.177	1.160
90 °C 14.4 mL	1.324	0.051	1.376
90 °C 19.2 mL	0.646	0.024	0.670

La Figura 4 muestra que la estabilización realizada a 85 °C y un volumen de 9.6 mL fue la menos eficiente, pues revela que existen altas concentraciones de estructuras fenólicas ionizadas, conjugadas o no conjugadas.

Tabla 5. Concentraciones para las diversas estructuras fenólicas identificadas en las muestras de ligninan extraída y estabilizada, calculadas de las Ecuaciones (4) a (7).

Muestra	Estructura Fenólica Ionizada (OH I) Ec. (4) (mmol/g)	Estructura Fenólica ionizada (OH II) Ec. (5) (mmol/g)
85 °C 9.6 mL	0.455	0.265
85 °C 14.4 mL	0.061	0.023
85 °C 19.2 mL	0.125	0.045
90 °C 9.6 mL	0.274	0.172
90 °C 14.4 mL	0.166	0.057
90 °C 19.2 mL	0.074	0.026

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

Muestra	Estructura Fenólica Débilmente Ácida (III) Ec. (6) (mmol/g)	Estructura Fenólica Débilmente Ácida (IV) Ec. (7) (mmol/g)
85 °C 9.6 mL	0.194	0.027
85 °C 14.4 mL	0.396	0.045
85 °C 19.2 mL	-0.0406	-0.017
90 °C 9.6 mL	0.028	0.005
90 °C 14.4 mL	0.071	-0.005
90 °C 19.2 mL	0.092	-0.001

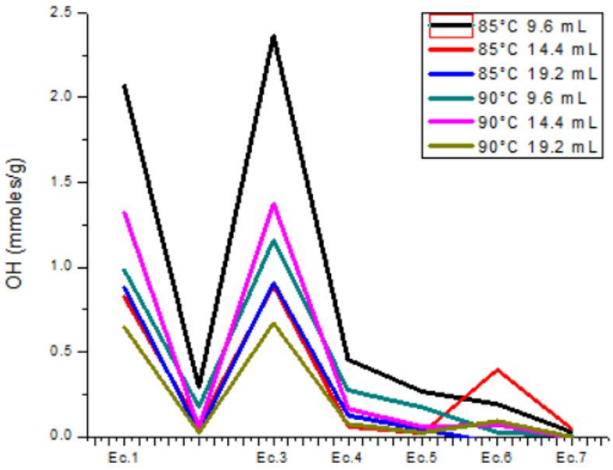


Figura 4. Tendencias de las concentraciones de las ecuaciones del análisis de Espectroscopía UV de las réplicas del diseño experimental.

Se espera que una estructura estabilizada contenga bajas concentraciones, o totalmente carezca, de grupos fenólicos, pues estos son reemplazadas de grupos acetales durante el proceso de estabilización y extracción de lignina.

Por el contrario, la condición de estabilización realizada a 90 °C y un volumen de 19.2 mL fue la más eficiente. Aquí, notamos que las concentraciones más bajas de grupos fenólicos fueron determinadas. Las concentraciones variaron en un un rango de 0.646 mmol/g a una ausencia completa. La mayor presencia de estructuras con grupos fenólicos es la fenólica no conjugada, estimada a través de la Ecuación (1).

En otras palabras, la Figura 4 da conocer el Total de Grupos Hidroxilos Fenólicos OH(I+II+III+IV). Teniendo en cuenta que a menor cantidad de grupos hidroxifenólicos mayor cantidad de enlaces β-O-4, nos interesa las muestras con menor número en cantidad, siendo las muestras con mayor concentración de propionaldehído en ambas temperaturas las que presentan menor presencia podemos mencionar:

- A mayor concentración de propionaldehído menor cantidad de grupos hidroxifenólicos presentes.
- La temperatura influye en relación en la cantidad de grupos hidroxifenólicos.

CONCLUSIONES

Este trabajo reporta por primera vez el contenido de grupos hidroxifenólicos resultantes de la estabilización de lignina contenida en cáscara de coco, usando pretratamientos basados en propionaldehído. El contenido de grupos hidroxifenólicos es un parámetro para determinar el grado de la estabilización de la lignina, pueden ser resmplazados por un grupo acetal. Este es un efecto característico del pretratamiento usando aldehídos y la conservación de los enlaces β-*O*-4, aumentando así la probabilidad de evitar repolimerización o condensación de la lignina, teniendo una relación de a menor cantidad de grupos hidroxifenólicos mayor cantidad de enlaces β-*O*-4.

Al caracterizar la lignina por medio del método UV, identificamos que la cuantificación está relacionada a la cantidad de grupos hidroxifenólicos que se encontraban en la estructura de la lignina estabilizada, los enlaces de estos grupos al ser disociados al someterse a soluciones alcalinas, permite identificarlos por medio de su absorbancia que brindan en un rango de longitud de onda ~230 – 380 nm. La disminución de la presencia de grupos hidroxifenólicos es más relevante en las pruebas con empleo de 19.2 mL de Propionaldehído a 85 y 90 °C (Pretratamientos 3 y 6), sugiriendo que es estas condiciones fue más efectivo la conservación de los enlaces β-O-4, aumentando así la probabilidad de evitar repolimerización o condensación de la lignina. Este resultado sugiere las condiciones de potenciar la reactividad química de la lignina, y su uso como precursor para generar productos de alto valor agregado a partir de este tipo de residuos agroindustriales.

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

AGRADECIMIENTOS
Juan Pablo Navarro Uribe agradece a la SECIHTI por la Beca de Posgrado otorgada, así como a mis asesores por su constante apoyo, orientación y por proporcionar los consejos e información necesarios para el desarrollo de esta investigación.

BIBLIOGRAFÍA

[1] Muensri, P., Kunanopparat, T., Menut, P., Siriwattanayotin, S. (2011). Effect of lignin removal on the properties of coconut coir fiber/wheat gluten biocomposite. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing. 42(2), 173-179.

[2] Josephine Olivares, E. (2023). Estabilización y fenolación de la lignina obtenida desde cascara de coco (*Cocos nucifera L.*). Tesis Maestría en Ciencias de la Ingeniería, Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Zacatepec, México.

[3] García Fernández, S. (2022). Caracterización de lignina de cáscara de cacao como fuente de moléculas de alto valor agregado (Doctoral dissertation, Universidad Autónoma Chapingo).

[4] Palomara, L. T., Bautistaa, A. G. A., Díazb, L. C., Morenoa, M. G. A., Ramos, R. T., Uscanga, E. R., & Leyva, C. C. (2015). Caracterización química de paja de trigo del valle de Mexicali y la correlación entre el No. Kappa y el contenido de lignina.

[5] Zambrano-Zambrano, G. A., García-Macías, V. L., Cedeño-Palacios, C. A., & Alcívar- Cedeño, U. E. (2021). Aprovechamiento de la cascarilla de arroz (Oryza sativa) para la obtención de fibras de celulosa. Polo del conocimiento, 6(4), 415-437.

[6] Eriksson, K. E. L., Blanchette, R. A., & Ander, P. (2012). Microbial and enzymatic degradation of wood and wood components. Springer Science & Business Media.

[7] Talebi Amiri, M., Dick, G. R., Questell-Santiago, Y. M., Luterbacher, J. S. (2019). Fractionation of lignocellulosic biomass to produce uncondensed aldehyde-stabilized lignin. Nature protocols. 14(3), 921-9.

[8] Karagoz, P., Khiawjan, S., Marques, M. P., Santzouk, S., Bugg, T. D., & Lye, G. J. (2023). Pharmaceutical applications of lignin-derived chemicals and lignin-based materials: Linking lignin source and processing with clinical indication. Biomass Conversion and Biorefinery, 1-22.

[9] Kumar, S., Mohanty, A. K., Erickson, L., & Misra, M. (2009). Lignin and its applications with polymers. Journal of Biobased Materials and Bioenergy, 3(1), 1-24.

[10] He, Y., Zeng, X., Lu, Z., Mo, S., An, Q., Liu, Q., ... & Zou, Y. (2024). Aqueous Electrocatalytic Hydrogenation Depolymerization of Lignin β-O-4 Linkage via Selective Caryl–O (C) Bond Cleavage: The Regulation of Adsorption. Journal of the American Chemical Society, 146(46), 32022-32031.

[11] Gärtner, A., Gellerstedt, G., Tamminen, T. (1999). Determination of phenolic hydroxyl groups in residual lignin using a modified UV-method. Nordic Pulp & Paper Research Journal, 14(2), 163-170.

[12] Chávez-Sifontes, M., & Domine, M. E. (2013). Lignina, estructura y aplicaciones: métodos de despolimerización para la obtención de derivados aromáticos de interés industrial. Avances en ciencias e Ingeniería, 4(4), 15-46.

[13] Gouveia, E. R., Nascimento, R. T. D., Souto-Maior, A. M., & Rocha, G. J. D. M. (2009). Validação de metodologia para a caracterização química de bagaço de cana-de- açúcar. Química Nova, 32, 1500-1503.

[14] Faustino, H., Gil, N., Baptista, C., & Duarte, A. P. (2010). Antioxidant activity of lignin phenolic compounds extracted from kraft and sulphite black liquors. Molecules, 15(12), 9308-9322.

[15] Arcentales Vera, M. B. (2020). UV-Absorption of lignin structures extracted from agricultural wastes (Bachelor's thesis, Universidad de Investigación de Tecnología Experimetal Yachay).

AUTORIZACIÓN Y RENUNCIA.

Los autores del presente artículo autorizan al TecNM/Instituto Tecnológico de Zacatepec para publicar el escrito en el libro electrónico del CITID 2025. El TecNM/ITZ o los editores no son responsables ni por el contenido ni por las implicaciones de lo que está expresado en el escrito.

SISTEMA INTELIGENTE MÓVIL PENITA PARA DETECTAR VARIABLES CLIMATOLÓGICAS MEDIANTE PROTOCOLO MQTT.

J. Á. Peña-Ramirez[1]. M. Delgado Reyes[2], N.J. Ontiveros-Hernández.[3]. S. Espinoza-Salgado[4], Yanet Castrejón Hernández[5]

Dr.[1.] Tecnológico Nacional de México. Instituto Tecnológico de Zacatepec, Departamento de Sistemas y Computación. Calzada Tecnológico No. 27 C.P. 62780 Zacatepec, Morelos, México (Tel: 7341069240; correo: jesus.pr@zacatepec.tecnm.mx.).
MEd.[2]. Tecnológico Nacional de México. Instituto Tecnológico de Zacatepec, Departamento de Sistemas y Computación. Calzada Tecnológico No. 27 C.P. 62780 Zacatepec, Morelos, México (Tel: 7341061386016; correo: miguel.dr@zacatepec.tecnm.mx.). Mc.[3]. Tecnológico Nacional de México. Instituto Tecnológico de Zacatepec, Departamento de Sistemas y Computación. Calzada Tecnológico No. 27 C.P. 62780 Zacatepec, Morelos, México (correo: norma.oh@zacatepec.tecnm.mx.).
Dr.[4].Tecnológico Nacional de México. Instituto Tecnológico de Zacatepec, Departamento de Sistemas y Computación. Calzada Tecnológico No. 27 C.P. 62780 Zacatepec, Morelos, México, (correo: socrates.es@zacatepec.tecnm.mx.).
MI[5].Tecnológico Nacional de México. Instituto Tecnológico de Zacatepec, Departamento de Sistemas y Computación. Calzada Tecnológico No. 27 C.P. 62780 Zacatepec, Morelos, México, (correo: yanet.ch@zacatepec.tecnm.mx.).

Resumen: El propósito de este artículo es mostrar el funcionamiento de un invernadero ubicado en el Instituto Tecnológico de Zacatepec, que permite monitorear diversas variables (como la temperatura del cultivo de ajo, u otras hortalizas) mediante una aplicación móvil desarrollada con App inventor (bloques). Para la comunicación de la interfaz se necesita el protocolo MQTT, el sistema móvil funciona como un servidor- cliente. Este sistema permite monitorear el proceso de crecimiento y el estado actual de cultivos como ajo, acelga, apio, berros, betabel, entre otros. Este artículo presenta los resultados de un proyecto de investigación realizado en el Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Zacatepec, Morelos. El estudio se aplica al sector agrícola para la gestión de cultivos de hortalizas (jitomate y tomate), incorporado en un sistema de riego y control automático de temperatura. La investigación fue desarrollada en colaboración con productores del sur del estado de Morelos, empleando entrevistas, encuestas y cuestionarios para detectar la necesidad de un sistema de monitoreo y control accesible; Este sistema está conformado por un módulo móvil desarrollado mediante bloques de programación en App Inventor 2, como también nos permite tener acceso a información de variables climáticas, así como las actividades programadas sobre el cultivo. Además, se propone la automatización del invernadero mediante una red neuronal artificial (RNA), la cual procesa los datos recolectados por sensores para controlar los actuadores de manera eficiente.

Palabras clave: Arduino ESP32, HTTPS, MQTT, MySQL, Protocolo, QR,

Abstract: The purpose of this article is to present the operation of a greenhouse located at the Instituto Tecnológico de Zacatepec, which allows monitoring of various variables (such as the temperature of garlic cultivation or other vegetables) through a mobile application developed using App Inventor (blocks). The MQTT protocol is required for interface communication, and the mobile system functions as a client-server. This system enables the monitoring of the growth process and current state of crops such as garlic, chard, celery, watercress, beetroot, among others. This article presents the results of a research project carried out at the Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Zacatepec, Morelos. The study is applied to the agricultural sector for managing vegetable crops (tomatoes and other vegetables), incorporating an irrigation system and automatic temperature control. The research was conducted in collaboration with producers from the southern region of the state of Morelos, using interviews, surveys, and questionnaires to identify the need for an accessible monitoring and control system. This system consists of a mobile module developed using block programming in App Inventor 2, which also allows access to climatic variable data and scheduled crop activities. Additionally, the study proposes greenhouse automation through an artificial neural network (ANN), which processes sensor data to efficiently control the actuators.

Key words: Arduino ESP32, HTTPS, MQTT, MySQL, Protocol, QR

INTRODUCCIÓN

En este artículo se presenta el desarrollo de un sistema inteligente para invernaderos, el cual utiliza un microprocesador ESP32 y el protocolo MQTT (Message Queuing Telemetry Transport) configurado como cliente-servidor en ambiente Windows.

El sistema móvil denominado Penita forma parte del prototipo que tiene como objetivo mejorar y facilitar el trabajo de los agricultores dedicados al cultivo de hortalizas en invernaderos. Anteriormente años atras, la agricultura ha estado en constante evolución.

Se han desarrollado nuevos tipos de semillas, nutrientes y fertilizantes, así como sustancias químicas que contribuyen

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

al crecimiento de los cultivos sin perjudicar al consumidor final.

Existe diversas actividades del agricultor, mediante un prototipo de un sistema inteligente automatizado, por lo tanto, se pueda controlar el ciclo de crecimiento de un cultivo, con el fin de que los agricultores puedan tener información en tiempo real de sus cultivos, mediante un dispositivo móvil con acceso a Internet [1].

Con este trabajo de investigación se busca lograr que los agricultores tengan acceso a la información relevante de su cultivo en invernadero, para captar las variables en tiempo real mediante protocolo MQTT como puede ser: la humedad, la temperatura, y la concentración de dióxido de carbono, con esto garantizar que los factores ambientales estén controlados de manera correcta.

Dado lo anterior, se realizó una búsqueda en línea acerca de las tecnologías encaminadas a mejorar y facilitar los procesos agrícolas, que básicamente dependen de personas, que en ocasiones no tienen el tiempo necesario para medir factores ambientales como puede ser la humedad en la tierra, la temperatura de los invernaderos; todo lo anterior, puede provocar que se tenga una cosecha con muchas enfermedades o plagas, y por consecuencia el agricultor tenga grandes pérdidas económicas considerables.

Por ello, se propone el diseño de un sistema integral automatizado, conformado por el microprocesador ESP32, una aplicación móvil desarrollada en App Inventor y sensores climáticos.

Este sistema tiene como propósito ofrecer al agricultor información útil sobre sus cultivos, contribuyendo a una mejor producción.

El sistema automatizado fue pensado para ser desarrollado con una tecnología básica y accesible a los agricultores se les haga más fácil, esto con el fin de buscar eficiencia y funcionalidad completa.

Más adelante se discutirán aspectos sobre su funcionamiento y algunos fundamentos teóricos relevantes para este trabajo de investigación.

En estos tiempos la exploración en el área de la informática se genera la innovación en la tecnología de la agricultura de precisión (AP), que les ayuda a los agricultores a que optimicen todos sus rendimientos, también a que reduzcan las aplicaciones de pesticidas y fertilizantes que no son necesarias, salvaguardar los recursos naturales y a afrontar a los imperiosos fenómenos atmosféricos [2].

La tecnología de AP mejora la eficiencia del uso de los recursos, también su calidad, su productividad, su sostenibilidad y la rentabilidad de la producción agrícola. Con esta tecnología se consigue información a detalle las particularidades del cultivo, optimizando la gestión de una parcela, desde la perspectiva medioambiental, económica y agronómica.

Lo que permite la AP es utilizar servicios tipificados y en tiempo real, apoyados en un extenso grado de elementos como: el tipo de riego, su ubicación, el tipo de cultivo, las prácticas de administración, el tamaño y el tipo de suelo y el nivel de automatización.

También se considera el Internet de las Cosas (IoT), es un conjunto de objetos físicos, con sensores incorporados con la finalidad de conectarse a Internet y poder recopilar e intercambiar datos de manera inteligente con otros dispositivos [3].

El IoT es inducido por un conjunto de procesos y métodos que utilizan software, sensores y otras tecnologías para una comunicación en tiempo real entre procesos y personas [4].

DESARROLLO

Diseño del modelo neuronal

Para el desarrollo del sistema automatizado se empleó una red neuronal Feedforward, la cual está compuesta por tres capas: una capa de entrada con 6 neuronas, una capa oculta con 10 neuronas y una capa de salida con 4 neuronas.

Cada sección utiliza funciones de activación específicas.

El diseño se detalla en la Figura No. 1, donde se presenta la arquitectura general de la red neuronal.

a) Capa de entrada: 6 neuronas

Estas representan las variables recolectadas por los sensores del invernadero:

- Temperatura (Sensor DHT11/DHT22)
- Humedad del aire (Sensor DHT11/DHT22)
- Humedad del suelo (Sensor de humedad capacitivo).
- Intensidad de luz (Sensor LDR)
- Nivel de CO_2 (Sensor MQ-135, opcional)
- Día/Noche (Sensor de luz o RTC)

b) Capa oculta: 10 neuronas

Se utilizan las siguientes funciones de activación:

- ReLU (Unidad Lineal Rectificada): obtener los datos de sensores y evita saturaciones.
- Sigmoide: activación (encender/apagar actuadores).

c) Capa de salida: 4 neuronas

Estas neuronas controlan los actuadores del invernadero:

- Ventilador (para reducir temperatura y CO_2)
- Riego automático (activar bomba de agua)
- Luces LED (para días nublados o baja luz)

Extractor de aire (para renovación de aire) Las funciones de activación en la salida son:

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

- Sigmoide (0-1) si es encendido/apagado (actuadores digitales).
- Tanh (-1 a 1) si queremos controlar la intensidad (PWM en ventiladores o luces) [5]. Ver Tabla No. 1.

Tabla 1 Diseño de la Red neuronal

Capa	Neuronas	Función de activación
Entrada	6	(Datos de sensores)
Oculta	10	ReLU / sigmoide
Salida	4	Sigmoide / Tanh

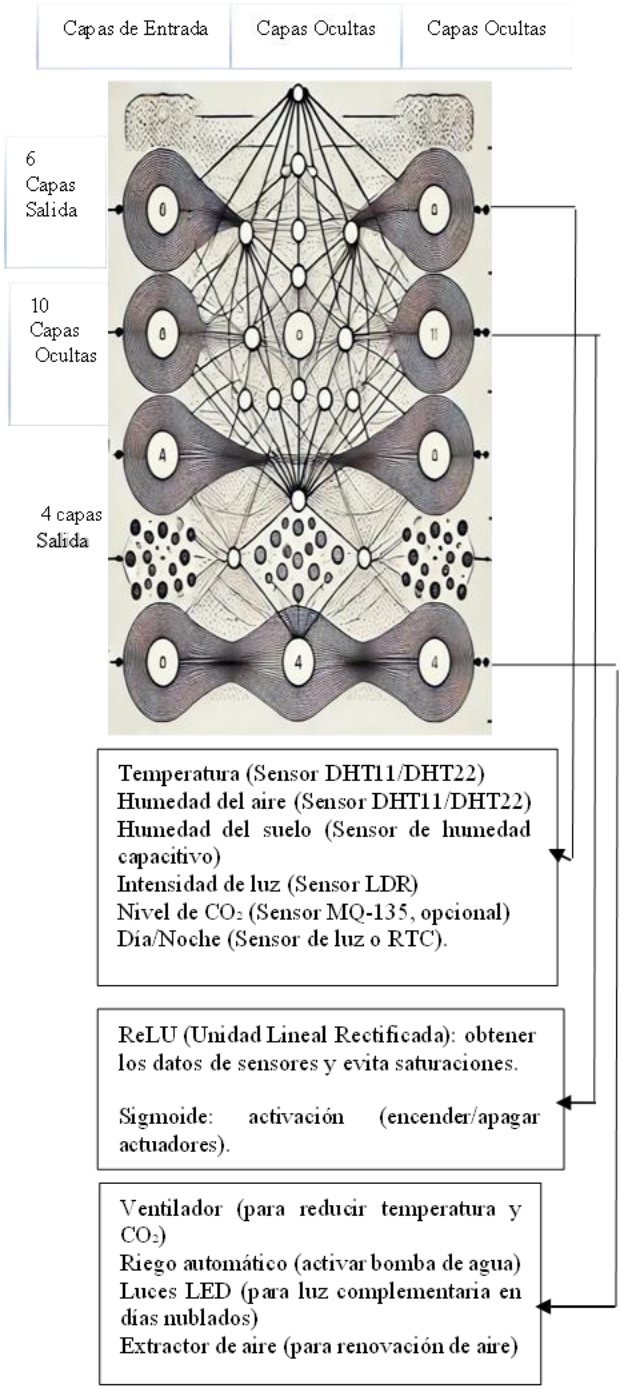


Figura No. 1 Esquema Red Neuronal (Elaboración Propia)

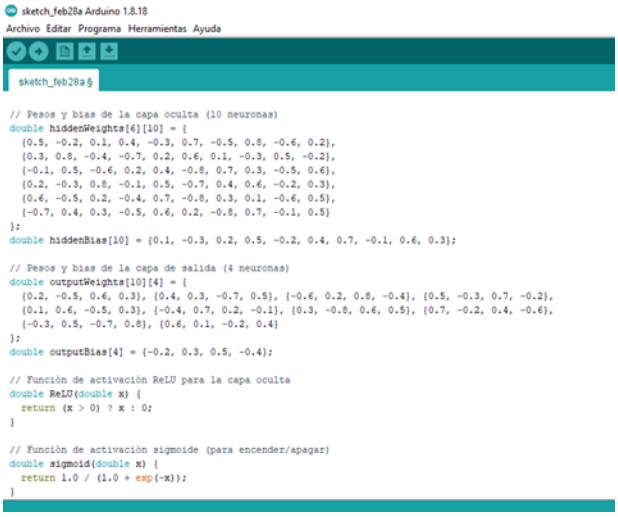


Figura No.2 últimos pesos de las 20 neuronas que fueron entradas. (Elaboración Propia).

Desarrollo de la aplicación móvil y servidor

Se desarrolló una aplicación Web mediante bloques para monitorear en tiempo real comunicación con Firebase en la nube, dicha aplicación móvil les proporciona a los agricultores, la información estadística del estado de las principales variables climatológicas del invernadero (temperatura, humedad, y concentración del dióxido de carbono).

Los datos que se recolectan del invernadero se almacenan en un servidor de base de datos Firebase gratuito.

La aplicación móvil Penita le muestra al agricultor, toda información relacionada con la temperatura y la humedad del suelo de cada uno de sus cultivos registrados el servidor Firebase.

Implementación del prototipo

El método utilizado para obtener información de las variables ambientales será mediante el protocolo de red MQTT conectado servidor-cliente.

Es necesario recolectar la información del invernadero a través de sensores mencionados con anterioridad. Con la información será recolectada en tiempo real almacenada en el servidor de base de datos Firebase.

También se deben analizar los componentes que estarán involucrados en el diseño del sistema, se recurrió también a hacer una simulación de electrónicos en el Proteus basados en microprocesadores, así como de los demás componentes electrónicos que contiene dentro de sus diferentes librerías.

Arquitectura del sistema

Se desarrolla un circuito en Proteus, esto permite conocer los requerimientos de cada uno de los elementos y muestra el funcionamiento de los sensores mediante una simulación, una vez que el programa se ha ejecutado de manera correcta, se considera un esquema eléctrico generado como base para

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

hacer el prototipo real sin ocasionar algún daño a los demás componentes físicos. Ver Figura No. 3

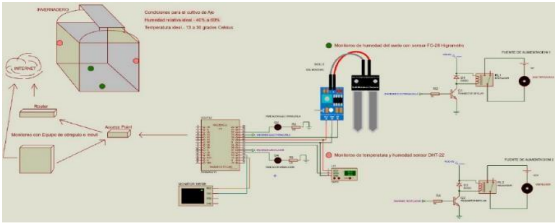


Figura No. 3. Arquitectura del proyecto en Proteus. (Elaboración propia).

Herramientas y lenguajes utilizados

En Appinventor tiene una plantilla principal (320*505 pixeles) con versión andriod desde una plataforma para Windows. Ver Figura No. 4.

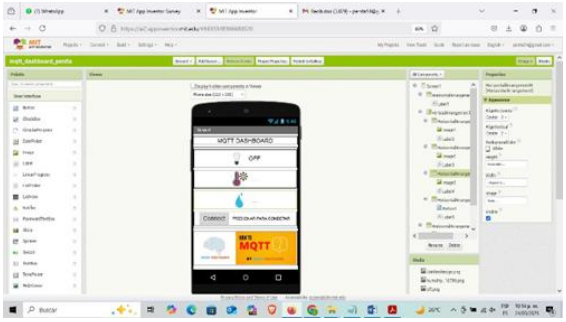


Figura No. 4. Platilla principal para control de monitoreo y captar en tiempo real las variables climatológicas del MQTT (Elaboración propia).

Para trabajar con appinventor de ios(Phone) con programación de bloques se necesita tener a licencia de Apple por una Año, con un costo $1789 pesos mexicanos, en donde appinventor de ios(Phone) nos permite descargar el certificado digital, y posteriormente en la cuenta Apple se tiene que certificar dicho documento para que posteriormente se cargue en la plataforma de appinventor ios(Phone) Ver Figuras No. 5 y 6.

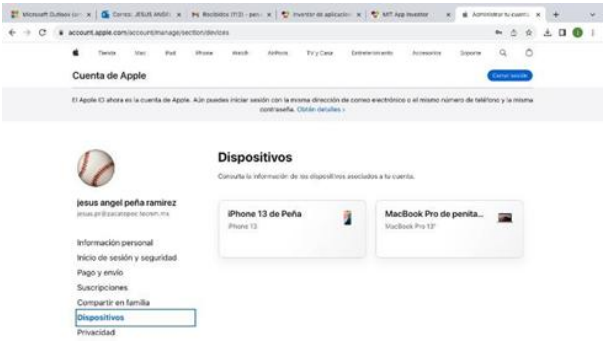


Figura. No. 5 Se puede usar móvil Phone, como se puede apreciar están enlazados en la cuenta Apple. (Elaboración Propia)

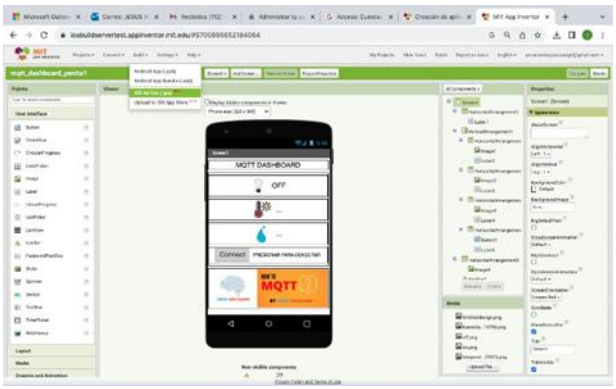


Figura. No. 6. Compilar y generar el ejecutable de ios (Phone). (Elaboración Propia)

DISCUSIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Este sistema móvil Penita fue desarrollado mediante programación de bloques App Inventor.

Este trabajo se utilizó un microcontrolador ESP32 se comunica mediante mensajes hacia el servidor MQTTX en la cual recibe todas las variables climatológicas (para saber su estado de salud de cada hortaliza) y a su vez la aplicación móvil Penita realiza el estado de monitoreo. Ver Figura. No 7.

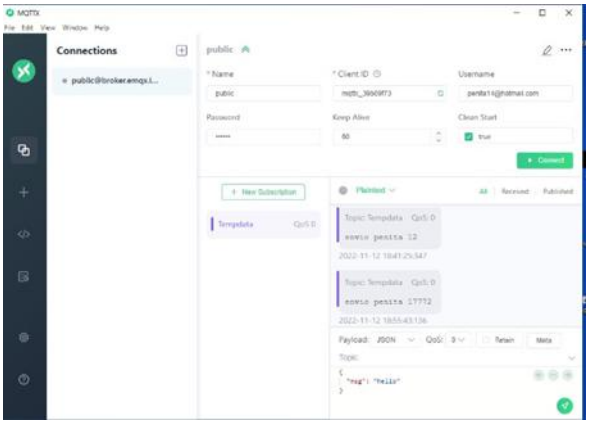


Figura. No. 7 MQTTX (Message Queing Telemetry Transport) (Elaboración Propia).

Para este trabajo de investigación es de tipo cuantitativa y cualitativa, usando técnicas como la entrevista, observación directa, encuestas y cuestionarios, para obtener toda la información acerca de la problemática que afecta en la zona sur del estado de Morelos con respecto a los cultivos de hortalizas.

Se debe analizar todo el contexto de la problemática, para dar inicio para la investigación, mediante los Componentes y su relación.

Que existe entre ellos, se efectuó la identificación del problema y su formulación. Se considera una actividad esencial fue la aplicación de un cuestionario a diversos productores agrícolas del sur del estado de Morelos. Cuya

finalidad de este cuestionario fue obtener información general de los cultivos, así como de las diversas actividades que se llevan a cabo en cultivos de hortalizas.

Para invernaderos. La información proporcionada por los encuestados aportó datos de juicio y de reflexión, sobre todo, los requerimientos funcionales, y características generales necesarios para el proceso de desarrollo del sistema inteligente automatizado. Con la encuesta aplicada se conformaba por 30 agricultores, de zonas rurales de los municipios de Zacatepec, Jojutla, Tlaquiltenango, Puente de Ixtla, Amacuzac Tlaltizapán.

Se considera un método de trabajo ágil y para controlar el desarrollo de software, se utilizó Método Rice, con respecto a esta metodología que se adapta perfectamente a este tipo de proyecto [6]. Esta metodología busca llevar mínimos de riesgos que se pueden presentar al ejecutar el proyecto en iteraciones menores a cuatro semanas, en cada iteración, que se realizan actividades como la planificación, análisis, diseño, codificación y resultados de pruebas, con esto se busca lograr el máximo progreso en el desarrollo al finalizar cada iteración. Esta metodología ágil tiene como objetivo primordial, generar software funcional, por encima de la documentación, con esto se tiene los incrementos en funcionales al cliente en menor tiempo. Ver Figura No. 8.

Figura. No. 8 Mostrar las variables climatológicas en tiempo real consola de Arduino y su vez en la aplicación móvil. (Elaboración Propia).

El diseño del sistema inteligente de monitoreo y control es mediante programación de bloques App Inventor y la conexión de hardware, hacia los dispositivos interconectados como el microprocesador ESP32 y sensores de temperatura.

El ESP32 contiene varios módulos y placas, totalmente programables y fáciles de utilizar. Las placas permiten leer entradas y generar señales de salida como sensor midiendo la temperatura del ambiente y convertirlo en una salida que permitirá que se active un extractor de calor y la activación de un ventilador [7,8].

Anteriormente, el microprocesador ESP32 es una de las mejores soluciones a considerar para proyectos de investigación este tipo. Con esta estructura se encuentra integrada, se pueden seleccionar herramientas como programación Espressif (IoT Development Framework), el entorno de programación de Arduino y App Inventor.

Se consideraron los dispositivos utilizados para la construcción para este proyecto, el sensor DHT22, el cual permitió medir la humedad y la temperatura relativa dentro de las áreas del invernadero. El código Arduino para comunicación entre servidor-cliente MQTT, usando Librería para sensores de temperatura (Adafruit_Sensor.h,DHT_U.h), protocolo cliente MQTT(PubSubClient.h), ArduinoJson.h, WiFi.h).

Para este trabajo de investigación se hace una petición MQTT (desde el lenguaje de programación Arduino), pero en lugar de retornar los mensajes (client.subscribe("Led1/status"); el servidor retorna todas las variables climatológicas para ver el estado del invernadero. [9,10].

Se hace peticiones mediante la programación Arduino utilizando la librería WiFi Client. Ver Figura. No. 9.

Para este proyecto se tiene rendimiento y costo bajo, ya que incorpora un termistor, sensor resistivo a la temperatura que permite medir el aire que circula en todo el invernadero y además un sensor de humedad, y proporciona también los datos a través de una señal digital.

Se tiene otro dispositivo de sensor de humedad en suelo FC-28 Higrómetro, este permite medir a través de 2 electrodos resistivos la humedad del suelo dentro del área del invernadero.

Este dispositivo es compatible con el microprocesador ESP32, en consecuencia, es monitorear el nivel de humedad en el suelo del invernadero.

Con este trabajo de investigación estos dispositivos ayudarían al riego de las hortalizas de manera automatizada solamente con agregar una válvula para esto. También se utilizó un relevador o relé, que es un dispositivo electromagnético y trabaja como un interruptor que permite controlar todo el circuito eléctrico para proteger de una sobrecarga de energía, como también se tiene bobina y un electroimán permite que los contactos abran o cierren circuitos eléctricos independientes [11].

En el momento que activa el relé mediante electromagnetismo se abre o se cierra un canal que transmite un voltaje y amperaje más alto posible. Sin embargo, el dispositivo Relé utilizado este mismo proyecto es el SRD-05VDC, el cual es utilizado para activar tres actuadores, como la bomba de riego y el extractor de humedad dentro del invernadero. Considerando las 20 Neuronas, 6 son para las entradas de mediciones, 10 Neuronas para procesar las funciones activaciones, 4 Neuronas de Salidas para controlar el Invernadero mediante Actuadores.

Para este proyecto se consideró un diseño del invernadero, se realizó una propuesta que tuviera dimensiones de 4m de largo x 4m de ancho y 2m de altura. Los materiales

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

necesarios para la construcción del invernadero son: a) estructura metálica PTR 19 Kit; b) depósito de plástico de 250 litros de agua; c) bomba recirculante de 60 litros por hora; d) tubos de CPVC de 1/2" x 6m; e) pegamento y lijas para pulir los tubos de CPVC [12,13].

Figura No. 9 código Fuente Microcontrolador Esp32 para la comunicación MQTTX y Detectar la temperatura de la hortaliza (Elaboración Propia).

En el sistema de aplicación móvil Penita se tiene varios módulos para que el agricultor pueda consultar todas las actividades planeadas, como también se permite consultar información en tiempo real acerca de los cultivos, agregando otra actividad donde se muestra notificaciones para que el agricultor con esta información puede ver sus tareas pendientes en el día.

Existe un proceso de riego sobre el cultivo, esto es una tarea automatizada, sin embargo, en ocasiones es necesario ajustar los parámetros según la época del año, por lo tanto, la aplicación móvil tiene la capacidad de programar un riego de manera remota mediante protocolo MQTT. [14] Ver figura No 10.

Figura No. 10. Módulos de actividades de aplicación móvil Penita. (Elaboración propia).

CONCLUSIONES

El Sistema inteligente móvil Penita para la detección de variables climatológicas mediante el protocolo MQTT, aporta de manera significativa un conocimiento sobre el uso de las tecnologías 4.0, específicamente en el Internet de las Cosas, ya que este proyecto, contribuye al conocimiento de cómo disminuir los tiempos y los costos de producción que tiene cada agricultor, derivados de tener un cultivo de hortalizas (tomate y jitomate). [15].

Además, con este tipo de proyectos, el agricultor le ayuda a mantenerse informado sobre las variables climatológicas dentro del invernadero. Hoy en día los agricultores del sur del estado de Morelos, están convencidos de usar nuevas estrategias, y nuevas tecnologías como el Internet de las cosas (IoT). El protocolo MQTT es más rápido que el protocolo HTTPS, con esto saber en tiempo los cambios inmediatos en la nube Firebase.

AGRADECIMIENTOS.

Agradecemos al Tecnológico Nacional de México por el apoyo institucional brindado, así como el Dr. Sócrates Espinoza Salgado de Zacatepec por su acompañamiento académico durante el desarrollo del proyecto.

BIBLIOGRAFÍA.

[1] Tovar, J., Santos, J., Badillo, A., & Rodríguez, G. (2019). Internet of Things applied to agriculture: Actual state. Universidad Católica. https://doi.org/10.21501/21454086.3253

[2] Ríos-Hernández, R. (2021). La agricultura de precisión: Una necesidad actual. Revista Ingeniería Agrícola, 11(1). ISSN: 2306-1545.

[3] Santana Ching, I., Cárdenas Rivero, A. J., Sosa López, R., & Portal Díaz, J. A. (2020). Monitoreo de parámetros ambientales en casas de cultivo a través de aplicación IoT. Revista Cubana de Transformación Digital, pp. 53– 62.

[4] Quiñones-Cuenca, V., González-Jaramillo, R., Torres, M., & Jumbo, M. (2017). Monitoring system of environment variables using a wireless sensor network and platforms of Internet of Things. Enfoque UTE, 8(1), 329–343. https://doi.org/10.29019/enfoqueute.v8n1.139

[5] Tzounis, A., Katsoulas, N., Bartzanas, T., & Kittas, C. (2017). Internet of Things in agriculture: Recent advances and future challenges. Biosystems Engineering, 164, 31–48. https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2017.09.007

[6] Martín del Brío, B., & Sanz Molina, A. (2017). Redes neuronales y sistemas difusos. Bonifacio Rama. Alfa Omega. https://catedras.facet.unt.edu.ar/intar/wp-content/uploads/sites/31/2017/04/4-Redes-Neuronales-Parte-III.pdf

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

[7] Morandini, M., Coleti, T., Oliveira, E., & Corrêa, P. (2021). Considerations about the efficiency and sufficiency of the utilization of the Scrum methodology: A survey for analyzing results for development teams.

[8] Santana Ching, I., Cárdenas Rivero, A. J., Sosa López, R., & Portal Díaz, J. A. (2020). Monitoreo de parámetros ambientales en casas de cultivo a través de aplicación IoT. Revista Cubana de Transformación Digital, pp. 53– 62.

[9] Ávila-Camacho, F. M., & Moreno-Villalba, L. M. (2022). Internet de las Cosas (IoT): Retos para las empresas en la era de la Industria 4.0. Boletín Científico de Ciencias Básicas e Ingenierías del ICBI.

[10] Ayaz, M., Ammad-Uddin, Z., Sharif, A., Mansour,

E. H. M., & Aggoune, H. M. (2019). Internet-of-Things (IoT)-based smart agriculture: Toward making the fields talk. IEEE Access, 7, 129551–129583. https://ieeexplore.ieee.org/document/8784034

[11] Elijah, O., Rahman, A., Orikumhi, C., Leow, C. Y., & Hindia, M. N. (2018). An overview of Internet of Things (IoT) and data analytics in agriculture: Benefits and challenges. IEEE Internet of Things Journal, 5(5), 3758–3773. https://doi.org/10.1109/JIOT.2018.2844296

[12] Elsevier. (2020). Computer Science Review, 39. https://doi.org/10.1016/j.cosrev.2020.100314

[13] Wen Tao, Zhao, L., Wang, G., & Liang, R. (2021). Review of the Internet of Things communication technologies in smart agriculture and challenges. Computers and Electronics in Agriculture, 189, 106352. https://doi.org/10.1016/j.compag.2021.106352

[14] Cedeño, R. (2023). Guía de iniciación a App Inventor. Creative Commons España. Recuperado de: https://codeweek.eu/docs/spain/guia-iniciacion-app-inventor.pdf

[15] Acosta, E. S. (2014). App Inventor: Programa de creación de aplicaciones móviles. ResearchGate. Recuperado de: https://www.researchgate.net/publication/264501836_A ppInventor_Programa

AUTORIZACIÓN Y RENUNCIA.

Los autores del presente artículo autorizan al TecNM/Instituto Tecnológico de Zacatepec para publicar el escrito en el libro electrónico del CITID 2025. El TecNM/ITZ o los editores no son responsables ni por el contenido ni por las implicaciones de lo que está expresado en el escrito.

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

SISTEMA MOVIL PARA EVALUAR LAS UNIDADES DE LOS ESTUDIANTES EN TRES PLANTELES EDUCATIVOS (CONALEP, UAEM, ITZ) MEDIANTE QR

J. Á. Peña-Ramirez[1]. M. Delgado Reyes[2], N.J. Ontiveros-Hernández[3], *S. Espinoza-Salgado[4], Yanet Castrejón Hernández[5]*

Dr.[1] Tecnológico Nacional de México. Instituto Tecnológico de Zacatepec, Departamento de Sistemas y Computación. Calzada Tecnológico No. 27 C.P. 62780 Zacatepec, Morelos, México (Tel: 7341069240; correo: jesus.pr@zacatepec.tecnm.mx.). MEd.[2] Tecnológico Nacional de México. Instituto Tecnológico de Zacatepec, Departamento de Sistemas y Computación. Calzada Tecnológico No. 27 C.P. 62780 Zacatepec, Morelos, México (Tel: 7341061386016; correo: miguel.dr@zacatepec.tecnm.mx.). Mc.[3] Tecnológico Nacional de México. Instituto Tecnológico de Zacatepec, Departamento de Sistemas y Computación. Calzada Tecnológico No. 27 C.P. 62780 Zacatepec, Morelos, México (correo: norma.oh@zacatepec.tecnm.mx.).
Dr.[4] Tecnológico Nacional de México. Instituto Tecnológico de Zacatepec, Departamento de Sistemas y Computación. Calzada Tecnológico No. 27 C.P. 62780 Zacatepec, Morelos, México, (correo: socrates.es@zacatepec.tecnm.mx.).
MI[5] Tecnológico Nacional de México. Instituto Tecnológico de Zacatepec, Departamento de Sistemas y Computación. Calzada Tecnológico No. 27 C.P. 62780 Zacatepec, Morelos, México, (correo: yanet.ch@zacatepec.tecnm.mx.).

Resumen: Este artículo presenta el desarrollo de Penita, una aplicación móvil multiplataforma orientada a mejorar el proceso de evaluación académica en tres instituciones educativas: CONALEP, UAEM e ITZ. La aplicación permite a los docentes registrar digitalmente las evaluaciones por unidad de cada estudiante mediante el escaneo de códigos QR, huella digital o llaves públicas, lo cual garantiza autenticidad y agilidad en el proceso. La herramienta fue diseñada utilizando entornos de programación por bloques como App Inventor y Trunkable, y se implementó en dispositivos Android e iOS. Además, se integraron servidores individuales por plantel con bases de datos MySQL y almacenamiento en la nube mediante Firebase, lo que permite la sincronización y consulta de información en tiempo real. Cada estudiante cuenta con una matrícula única que actúa como identificador, y puede autenticarse para firmar su evaluación desde su dispositivo móvil. Los resultados obtenidos demuestran que la aplicación facilita significativamente el control de firmas y evaluaciones, especialmente en grupos numerosos, reduciendo tiempos de procesamiento y mejorando la seguridad de los datos. Penita representa una solución práctica, escalable y segura para digitalizar procesos educativos que tradicionalmente se realizan de forma manual.

Palabras Clave: Encriptación, Huella digital, Llaves públicas, MySQL, QR, Servidor.

Abstract: This article presents the development of Penita, a cross-platform mobile application aimed at improving the academic evaluation process in three educational institutions: CONALEP, UAEM, and ITZ. The application allows teachers to digitally record student unit evaluations through the scanning of QR codes, fingerprints, or public keys, ensuring authenticity and efficiency in the process. The tool was developed using block-based programming environments such as App Inventor and Thunkable, and was implemented on both Android and iOS devices. Individual servers were integrated for each institution, with MySQL databases and cloud storage via Firebase, enabling real-time synchronization and data access. Each student has a unique enrollment number that acts as an identifier and can authenticate to sign their evaluation from their mobile device. The results show that the application significantly streamlines the control of signatures and evaluations, especially in large groups, reducing processing time and enhancing data security. Penita represents a practical, scalable, and secure solution for digitizing educational processes that are traditionally carried out manually.

Key word: Encryption, Fingerprint, Public Keys, MySQL, QR, Server

INTRODUCCIÓN

En la actualidad, las instituciones educativas enfrentan grandes retos para llevar un control eficiente y seguro de las actividades académicas, especialmente en entornos con una alta cantidad de estudiantes. El registro tradicional de asistencia y evaluación, basado en listas impresas o firmas manuales, resulta cada vez más obsoleto y vulnerable a errores o manipulaciones.

En los planteles educativos CONALEP, UAEM e ITZ, esta situación se manifiesta con mayor intensidad debido a la magnitud de los grupos, que pueden llegar hasta los 65 alumnos por clase. Esto ha hecho evidente la importancia de adoptar herramientas digitales que mejoren, de forma rápida y confiable, las tareas administrativas y el trabajo docente.

En respuesta, se desarrolló la aplicación móvil Penita, una solución multiplataforma que permite evaluar de manera digital las unidades temáticas de los estudiantes a través de sistemas de autenticación como huella digital, códigos QR y llaves públicas. Esta aplicación, diseñada tanto para Android como para iPhone, integra tecnologías como App Inventor, Trunkable, bases de datos MySQL y servicios en la nube como Firebase. [1] Se desarrolla una librería API para la autenticación de hardware y software sobre la huella digital del dispositivo móvil [2] de cada estudiante, mediante su matrícula [3].

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

La propuesta tiene como finalidad facilitar el control académico en los tres planteles mencionados, asegurando que cada estudiante pueda firmar sus evaluaciones de manera personal, segura y rápida. Además, permite al docente verificar, en tiempo real, las firmas registradas y generar reportes automatizados.
Con esta herramienta se busca no solo modernizar los métodos de evaluación, sino también fortalecer la seguridad, accesibilidad y eficiencia del proceso educativo. [4]

DESARROLLO

Arquitectura general del sistema

El sistema Penita fue concebido como una solución integral para la evaluación digital de estudiantes, compuesto por dos aplicaciones móviles (una para docentes y otra para estudiantes), así como tres servidores independientes correspondientes a cada plantel participante (CONALEP, UAEM, ITZ). El sistema permite la gestión, autenticación y almacenamiento de evaluaciones mediante tecnologías de identificación como códigos QR, huella digital y llaves públicas (Ver Figura 1).

Figura 1. Plantillas para cada plantel educativo

Herramientas y tecnologías empleadas

Para llevar a cabo el desarrollo, se hizo uso de herramientas específicas que permitieron dar forma al sistema:

- App Inventor y Trunkable Web para la programación visual por bloques.
- Firebase para almacenamiento en la nube. [5]
- Bases de datos MySQL 8.2 para gestionar información estructurada.
- XAMPP como servidor local para la generación de llaves públicas.
- API personalizada para autenticación de usuarios mediante matrícula y huella digital.
- Dispositivos móviles Android e iOS como plataformas de ejecución.

Aplicación para docentes

Esta aplicación permite al docente:

- Evaluar unidades de aprendizaje por estudiante y grupo.
- Escanear el código QR del alumno y registrar su firma digital.
- Consultar y modificar registros.
- Subir evidencia (foto y QR) al servidor Firebase.

Además, el docente puede activar o bloquear el acceso de los estudiantes al sistema. Cada escuela cuenta con su propia plantilla personalizada y clave de acceso.

Aplicación para estudiantes

Cada estudiante tiene acceso a su propia aplicación personalizada, donde puede:

- Iniciar sesión con matrícula y contraseña.
- Firmar su evaluación mediante huella digital o cargando una llave pública.
- Consultar el total de firmas registradas.
- Visualizar su información académica y datos personales.

La autenticación biométrica se realiza desde el sensor del dispositivo móvil y es validada en tiempo real por el servidor correspondiente.

Sistema móvil Android penita

El sistema se compone de la siguiente manera:

a) Bloquear o desbloquear la aplicación del estudiante
b) Operaciones de alta, bajas, consultas y reportes (Ver Figuras 2 y 3) (matrícula, nombre, materia, contraseña, grupo, fecha, tema, hora, imagen QR, imagen foto digital, firmas, total firmas, aviso de autorización de que puede firmar y participación cada estudiante). [6]
c) Evaluar las unidades para firmar.
d) Subir a la nube (Firebase) Qr Y Foto digital del estudiante base de datos (firebase).
e) Escanear QR de cada estudiante donde debe aparecer foto digital del estudiante y asignar las firmas de cada estudiante. También verifica si tiene firmas asignadas el estudiante.

Asimismo, se desarrollaron reportes automáticos que recopilan las firmas registradas por cada estudiante, incluyendo datos como matrícula, grupo, materia, fecha y hora, como se muestra en la Figura 3. Esta funcionalidad permitió a los docentes mantener un control detallado y En la Figura 4 se puede ver el proceso de firma mediante llave pública [7].

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

Figura No. 2 Operaciones altas, bajas, modificaciones y reportes.

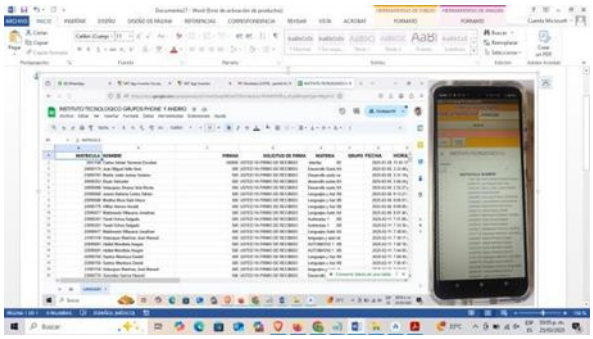


Figura. No. 3 Se generan un Reporte todas las firmas de cada estudiante

Metodología

Este proyecto se desarrolló bajo un enfoque de investigación tecnológica aplicada, con el objetivo de resolver una problemática concreta en el ámbito educativo mediante el uso de herramientas digitales.

La metodología utilizada fue de tipo experimental, con diseño iterativo incremental.

Se diseñaron y probaron versiones iniciales del sistema Penita en los planteles CONALEP, UAEM e ITZ, y se realizaron ajustes conforme a las observaciones de docentes y estudiantes.

Se trabajó con una muestra de aproximadamente 120 estudiantes y 6 docentes, seleccionados por disponibilidad y colaboración institucional.

Las herramientas utilizadas incluyeron: App Inventor, Trunkable, Firebase, bases de datos MySQL, servidores XAMPP, y dispositivos móviles Android/iOS. La validación se realizó mediante pruebas funcionales, análisis de respuesta del sistema y entrevistas estructuradas a usuarios para evaluar usabilidad, seguridad y confiabilidad.

DISCUSIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Durante la implementación del sistema Penita, se realizaron pruebas funcionales tanto en dispositivos Android como iOS, utilizando las versiones diseñadas para estudiantes y docentes.

Uno de los logros más relevantes fue la posibilidad de autenticar a los usuarios sin necesidad de huella digital, gracias al uso de llaves públicas encriptadas.

Figura No. 4 Firmar con llave pública.

Esta alternativa fue particularmente útil en dispositivos que no contaban con lector biométrico.

Actualizado del avance por unidad de cada alumno. Para la generación de llaves públicas, se utilizó un servidor local con XAMPP sobre el puerto 80, en combinación con scripts PHP encargados del proceso de encriptación y desencriptación.

La base para esta operación fue una llave privada institucional, garantizando la seguridad de la información (Figura 5). Además, se creó un archivo APK personalizado para cada estudiante, conteniendo sus datos personales como matrícula, nombre y grupo (CONALEP, UAEM e ITZ) [8].

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

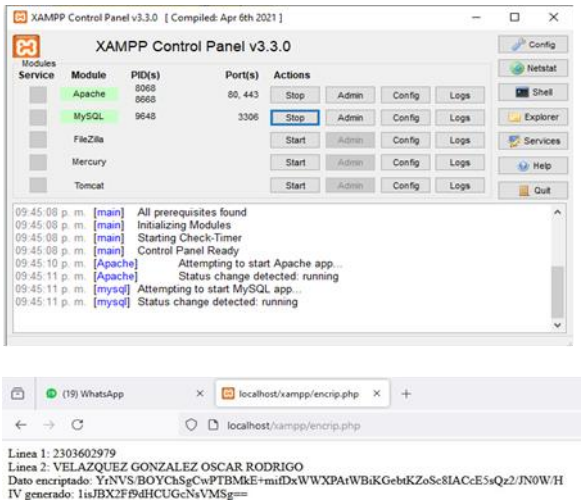


Figura. 5. Creación de llaves publicas mediante xamp localhost puerto 80

La autenticación de los estudiantes se realiza a través de servidores web, que almacenan y validan los datos enviados por cada aplicación móvil. La Figura 6 muestra los tres sistemas de hosting correspondientes a cada institución.

Por otro lado, la aplicación Android cuenta con un módulo de autenticación biométrica mediante huella digital, validando la identidad del estudiante y asociando sus datos con un token único que se sincroniza en la nube (Figura 7) [11].

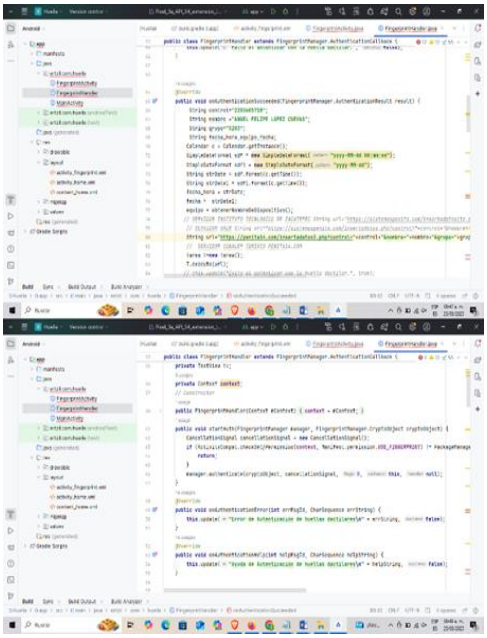


Figura. 6 Tres sistemas hosting web (CONALEP, UAEM, ITZ)

Figura. No 7 Ejecución de la aplicación apk de una estudiante ITZacatepec

Cada aplicación estudiantil permite registrar firmas digitales mediante un botón que se activa al colocar el dedo en el lector o mediante una llave pública.

El sistema registra el modelo del dispositivo, nombre del usuario, fecha, hora y grupo, y almacena esta información en Firebase.

Para acceder al sistema, el estudiante debe ingresar su matrícula y contraseña; una vez autenticado, puede consultar su historial de firmas, escanear su propio QR y subir su foto digital como evidencia [10].

En el caso de la versión iPhone, desarrollada con Trunkable Web, se generó una aplicación específica para estudiantes. Esta versión permite iniciar sesión con matrícula y contraseña, subir su llave pública a los servidores (Hostingers, Inmasof) y consultar el total de firmas registradas.

Como se muestra en la Figura 8, al escanear el QR del estudiante, el docente puede visualizar la foto digital del alumno y verificar si ya se le ha asignado una firma, evitando duplicaciones.

Figura. 8. Al Escanear Qr presenta foto digital (CONALEP, UAEM, ITZ)

El sistema web desarrollado con Trunkable opera mediante suscripciones mensuales, las cuales permiten habilitar el diseño completo de las pantallas y proteger los datos sensibles del estudiante, ocultando la URL visible en el dispositivo (Figura 9) [7].

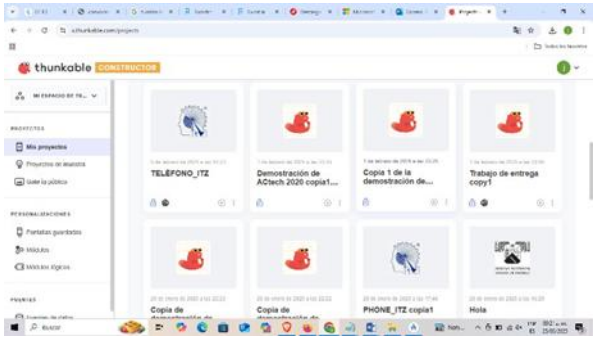


Figura. 9 Sitio web programación web trunkable de los tres planteles CONALEP, UAEM, ITZ.

Cada estudiante, al firmar, puede sumar sus calificaciones individuales y enviarlas automáticamente a la base de datos en la nube (Figura 10).

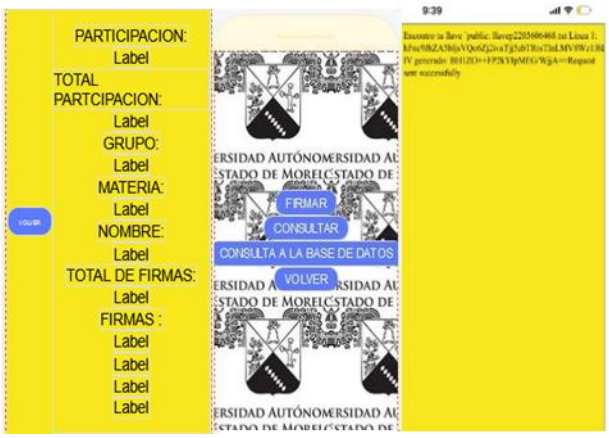


Figura. 10 Móvil iPhone penita CONALEP, UAEM, ITZ

Finalmente, es importante destacar que para utilizar App Inventor y Trunkable, los usuarios requieren una cuenta de correo Gmail.

Estas herramientas, desarrolladas originalmente por el MIT y adoptadas por Google, fueron fundamentales para la creación de ambas versiones móviles del sistema Penita, dirigidas a estudiantes y docentes de los tres planteles educativos (Figura 11) [8,9].

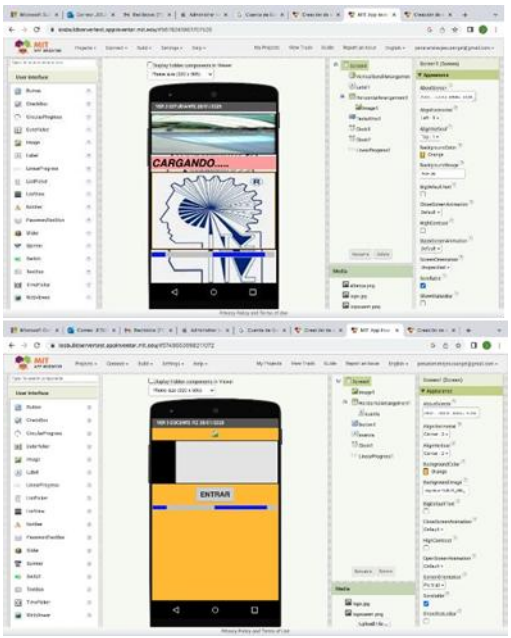


Figura 11 herramienta en línea para programar dispositivos Phone (Docente y Estudiante).

Seguridad y confiabilidad del sistema

Uno de los pilares del sistema Penita es la seguridad en la autenticación de los usuarios. La combinación de métodos biométricos (huella digital) con llaves públicas encriptadas proporciona una doble capa de protección, reduciendo la posibilidad de suplantación de identidad.

La generación y validación de llaves se ejecuta mediante algoritmos PHP en un entorno XAMPP seguro. Además, cada transacción queda registrada con sello de tiempo (timestamp) y token único.

Firebase proporciona control de acceso, cifrado SSL y backups automáticos, lo cual garantiza la integridad y disponibilidad de la información.

El sistema se diseñó bajo principios de privacidad: no almacena datos sensibles en los dispositivos, sino que opera con autenticación remota y almacenamiento centralizado.

Limitaciones y trabajos futuros

Aunque el sistema Penita ha demostrado ser funcional y adaptable en los planteles participantes, aún presenta ciertas limitaciones que pueden abordarse en desarrollos futuros. Entre ellas, se encuentran las restricciones de compatibilidad con algunos modelos de dispositivos móviles, la dependencia de conexión estable a internet y la necesidad de capacitación inicial para usuarios con poca experiencia digital.

Se plantea como trabajo futuro la implementación de un panel Web administrativo centralizado, la integración de análisis estadístico de desempeño estudiantil, así como la expansión del sistema a otras instituciones mediante convenios de colaboración educativa. [10,9].

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

A manera de síntesis, la Tabla 1 resume las principales diferencias entre el método tradicional de evaluación y la solución digital propuesta:

Tabla 1 proceso tradicional vs el proceso con Penita

Aspecto	Método tradicional	Sistema Penita
Registro de firmas	Manual, en papel	Digital, en la nube
Validación de identidad	Visual, poco confiable	Huella digital / llave pública
Generación de reportes	Manual, toma tiempo	Automática, en tiempo real
Accesibilidad del sistema	Solo presencial	Remoto, desde cualquier lugar
Seguridad	Riesgo de falsificación	Encriptación

Este comparativo evidencia el impacto positivo que puede tener la incorporación de tecnologías móviles en el ámbito educativo.

Impacto educativo del sistema Penita

La implementación del sistema Penita no solo mejoró la eficiencia de los procesos administrativos, sino que también fortaleció la cultura digital de los estudiantes. [11,12].

Al participar activamente en la firma digital de sus evaluaciones, los alumnos adquirieron conciencia sobre el valor de la seguridad digital, la identidad electrónica y el uso responsable de sus credenciales académicas.

Para los docentes, la automatización de reportes y la validación en tiempo real representó una ventaja significativa frente a métodos manuales.

El sistema redujo el estrés operativo y permitió concentrarse en la labor formativa más que en tareas repetitivas. Además, la adaptabilidad del sistema a dispositivos móviles comunes y plataformas en la nube lo convierte en una solución replicable en otras instituciones con recursos limitados.

CONCLUSIONES

El desarrollo del sistema móvil Penita logró cumplir con el objetivo principal de facilitar la evaluación digital de unidades de aprendizaje en tres instituciones, mediante el uso de tecnologías accesibles, seguras y adaptadas a distintos dispositivos móviles. [13,14].

Gracias a la implementación de autenticación por huella digital, códigos QR y llaves públicas, se garantizó la integridad del proceso de firma [15], eliminando la necesidad de documentos físicos o procesos manuales propensos a errores. Los resultados demostraron una mejora en la eficiencia del tiempo de evaluación, así como una mayor organización y trazabilidad de la información por parte del personal docente.

Se recomienda continuar con el fortalecimiento del sistema mediante funciones avanzadas como análisis estadístico automatizado, visualización gráfica del progreso de los estudiantes y mayor integración con plataformas institucionales.

Penita representa un ejemplo claro de cómo la tecnología puede mejorar los procesos educativos, promoviendo una gestión más ágil, segura y confiable.

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan su agradecimiento al Tecnológico Nacional de México, campus Instituto Tecnológico de Zacatepec, por proporcionar el apoyo institucional, así como los espacios y recursos tecnológicos que hicieron posible la realización de este proyecto.

De igual forma, se reconoce la valiosa colaboración del Dr. Sócrates Espinoza Salgado, integrante del área de Ingeniería en Sistemas Computacionales y de la Maestría en Ingeniería, cuyas aportaciones técnicas y metodológicas fueron fundamentales para la consolidación del sistema Penita.

BIBLIOGRAFÍA

[1] MIT App Inventor. (2024). Guía oficial de usuario. Massachusetts Institute of Technology. Recuperado de: https://appinventor.mit.edu/explore/ai2/support

[2] Rojas, M. A. & Zúñiga, P. H. (2017). Autenticación biométrica en dispositivos móviles Android. Revista de Ingeniería Informática y Sistemas, 10(2), 45–52.

[3] Android Developers. (2024). Android Studio: Introducción. Google Developers. Recuperado de: https://developer.android.com/studio/intro?hl=es-419

[4] Peña, R. (2021). Evaluación digital en entornos escolares: un enfoque basado en tecnologías móviles. Revista Iberoamericana de Tecnología Educativa, 17(3), 101–116.

[5] Firebase. (2024). Firebase Authentication. Google Developers. Recuperado de: https://firebase.google.com/docs/auth

[6] Wolber, D. (2024). App Inventor y el componente web. Pura Vida Apps. Recuperado de: https://puravidaapps.com/sendmailPHP.php

[7] Celdas, J. (2024). Algoritmo de Encriptación para Imágenes a Color Basado en Sistemas Caóticos. Revista Scielo Colombia. Recuperado de: http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext& pid=S0121750X2020000200144&lang=es

[8] Red.es e INTEF. (2019). Creando aplicaciones para móviles Android con App Inventor 2. Ministerio de Educación y Formación Profesional, España. Recuperado de: https://intef.es/wp-content/uploads/2019/03/MITApp-Inventor-2.pdf

[9] Martínez, J. (2020). Diseño y desarrollo de aplicación móvil punto de venta [Tesis de licenciatura, IPN]. Repositorio Digital IPN. Recuperado de: https://tesis.ipn.mx/jspui/bitstream/123456789/18454/1/Dise%C3%B1o%20y%20desarrollook.pdf

[10] Menéndez, F. A. (2024). Revista de Educación Matemática, Epsilon 91(6). Recuperado de: https://thales.cica.es/epsilon/sites/thales.cica.es.epsilon/files/[field_volumenformatted]/epsilon91_6.pdf

[11] Universidad Nacional Autónoma de México. (2023). El cifrado web SSL/TLS. Revista Seguridad Bimestral, núm. 10. Recuperado de: https://revista.seguridad.unam.mx/numero-10/el-cifrado- web-ssltls

[12] Almazán, C. J. (2018). Implementación de sistemas de autenticación biométrica en ambientes educativos virtuales [Tesis de maestría, Universidad Autónoma de Zacatecas].

[13] Cedeño, R. (2023). Guía de iniciación a App Inventor. Creative Commons España. Recuperado de: https://codeweek.eu/docs/spain/guia-iniciacion-app- inventor.pdf

[14] Acosta, E. S. (2014). App Inventor: Programa de creación de aplicaciones móviles. ResearchGate. Recuperado de: https://www.researchgate.net/publication/264501836_A ppInventor_Programa

[15] Busquet, L. (2006). Las cadenas musculares. Tronco, columna cervical y miembros superiores (8ª ed.). Barcelona: Paidotribo.

AUTORIZACIÓN Y RENUNCIA.

Los autores del presente artículo autorizan al TecNM/Instituto Tecnológico de Zacatepec para publicar el escrito en el libro electrónico del CITID 2025. El TecNM/ITZ o los editores no son responsables ni por el contenido ni por las implicaciones de lo que está expresado en el escrito.

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

SISTEMA MOVIL PENITA QUE PERMITE REALIZAR DESCUENTOS MEDIANTE QR. EN UNA CADENA HOTELERA

J. Á. Peña-Ramirez[1]. M. Delgado Reyes[2], N.J. Ontiveros-Hernández.[3] .*S. Espinoza-Salgado*[4]

Dr.[1.] Tecnológico Nacional de México. Instituto Tecnológico de Zacatepec, Calzada Tecnológico No. 27 C.P. 62780 Zacatepec, Morelos, México (Tel: 7341069240; e-mail: penita14@gmail.com, jesus.pr@zacatepec.tecnm.mx.).
MEd.[2.] Tecnológico Nacional de México. Instituto Tecnológico de Zacatepec, Calzada Tecnológico No. 27 C.P. 62780 Zacatepec, Morelos, México (Tel: 7341061386016; e-mail:, miguel.dr@zacatepec.tecnm.mx.).
Mc.[3] .Tecnológico Nacional de México. Instituto Tecnológico de Zacatepec, Calzada Tecnológico No. 27 C.P. 62780 Zacatepec, Morelos, México (e-mail: norma.oh@zacatepec.tecnm.mx.)
Dr.[4.] Tecnológico Nacional de México. Instituto Tecnológico de Zacatepec, Calzada Tecnológico No. 27 C.P. 62780 Zacatepec, Morelos, México, (e-mail: socrates.es@zacatepec.tecnm.mx.)

Resumen: En este artículo presenta una solución tecnológica a través de dos sistemas móvil penita para Andriod y Phone el primer sistema es para el corporativo de la empresa hotelera, en cual tiene todos los permisos como administrador, permitiendo realizar operaciones(altas, bajas, consultas, reportes, actualizaciones, generar y borrar Qr) y obtener descuento mediante Qr, y el segundo es para todas la cadenas hoteles en cualquier parte del mundo, ambos sistemas realizan transiciones en tiempo real, en este los gerentes está limitados para hacer menos operaciones, su función es generar, escanear Qr para descuento y subir a la nube (firebase y hojas cálculos como reportes finales) la información del Qr de los clientes.

Palabras clave: Qr, Protocolo, Https,Servidor mysql, hotels, Descuento, Hoteles, Arduino.

Abstract*:* In this article, a technological solution is presented through two mobile penita systems for Andriod and Phone. The first system is for the hotel company's corporate office, in which it has all the permissions as an administrator, allowing operations to be carried out (registrations, cancellations, queries, reports, updates, generating and deleting Qr) and obtaining a discount through Qr, and the second is for all hotel chains anywhere in the world, both systems carry out transitions in real time, in this the managers are limited to do fewer operations, their function is to generate and scan Qr for a discount. And upload customer Qr information to the cloud (firebase and spreadsheets as final reports). Customer Qr information.

Keywords: Qr, Protocol, Https, Mysql Server, Discount, hotels, Arduino

INTRODUCCIÓN

Este trabajo de investigación se utilizó la metodología cuantitativa y cualitativa realizando entrevistas, encuestas y cuestionarios sobre la calidad de servicio. Las empresas que manejan una cadena de hoteles están diseñadas para manejar un tipo de segmento de mercado en la cual viajen por diferentes motivos y necesitan descansar. Este trabajo de investigación es tomar en cuenta la calidad del servicio de hospedaje, entre otros los descuentos para que los turistas evalúen los procesos y la cadena de hoteles de cada empresa se enfoquen en la satisfacción del cliente de acuerdo a sus necesidades. Si tiene un funcionamiento de las empresas hoteleras depende de los trabajadores que las conozcan las expectativas de cada uno clientes y cada huésped que ingresa al hotel perciba la calidad de los servicios brindados, este análisis permite ver las deficiencias, para determinar si existe el nivel de satisfacción en el servicio que brinda a cada uno de los usuarios, en el marco sobre modelo de investigación que mide la calidad del servicio que perciben cada uno de los clientes. Se basa en encuestas o cuestionarios que comparan las expectativas de cada uno los clientes con su experiencia real [1]. La continuidad en las mejores actividades que tienen relación directa por cada usuario contribuirá para tener una nueva visión del servicio ofrecido, de tal manera que cada proceso mejore y así obtener satisfacción en el cliente. En los resultados obtenidos se evidencia que las perspectivas analizadas dan un panorama global de la calidad de los servicios hoteleros de segunda categoría teniendo deficiencias en la confiabilidad y capacidad de respuesta hacia los usuarios, mismas que se pueden mejorar estandarizando y gestionando los procesos [2].

En este trabajo de investigación se propone dos sistemas móviles denominado “penita”. Se clasifica en dos partes la primera parte es el corporativo de la empresa hotelera se encarga controlar operaciones todas las operaciones de la segunda parte es la gerencia.

DESARROLLO

Este sistema móvil penita Andriod y Phone se realizó mediante programación de bloques App Inventor se generó dos aplicaciones móviles (Cooperativo y gerencia).

Sistema móvil Andriod y Phone (Corporativo).

La primera aplicación móvil tiene todos los permisos principales como administrador se presenta las siguientes funciones; 1.- Enviando N Tokens(Contraseña) hacia la segunda aplicación(gerencia), con esto para ayudar la seguridad de ambas aplicaciones,2.-Tambien permite generar nuevas contraseñas y enviarla a la segunda aplicación(gerencia) este sucede cuando se cambia por un nuevo personal de gerencia,3.-Permite generar operaciones(altas, bajas, consultas, actualizaciones,

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

operaciones con Qr, y reportes) de nuevo registro de perfiles cuyo propósito es autorizar un determinado porcentaje de descuento de acuerdo el nivel de perfil del usuario, por ejemplo el rol del administrador tendrá 0 a 100% de descuento hacia los clientes, y el rol de un gerente es autorizar un descuento 50 a 100%, también permite generar N perfiles con autorización de diferentes descuentos entre 0 a 50% ,4.- Permite generar y compartir Qr,5, también permite realizar el registro llegada (check-in) y salida (check out) del cliente, en base la fecha y hora.100% de descuento hacia los clientes, y el rol de un gerente es autorizar un descuento 50 a 100%, también permite generar N perfiles con autorización de diferentes descuentos entre 0 a 50% ,4.- Permite generar y compartir Qr,5, también permite realizar el registro llegada (check-in) y salida (check out) del cliente, en base la fecha y hora.

Sistema móvil Andriod y Phone(Gerente).

Esta segunda aplicación móvil es únicamente para los gerentes de la cadena de hoteles en la cual está limitada los permisos. A continuación, se presenta las siguientes funciones; 1.- Permite generar Qr para el registro llegada (check-in) y salida (check out) del cliente, en base la fecha y hora. 2.-Permite compartir Qr hacia otras aplicaciones como correo, web.whatsapp.com y otros.3.- Permite Escanear Qr para obtener la información; Quien en el responsable de generar Qr incluyendo el porcentaje de descuento de acuerdo el perfil de usuario, registro llegada (check-in) y salida (check out) del cliente, en base la fecha, hora y si esta vencida de fecha dicho Qr, al momento de Escanear dicho Qr manda un mensaje de ya no es válido y está fuera de tiempo.4.- Pero si el Qr está en rango de fecha aceptable se podrá registrar en la nube google sites en una hoja de cálculo, en se momento se elimina de forma automática dicho Qr para no ser usado nuevamente. Para el desarrollo de estas aplicaciones móviles se programó mediante bloques App Inventor entre ellos hay bloques para comunicación del manejador de MySQL, Firebase y hosting Web.

Se necesita una cuenta gmail.com para entrar App Inventor, Existe dos herramientas en línea que permite crear aplicaciones para dispositivos Android y Phone.Ver Figura No.1 y No.2. Fue creada originalmente por el MIT (Instituto Tecnológico de Massachusetts) y posteriormente adoptada por Google. Dos sistemas móviles una para el corporativo y el otro para los gerentes [3].

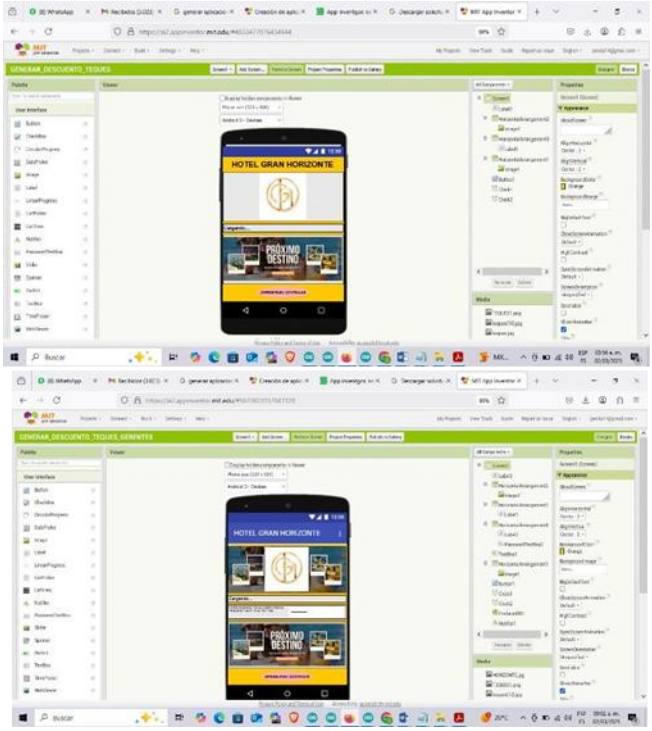


Figura No. 1 herramienta en línea para programar dispositivos Android para el corporativo y gerencia.

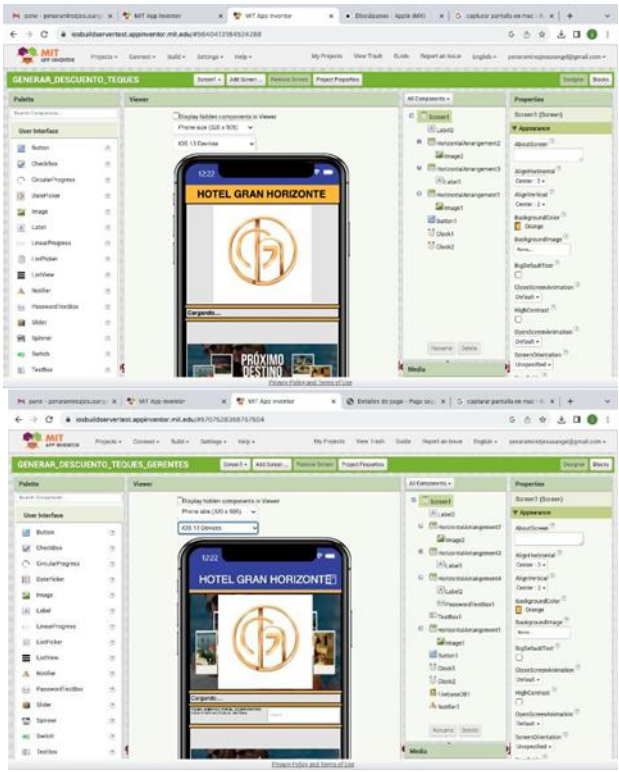


Figura No. 2 Herramienta en línea para programar dispositivos Phone para el corporativo y gerencia (Elaboración propia)

La herramienta en línea para el sistema móvil corporativo presenta la programación en bloques para registrar la fecha

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

(check) límite para asignar el Qr al cliente. Ver Figura No. 3.

Figura No. 3 Herramienta en línea para asignar límite de fecha el Qr mediante programación de bloques.(Elaboración Propia).

App Inventor es una herramienta que esta línea que permite desarrollar sistema móvil para la gerencia, a continuación se presenta la programación en bloques para escanear, mostrar la información del QR de todos los clientes, en cual se les otorgo un porcentaje de descuento y subir a la nube firebase, dicha información que contiene el perfil del usuario quien otorgo dicho descuento, el rango de fecha que tendrá validez el Qr, en la cual es eliminada de forma automática el Qr para posteriormente no sea usado nuevamente. Unas de las funciones que tienes esta aplicación es que recibe un *TOKEN* de forma aleatoria por parte de la aplicación corporativo por seguridad para validar su autenticación como gerente en su hotel correspondiente. [4] Ver Figura No. 4.

Metodología

Este proyecto se desarrolló bajo un enfoque de investigación tecnológica aplicada, con el objetivo de resolver una problemática concreta en el ámbito de hotelería mediante el uso de herramientas digitales.

La metodología utilizada fue de tipo experimental, con diseño iterativo incremental.

Cada vez que se genera un nuevo Qr incrementa el contador, cuando es utilizado para el descuento dicho Qr. Es eliminado esto ayuda para que el cliente no lo vuelva utilizar en la cadena hotelera.

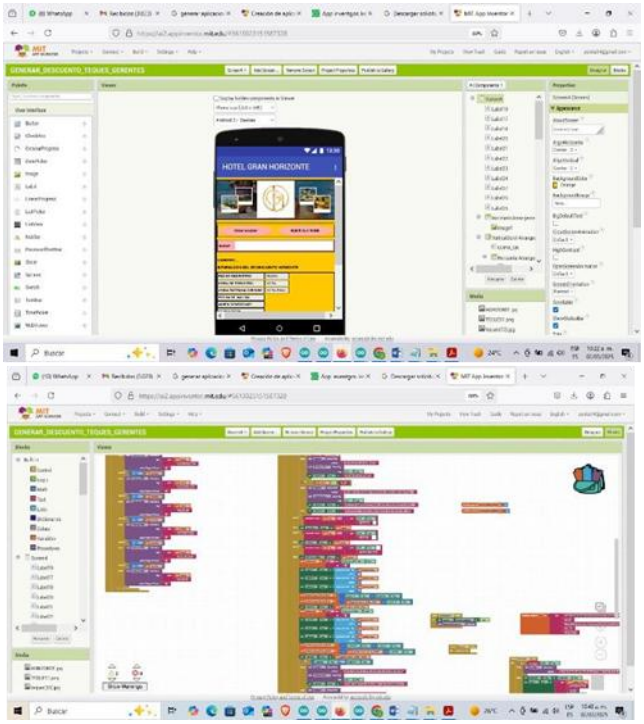


Figura No.4 Herramienta en línea de bloques para obtener información del Qr y subir a la nube firebase. (Elaboración Propia)

DISCUSIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Los resultados obtenidos que se encuentra en ejecución en tiempo real para el sistema móvil corporativo se presentan todos los permisos como administrador para realizar operaciones (altas, bajas, consultas, actualizaciones, consultar, generar y borrar Qr). Para dar de alta un usuario con perfil de gerente con descuento 0 a 50% ,o más bien dar de alta con perfil de corporativo con descuento de 0 a 100%, también permite registrar N nombres, N perfiles deseados y otros.

Se puede realizar operaciones, modificaciones de cambio de fecha del Qr. Una característica principal de la aplicación del corporativo que permite cambiar las contraseñas nuevas y TOKENS si algún de los gerentes ya no labore la empresa hotelera y no tenga acceso a la dicha aplicación de gerencia. [6]Ver Figura No 5.

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

Figura No.5 Realiza las operaciones para el corporativo. (Elaboración Propia)

También permite consultar el usuario, numero de tarjeta, usuario y contraseña cuyo propósito es saber quién es el responsable de generar Qr con su respectivo porcentaje de descuento [7]. Ver Figura No.6.

Figura No.6 Realiza las operaciones para el corporativo, las consultas correspondientes (Elaboración Propia).

Para genera el Qr se necesita establecer una fecha de limite, si el cliente no usa dicho Qr, y se pasa la fecha la gerencia escanea el Qr del cliente, se tendrá que generar un nuevo Qr al cliente, como se puede observar está parpadeando el botón rojo es una alerta roja para que el administrador del corporativo genere los TOKENS y dicho TOKEN es recibida por la aplicación de gerencia y se pueda utilizar por seguridad ver Figura No. 7.

Figura No.7 Establece el rango límite de fecha para tenga validez el Qr el corporativo, considerando (Elaboración Propia).

Por otro lado, el corporativo tiene la capacidad de generar Qr y compartir en otras aplicaciones como puede ser correo, web.whatsapp.com y otros. Ver Figura No. 8.

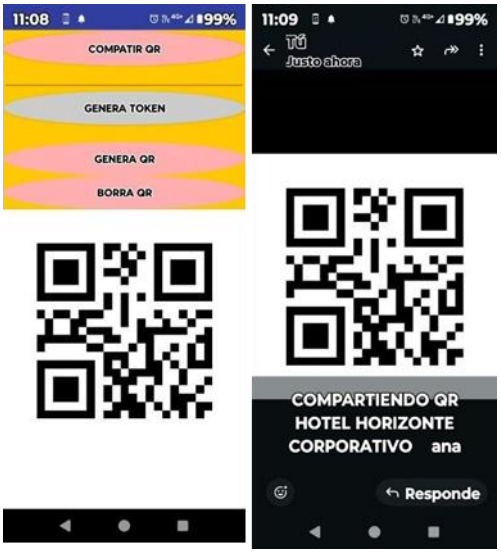


Figura No.8 Genera, comparte y borra el Qr el corporativo, considerando una fecha límite. (Elaboración Propia).

Por otro lado, como puede observar la siguiente Figura No. 9 la aplicación de la gerencia recibe el TOKEN por parte de la aplicación del corporativo por seguridad, y su vez el gerente podrá entrar dicha aplicación con los datos siguientes como el número de tarjeta, usuario y Contraseña, en esta aplicación es limitado para hacer menos operaciones [8, 9, 10].

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

Figura No.9 La gerencia recibe el TOKEN enviado por el corporativo (elaboración Propia).

Una vez que el gerente se autentifico con el TOKEN procede generar el Qr de descuento, pero ahora con una fecha atrasada cuyo propósito se escanea y no tendrá validez dicho Qr. Ver Figura No. 10.

Figura No.10 Proceso para genrar un Qr no valido (Elaboracion Propia).

Una vez escaneado el Qr se obtiene la información correspondiente pero esta vez manda el mensaje de ya se fue caducado la fecha del Qr.y su vez va a ser eliminado cuando se sube a la nube firebase y se crea un reporte por este descuento. Esta operación muestra información fecha de registro, hora de registro, entrada del check-out, fecha de salida, quien es el responsable de generar el Qr. Cuanto es el porcentaje de descuento, como también si está autorizado y su perfil. Ver Figura No.11.

Figura No.11 Caduco el Qr por la fecha esta fuera de rango. (elaboración Propia).

El siguiente resultado es generar un Qr valido con un rango de fecha aceptable para proceder el descuento de 15%. Ver Figura No. 12.

Figura No.12 Generación de Qr valido esta un rango de fecha.(elaboración Propia).

La siguiente prueba de resultado manda el mensaje de que el Qr está en una fecha futura valida, el gerente procede a realizar el descuento del 15%, con perfil de gerente, con el usuario denominado "ANA", y su llegada check-in es 15:00 horas pm. Hacia el hotel que va a ser hospedado el cliente. Ver Figura No. 13.

Se utilizó un servidor gratuito firebase para subir los datos del Qr en tiempo real, como los TOKENS que permite validar la seguridad comunicación de ambas aplicaciones. Ver Figura No.15.

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

Figura No.13 Generación de QR valido está un rango de fecha. (elaboración Propia).

para finalizar este trabajo de investigación se presenta un reporte general en googlesites en la hoja de cálculo en línea en la cual nos permite programar un script con los campos como numero de Qr, fecha de registro, hora de registro, entrada del check-in, fecha de salida check-out, quien es el responsable de generar el Qr. Cuanto es el porcentaje de descuento, como también si está autorizado de acuerdo con su perfil. [11]. Ver Figura No. 14.

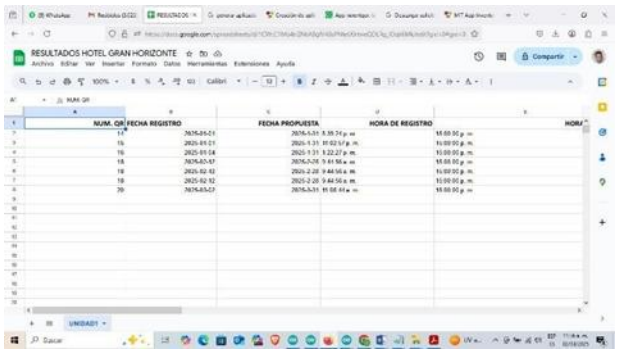


Figura No.14 Generación de reporte en googlesites hoja de cálculo .(elaboración Propia).

Figura No.15 Datos en tiempo Real con Firebase se almacena los datos del Qr .(elaboración Propia).

El corporativo para realizar todas las operaciones (altas, bajas, actualizaciones, operaciones con QR) en un servidor de paga Hostingers.com, donde se registra el perfil, el porcentaje de descuento, número de tarjeta, usuario, contraseña la fecha del registro del QR. Ver figura No. 16.

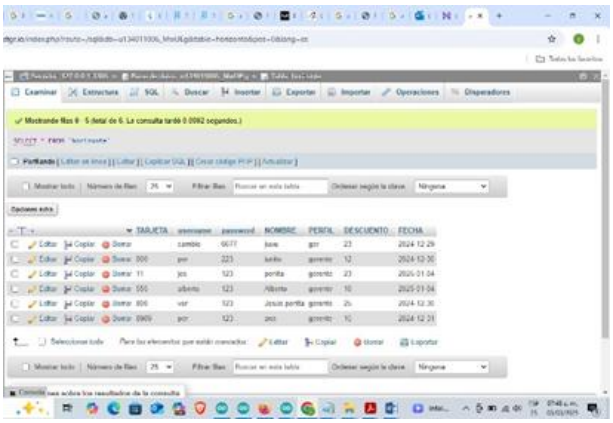


Figura No.16. Hosting manejador de base datos MySQL .(elaboración Propia)

CONCLUSIONES

El Sistema móvil penita que permite realizar descuentos mediante Qr, en una cadena de hotelería, nos ayuda realizar segmentar el mercado, las personas tienen diferentes estilos de vida, no todos tienen la capacidad para adquirir una habitación con todas las comodidades necesarias. Al utilizar el sistema móvil es una estrategia mercadotecnia para atraer más clientes a los hoteles de acuerdo a sus necesidades.

AGRADECIMIENTOS.

Los autores de este trabajo de investigación agradecen al Tecnológico Nacional de México por utilizar sus espacios para llevar a cabo este proyecto de investigación (Sistema móvil penita que permite realizar descuentos mediante Qr. En una cadena de hotelería) Así como También, todo el apoyo brindado por el Dr. Sócrates Espinosa Salgado, Integrante en área de Ingeniería en Sistemas Computacionales y Maestría Ingeniería quien fue parte esencial con sus contribuciones para el desarrollo del presente proyecto.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

[1] Journal of Tourism and Heritage Research (2020), vol, nº 3, nº 3 pp. 278-291, Muñoz Aparicio, C.G;Navarrete Torres, M.C. & Membreño Juárez, J. “Impact of tourism in the hotels in Mexico”.

[2] SiteMinder (2020). Cómo aumentar tu tasa de ocupación hotelera. Recuperado de: https://www.siteminder.com/es/r/distribucion-hotelera/aumentar-tasa-ocupacion-hotelera/

[3] Acosta, E. S. (febrero de 2014). rincon de la ciencia researchgate.net. Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/264501836_App Inventor_Programacion_para_moviles_al_alcance_de_todos.

[4] Android Studio, 2. (12 de enero de 2023). Android Studio. Obtenido de Andrio Studio: https://developer.android.com/studio/intro?hl=es-419. Consultado en mayo 2019). componente, w. A. (enero de 2020). App Inventor y el componente web. Obtenido de https://puravidaapps.com/sendmailPHP.php. Consultado en marzo 2019.

[5] Componente, W. A. (enero de 2020). App Inventor y el componente web. Obtenido de https://puravidaapps.com/sendmailPHP.php. Consultado en marzo 2019. Facultad de Ingeniería Universidad Distrital Francisco

[6] José de Caldas, 2. (30 de abril de 2020). Algoritmo de Encriptación para Imágenes a Color Basado en Sistemas Caóticos. Obtenido de Encryption Algorithm for Color Images Based on Chaotic Systems: http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext & pid=S0121750X20 S0121750X2020000200144&lang=es. Consultado en marzo 2019).

[7] INTEF, r. F. (abril de 2019). Creando aplicaciones para móviles Android appinventor 2. Obtenido de https://intef.es/wpcontent/uploads/2019/03/MITApp-Inventor-2.pdf . Consultado en abril 2019.

[8] Jorge Martinez, 2. (12 de mayo de 2016). Desarrollo de aplaicion movil punto de Venta. Obtenido de Desarrollo de aplaicion movil punto de Venta: https://tesis.ipn.mx/jspui/bitstream/123456789/18454/1 / Dise%C3%B1o%20y %20desarrollook.pdf. Consultada en mayo de 2018.

[9] Menéndez, F. A. (Abril de 2015). - Revista de Educación Matemática. Obtenido de https://thales.cica.es/epsilon/sites/thales.cica.es.epsilon/ f iles/[field_volumenformatted]/epsilon91_6.pdf. Consultado en abril 2019.

[10] Mexico, U. A. (abril de 2018). Revista Seguridad. Revista Bimestral. Obtenido de https://revista.seguridad.unam.mx/numero-10/el-cifrado- web-ssltls. Consultado en marzo 2018.

[11] Tzounis, A., Katsoulas, N., Bartzanas, T., Kittas, C. (2017). Internet of things in agriculture, recent advances and futures challenges. Elsevier Biosystems Engineering. Vol. 164. Pp. 31-48. https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2017.09.007.

[12] Martin del Brío y Alfredo Sanz Molina. Alfa Omega. Redes Neuronales y Sistemas Difusos / Bonifacio– Rama.Colombia/c.2017. https://catedras.facet.unt.edu.ar/intar/wp-content/uploads/sites/31/2017/04/4-Redes-Neuronales-Parte-III.pdf

[13] Morandini, M., Coleti, T., Oliveira, E., Corrêa, P. (2021). Considerations about the efficiency and sufficiency of the utilization of the Scrum methodology: A survey for analyzing results for development teams. [14]Santana Ching, I., Cárdenas Rivero, A. J., Sosa López, R., & Portal Díaz, J. A. (2020). Monitoreo de parámetros ambientales en casas de cultivo a través de aplicación IoT. Revista Cubana de Transformación digital, pp. 53-62. 106 Sandra Lucia Dorantes González, et al.

[14] Ávila-Camacho, F.M y Moreno-Villalba, L.M. (2022). Internet de las Cosas (IoT) Retos para las Empresas en la era de la Industria 4.0. Boletín Científico de Ciencias Básicas e Ingenierías del ICBI.

[15] Ayaz, M., Ammad-Uddin, Z., Sharif, A., Mansour & E. -H. M. Aggoune. (2019). Internet-of-Things (IoT)-Based Smart Agriculture: Toward Making the Fields Talk. in IEEE Access. Vol. 7, pp. 129551-129583. https://ieeexplore.ieee.org/document/8784034.

[16] Elijah, O., Rahman, A., Orikumhi, C., Leow and M. N. Hindia. (2018). An Overview of Internet of Things (IoT) and Data Analytics in Agriculture: Benefits and Challenges. in IEEE Internet of Things Journal. Vol. 5, No. 5, pp. 3758-3773. https://doi.org/10.1109/JIOT.2018.2844296.

[17] Elsevier. Computer Science Review. Vol. 39. https://doi.org/10.1016/j.cosrev.2020.100314.

[18] Wen Tao, Liang Zhao, Guangwen Wang, & Ruobing Liang. (2021). Review of the internet of things communication technologies in smart agriculture and challenges. Computers and Electronics in Agriculture, Vol. 189, 2021, 106352, ISSN 0168-1699, https://doi.org/10.1016/j.compag.2021.106352.

AUTORIZACIÓN Y RENUNCIA.

Los autores del presente artículo autorizan al TecNM/Instituto Tecnológico de Zacatepec para publicar el escrito en el libro electrónico del CITID 2025. El TecNM/ITZ o los editores no son responsables ni por el contenido ni por las implicaciones de lo que está expresado en el escrito.

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

GLOSARIO GASTRONÓMICO EN LENGUA DE SEÑAS MEXICANA-UTSEM

Y. Ávila-Nájera [1], E. Adán-Moreno[2], K. Trujillo-Toledo[3], J.L. Arroyo-Anica[4], R. Rodríguez Yesca[5]

Maestría en Ciencias de la Computación. Universidad Tecnológica del Sur del Estado de Morelos, Tecnologías de la Información. yazminavila@utsem-morelos.edu.mx, ernestoadan@utsem-morelos.edu.mx, keniatrujillo@utsem-morelos.edu.mx, josearroyo@utsem-morelos.edu.mx, raulrodriguezyesca@gmail.com. 7772650049, 7775640634, 7771399318, 7771427997, 7773763229. 62765, 62662, 62980, 62587, 62797.

***Resumen**:* El presente artículo tiene el propósito de dar a conocer el desarrollo de un glosario gastronómico en Lengua de Señas Mexicana (LSM) a través de un sistema web, que fortalezca y facilite el proceso de aprendizaje de la comunidad Sorda que estudia en el Programa Educativo de Gastronomía en la Universidad del Sur del Estado de Morelos (UTSEM). Para la realización del proyecto se trabajó de manera colaborativa con el Programa Educativo (PE) de Tecnologías de la Información (TI), estudiantes Sordos del PE de Gastronomía, intérpretes y la responsable del Programa de Inclusión Universitaria (PIU). Como resultado se cuenta con un sistema web, para el cual se ha iniciado la producción de videos en LSM para actualizar el contenido del sistema, los cuales son cargados por medio de la página de YOUTUBE y enlazados al sistema, lo que permite compartir el contenido no solo a la comunidad estudiantil de la UTSEM, sino también al público en general que esté interesado en aprender y practicar vocabulario relacionado a la gastronomía en LSM.

Palabras Clave: Glosario, Gastronomía, LSM, Sistema web, TI.

***Abstract** --* The purpose of this article is to socialize the development of a gastronomic glossary in Mexican Sign Language (LSM) through a web system, which allows and facilitates the learning process of the Deaf community that studies Gastronomy at the Universidad del Sur del Estado de Morelos (UTSEM). To carry out the project, Information Technology area, Deaf Gastronomy´s students, interpreters and personal from the University Inclusion Program (UIP) have worked together and as a result, a web system has been done to create videos in MSL increasing the content to the system, which are uploaded through the YOUTUBE page and linked to the system, which allows sharing the content not only with the student community of UTSEM, but also with public in general who is interested in learning and practicing vocabulary related to gastronomy in MLS.

Key words – Glossary, Gastronomy, LSM, Web system, IT.

INTRODUCCIÓN

La inclusión universitaria comienza con garantizar que todos los estudiantes tengan las mismas oportunidades para ingresar a la universidad, lo que implica eliminar barreras académicas o sociales que puedan dificultar el acceso de estudiantes de sectores vulnerables o marginalizados.

Un aspecto importante de la inclusión es la accesibilidad, en este caso y para este proyecto se enfocará en los recursos digitales (plataformas de aprendizaje y materiales educativos). Las universidades tienen a su alcance los mecanismos para asegurarse de que el estudiantado pueda acceder a todos los aspectos de su educación, sin barreras físicas, tecnológicas o pedagógicas. Es por ello que la colaboración entre los PE de TI y Gastronomía tiene un gran potencial para el desarrollo de herramientas tecnológicas aplicadas a la comunidad sorda.

Actualmente la tecnología avanza continuamente, por lo que las instituciones tienen la necesidad de irse adaptando a estos nuevos avances. Apoyarse de herramientas tecnológicas como lo son los sistemas web, para la solución de problemas que surgen en el día a día, representa una gran ventaja, especialmente en el ámbito educativo, ya que permiten y facilitan los procesos de aprendizaje del estudiantado.

Hoy en día las instituciones de nivel superior comienzan a apostar por el camino de la inclusión. Como es el caso de la Universidad del Sur del Estado de Morelos, que cuenta con un Programa de Inclusión Universitaria que brinda apoyos para que el estudiantado con algún tipo de discapacidad o neurodivergencia culminen sus estudios universitarios. Partiendo de que las TI son una herramienta importante en el proceso de enseñanza-aprendizaje, se desarrolló un proyecto con la comunidad Sorda teniendo como objetivo facilitar el aprendizaje por medio de un sistema web, con contenido visual, el cual consta de un glosario gastronómico en lengua de señas mexicana (LSM).

La inclusión universitaria es un principio fundamental para garantizar una educación superior de calidad y equitativa. Promoverla no solo beneficia a los estudiantes individualmente, sino que también contribuye al enriquecimiento de la comunidad universitaria y prepara a los futuros profesionales para un mundo diverso e interconectado.

Como primer paso del presente proyecto, fue necesario identificar los principales tecnicismos o palabras comunes necesarias para que los estudiantes comprendan los temas

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

de la gastronomía, ya que algunas de ellas no cuentan con una "seña establecida" y por lo tanto la palabra debe ser deletreada en LSM, algunos ejemplos del deletreo de las palabras se observan en la figura 1 y 2.

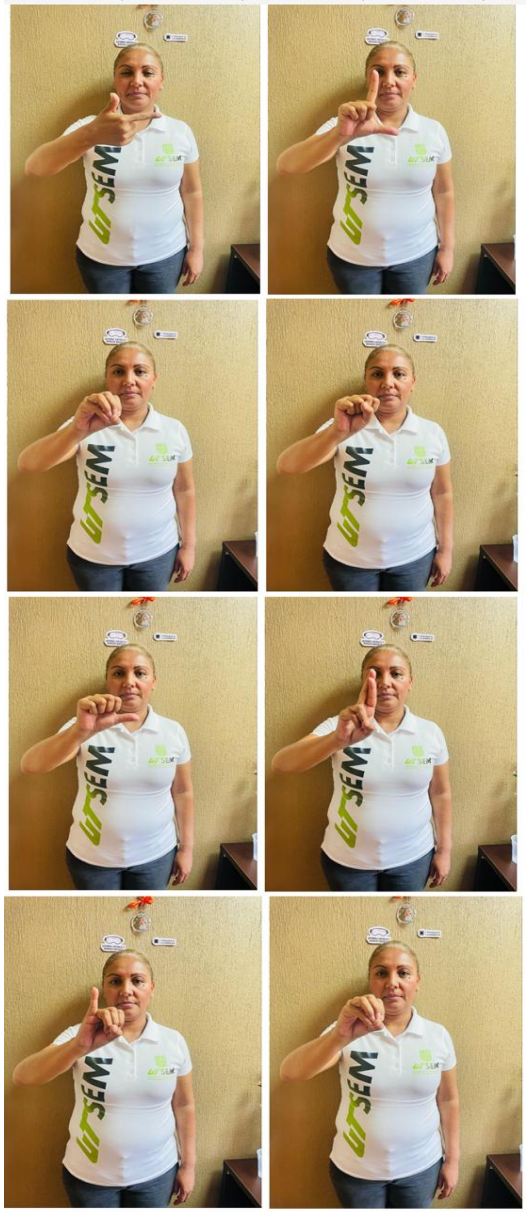


Figura 1. Palabra "Glosario" en LSM

Cuando una persona sorda no cuenta con una seña establecida para una palabra, el proceso de deletreo puede considerarse como una desventaja desde el sentido de que tiene que hacer un mayor esfuerzo cognitivo que puede dificultar la fluidez de la comunicación.

En otros casos, este deletreo también implica una pérdida de contexto y comprensión si la persona no reconoce la palabra de inmediato y le genera confusión o la necesidad de repetirla, además de que esto genera una fatiga física al tener conversaciones largas donde se tenga que hacer uso repetitivo del alfabeto manual.

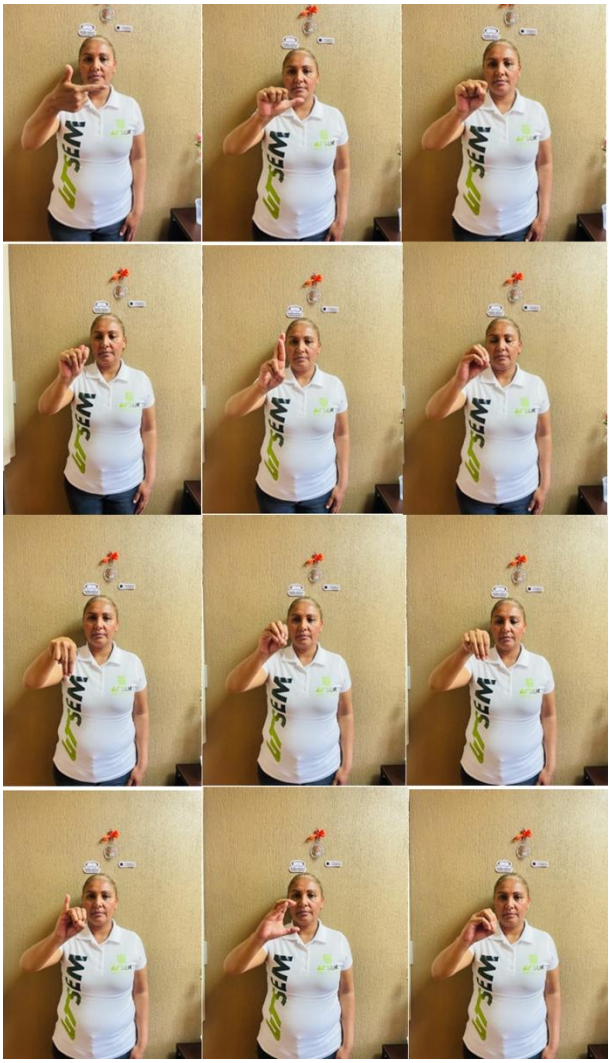


Figura 2. Palabra "Gastronómico" en LSM

Derivado de lo anterior, la comunidad sorda, tiende a crear señas nuevas para conceptos que usan con frecuencia, en lugar de deletrearlas.

Otro punto importante es la descripción de la palabra, lo que permite la comprensión de un nuevo concepto y su contextualización, sobre todo en áreas donde se van generando nuevos conocimientos para los estudiantes de la comunidad sorda, que no siempre están inmersos en el manejo de términos gastronómicos como es el caso del presente trabajo.

En este proyecto, se analizaron una serie de palabras o conceptos académicos del área de gastronomía, que, por su relevancia, fue necesario dar a conocer de manera clara a los estudiantes sordos, estas palabras son:

- Baño María
- Marinar
- Escaldar
- Blanquear
- Empanizar o rebozar

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

- Escalfar o Pochar
- Flambear o flamear
- Sofreír
- Reducir o reducción
- Saltear
- Tamizar
- Braseado o breseado
- Confitar
- Freído profundo
- Deshidratación
- A la parrilla
- Asado en sartén
- Pasar por agua
- Cocinar a presión
- Dorar
- Ahumar
- Sous vide o al vacío
- Asado lento
- Abrillantar
- A punto de nieve
- Acaramelar
- Aderezar

DESARROLLO

Antecedentes. El Programa Educativo de Tecnologías de la Información, de la Universidad, busca aplicar soluciones tecnológicas para identificar y abordar áreas de oportunidad en las operaciones y servicios de la institución. El principal objetivo es agilizar los procesos y automatizar tareas, lo que contribuirá a mejorar la eficiencia y brindar una mejor experiencia a los estudiantes y personal académico.

Desde el año 2016, la Universidad Tecnológica de la Sierra del Estado de Morelos (UTSEM) ha implementado el Programa de Inclusión Universitaria (PIU), particularmente en el programa educativo de Gastronomía. Este programa tiene como objetivo ofrecer una educación accesible y de calidad a estudiantes sordos, permitiéndoles participar plenamente en todas las actividades académicas y prácticas de su formación. A través de la integración de intérpretes de lengua de señas, los estudiantes sordos pueden desarrollar sus habilidades culinarias en un entorno inclusivo y equitativo, promoviendo su autonomía y desarrollo profesional, cabe resaltar, que hasta el día de hoy la UTSEM cuenta con cuatro egresados sordos que han concluido sus estudios.

Este trabajo surge como un Proyecto de Estadía, enfocado a atender una necesidad detectada por parte del PE de Gastronomía, para la impartición de las asignaturas que comprenden temas que deben ser explicados a mayor detalle para las y los estudiantes sordos, que en ocasiones pueden quedarse con alguna duda al no contar con un medio de estudio que les permita reforzar los temas fuera del aula de clase.

Diseño: Para esta etapa, se realizaron reuniones con el PE de TI, Gastronomía, integrantes del PIU e intérpretes, y se definió la realización de las vistas del sistema y las funciones, las cuales serán manejadas por 2 tipos de roles, administrador, el cual se muestra en la figura 3, y el usuario final, como se muestra en la figura 4.

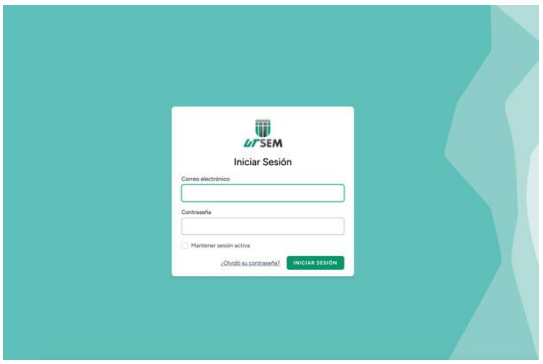


Figura 3. Inicio de sesión de administrador

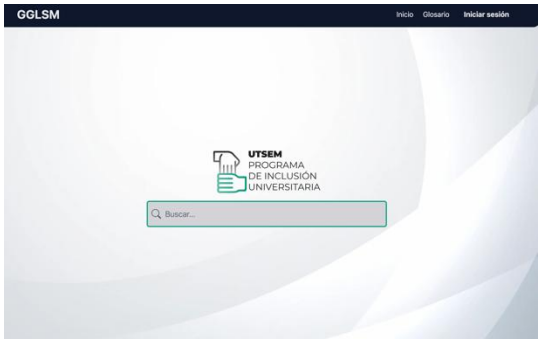


Figura 4. Vista de inicio de usuario

Implementación: En esta etapa se realiza la implantación efectiva del sistema, a partir del diseño y las especificaciones previas.

En esta etapa se implementan las interfaces visuales y las funcionalidades que permiten a los usuarios navegar y realizar acciones dentro del sitio o aplicación.

- Codificación del diseño de la interfaz: Basándose en los prototipos diseñados se crea la estructura HTML, los estilos CSS y la interactividad utilizando JavaScript.
- Desarrollo de navegación: Se implementan los menús y enlaces para garantizar que la navegación sea fluida y fácil de usar.
- Acciones de elementos: Se implementan los formularios, las acciones de los botones, controles deslizantes y demás elementos interactivos.
- Optimización de la experiencia de usuario: Asegurar que sea un sitio web responsivo, es decir, se adapte correctamente a los diferentes dispositivos, como son móviles, tabletas y computadoras.

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

Inicialmente se crearon la carpeta y los archivos principales como el índex, css y JavaScript, como se muestra en la figura 5, por otra parte, como gestor de Base de Datos se utilizó "phpmyadmin" en donde se crea la base de datos con sus respectivas tablas y atributos.

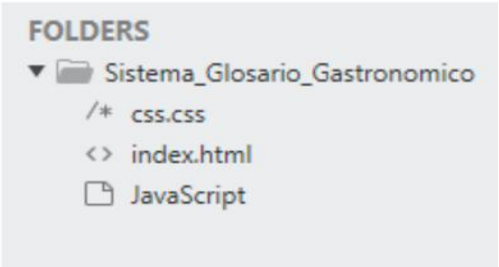


Figura 5. Estructura básica del sistema

Como se observa, la página del administrador es más dinámica, ya que el rol de administrador tiene los permisos de realizar varias acciones como son agregar los términos con sus descripciones, como se visualiza en la figura 6.

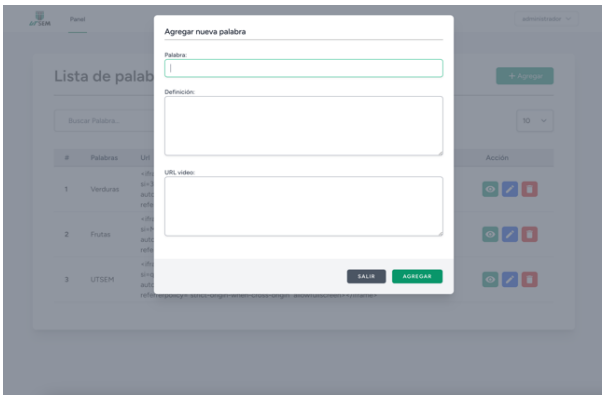


Figura 6. Vista del administrador. Agregando términos gastronómicos

Otras de las funciones permitidas al rol de administrador son la modificación y eliminación de algún término gastronómico, como se visualiza en la figura 7 y figura 8.

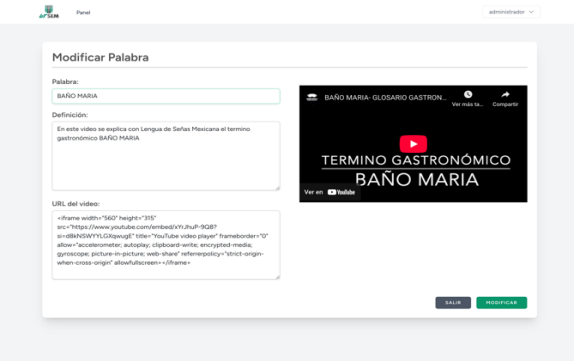


Figura 7. Vista del administrador. Modificando un término gastronómico

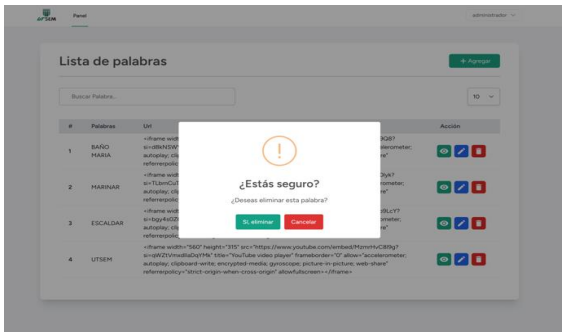


Figura 8. Vista del administrador. Eliminación de un término gastronómico

Para agregar los términos gastronómicos al sistema se requiere subir el video a la página de Youtube, como se visualiza en la figura 9.

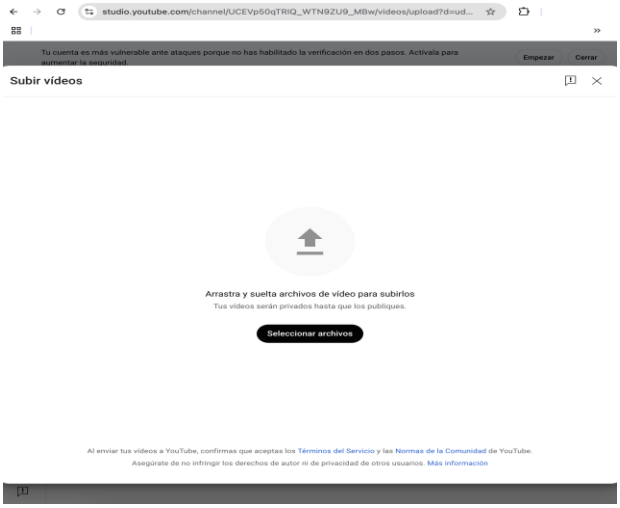


Figura 9. Subiendo video a Youtube

Al terminar la carga del video a la página de Youtube queda disponible para que los usuarios en general puedan visualizarlo, como se muestra en la figura 10.

Figura 10. Visualización del video en la página web de Youtube

Para integrar el video al sistema del Glosario Gastronómico es necesario copiar el link para agregarlo. Al seleccionar

"Compartir" se mostrará la opción para copiar el link (figura 11).

Figura 11. Copiando link del video subido a Youtube.

Posteriormente ya que al administrador ha agregado los términos gastronómicos se procede a la creación de contenido y una vez que el administrador agregó el término al glosario se pueden visualizar en la "Lista de palabras".

Se selecciona la opción de insertar y se visualizará el código a copiar (figura 12).

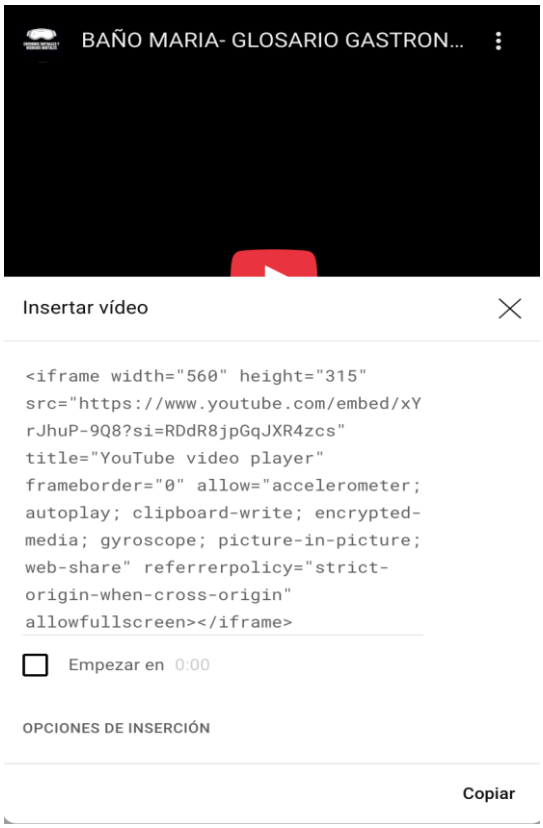


Figura 12. Código del link del término gastronómico

Al copiar el código del link se agrega al término gastronómico descrito en la sección de "URL video" (figura 13).

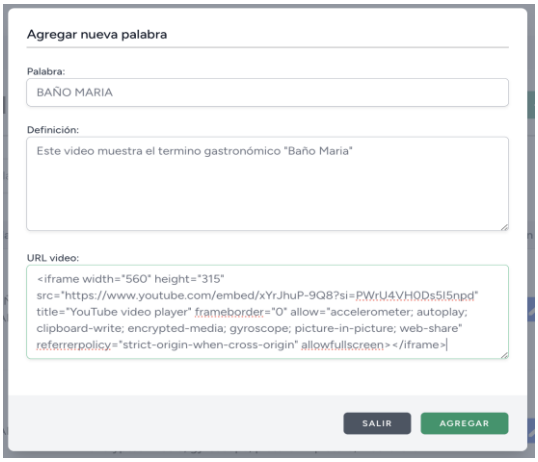


Figura 13. Ingreso del término gastronómico

Una vez subidos los videos, el administrador los puede visualizar en la "Lista de palabras", como se muestra en la figura 14.

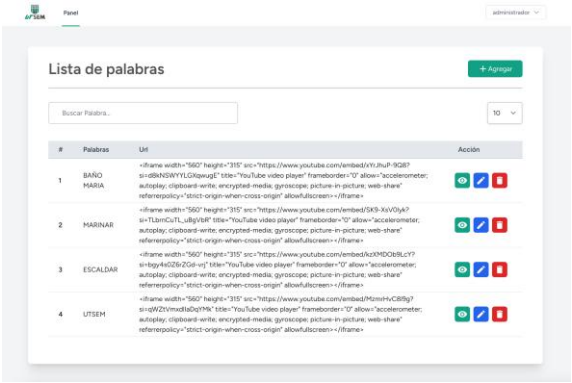


Figura 14. Vista del administrador. Lista de palabras

Una vez agregado el video al sistema, el usuario del sistema puede buscar el término y visualizarlo en LSM, como se muestra en la figura 15.

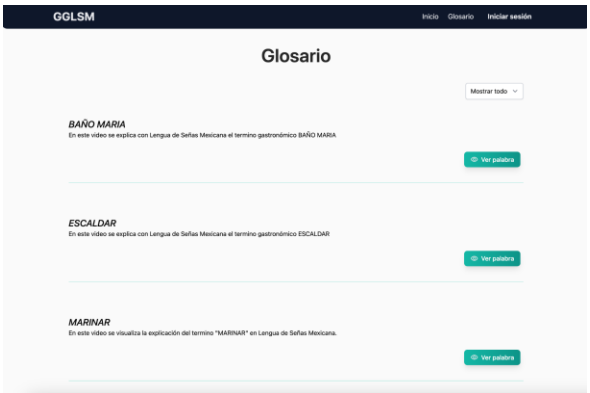


Figura 15. Vista del usuario. Búsqueda del término gastronómico

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

Para visualizar el término se deberá dar click en el botón "Ver palabra" (figura 16).

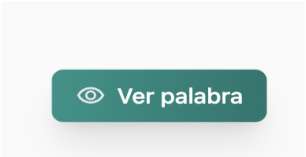


Figura 16. Vista del usuario. Botón "Ver palabra"

Al seleccionar el término gastronómico se puede visualizar la descripción y el video (figura 17).

Control: Durante el desarrollo de este proyecto se llevaron a cabo varias reuniones con las diferentes áreas implicadas en este proyecto.

Área de gastronomía: Aportó información acerca de los términos más comunes para desarrollar en el sistema.

Área de TI. Se encargó de la producción y edición de los videos, así como el diseño y codificación del sistema, con apoyo de estudiantes del área y asesoramiento de profesores.

Programa de inclusión universitaria de la Universidad del Sur del Estado de Morelos (PIU): Apoyo sensibilizando a los estudiantes de la Universidad, mencionando la importancia de formar parte de una sociedad inclusiva. Nos acercó al área de Intérpretes de LSM para identificar los términos durante la edición de los videos.

Cierre: En el transcurso del desarrollo del proyecto se fueron realizando ajustes y mejoras al sistema, lo que ha permitido una mejor interacción entre el sistema, administrador y usuarios.

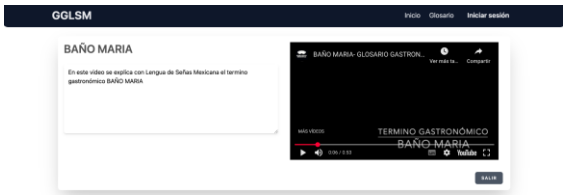


Figura 17. Vista de usuario. Visualización del término gastronómico

DISCUSIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

En la actualidad en la web se encuentran varios videos que aportan conocimiento del LSM, sin embargo, no se encuentra alguno especializado en el área de gastronomía, lo que motivó a la realización de este proyecto, el cual fue revisado y sometido a pruebas con estudiantado Sordo e intérpretes de la comunidad UTSEM.

Como resultado se observa un buen manejo y visualización de la información del sistema web del Glosario Gastronómico LSM, ya que permite al estudiantado Sordo de la UTSEM visualizar los términos a utilizar en sus clases de gastronomía, les permite anticiparse al conocimiento de las señas asignadas a los términos para llegar preparados a sus clases, el incluir la búsqueda por palabra facilita a los usuarios una mejor interacción con el sistema para poder visualizar los términos de su interés.

La vista del administrador permite agregar, modificar y eliminar los términos gastronómicos de manera fácil y entendible, lo que permitirá continuar la actualización de la información dentro del sistema.

CONCLUSIONES

El proyecto del desarrollo de un sistema web con contenido visual, Glosario gastronómico LSM de la UTSEM, fue una experiencia agradable, reafirmando la importancia de la inclusión en nuestra comunidad universitaria.

El buen uso de la tecnología nos permite realizar una gestión de la información, en este caso, enfocándonos en el área de gastronomía, que cuenta con estudiantes de la comunidad sorda, facilitándoles el acceso al conocimiento de términos gastronómicos en LSM.

Contar con herramientas tecnológicas multimedia, resulta muy útil para la enseñanza en términos de gastronomía en lenguaje de señas, ya que permiten una presentación visual, clara y accesible.

Algunas de las ventajas de este proyecto hacia la comunidad de personas sordas son:

- Visualización clara, ya que los videos facilitan la comprensión y memorización de los términos, ya que el LSM es visual y espacial.
- Accesibilidad, debido a que los videos están disponibles en cualquier momento, lo que permite a los estudiantes aprender a su propio ritmo.
- Existe un refuerzo visual, ya que los videos incluyen subtítulos con explicaciones que ayudan a la comprensión de los temas.

Como trabajos futuros, este proyecto puede incluir una mayor diversidad de contenidos y demostraciones prácticas, ya que en gastronomía existe una gran cantidad de conceptos que son aplicables a diferentes contextos y aplicaciones, como la preparación de recetas, que también pueden contar con algún video ilustrativo.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos las facilidades otorgadas al desarrollo e implementación de este proyecto a la Universidad

Tecnológica del Sur del Estado de Morelos, que permitió los espacios y horarios oportunos a los participantes en la ejecución del Sistema Web de Glosario Gastronómico en LSM.

BIBLIOGRAFÍA

[1] Requeiro Almeida, R., Luque Espinoza de los Monteros, M., & Lafita Frómeta, R. (2019). INCLUSIÓN UNIVERSITARIA Y EQUIDAD DE ACCESO A LOS RECURSOS DIGITALES. Revista Metropolitana de Ciencias Aplicadas, 2(3), 82-90.

[2] de Souza Godinho, S., Vivianan Rivela, C., Oliveira Medrado, S., Marmo, J., & Lanuque, A. (2021). EDUCACIÓN INCLUSIVA Y ACCESIBILIDAD DIGITAL. Revista Científica Arbitrada de la Fundación Mente Clara, 6, 1-33.

[3] Canales-Cruz, A., Peredo-Valderrama, R., Balladares-Ocaña, L., Peredo-Valderrama, I., & Sossa-Azuela, J. (2009). Arquitectura de sistemas tecnológicos para la educación basada en Web. Ingeniería. Investigación y Tecnología, X(2), 145-157.

[4] Ríos Rodríguez, L. R., Anzola Omaña, S., & Gómez Blanco, J. F. (2015). UTILIZACIÓN DE HERRAMIENTAS WEB EN LA ENSEÑANZA UNIVERSITARIA. Pedagogía y Sociedad, 18(43), 61-69.

AUTORIZACIÓN Y RENUNCIA.

Los autores del presente artículo autorizan al TecNM/Instituto Tecnológico de Zacatepec para publicar el escrito en el libro electrónico del CITID 2025. El TecNM/ITZ o los editores no son responsables ni por el contenido ni por las implicaciones de lo que está expresado en el escrito.

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

CITID 2025 ISSN: 2992-8516

ESTUDIO DE FÁRMACOS EMPLEANDO CIENCIA DE DATOS, EL CASO DE LA ENFERMEDAD DE ALZHEIMER

Jessica J. Sánchez-García [1], Edgar Aguilar-Ortiz *[2]

[1]Doctora en Química, Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Química, heparina250ml@gmail.com, teléfono 56223899 ext 4448. C.P 04510
[1]Doctor en Química, Universidad Nacional Autónoma de México, Unidad Radiofarmacia-Ciclotrón, División de Investigación, Facultad de Medicina, edgaraguilar08@gmail.com, C.P. 04510

Resumen – La enfermedad de Alzheimer es un padecimiento asociado a la acumulación de la proteína beta amiloide, esta acumulación produce agregados que dan como resultado una disminución de las capacidades cognitivas de la persona que lo padece, esto impacta directamente en la calidad de vida del paciente, así como de los familiares quienes son los que generalmente cuidan de ellos. Si bien hoy existen diferentes fármacos para disminuir los síntomas del Alzheimer, es importante que se ponga un mayor esfuerzo en desarrollar nuevas alternativas que puedan ser costeables, considerando el punto anterior, disciplinas como la Ciencia de Datos ofrecen a los químicos una manera diferente de abordar la problemática de la búsqueda de nuevos fármacos, ya que hace posible encontrar patrones estructurales que puedan ser indicativos de potenciales candidatos a fármacos.
En este trabajo, abordamos el estudio de los fármacos ya existentes para el tratamiento de la enfermedad de Alzheimer desde un punto de vista de la Ciencia de Datos, para esto empleamos dos herramientas, uno es Python y las librerías que tiene asociadas, que ayuda a la visualización de datos. Esto lo hacemos para obtener un panorama de las principales características que debería de considerar un farmacéutico al diseñar un fármaco para tratamiento de Alzheimer.

Palabras Clave: Alzheimer, Andamios estructurales, Ciencia de Datos, Diseño de fármacos, Visualización de datos,

Abstract -- Alzheimer's disease is a condition associated with the accumulation of amyloid beta protein. This accumulation produces aggregates that result in a decrease in the cognitive abilities of the person who suffers from it. This directly impacts the quality of life of the patient, as well as the family members who take care of them. Although today there are different drugs to reduce the symptoms of Alzheimer's, it is important that greater effort be put into developing new alternatives that may be affordable. Considering the previous point, disciplines such as Data Science offer chemists a unique way of approaching the problem of searching for new drugs, since it makes it possible to find structural patterns that may be indicative of potential drug candidates.
In this work, we approach the study of existing drugs for the treatment of Alzheimer's disease from a Data Science point of view. For this we use two tools, one is Python, and the libraries associated with it, and Datawarrior, a software that helps with data visualization. We do this to obtain an overview of the main characteristics that a pharmacist should consider when designing a drug for the treatment of Alzheimer's.
Key words – Alzheimer, Data Science, Data visualization, Drug design, structural scaffolds.

INTRODUCCIÓN

La enfermedad de Alzheimer (EA) es un tipo de demencia que es el resultado de un trastorno neurodegenerativo caracterizado por pérdida y múltiples deterioros cognitivos y deterioro cognitivo. Los primeros informes de Alois Alzheimer en 1907 describen la presencia de deterioro cognitivo junto con la formación de placas seniles que luego se atribuyeron al desequilibrio de las proteínas Aβ y tau1 2[1]. A nivel mundial la EA es la principal causa de demencia en personas mayores (≥ 65 años), lo cual es un dato importante ya que según los datos de población hoy en día somos aproximadamente 8 mil millones de personas en el mundo, y las personas mayores de 65 años conforman el 10% de la población, y serán parte de las estadísticas relativas a la EA. Según un informe de la OMS los principales países con tasas de EA por cada 100.000 personas son: Finlandia (54,65 casos), Reino Unido (42,70 casos), Eslovaquia (38,15 casos), Estados Unidos se ubicó en el octavo lugar (33,26 casos), estos datos están asociados con los datos mundiales de envejecimiento, siendo Europa el continente cuya población envejecida (≥ 65 años) supera el 15 % de su población total[2].

La EA es el resultado de una alteración compleja en el metabolismo de las proteínas, entre ellas y la más estudiada es el papel de la proteína precursora del amiloide (APP) Figura 1. APP es una proteína integral de membrana cuyo gen en humanos se encuentra en el cromosoma 21 y fue identificado en 1987, consta de un único dominio de membrana, un extremo N glicosilado extracelular grande y un extremo C citoplasmático más corto, se produce en varias isoformas cuyo tamaño varía de 695 a 770 aminoácidos. Las tres isoformas principales son APP695, APP751, APP770, que APP751 y APP770 se expresan en células gliales y proporcionan soporte a las neuronas. APP695 se expresa en neuronas[3,4].

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

Figura 1. Estructura de la proteína precursora amiloide

El papel de la APP en la EA releva en su proteólisis ya que podría seguir dos vías, amiloidogénica o no amiloidogénica. En la vía amiloidogénica, la β-secretasa y la γ-secretasa son las principales enzimas que cortan la APP desde que generan fragmentos de sAPPβ, AICD y Aβ. Por otro lado, la vía no amiloidogénica implica la acción de la α-secretasa y la γ-secretasa; sus acciones dan como resultado la formación de fragmentos sAPPα, AICD y P3[5,6].

Dado que la ruta amiloidogénica es la forma en que se genera Aβ que varía en el tamaño de 37 a 49 aminoácidos, es importante señalar que el Aβ se secreta a partir de células sanas de los nervios, la piel y el intestino, ya que circula en el líquido cefalorraquídeo y la sangre. Está bien documentado que los Aβ son esenciales para varios procesos neuronales, incluida la excitabilidad celular, la plasticidad sináptica y la neuroprotección.

En personas con EA, la eliminación de Aβ a través de LRP1 se altera, lo que da como resultado una acumulación excesiva y, por lo tanto, una agregación en placas en las regiones corticales y límbicas. Las principales isoformas de Aβ que están presentes en las placas son la 40 y la 42, siendo la Aβ42 la que tiene mayor propensión a generar ensamblajes y por tanto neurotoxicidad. Las características de agregación entre Aβ40 y Aβ42 parecen ser similares; sin embargo, la presencia de dos péptidos adicionales en Aβ42 aumenta la hidrofobicidad del extremo C-terminal y, por tanto, su tasa de agregación. La ruta completa de este mecanismo es: formación de monómeros solubles, seguido de la generación de oligómeros solubles que se consideran los más tóxicos, la maduración de los oligómeros produce filamentos que se unen dando como resultado fibrillas, finalmente las fibrillas se posan en la formación antiparalela que es característica de los agregados[7,8].

Basados en la base de datos DrugBank, los fármacos aprobados para el control de los síntomas asociados al Alzheimer son solo 7, de los cuales 5 son anticuerpos monoclonales y 2 son compuestos orgánicos de peso molecular discreto. Figura 2.

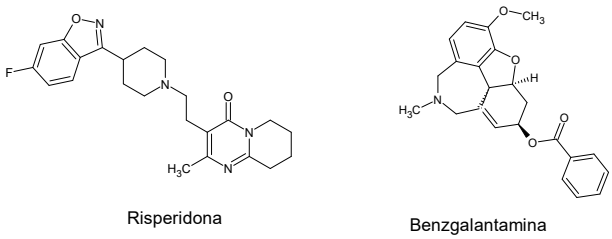


Figura 2. Fármacos aprobados por la FDA para el tratamiento de Alzheimer.

La quimioinformática es una disciplina que involucra el uso de técnicas de informática para el análisis de grandes cantidades de datos (Data Science). Aplicado a las ciencias farmacéuticas, se han podido desarrollar fármacos de novo o reposicionar algunos ya existentes[9–11].

La mayoría de los proyectos que involucran este tipo de técnicas comienzan con

1. La elección del blanco terapéutico (proteína de interés).
2. Análisis de bases de datos y su limpieza.
3. Realizar un análisis exploratorio de los datos encontrados para ubicar tendencias.
4. Ejecutar estudios de similitud estructural, análisis de Activity-Cliffs y QSAR.
5. Finalmente se proponen las estructuras

Una manera en la cual se ejecutan los proyectos basados en Ciencia de datos aplicados a la química involucra el siguiente flujo de trabajo. Figura 3.

Figura 3. Flujo de trabajo para un proyecto de ciencia de datos aplicado al desarrollo de fármacos

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

En este punto es importante destacar que el uso de la ciencia de datos en la química nos ofrece una nueva perspectiva para abordar los problemas referentes a. diseño de nuevos fármacos, la generación de nuevos materiales químicos o incluso el estudio de toxicidades asociades a compuestos químicos.

DESARROLLO

Obtención y limpieza de datos

El primer paso consistió en recabar la información referente al péptido precursor de placa beta amiloide, uno de los principales focos de atención. Ya que es sabido que la acumulación de este péptido genera agregados insolubles que causan la disminución de las propiedades cognitivas. Para esto empleamos la API que viene asociada en Python y que conecta al servidor de ChEMBL[12]. Una vez hecho esto se seleccionó la enfermedad en cuestión "Alzheimer" para después seleccionar el número de la proteína de interés para este estudio. El siguiente paso consistió en implementar un método de limpieza de datos[13], para lo cual se emplearon las librerías Pandas, RDKit. Se emplearon los siguientes parámetros: standardizer, largestfragmentchooser, uncharger, reionizer, tautomercanonicalizer[14]. Se seleccionaron los siguientes átomos como especies permitidas y si dentro de la estructura había uno que no se encontrara en la lista, se eliminaba: H, B, C, N, O, F, Si, P, S, Cl, Br, I. Una vez hecho esto se dividieron a las moléculas entre activas e inactivas, para lo cual se empleó el valor del Ki, siendo activas aquellas cuyo valor era menor a 10,000 e inactivas aquellas cuyo valor era mayor a 10,000.

Determinación de parámetros fisicoquímicos y construcción de gráficos

Completado el proceso de limpieza de la base de datos, el siguiente objetivo fue la determinación de parámetros fisicoquímicos que están asociados con la biodisponibilidad oral de fármacos: Peso molecular (MW), coeficiente de partición (logP), número de átomos donadores de hidrógenos (HBD), numero de átomos aceptores de hidrógenos (HBA), enlaces rotables (RotBonds) y el área total polar superficial (TPSA). Para esto se empleó la librería RDKit, pandas, numpy, seaborn y matplotlib, estas últimas para construir gráficos. Y observar la distribución de cada uno de los parámetros fisicoquímicos previamente determinados[15,16].

Con estos datos, se determinó la correlación de Pearson entre los diferentes descriptores y se construyó un HeatMap de estos.

Reducción de la dimensionalidad

Con el objetivo de realizar un análisis de todos los parámetros fisicoquímicos, se emplearon dos técnicas estadísticas que tienen como objetivo la reducción de la dimensionalidad cuando analizamos bases de datos que involucran más de tres variables. Un primer método denominado Análisis de Componentes Principales (PCA)[17] y el segundo denominado Incrustación de vecinos estocásticos distribuidos en t (t-SNE)[16], el objetivo de esto es visualizar distribuciones que a simple vista no detectaríamos.

Análisis de andamios estructurales

En un último estudio, empleando el algoritmo desarrollado por Bemis-Murcko se determinaron los andamios estructurales, así como la frecuencia en la que aparecen dentro del set de datos[18].

Análisis de huellas digitales moleculares

Un siguiente análisis consistió en determinar las huellas digitales moleculares. En este trabajo se emplearon dos huellas digitales moleculares MACCS-key (Molecular Access system)[19] que codifica como 1 la presencia de cierta subestructura en la molécula y como cero la ausencia de esta misma subestructura, la segunda huella digital molecular empleada fue ECFP4 (Extended Connectivity finger print)[20] en su versión delimitada a 4Å y que considera el ambiente atómico en a un alcance de 2 enlaces de distancia desde el átomo central Figura 4.

Para la comparación de estas dos huellas digitales se empleó una técnica de reducción de la dimensionalidad, t-SNE y poder observar la ausencia o existencia de patrones.

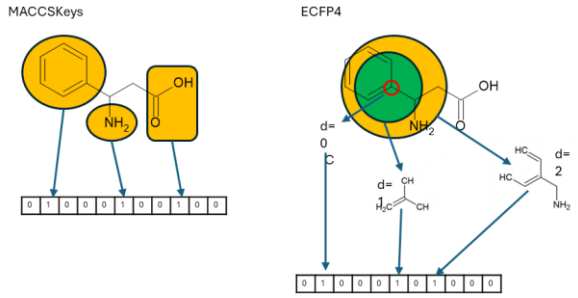


Figura 4. Representación de huellas digitales moleculares MACCS-keys y ECFP4

DISCUSIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Obtención y limpieza de datos

Una vez obtenida la base de datos que contiene los fármacos con un valor de Ki asociado hacia la proteína beta amiloide, se catalogaron en activos e inactivos, eliminando los compuestos catalogados como intermedios.

Tabla 1. Contribución de los parámetros fisicoquímcios al gráfico de PCA.

Número de moléculas antes de implementar el protocolo de curado	Número de moléculas una vez implementado el proceso de curado
535	276

La Tabla 1, muestra como se ha disminuido el número de compuestos a estudiar, ya que como recordamos anteriormente se eliminaron compuestos repetidos,

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

compuestos que no cuyo valor de Ki estuviese registrado como NA.

En la figura 5, se puede observar un gráfico de colunas que muestra la distribución de los compuestos Activos vs los compuestos inactivos. Siendo estos últimos los que mayor proporción guardan.

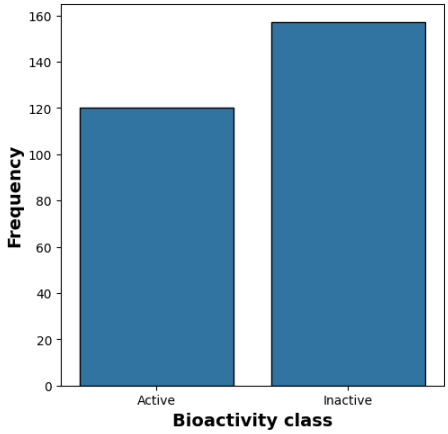


Figura 5. Gráficas de columnas de compuestos activos e inactivos

Distribución de los parámetros fisicoquímicos

Posteriormente empleando Python y las librerías asociadas de RdKit, Pandas y Seaborn. Se construyeron gráficos de violín, para visualizar la distribución de los parámetros fisicoquímicos.

La figura 6 muestra la distribución de los parámetros fisicoquímicos peso molecular (MW), Coeficiente de partición (log P), enlaces rotables (rotbonds), grupos aceptores de hidrógeno (HBA), grupos donadores de hidrógeno (HBD), área polar total superficial (TPSA).

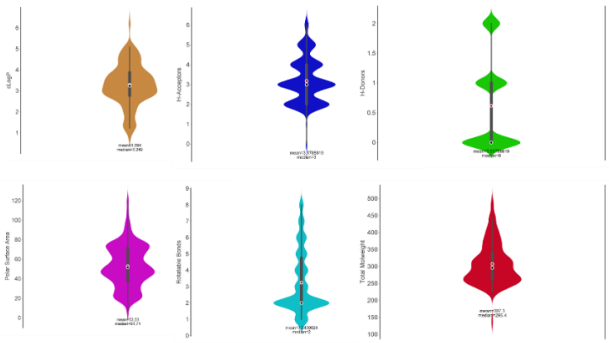


Figura 6. Gráficas de violín para los seis parámetros fisicoquímicos determinados

Es posible observar en la Figura 6, que la distribución de los parámetros fisicoquímicos no tiene una distribución normal, pero los valores de media y mediana se encuentran dentro de los valores permitidos por Lipinski que establece que el peso molecular debe de ser menor a 500 g/mol, el coeficiente de partición debe de ser menor a 5, el número de grupos aceptores de hidrógeno menor a 10 y aceptores de hidrogeno no más de 5. Esto nos indica que los compuestos analizados muestran una buena biodisponibilidad oral, a pesar de que algunos son inactivos.

El siguiente estudio consistió en elaborar un Heatmap basado en la correlación que existe entre los diferentes parámetros fisicoquímicos. En la Figura 7 se puede observar que los parámetros fisicoquímicos que guardan una correlación positiva son: Peso molecular (MW) con HBA y los enlaces rotables, de igual manera HBA tiene una correlación positiva entre enlaces rotables y TPSA.
Esta correlación puede ser de ayuda al momento de diseñar una nueva molécula ya que se puede considerar a los parámetros fisicoquímicos que guardan esta correlación positiva como un punto de partida.

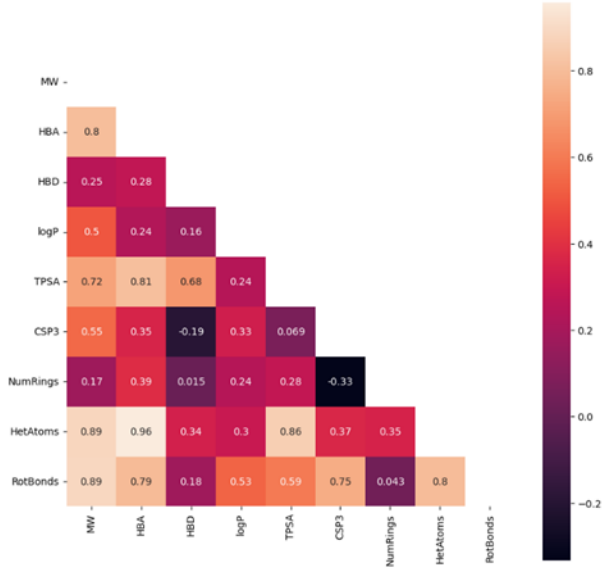


Figura 7. Correlación entre los diferentes parámetros fisicoquímicos empleando un Heatmap y correlación de Pearson

Reducción de la dimensionalidad

Para lograr un mejor análisis de la influencia de los parámetros fisicoquímicos evaluados, se empleó una técnica de reducción de la dimensionalidad. La Figura 8 muestra que pc2 tiene una mayor contribución en los compuestos que muestran mejores valores de Ki, esto no sucede con pc1 que no tiene esta contribución.

Complementariamente en la Tabla 2, se muestra que los parámetros fisicoquímicos que tienen una contribución mayor en pc2 son: HBD y TPSA.

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

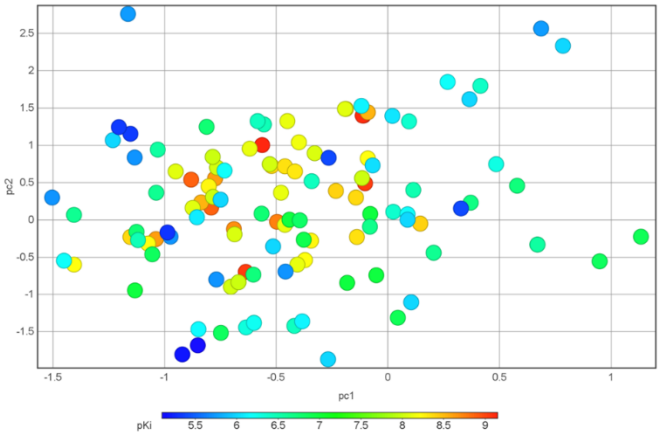


Figura 8. Reducción de la dimensionalidad empleando PCA

Tabla 2. Contribución de los parámetros fisicoquímicos al gráfico de PCA.

Nombre del parámetro fisicoquímico	PC1	PC2
Peso molecular	0.4915	-0.2144
LogP	0.16419016	-0.7374878
HBA	0.5006838	0.13928338
HBD	0.22269188	0.46400795
TPSA	0.44739429	0.3509587
Número de estereocentros	0.04092073	-0.09420556
Enlaces Rotables	0.478911	-0.2082862

En la Figura 9 se muestra la reducción de la dimensionalidad empleando t-SNE. En esta es posible observar clusters o aglomerados de compuestos en donde claramente aquellos puntos que en el gráfico de PCA se mostraban muy cercanos, se logran separar, esto es el caso de los compuestos con mejores valores de pKi .

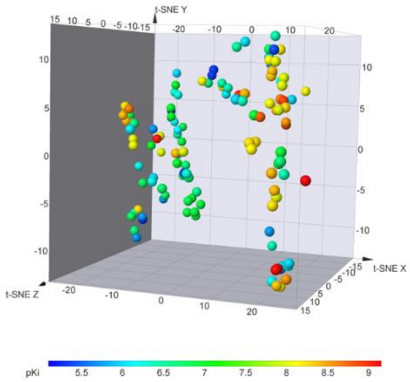


Figura 9. Grafica de t-SNE para los parámetros fisicoquímicos estudiados.

Análisis de andamios estructurales

Con el objetivo de visualizar la diversidad de andamios estructurales, se empleó el algoritmo de Bemis-Murcko en el cual se remueven los sustituyentes que se encuentren enlazados a un ciclo, si dos ciclos de encuentran unidos esta unión se conserva y se considera como un andamio.
Está técnica es de mucha utilidad el momento de diseñar nuevos compuestos ya que podemos observar que andamio es el que más se encuentra presente en los estudios y tomarlo como punto de partida.

En la figura 10 se puede observar el boxplot que contiene a los andamios estructurales más frecuentes y su actividad.

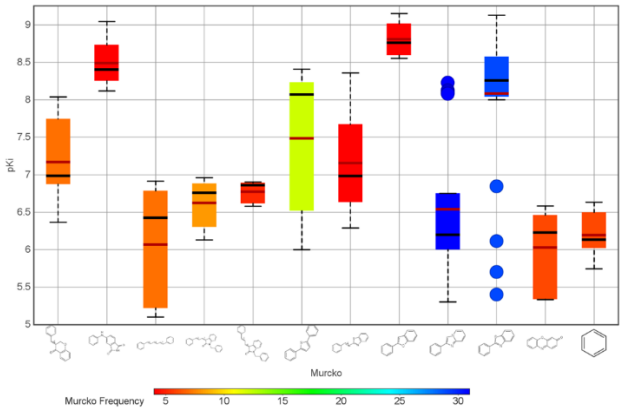
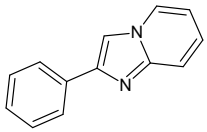
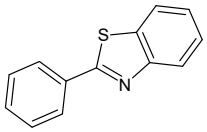


Figura 10. Box plot que contiene los andamios estructurales más frecuentes

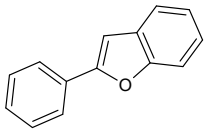
En la Figura 11 es posible observar la estructura de los compuestos que se extrajeron del grafico de cajas arriba mostrado. Una característica que resalta es que tres de los cuatro principales compuestos tienen un andamio estructural basado en un derivado del benzotiazol.



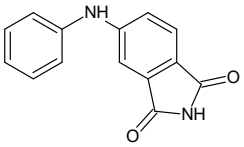
Frecuencia de aparición: 31
pKi media 7.15



Frecuencia de aparición: 29
pKi : 8.26



Frecuencia de aparición: 4
pKi media 8.79



Frecuencia de aparición: 4
pKi media 8.49

Figura 11. Andamio estructural de los compuestos con mayores frecuencias de aparición y mejores valores de pKi

Con esto en consideración sería posible proponer una serie de compuestos que presenten potencial aplicación para el tratamiento del Alzheimer basados en este tipo de andamios y basados en los parámetros fisicoquímicos, realizar las modulaciones adecuadas para obtener un perfil fisicoquímico, y farmacocinético adecuado.
Análisis de huellas digitales

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

El objetivo de asignar las huellas digitales moleculares es el obtener cuales son las subestructuras que más prevalecen en un set de compuestos a estudiar, de esa manera se puede realizar y cerrar un análisis de compuestos y proponer el tipo de grupos que se deben de insertar para obtener los mejores candidatos, esto considerando los puntos antes tratados, distribución estadística de parámetros fisicoquímicos, datos de correlación y el andamio estructural a emplear.

En la figura 12 se puede observar un gráfico de t-SNE que se construyó con los valores de la huella digital molecular MACCS-key. En esta es posible observar que los compuestos activos (puntos de color azul) muestran una distribución más estrecha, lográndose observar dos grupos (clusters) de compuestos. Por otro lado, los compuestos inactivos (puntos de color verde).

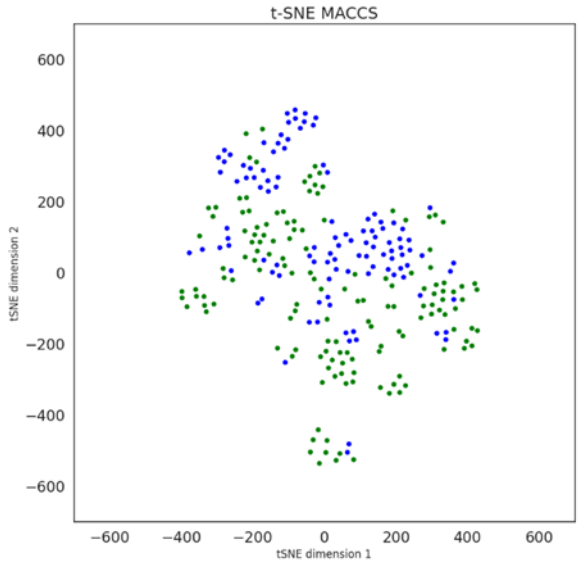


Figura 12. Gráfico de t-SNE para las huellas digitales MACCS-keys

En la figura 13 se muestra el gráfico de t-SNE para la huella digital molecular ECFP4, recordando que esta se basa en la construcción de circunferencias alrededor de un átomo y a partir de allí determinar características electrónicas y estructurales, es posible observar una distribución más amplia de los compuestos activos (azules) y de los compuestos inactivos (verdes).

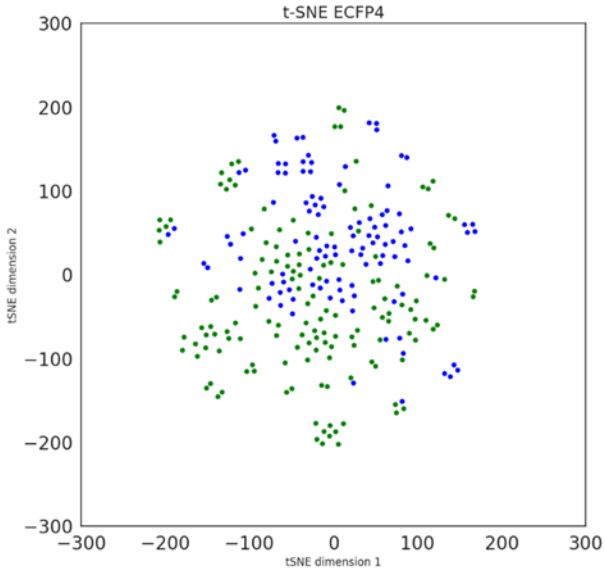


Figura 12. Gráfico de t-SNE para las huellas digitales moleculares ECFP4

CONCLUSIONES

La implementación disciplinas como la Ciencia de Datos en la Química (Quimioinformática) ha dado un resultado notable en el desarrollo de nuevos compuestos. Ya que procesos que tardaban años (diseño de fármacos) ahora es posible realizarlos en un menor tiempo y con mejores resultados. En este caso la implementación de la ciencia de datos al estudio de compuestos usados como tratamiento contra el Alzheimer, nos brinda la posibilidad de abordar la problemática de los escasos fármacos que hay para este padecimiento, esto desde un nuevo punto de vista. Logrando un entendimiento más profundo y una mejor visualización de las características que hacen a un fármaco un compuesto ideal para determinado tratamiento. En este caso particular se logró en un primer punto establecer cuatro potenciales andamios estructurales basados en un núcleo derivado del benzotiazol el cual puede ser modificado empleando la correlación positiva que hay entre ciertos parámetros fisicoquímicos y el análisis de las huellas digitales moleculares MACCS-keys y ECFP4.

Para complementar este trabajo se sugiere realizar estudios de acoplamiento molecular con las moléculas propuestas y lograr así complementar los estudios *in silico.*

AGRADECIMIENTOS

Los autores quieren agradecer a la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) por la beca posdoctoral otorgada.

BIBLIOGRAFÍA

[1] D.S. Knopman, H. Amieva, R.C. Petersen, G. Chételat, D.M. Holtzman, B.T. Hyman, R.A. Nixon, D.T. Jones, (2021). Alzheimer disease, Nat Rev Dis Primers pp.7. https://doi.org/10.1038/s41572-021-00269-y.

.

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

[2] A. Wimo, K. Seeher, R. Cataldi, E. Cyhlarova, J.L. Dielemann, O. Frisell, M. Guerchet, L. Jönsson, A.K. Malaha, E. Nichols, P. Pedroza, M. Prince, M. Knapp, T. Dua, (2023). The worldwide costs of dementia in 2019, Alzheimer's and Dementia 19 pp. 2865–2873. https://doi.org/10.1002/alz.12901.

[3] G.F. Chen, T.H. Xu, Y. Yan, Y.R. Zhou, Y. Jiang, K. Melcher, H.E. Xu, (2017). Amyloid beta: Structure, biology and structure-based therapeutic development, Acta Pharmacol Sin 38 pp.1205–1235. https://doi.org/10.1038/aps.2017.28.

[4] B. Penke, M. Szucs, F. Bogár (2020). Oligomerization and conformational change turn monomeric β-amyloid and tau proteins toxic: Their role in Alzheimer's pathogenesis, Molecules pp.25. https://doi.org/10.3390/molecules25071659.

[5] T. Mohamed, A. Shakeri, P.P.N. Rao, (2016). Amyloid cascade in Alzheimer's disease: Recent advances in medicinal chemistry, Eur J Med Chem 113 pp. 258–272. https://doi.org/10.1016/j.ejmech.2016.02.049.

[6] L. Tillement, L. Lecanu, V. Papadopoulos, (2011). Alzheimer's disease: Effects of β-amyloid on mitochondria, Mitochondrion 11 13–21. https://doi.org/10.1016/j.mito.2010.08.009.

[7] A. Varesi, A. Carrara, V.G. Pires, V. Floris, E. Pierella, G. Savioli, S. Prasad, C. Esposito, G. Ricevuti, S. Chirumbolo, A. Pascale, (2022). Blood-Based Biomarkers for Alzheimer's Disease Diagnosis and Progression: An Overview, Cells pp.11. https://doi.org/10.3390/cells11081367.

[8] J.C. Polanco, C. Li, L.G. Bodea, R. Martinez-Marmol, F.A. Meunier, J. Götz, (2018). Amyloid-β and tau complexity - Towards improved biomarkers and targeted therapies, Nat Rev Neurol 14 pp. 22–40. https://doi.org/10.1038/nrneurol.2017.162.

[9] E. López-López, J. Bajorath, J.L. Medina-Franco, (2021). Informatics for Chemistry, Biology, and Biomedical Sciences, J Chem Inf Model 61 pp.26–35. https://doi.org/10.1021/acs.jcim.0c01301.

[10] T. Yu, C. Nantasenamat, S. Kachenton, N. Anuwongcharoen, T. Piacham, (2023). Cheminformatic Analysis and Machine Learning Modeling to Investigate Androgen Receptor Antagonists to Combat Prostate Cancer, ACS Omega 8 pp. 6729–6742. https://doi.org/10.1021/acsomega.2c07346.

[11] S.W. Muchmore, J.J. Edmunds, K.D. Stewart, P.J. Hajduk, (2010). Cheminformatic tools for medicinal chemists, J Med Chem 53 pp.4830–4841. https://doi.org/10.1021/jm100164z.

[12] B. Zdrazil, E. Felix, F. Hunter, E.J. Manners, J. Blackshaw, S. Corbett, M. de Veij, H. Ioannidis, D.M. Lopez, J.F. Mosquera, M.P. Magarinos, N. Bosc, R. Arcila, T. Kizilören, A. Gaulton, A.P. Bento, M.F. Adasme, P. Monecke, G.A. Landrum, A.R. Leach, (2024). The ChEMBL Database in 2023:ã drug disco v ery platf orm spanning multiple bioactivity data typesãnd time periods, Nucleic Acids Res 52 pp. D1180–D1192. https://doi.org/10.1093/nar/gkad1004.

[13] D. Fourches, E. Muratov, A. Tropsha, (2016). Trust, but Verify II: A Practical Guide to Chemogenomics Data Curation, J Chem Inf Model 56 pp.1243–1252. https://doi.org/10.1021/acs.jcim.6b00129.

[14] M.A. Miller, (2002). Chemical database techniques in drug discovery, Nat Rev Drug Discov 1 pp. 220–227. https://doi.org/10.1038/nrd745.

[15] L. Xue, J. Bajorath, 2000. Molecular Descriptors in Chemoinformatics, Computational Combinatorial Chemistry, and Virtual Screening

[16] H. Liu, J. Yang, M. Ye, S.C. James, Z. Tang, J. Dong, T. Xing, (2021). Using t-distributed Stochastic Neighbor Embedding (t-SNE) for cluster analysis and spatial zone delineation of groundwater geochemistry data, J Hydrol (Amst) pp.597. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126146.

[17] R. Bro, A.K. Smilde, (2014). Principal component analysis, Analytical Methods 6 2812–2831. https://doi.org/10.1039/c3ay41907j.

[18] G.W. Bemis, M.A. Murcko, 1996.The Properties of Known Drugs. 1. Molecular Frameworks.https://pubs.acs.org/sharingguidelines.

[19] A. Cereto-Massagué, M.J. Ojeda, C. Valls, M. Mulero, S. Garcia-Vallvé, G. Pujadas, (2015). Molecular fingerprint similarity search in virtual screening, Methods 71 pp. 58–63. https://doi.org/10.1016/j.ymeth.2014.08.005.

[20] D. Rogers, M. Hahn, (2010). Extended-connectivity fingerprints, J Chem Inf Model 50 742–754. https://doi.org/10.1021/ci100050t.

AUTORIZACIÓN Y RENUNCIA.

Los autores del presente artículo autorizan al TecNM/Instituto Tecnológico de Zacatepec para publicar el escrito en el libro electrónico del CITID 2025. El TecNM/ITZ o los editores no son responsables ni por el contenido ni por las implicaciones de lo que está expresado en el escrito.

.

CASO DE APLICACIÓN DEL REQUISITO 7.5 INFORMACIÓN DOCUMENTADA DE LA NORMA ISO 9001:2015 EN UN PROYECTO DE RESIDENCIA

Bahena Díaz Alma[1], Ambriz Zavaleta Cecilia Marina [2], Arce Ocampo Claudia Yazmín [3], Jiménez Ramos Jennifer Paola[4], Domínguez Reyes Nicolas[5].

[1]Maestría en Administración, TECNM, Instituto Tecnológico de Zacatepec, Departamento ingeniería industrial, alma.bd@zacatepec.tecnm.mx, 7341017066, C.P. 62780.
[2]Maestria en Educación, TECNM, Instituto Tecnológico de Zacatepec, Departamento ingeniería industrial, cecilia.az@zacatepec.tecnm.mx, 7431289268, C.P. 62907.
[3]Maestria en Ciencias de la Ingeniería, TECNM, Instituto Tecnológico de Zacatepec, Departamento ingeniería industrial, claudia.ao@zacatepec.tecnm.mx, 7774243594, C.P. 62780.
[4] Egresada de ingeniería industrial, Laboratorios CLINIC S.A. de C.V., Departamento de calidad, Área de calidad y compras, Jenniferjimenez017@gmail.com, 7774602912, C.P. 76138.
[5] Maestría en Administración de Negocios, TECNM, Instituto Tecnológico de Zacatepec, Departamento ingeniería industrial, nicolas.dr@zacatepec.tecnm.mx, C.P. 62900.

Resumen -- El presente artículo tiene como objetivo el desarrollo del requisito 7.5 Información documentada de la norma [1] ISO 9001:2015 [2] para dar cumplimiento a los estándares y especificaciones de calidad y compras en los procesos de planillas, doceneras, pigmentos y calcomanías. La investigación se realizó dentro de la empresa Laboratorios CLINIC S.A. de C.V., particularmente en el área de calidad y compras para lograr la certificación de la empresa y generar productos con calidad para el mercado. Fue necesario analizar lo que solicita el requisito 7.5 Información documentada de la norma ISO 9001:2015 para que las áreas de calidad y compras pudieran cumplir con la documentación relacionada con la materia prima. Se reunió a las personas que intervienen de manera directa con el material, se analizó la información y se generó la documentación requerida para dar cumplimiento al punto 7.5 Información documentada.

Palabras Clave: Especificaciones técnicas, gestión de calidad, ISO 9001:2015, información documentada, formato base.

Abstract -- The purpose of this article is to develop requirement 7.5 Documented Information of the ISO 9001:2015 standard to comply with quality and purchasing standards and specifications in the payroll, packaging, pigment, and decal processes. The research is being conducted within Laboratories CLINIC S.A. de C.V., particularly in the area of quality and purchasing, with the aim of achieving certification and producing high-quality products for the market. It was necessary to analyze what requirement 7.5 Documented information of the ISO 9001:2015 standard requests so that both the quality and purchasing departments could comply with the documentation related to the raw material. The people who are directly involved with the material were met, the information was analyzed and the documentation required to comply with point 7.5 Documented information was generated.

Key words – Technical specifications, quality management, ISO 9001:2015, documented information, base format.

INTRODUCCIÓN

Desde 1980 [3] que el control de calidad pasó a ser un punto relevante para las empresas, se convirtió en una garantía de calidad, considerando todo lo que engloba el proceso y cadena de producción, no solo al producto terminado. Con ello se procuró garantizar la conformidad del producto desde el inicio hasta el final.

Las empresas al momento de querer implementar la norma ISO 9001:2015 en las empresas, se tiene la necesidad de que el Sistema de Gestión de la Calidad (SGC) considere e incluya la información documentada requerida por dicha norma y tambien la información documentada que la empresa defina como necesaria para que su SGC trabaje de manera eficiente.

Es necesario que se identifiquen y se describan los aspectos necesarios y se genere la información documentada para que el SGC tenga un funcionamiento óptimo, generando los procedimientos y registros precisos.

De acuerdo con la Norma ISO 9001: 2015 (2015) [2] La adopción de un SGC es una decisión estratégica para una organización que le puede ayudar a mejorar su desempeño global y proporcionar una base sólida para las iniciativas de desarrollo sostenible.

La empresa Laboratorios CLINIC en años anteriores presentaba la situación problemática que al realizar la compra de materia prima de: planillas, doceneras, pigmentos y calcomanías, empleaba un registro, sin embargo, dentro de este registro no estaba indicado las especificaciones que se deberían cumplir, solamente se registraba cuantas veces se pedían para cumplir con la planeación semanal de producción. Por este motivo, cuando llegaba material a la empresa, no tenía documentos

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

o certificados de calidad por parte del proveedor, se tenían que hacer pruebas de calidad a cada material para asegurarse que fuera el correcto, lo que llevaba a pérdida de tiempo en el proceso de elaboración de los cepillos dentales.

Por esta razón la empresa Laboratorios CLINIC consideró necesario que se crearan formatos [4] de especificación de materia prima, para que se indiquen las características y especificaciones que debe contemplar el coordinador de compras (COOR. COMPRAS) al hacer la solicitud a los proveedores y posteriormente el coordinador de calidad de proceso (COOR. CALIDAD PRO.) pueda aprobar la materia prima de una forma más rápida y sencilla.

El objetivo de la investigación es desarrollar el requisito 7.5 Información Documentada de la Norma ISO 9001:2015, para dar cumplimiento a las especificaciones al momento de solicitar las planillas, doceneras, pigmentos y calcomanías que se emplean para elaborar los cepillos dentales.

Con la información obtenida de las áreas involucradas con la materia prima se propone elaborar un formato [5] que ayude a dichas áreas (calidad, compras y almacén) para que logren mantener las especificaciones y los estándares de calidad que la empresa ha definido para sus productos.

La empresa Laboratorios CLINIC S.A. de C.V. para finales del año 2023 se planteó obtener la certificación [6] de la norma ISO 9001:2015.

DESARROLLO

Requisito 7.5 Información documentada de la norma ISO 9001:2015.

Uno de los objetivos de la norma ISO 9001:2015 es que las organizaciones cuenten con la información más relevante para poder lograr sus resultados esperados. Esto nos llevan a la importancia de tener información necesaria para apoyar el crecimiento de la organización y evidenciar dichos resultados.

La información documentada que abarca el requisito 7.5 de la norma ISO 9001:2015 es un apoyo necesario para el desarrollo estratégico de negocios. Por ello se dará cumplimiento a los mencionado en dicho requisito.

Tabla 1. Requisito 7.5 de la Norma ISO 9001:2015

7 APOYO	
7.5 Información documentada	7.5.1 Generalidades
	7.5.2 Creación y actualización
	7.5.3 Control de la información documentada

Con este propósito, se generaron los formatos necesarios para que la empresa pueda cumplir con el requisito 7.5 de la norma ISO 9001:2015, estos fueron revisados y aprobados por las partes interesadas pertinentes de la empresa.

A continuación, se muestra cómo se llevó a cabo la presente investigación:

- Analizar el requisito 7.5 Información documentada de la norma ISO 9001:2015.
- Revisar el vocabulario aplicado a las normas ISO 9000 [7].
- Investigar las partes que componen a un formato, que servirá como machote [8] o formato base.
- Reunir información de las áreas relacionada directamente con la calidad del producto (calidad, compras y almacén).
- Identificar los documentos existentes, para analizar si deben ser actualizados o eliminados. Se revisó el Procedimiento y control de documentos P-LCL-CA-01 [9].
- Crear el formato que servirá de base para la adquisición de la materia prima para elaborar los cepillos dentales. Para ello se estableció un proceso considerando los puntos del P-LCL-CA-01.
- Aprobar el formato base creado antes de su uso.
- Asegurar que el formato base esté disponible para los trabajadores. Este acceso puede estar tanto físico o digital.

Los Laboratorios CLINIC S.A. de C.V. ubicados en Querétaro, se encontraba en proceso de certificación de la norma ISO 9001:2015, por lo que surgió la necesidad de dar cumplimiento al requisito 7.5 de dicha norma. Se analizó la información generada previamente en la empresa para de ahí partir y crear la documentación pertinente para poder cumplir con el punto antes mencionado de la norma.

Se involucró a las áreas que están directamente relacionadas con la materia prima, se utilizó la información hasta el momento generada en las áreas de calidad, compras, apoyándose con el área de almacén.

Dentro de la empresa, existe una relación fundamental entre las áreas de calidad y compras. Ya que el área de compras adquiere materia prima diversa que es necesaria para la producción de los productos que se ofertan en el mercado, una vez que está en planta (área de almacén) la materia prima pasa por pruebas que son realizadas por el área de calidad, quien determina si cumple o no. Por ello era necesario que los documentos utilizados en la empresa se indicaran las especificaciones que debería de tener la materia prima (planillas, doceneras, pigmentos y calcomanías) que se utilizan para hacer los cepillos de dientes.

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

Fue necesario analizar los formatos existentes y ver si cumplían o no por lo descrito en el punto 7.5 de la norma ISO 9001:2015. Se solicitó información a los Laboratorios CLINIC, el cual proporcionó el "Procedimiento y control de documentos" P-LCL-CA-01, el cual consta de los siguientes puntos:

1. Aprobación
2. Objetivo
3. Alcance
4. Documentos de referencia
5. Definiciones
6. Procedimientos
7. Diagrama de flujo
8. Control de cambios

Del procedimiento antes mencionado, se tomó el punto 6 Procedimientos [10], para generar la documentación necesaria para que las áreas de calidad y compras puedan cumplir con el requisito 7.5 de la norma ISO 9001:2015 y así lograr la certificación.

El punto 6 Procedimientos se conforma de la siguiente manera:

6.1 Elaboración
6.2 Revisión
6.3 Aprobación
6.4 Emisión
6.5 Difusión e implementación de cambios
6.6 Modificaciones, actualizaciones o adecuaciones
6.7 Distribución
6.8 Estructura documental
6.9 Identificación
6.10 Respaldo
6.11 Control de documentos externos

Se muestra el punto 6 que está dentro del procedimiento P-LCL-CA-01, para comenzar el análisis de la información generada por la empresa y cumplir con el requisito 7.5 de la Norma ISO 9001:2015.

6. Procedimiento

Todo documento (Manual, Procedimiento, Mapa de Secuencia e Interacción de Procesos, Procedimiento, Instructivo, Ayuda visual, formato, y cualquier otro declarado dentro del SGC) requerido por LABORATORIOS CLINIC y que sea nuevo, se modifique, adecúe, mejore o se elimine, deberá someterse al siguiente proceso:

6.1 Elaboración

Consiste en la generación del documento por parte del experto del tema y del amplio conocimiento que éste tenga en la metodología de la operación, para lo cual se considera lo siguiente:

a) Previamente evaluado y aprobado el método de trabajo de la operación o actividad analizada, el conocedor del tema elaborará el documento, éste deberá describir en forma clara y sencilla su ejecución u operación (para lo cual usara) FORMATO BASE DE PRECEDIMIENTO F-LCL-CA-01, o en caso de que se elabore un formato para una actividad específica, solicita al Coor. Calidad Pro. que le asigne un código al documento (ya sea del consecutivo general del SGC o del control del procedimiento de su área). Quién elabore el documento deberá asegurarse que la operación o actividad física se ejecuta idénticamente a la teoría del documento y que se obtienen los mismos resultados, incluyendo los resultados.

a) Si el documento generado requiere la elaboración de más documentos, cada documento deberá seguir el mismo proceso.
b)Para que un documento sea considerado parte integrante del SGC, este es redactado conforme a la estructura del Formato de Base de Procedimiento F-LCL-CA-01 y deberá contener la estructura indicada en el punto 6.1.2.

Imagen 1 del punto 6 del procedimiento P-LCL-CA-01 de la empresa Laboratorios CLINIC

El punto 6.1 corresponde a la elaboración de documentos dentro de la empresa, indica cómo se deben crear un nuevo formato. Se debe solicitar al responsable de la COOR. CALIDAD PRO. que asigne una nueva clave de acuerdo con la actividad para que se realizará específicamente.

Una vez avisado al COOR. CALIDAD PRO, se pasó al punto 6.1.2 donde está indicada la estructura del documento. El cual está dividido en tres partes:

a) Encabezado
b) Cuerpo
c) Pie de página

A continuación, se enlista lo que debe contener la parte del encabezado dentro del Formato P-LCL-CA-01 de los Laboratorios CLINIC (ver imagen 2).

1. Título
2. Logotipo
3. Revisión
4. Fecha
5. Código
6. Emisor
7. Página

a) Encabezado: Debe contener lo siguiente:

1-. Título: Refiere el Nombre del documento.
2-. Logotipo de Laboratorios CLINIC.
3-. Revisión: 0 a la 99, en el ejemplo, la revisión es 00.
4-. Fecha: Refieren día, mes y año en que el documento se publica (esta fecha ha de ser coincidente con la fecha de difusión del documento, la cual está referida en una lista maestra de control de documentos F-LCL-CA-06)
5-. Código: Notación específica que tiene cada documento para que pueda ser controlado

Está conformado de X-LCL-DEPTO-NN

Dónde:
X puede ser M = Manual, P = Procedimiento, I = Instructivo, A =mapa, F = Formato, O = Política,
T= tablas, R= Reglamento, V= Ayuda visual
Luego tres letras que quieren decir: LCL = LABORATORIOS CLINIC.

Las siguientes 2 a 3 letras son del departamento.

DG: Dirección general
CA: Sistema de gestión de calidad(calidad)
LAB: Laboratorio
AL: ALMACEN
RH: Recursos Humanos
MT: Mantenimiento
VT: Ventas
CO: Compras
PT: Producción
PY: Proyectos
ME: Mejora
CAL: Calibración

NN = NÚMERO CONSECUTIVO DE DOS DÍGITOS POR DEPARTAMENTO.

Nota: Algunos formatos pueden no tener código y si no lo tienen pueden presentar S/N u S/C; sin embargo, se anexan en la lista maestra de documentos.

EJEMPLO: PROCEDIMIENTO DE CONTROL DE DOCUMENTOS
P-LCL-CA -01

P	=	PROCEDIMIENTO
LCL	=	LABORATORIOS CLINIC
CA	=	DEPARTAMENTO O ÁREA – CALIDAD
01	=	NÚMERO CONSECUTIVO DE DOS DÍGITOS

El código del documento ha de ser único y esto es controlado por el Coor. Calidad Pro.
6-. Emisor: Nombre de la persona que emite el documento.
7-. Página: Indica el número de página correspondiente y el número total de páginas.

Imagen 2 Aspectos del Encabezado en el Formato P-LCL-CA-01

Al realizar un análisis de la información mostrada en la imagen 2, se consideró necesario agregar al formato P-L-CL-CA-01 la letra E correspondiente a Especificaciones, ya que es necesario que se cuente con las especificaciones de cada materia prima que se utiliza para la fabricación de los cepillos dentales.

Se le solicita al COOR. CALIDAD PRO. que asigne una nueva clave dentro del formato P-L-CL-CA-01 y esto conlleva una actualización del mismo formato. También se recogieron las copias controladas del formato y se notifica al personal de dicho cambio.

.

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

A continuación, en la imagen 3 se muestra el diagrama de flujo [11] donde se indica cómo se llevó a cabo la actualización del formato.

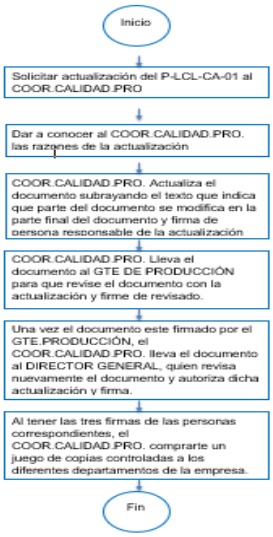


Imagen 3 Proceso para la solicitud de actualización del Formato P-LCL-CA-01.

Una vez que se tienen las tres firmas de las personas que participan en la autorización del cambio, se sube el nuevo formato del P-LCL-CA-01 al SGC de la empresa y se comparten las copias controladas a cada área.
En la siguiente imagen 4 se muestra la actualización del formato P-LCL-CA-01.

a) Encabezado: Debe contener lo siguiente:

1-. Título: Refiere el Nombre del documento.
2-. Logotipo de Laboratorios CLINIC.
3-. Revisión: 0 a la 99, en el ejemplo, la revisión es 00.
4-. Fecha: Refieren día, mes y año en que el documento se publica (esta fecha ha de ser coincidente con la fecha de difusión del documento, la cual está referida en una lista maestra de control de documentos F-LCL-CA-06)
5-. Código: Notación específica que tiene cada documento para que pueda ser controlado

Está conformado de X-LCL-DEPTO-NN

Dónde:
X puede ser M = Manual, P = Procedimiento, I = Instructivo, A =mapa, F = Formato, O = Política,
T= tablas, R= Reglamento, V= Ayuda visual
Luego tres letras que quieren decir: LCL = LABORATORIOS CLINIC.

Las siguientes 2 a 3 letras son del departamento.

DG: Dirección general
CA: Sistema de gestión de calidad(calidad)
LAB: Laboratorio
AL: ALMACEN
RH: Recursos Humanos
MT: Mantenimiento
VT: Ventas
CO: Compras
PT: Producción
PY: Proyectos
ME: Mejora
CAL: Calibración
E: Especificación

NN = NÚMERO CONSECUTIVO DE DOS DÍGITOS POR DEPARTAMENTO.

Nota: Algunos formatos pueden no tener código y si no lo tienen pueden presentar S/N u S/C; sin embargo, se anexan en la lista maestra de documentos.

EJEMPLO: PROCEDIMIENTO DE CONTROL DE DOCUMENTOS
P-LCL-CA -01
P = PROCEDIMIENTO
LCL = LABORATORIOS CLINIC
CA = DEPARTAMENTO O ÁREA – CALIDAD
01 = NÚMERO CONSECUTIVO DE DOS DÍGITOS

El código del documento ha de ser único y esto es controlado por el Coor. Calidad Pro.
6-. Emisor: Nombre de la persona que emite el documento.
7-. Página: Indica el número de página correspondiente y el número total de páginas.

Imagen 4 Actualización de instrucciones del Encabezado del Formato P-LCL-CA-01.

Teniendo en cuenta la información anterior, se procedió a crear el nuevo Formato Base de Especificaciones de Material, asignándole un código. De acuerdo con el punto 6.1.2 se procedió a realizar el Encabezado del nuevo formato.
F= Formato
LCL= Laboratorios CLINIC
CA= SGC
03= Número asignado por el COOR. CALIDAD PRO.
Por lo tanto, el código para el nuevo formato es F-LCL-CA-03

A continuación, se muestra el encabezado del nuevo Formato Base de Especificaciones de materia prima.

FORMATO BASE DE ESPECIFICACIÓN DE MATERIAL

CLINIC	Código:	F-LCL-CA-03	Página 1 de 1	
			Revisión:	00
	Emisor:		Fecha:	

Imagen 5 Encabezado del Formato Base de Especificación de Material

De acuerdo con el punto 6.1.2 Elaboración de documentos, se sigue con el inciso b, que corresponde al Cuerpo de documentos.

b) Cuerpo de documento: El procedimiento ha de contener como mínimo los siguientes títulos apartados o subtítulos:

1-. Aprobación (ningún documento es válido sin las firmas de elaboración revisión y aprobación).
Elaboró: Nombre y Puesto de la persona responsable de la elaboración del documento.
Revisó: Nombre y Puesto organizacional de la persona que Revisa el documento,
Aprobó: Nombre y Puesto organizacional de la persona que Aprueba el documento,
2-. Objetivo del documento.
3-. Alcance del documento.
4-. Documentos de referencia (en general formatos, pero pueden ser leyes y documentos externos).
5-. Definiciones (palabras utilizadas en el documento para mejor entendimiento).
6-. Procedimiento o Instructivo (detallado las actividades o instrucciones)
7-. Diagrama de flujo (puede aplicar o no).
8-. Control de cambios (que nos permite un mejor control de documentos).

Nota: El punto numero 1 es obligatorio para todo nuevo formato base, del punto 2 al 8 pueden o no estar integrados. Eso será determinado por quien elabora, ya que cada cuerpo de formato ha de ser diferente de acuerdo a la actividad para la que se utilice.

Imagen 6 Aspectos a considerar para el cuerpo de nuevos documentos.

De los puntos que se observan en la información previa (imagen 6) solamente se dio cumplimiento al apartado de Aprobación.

1. APROBACIÓN:

Elaboró	Revisó	Aprobó
COOR. COMPRAS	COOR. CALIDAD PRO.	GTE. ADMINISTRATIVO

Imagen 7 Punto uno del Formato Base de Especificación de Material.

Se consideró pertinente que el COOR. COMPRAS funja como quien elabora el nuevo formato, ya que es quien tiene el trato con proveedores y la compra de materia prima, y es quien debe indicar las especificaciones necesarias.

Para la parte de revisor se consideró que fuera el COOR. CALIDAD PRO. por qué es quien identifica el material como bueno para pasar a producción, una vez que se ha revisado que cumpla con las especificaciones indicadas por compras.

Por último, la persona encargada de autorizar dicho formato será el Gerente administrativo (GTE. ADMINISTRATIVO), esto debido a qué es quién autoriza los pagos y pueda conocer los detalles de la compra.

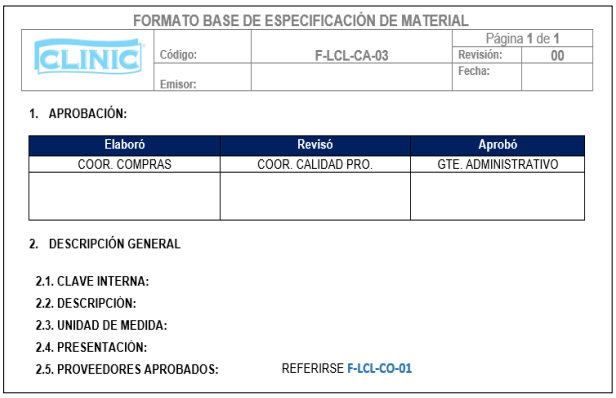
Continuando con el análisis de lo que debería comprender el cuerpo del nuevo formato, se consideró analizar los siguientes formatos.

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

- Procedimiento de Inspección P-LCL-IN-01
- Procedimiento de Compras P-LCL-CO-01

De este análisis se consideró agregar los siguientes puntos dentro del cuerpo del Formato Base de Especificación de Material, siguiendo el orden de numeración que se dio en el punto uno de Aprobación. En el diseño de la propuesta se consideraron las necesidades de las áreas de calidad y compras para facilitar al COOR. CALIDAD PRO. la liberación de la materia prima sea más fácil y sencilla, y se pase al área de producción.

2. DESCRIPCIÓN GENERAL
2.1 CLAVE INTERNA (asignada por el COOR. COMPRAS, se genera de acuerdo al tipo de material)
2.2 DESCRIPCIÓN (asignada por el COOR. COMPRRAS, con la ayuda del COOR. CALIDAD PRO. para indicar una descripción general del material)
2.3 UNIDAD DE MEDIDA (Kg, Pza., L, etc.)
2.4 PRESENTACIÓN (sacos, cajas, tarimas, etc.)
2.5 PROVEEDORES APROBADOS (considera el listado de proveedores que se encuentra en formato F-LCL-CO-01)



FORMATO BASE DE ESPECIFICACIÓN DE MATERIAL

CLINIC	Código: F-LCL-CA-03	Página 1 de 1	
		Revisión:	00
	Emisor:	Fecha:	

1. APROBACIÓN:

Elaboró	Revisó	Aprobó
COOR. COMPRAS	COOR. CALIDAD PRO.	GTE. ADMINISTRATIVO

2. DESCRIPCIÓN GENERAL

2.1. CLAVE INTERNA:
2.2. DESCRIPCIÓN:
2.3. UNIDAD DE MEDIDA:
2.4. PRESENTACIÓN:
2.5. PROVEEDORES APROBADOS: REFERIRSE F-LCL-CO-01

Imagen 8 Avance del Formato Base de Especificación de Material

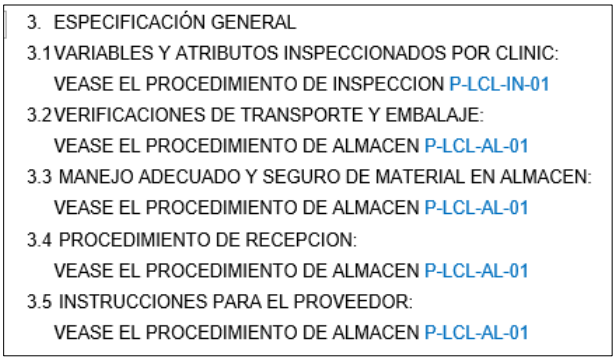
Para seguir con el desarrollo del cuerpo del documento se sigue al punto tres, en donde se propuso agregar la especificación general del material, se agrega información detallada del material, la cual puede ser la siguiente:

- Medidas del material en su forma individual (planilla, docenera, calcomanía). Estas medidas se pueden mostrar mediante una tabla para que el área de calidad pueda realizar la inspección, de la misma de forma rápida y así disminuir los tiempos de inspección.
- Componentes del material (para el caso de pigmentos) [12]. En los pigmentos es importante conocer los elementos, esto debido a que debe cumplir con ciertos ingredientes para obtener el color que se requiere. Al tener esta información se puede comparar contra lo que el proveedor entrega y verificar desde este punto si es lo que se requiere.
- Certificado FDA (pigmentos). Los pigmentos al ser utilizados para darle color al mango del cepillo deben contar con el certificado FDA, ya que el producto terminado (cepillo dental) es usado para higiene personal y está en contacto con el cuerpo.
- Etc. (Otras que sean necesarias de acuerdo con el material)

Los puntos antes mencionados son importantes ya que la materia prima que adquiere el área de compras se importa, y en ocasiones al no tener documentos de las especificaciones, la compra se hace difícil por el idioma. Asi tambien, esto hace que se atrasen los tiempos de liberación de materia prima por parte del área de calidad, ya que no se cuenta con la información suficiente.

Dentro del punto tres del cuerpo del formato F-LCL-CA-03 se consideró oportuno la información que pudiera proporcionar el área de Almacén, ya que se encargan del movimiento del material, desde su ingreso a almacén hasta surtir en producción.

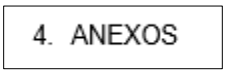
Por lo tanto, las tres áreas que se reunieron para analizar el punto tres del cuerpo del formato F-LCL-CA-03, generan la siguiente información.



3. ESPECIFICACIÓN GENERAL
3.1 VARIABLES Y ATRIBUTOS INSPECCIONADOS POR CLINIC:
VEASE EL PROCEDIMIENTO DE INSPECCION P-LCL-IN-01
3.2 VERIFICACIONES DE TRANSPORTE Y EMBALAJE:
VEASE EL PROCEDIMIENTO DE ALMACEN P-LCL-AL-01
3.3 MANEJO ADECUADO Y SEGURO DE MATERIAL EN ALMACEN:
VEASE EL PROCEDIMIENTO DE ALMACEN P-LCL-AL-01
3.4 PROCEDIMIENTO DE RECEPCION:
VEASE EL PROCEDIMIENTO DE ALMACEN P-LCL-AL-01
3.5 INSTRUCCIONES PARA EL PROVEEDOR:
VEASE EL PROCEDIMIENTO DE ALMACEN P-LCL-AL-01

Imagen 9 Especificación general del material

El cuarto punto que contiene el formato es sobre los anexos. Estos anexos son imágenes del material, en caso de que aplique, para tener una referencia de cómo debe llegar la materia solicitada, para facilitar el trabajo al COOR. CALIDAD PRO., sino se requiere, se indica con una leyenda de N/A. Se muestra a continuación, imagen 10.



4. ANEXOS

Imagen 10 Anexos del Formato Base de Especificación de Material

Para el siguiente punto se toma en cuenta el punto 6.6 Modificaciones, actualizaciones o adecuaciones del P-CL-CA-01 y con ello completar el cuerpo del nuevo formato base (imagen 11).

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

6.6 Modificaciones, actualizaciones o adecuaciones

Se efectúan revisiones periódicas (sobre todo después de auditorías) a los documentos que forman parte del SGC para validar que éstos se encuentran legibles, fácilmente identificables y en condiciones de uso; así como, las actividades que se realicen sean congruentes con lo declarado en los mismos.

Las modificaciones se indican subrayado en el cuerpo del procedimiento el texto, palabra o párrafo que se modificó, si es una tabla, diagrama o dibujo, se marca por medio de una raya vertical a uno de los costados o por medio de una estrella si sólo cambió un punto del diagrama.

Y también tenemos al final del documento una tabla de control de cambios, que sirve para mostrar las mejoras documentadas, acciones correctivas o preventivas que han sido realizadas en el SGC.
La siguiente tabla se anexa como ejemplo:

REV	FECHA	CAMBIOS	ELABORO
00	1-JUL-22	Primera emisión	Nombre del elaborador
01	3-may-23	Modificaciones puntos 6.1, 6.2 y 6.5 en el procedimiento debidas a AUDITORIA INTERNA 001-MAYO 23	Nombre del elaborador

Los cambios, modificaciones o adecuaciones a los documentos son revisados y aprobados para posteriormente emitirse mediante el siguiente mecanismo:

6.6.1 Cuando se trate de cambios, modificaciones o adecuaciones al Manual de Calidad o Procedimientos, ha de quedar registrado al final del documento de manera resumida y se notificará al Coor. Calidad Pro. Para que efectúe las correcciones correspondientes.

6.6.2 En caso de formatos o documentos donde por su naturaleza el cambio no pueda ser registrado en éste, registra sus adecuaciones en la Lista Maestra de Documentos F-LCL-CA-06.

6.6.3 En caso de documentos propiedad del cliente o externos, se comunica al Coor. Calidad Pro. Del cambio, modificación o adecuación del documento, para que valore la afectación que éste tendrá dentro de los documentos del SGC y se lleve a cabo la metodología mencionada en los puntos anteriores.

6.6.4 Una vez valorados los cambios y/o afectaciones de los documentos dentro del SGC se realizará la actualización y distribución de la documentación.

Imagen 11 Contenido del Punto 6.6 del Formato P-LCL-CA-01

De acuerdo con lo establecido en el punto 6.6 se agrega como último punto del cuerpo del documento, el control de cambios y se muestra.

5. CONTROL DE CAMBIOS

REV	FECHA	CAMBIOS	ELABORÓ

Imagen 12 Control de Cambios

Para terminar el Formato F-LCL-CA-03 se debe considerar el punto 6.1.2 del Formato P-LCL-CA-01, el inciso c.
Este último inciso nos indica que todo documento que utilice la empresa Laboratorios CLINIC, deben tener su pie de página correspondiente.

c)Pie de Página: En la sección se indica la revisión del formato de DOCUMENTO y la Revisión

Imagen 13 Instrucción del Pie de Página

A continuación, se muestra el resultado obtenido del análisis que se realizó en la empresa Laboratorios CLINIC. Una vez terminado el Formato Base de Especificaciones de Material F-LCL-CA-03 se envió por correo electrónico al COOR. CALIDAD PRO para que subiera el nuevo formato al SGC y se compartiera una copia controlada de la misma a las áreas necesarias.

FORMATO BASE DE ESPECIFICACIÓN DE MATERIAL
(1)

CLINIC	Código:	F-LCL-CA-03 (2)	Revisión:	00 (4)
			Fecha:	dd/mm/aaaa (5)
	Emisor:	(3)	Página 1 de 2	

1. APROBACIÓN:

Elaboró	Revisó	Aprobó
COOR. COMPRAS	COOR. CALIDAD PRO.	GTE. ADMINISTRATIVO
(6)	(7)	(8)

2. DESCRIPCIÓN GENERAL:

2.1 CLAVE INTERNA: (9)
2.2 DESCRIPCIÓN: (10)
2.3 UNIDAD DE MEDIDA: (11)
2.4 PRESENTACIÓN: (12)
2.5 PROVEEDORES APROBADOS: REFERIRSE F-LCL-CO-01

3. ESPECIFICACIÓN GENERAL:

(13)

3.1 VARIABLES Y ATRIBUTOS INSPECCIONADOS POR CLINIC:
VEASE EN EL PROCEDIMIENTO DE INSPECCION P-LCL-IN-01

3.2 VERIFICACION DE CONDICIONES DE TRANSPORTE Y EMBALAJE:
VEASE EN EL PROCEDIMIENTO DE ALMACÉN P-LCL-AL-01

3.3 MANEJO ADECUADO Y SEGURO DE MATERIAL EN ALMACÉN:
VEASE EN EL PROCEDIMIENTO DE ALMACÉN P-LCL-AL-01

3.4 PROCEDIMIENTO DE RECEPCIÓN:
VEASE EN EL PROCEDIMIENTO DE ALMACÉN P-LCL-AL-01

3.5 INSTRUCCIONES PARA EL PROVEEDOR:
VEASE EN EL PROCEDIMIENTO DE ALMACEN P-LCL-AL-01

4. ANEXOS (14)

5. CONTROL DE CAMBIOS

Rev.	FECHA	CAMBIOS	ELABORÓ
(15)	dd/mm/aaaa (16)	(17)	(18)

Rev. 00 F-LCL-CA-03

Imagen 14 Formato Base con instrucciones de llenado.

FORMATO BASE DE ESPECIFICACIÓN DE MATERIAL

CLINIC	Código:	F-LCL-CA-03	Revisión:	00
			Fecha:	dd/mm/aaaa
	Emisor:		Página 2 de 2	

INSTRUCCIONES DE LLENADO PARA EL FORMATO BASE DE ESPECIFICACIONES

Número	Descripción
1	Anotar como titulo, ESPECIFICACION DE MATERIAL
2	Anotar E-LCL-CO-(N), donde N corresponde a un número consecutivo de 3 dígitos asignado dado por la clave interna
3	Anotar el nombre de quien emite la especificación
4	Anotar la revisión a dos dígitos.
5	Anotar la fecha en que se elabora la especificación de acuerdo al formato indicado.
6	Anotar el nombre del coordinador de compras
7	Anotar el nombre del coordinador de calidad
8	Anotar el nombre del gerente administrativo
9	Anotar la clave de la materia prima.
10	Anotar la descripción del material,
11	Anotar la unidad de medida (Kg., pza., LT, etc.)
12	Anotar la presentación en la que llega (sacos, cajas, tarimas, etc.)
13	Anotar descripción detalla del material (medidas, componentes, certificados, etc.)
14	Agregar imágenes del material para observar los artes y/o medidas
15	Anotar la revisión correspondiente al material
16	Anotar la fecha en que se realiza la emisión del documento y/o actualizaciones
17	Anotar los cambios realizados señalando el punto en donde se realizó la actualización o en su caso emisión del documento
18	Anotar el nombre de quien elabora el documento o las actualizaciones

Nota: Las especificaciones de materia prima no tienen un límite de hojas, estas dependen de cada material.

Rev. 00 F-LCL-CA-03

Imagen 15 Instrucciones de llenado del Formato base

.

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

A continuación, se muestran dos ejemplos de la aplicación del Formato Base de Especificación de Material F-LCL-CA-03 empleado en un tipo de calcomanía y en uno de los tantos pigmentos que se utilizan.

ESPECIFICACIÓN DE MATERIAL

CLINIC	Código:	F-LCL-CO-185 PIRAÑNU	Página 1 de 2	
			Revisión:	00
	Emisor:	ALEJANDRA MARTÍNEZ	Fecha:	10/10/2023

1. APROBACIÓN:

Elaboró	Revisó	Aprobó
COOR. COMPRAS	COOR. CALIDAD PRO.	GTE. ADMINISTRATIVO
Alejandra Martínez	Gerardo Sánchez	Laura Flores

2. DESCRIPCIÓN GENERAL

2.1. CLAVE INTERNA: MCCALC32-PIRAÑNU
2.2. DESCRIPCIÓN: CALCOMANIA C32 PIRAÑA NUEVO
2.3. UNIDAD DE MEDIDA: PZA
2.4. PRESENTACIÓN: ROLLO
2.5. PROVEEDORES APROBADOS: REFERIRSE F-LCL-CO-01

3. ESPECIFICACIÓN GENERAL:
Calcomanía adheridle por transferencia de calor para estampado en SAN.
Este producto no tiene caducidad.
8 calcomanías entre macula y macula.

CALCOMANIA		TEST METOD REP EN COA	ANSI	LETRA	TOLERANCIAS		
PARTE	VARIABLE				MIN	TARGET	MAX
LOGO	MEDIDAS	DIMESIONAL	AQL .65	-	Véase anexo 1		
	DISEÑO	VISUAL	AQL .65	-			
MACULA	ANCHO (Macula a macula)	DIMESIONAL	AQL .65	A	109.5 mm	110 mm	110.5 mm
	LARGO (Macula a macula)	DIMESIONAL	AQL .65	B	253.5mm	254 mm	254.5 mm
	LOGO a Macula izquierda	DIMESIONAL	AQL .65	C	5.96 mm	6.46 mm	6.96 mm
	LOGO a Macula derecha	DIMESIONAL	AQL .65	D	8.30 mm	8.8 mm	9.3 mm
	Distancia vertical entre calcomanías	DIMESIONAL	AQL .65	E	25.39mm	25.54 mm	25.69 mm
	Distancia entre calcomanía y la orilla superior	DIMESIONAL	AQL .65	F	3.57 mm	4.07 mm	4.57 mm
	Distancia entre calcomanía y la orilla inferior	DIMESIONAL	AQL .65	G	3.57 mm	4.07 mm	4.57 mm
	Calcomanías por macula	DIMESIONAL	AQL .65	-	-	8	-

3.1. VARIABLES Y ATRIBUTOS INSPECCIONADOS POR CLINIC:
VEASE EN EL PROCEDIMIENTO DE INSPECCION P-LCL-IN-01

3.2. VERIFICACION DE CONDICIONES DE TRANSPORTE Y EMBALAJE:
VEASE EN EL PROCEDIMIENTO DE ALMACEN P-LCL-AL-01

3.3. MANEJO ADECUADO Y SEGURO DE MATERIAL EN ALMACÉN:
VEASE EN EL PROCEDIMIENTO DE ALMACEN P-LCL-AL-01

3.4. PROCEDIMIENTO DE RECEPCIÓN:

REV. 00 F-LCL-CA-03

Imagen 16 Página 1 del Formato de especificación de calcomanía PIRAÑANU

ESPECIFICACIÓN DE MATERIAL

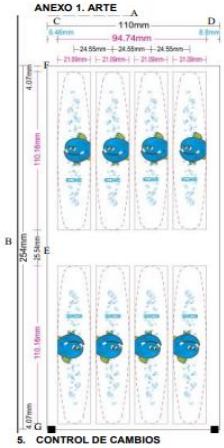
CLINIC	Código:	F-LCL-CO-185 PIRAÑNU	Página 2 de 2	
			Revisión:	00
	Emisor:	ALEJANDRA MARTÍNEZ	Fecha:	10/10/2023

VEASE EN EL PROCEDIMIENTO DE ALMACEN P-LCL-AL-01

3.5 **INSTRUCCIONES PARA EL PROVEEDOR:**
VEASE EN EL PROCEDIMIENTO DE ALMACEN P-LCL-AL-01

4. ANEXOS

ANEXO 1. ARTE



5. CONTROL DE CAMBIOS

REV	FECHA	CAMBIOS	ELABORÓ
00	10/10/2023	EMISIÓN DE DOCUMENTO	ALEJANDRA MARTÍNEZ

REV. 00 F-LCL-CA-03

Imagen 17 Página 2 del Formato de especificación de calcomanía PIRAÑNU

ESPECIFICACIÓN DE MATERIAL

CLINIC	Código:	F-LCL-CO-032 MIPIPP-NREX	Página 1 de 2	
			Revisión:	00
	Emisor:	ALEJANDRA AMRTÍNEZ	Fecha:	10/202023

1. APROBACIÓN:

Elaboró	Revisó	Aprobó
COOR. COMPRAS	COOR. CALIDAD PRO.	GTE. ADMINISTRATIVO
Alejandra Martínez	Gerardo Sánchez	Laura Flores

2. DESCRIPCIÓN GENERAL

2.1. CLAVE INTERNA: MIPIPP-NREX25626
2.2. DESCRIPCIÓN: PIGMENTO (REX-25626) NARANJA
2.3. UNIDAD DE MEDIDA: KG
2.4. PRESENTACIÓN: SACO DE 1 A 5 KG
2.5. PROVEEDORES APROBADOS: REFERIRSE F-LCL-CO-01

3. ESPECIFICACIÓN GENERAL:

PIGMENTO PARA POLIPROPILENO

Pigmento presentado en forma de polvos finos de tamaño de partícula entre 10 y 100 nm formados por la mezcla física de pigmentos, colorantes y aditivos puros, sin el uso de cargas, que permitan aplicar en una mínima concentración. Diseñado para la coloración de resinas en el proceso de inyección y extrusión a un bajo costo.

Este producto tiene buen poder cubriente, muy buena resistencia a la temperatura y a la luz y tiene excelente dispersión y sin problema de migración, veteado y toxicidad.
Este producto cuenta con aprobación FDA y es perfecto para aplicar en artículos para plásticos que estén en contacto directo con alimentos.

Clave del proveedor:
Espectroquimia: **EQ 2664-1**

INFOMACION DEL PRODUCTO			
PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS	COLOR	NARANJA	
	TONO	CMC D65 -10°	
		L*	91.57
		a*	-22.90
		b*	90.50
		C*	93.35
		h°	104.20
	APARIENCIA	Polvo	
	TAMAÑO	Entre 10 Y 100 NM	
	OLOR	Inoloro	
	SOLUBILIDAD EN AGUA	No soluble	

REV. 00 F-LCL-CA-03

Imagen 18 Página 1 del Formato de especificación de pigmento NARANJAREX

ESPECIFICACIÓN DE MATERIAL

CLINIC	Código:	F-LCL-CO-032 MIPIPP-NREX	Página 2 de 2	
			Revisión:	00
	Emisor:	ALEJANDRA AMRTÍNEZ	Fecha:	10/202023

PROPIEDADES DE RESISTENCIA	RESITENCIA A LA MIGRACIÓN	1-5	5
	RESITENCIA A LA LUZ	1-5	4
	RESITENCIA A LA INTERPERIE	1-5	4
	RESITENCIA A LA TEMPERATURA	°C	280 (5 min)
APLICACIÓN, RECOMENDACIONES Y USOS	Procesos: Moldeado por inyección		
	Mezclado: Mezclarse a una velocidad de 80 rpm durante 10 minutos. No llenar tambo de mezclador a más de la mitad.		
	Aplicación recomendada: 1% (10 gr de polvo / 1Kg. de resina)		
	Uso final: Personal/Farmacéutico/Doméstico/Industrial		
	Uso en artículos en contacto directo con alimentos:	Si	
	Resinas:	PP	

3.1. VARIABLES Y ATRIBUTOS INSPECCIONADOS POR CLINIC:
VEASE EN EL PROCEDIMIENTO DE INSPECCION P-LCL-IN-01

3.2. VERIFICACION DE CONDICIONES DE TRANSPORTE Y EMBALAJE:
VEASE EN EL PROCEDIMIENTO DE ALMACEN P-LCL-AL-01

3.3. MANEJO ADECUADO Y SEGURO DE MATERIAL EN ALMACÉN:
VEASE EN EL PROCEDIMIENTO DE ALMACEN P-LCL-AL-01

3.4. PROCEDIMIENTO DE RECEPCIÓN:
VEASE EN EL PROCEDIMIENTO DE ALMACEN P-LCL-AL-01

3.5 **INSTRUCCIONES PARA EL PROVEEDOR:**
VEASE EN EL PROCEDIMIENTO DE ALMACEN P-LCL-AL-01

4. ANEXOS
N/A

5. CONTROL DE CAMBIOS

REV	FECHA	CAMBIOS	ELABORÓ
00	10/10/2023	EMISIÓN DE DOCUMENTO	ALEJANDRA MARTÍNEZ

REV. 00 F-LCL-CA-03

Imagen 20 Página 1 del Formato de especificación de pigmento NARANJAREX

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

DISCUSIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

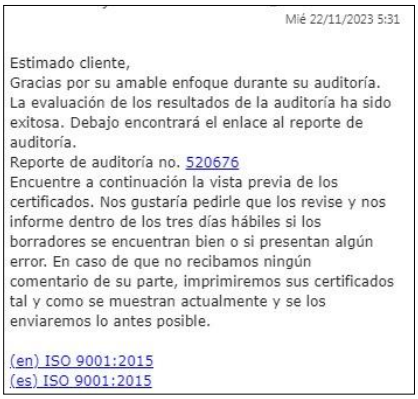
Con la realización del Formato Base de Especificación de Material F-LCL-CA-03 la empresa Laboratorios CLINIC dio cumplimiento al requisito 7.5 Información documentada de la Norma ISO 9001:2015 y con ello se logró obtener la Certificación que la empresa indico como un objetivo a lograr.

7.5. Información documentada
7.5.1. Generalidades. La empresa Laboratorios CLINIC incluye la información documentada para dar cumplimiento a las especificaciones del material que se ocupa en la producción de cepillos en el Formato Base de Especificaciones de Material F-LCL-CA-03.

7.5.2 Creación y actualización. La empresa Laboratorios CLINIC considero necesario crear y generar un formato que ayudara a cumplir con las especificaciones del material que se ocupa en la producción de cepillos dentales, por ello se realizó el análisis descrito en la parte de Desarrollo del presente trabajo. Al generar el Formato Base de Especificación de Material F-LCL-CA-03 fue necesario actualizar el Formato Procedimiento y Control de Documentos P-LCL-CA-01.

7.5.3. Control de la información documentada. La empresa Laboratorios CLINIC se asegura que la información documentada esté disponible, se distribuya, se almacene, se proteja de manera adecuada, apoyándose del COOR. CALIDAD PRO.

El Formato Base de Especificación de Material F-LCL-CA-03 se puede usar para las especificaciones de cualquier materia prima que se requiera en planillas, doceneras, calcomanías, pigmentos, corrugados, mangos, cerdas, PVC, alambre, entre otros. Este formato facilito el proceso de compra, la inspección y del manejo de material en la planta. La empresa Laboratorios CLINIC cumplió con el objetivo de obtener la Certificación. Se muestra el correo enviado por el auditor, donde se indicó que la empresa logró la Certificación.


Mié 22/11/2023 5:31

Estimado cliente,
Gracias por su amable enfoque durante su auditoría. La evaluación de los resultados de la auditoría ha sido exitosa. Debajo encontrará el enlace al reporte de auditoría.
Reporte de auditoría no. 520676
Encuentre a continuación la vista previa de los certificados. Nos gustaría pedirle que los revise y nos informe dentro de los tres días hábiles si los borradores se encuentran bien o si presentan algún error. En caso de que no recibamos ningún comentario de su parte, imprimiremos sus certificados tal y como se muestran actualmente y se los enviaremos lo antes posible.

(en) ISO 9001:2015
(es) ISO 9001:2015

Imagen 21 Correo de Confirmación de Acreditación de la Norma ISO 9001:2015

.

CONCLUSIONES

La empresa Laboratorios CLINIC cumplió con su objetivo planteado al inicio de la realización de este trabajo de obtener la Certificación de la Norma ISO 9001:2015. Al generar un formato que ayudó a cumplir el requisito 7.5 de dicha norma.

El Formato Base de Especificación de Material F-LCL-CA-03 da cumplimiento a la información documentada necesaria para las áreas de compras y calidad, así tambien el buen manejo de la materia prima por parte del área de almacén.

El formato F-LCL-CA-03 posteriormente se aplicó para sus demás productos:

- Hilo dental
- Pasta dental
- Cera dental

La empresa se comprometió con seguir con la mejora continua para brindar productos con alta calidad y mantener su certificación por varios periodos. Ya que la certificación tiene una validez de tres años [13], se debería considerar generar un Plan de Auditoría [14], el cual estaría comprendido para:

- Auditorias de seguimientos [15], cuyo propósito será para verificar que la empresa cumple con los estándares de calidad, así tambien identificar y corregir desviaciones antes de la auditoria de recertificación.

AGRADECIMIENTOS

Un agradecimiento a la empresa Laboratorios CLINIC por autorizar el uso de la información que se generó cuando se realizó la residencia profesional.

BIBLIOGRAFÍA

[1] García, V. (2018). ¿Qué es una norma? Unidades de Apoyo para el Aprendizaje. Recuperado de https://uapa.cuaieed.unam.mx/sites/default/files/minisite/static/b21dc82f-af46-4e6e-aa9e-7ec603806a45/1-Concepto-de-Norma/index.html

[2] Cortez, J. (2017). Sistemas de Gestión de la Calidad (1ª ed.). ICB. Sistemas de Gestión de Calidad (ISO 9001:2015). Recuperado de https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=RhkwDwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PT8&dq=ISO+9001:2015&ots=XSymYrBUD4&sig=XGuNAx3YyegJShFMPrSf5FUpUe8#v=onepage&q=ISO%209001%3A2015&f=false

[3] Heizer, J. & Render, B. (2009). Principios de Administración de Operaciones. Recuperado de https://virtual.unju.edu.ar/pluginfile.php/811778/mod_resource/content/1/Principios_De_Administracion_De_Operacio%20render.pdf

[4] REAL ACADEMIA ESPAÑOLA: *Diccionario de la lengua española*, (23ª ed.) [versión 23.7 en línea]. Recuperado de https://dle.rae.es/formato

[5] García, J. (2016). Enciclopedia Asigna (36ª ed.). ENA. Definición de formato. Recuperado de https://enciclopedia.net/formato/

[6] Geo innova. (2021). ISO 9001- ¿Qué es?, importancia y trámites de certificación. Recuperado de https://geoinnova.org/blog-territorio/iso-9001/#:~:text=Para%20qu%C3%A9%20sirve%20la%20ISO%209001,-La%20importancia%20de&text=La%20gesti%C3%B3n%20de%20la%20calidad%20nos%20ayuda%20a%20reducir%20la,funcionamiento%20normales%2C%20%C3%B3ptimas%20o%20adversas.

[7] ISO 9000:2005. (2005). Sistemas de gestión de la calidad — Fundamentos y vocabulario. Recuperado de https://www.iso.org/obp/ui/es/#iso:std:iso:9000:ed-4:v1:es

[8] REAL ACADEMIA ESPAÑOLA: *Diccionario de la lengua española*, (23ª ed.) [versión 23.6 en línea]. https://dle.rae.es/machote

[9] Core Business Solutions. Recuperado de https://www.thecoresolution.com/clause-7-5-iso-90012015-explained

[10] Universidad de Nariño. (2020). Guía para la Elaboración y Control de Documentos y Registros del SIGC. Recuperado de https://www.udenar.edu.co/recursos/wp-content/uploads/2020/05/SGC-GU-01-Guia-Elaboracion-y-Control-de-Docs-v6.pdf

[11] Conexión ESAN. (2019). El uso del diagrama de flujo ara la gestión de la calidad. Recuperado de https://www.esan.edu.pe/conexion-esan/el-uso-del-diagrama-de-flujo-para-la-gestion-de-calidad#:~:text=El%20diagrama%20de%20flujo%2C%20tambi%C3%A9n,y%20el%20final%20del%20mismo

[12] DOF- Diario Oficial de la Federación. Recuperado de https://www.dof.gob.mx/nota_detalle_popup.php?codigo=4917218

[13] ereinn consultoría y formación. Duración de la vigencia del certificado de calidad ISO 9001: Compromiso continuo con la excelencia empresarial. Recuperado de https://ereinn.com/duracion-de-la-vigencia-del-certificado-de-calidad-iso-9001-compromiso-continuo-con-la-excelencia-empresarial/

[14] ESGinnova Group. ¿Diferencias entre un Programa y un Plan de auditoria? Recuperado de https://www.nueva-iso-9001-2015.com/2020/06/diferencias-entre-un-programa-y-un-plan-de-auditoria/

[15] ESGinnova Group. ¿Qué es una auditoria de seguimiento basada en ISO 9001 2015? Recuperado de https://www.nueva-iso-9001-2015.com/2016/11/auditoria-seguimiento-iso-9001-2015/

AUTORIZACIÓN Y RENUNCIA.

Los autores del presente artículo autorizan al TecNM/Instituto Tecnológico de Zacatepec para publicar el escrito en el libro electrónico del CITID 2025. El TecNM/ITZ o los editores no son responsables ni por el contenido ni por las implicaciones de lo que está expresado en el escrito.

.

CITID 2025 ISSN: 2992-8516

ANÁLISIS DE ESTRATEGIAS DE APRENDIZAJE DEL PROGRAMA EDUCATIVO DE INGENIERÍA EN ADMINISTRACIÓN DEL INSTITUTO TECNOLÓGICO DE ZACATEPEC

Janet Lissy Moreno Hernández[1], Edgar Isaías Flores Martínez [2], Miriam Antonia Chavarria Santibañez[3], María Del Rocío Ramírez Miranda[4]

[1]Maestra en Administración. Tecnológico Nacional de México/ Instituto Tecnológico de Zacatepec, Departamento de Ciencias Económico-Administrativo. janet.mh@zacatepec.tecnm.mx. 7774422199, Calzada tecnológico #27 C.P. 62780 Zacatepec de Hidalgo, Morelos. México

[2]Licenciado en Administración. Tecnológico Nacional de México/ Instituto Tecnológico de Zacatepec, Departamento de Ciencias Económico-Administrativo. edgar.fm@zacatepec.tecnm.mx. 7773014097, Calzada tecnológico #27 C.P. 62780 Zacatepec de Hidalgo, Morelos. México

[3] Doctorado en Administración. Tecnológico Nacional de México/ Instituto Tecnológico de Zacatepec, Departamento de Ciencias Económico- Administrativo. miriam.cs@zacatepec.tecnm.mx. 734 100 9871, Calzada Tecnológico #27, CP. 62780, Zacatepec de Hidalgo, Morelos, México.

[4]Maestra en Administración. Tecnológico Nacional de México/ Instituto Tecnológico de Zacatepec, Departamento de Ciencias Económico-Administrativo. maria.rm@zacatepec.tecnm.mx. 7774422199, Calzada tecnológico #27 C.P. 62780 Zacatepec de Hidalgo, Morelos. México

Resumen – La presente investigación se centra en una muestra aleatoria de estudiantes del programa de Ingeniería en Administración del Instituto Tecnológico de Zacatepec, con el propósito de identificar las estrategias de aprendizaje más utilizadas por los estudiantes y, a partir de estos hallazgos, plantear alternativas que se ajusten a las necesidades educativas. A través de la recolección y análisis de datos, esta investigación busca identificar las estrategias de aprendizaje que contribuyan a mejorar el proceso de enseñanza dentro del aula. Al aplicar estrategias pedagógicas más adecuadas, se espera no solo optimizar el aprendizaje, sino también reducir la deserción escolar, problema que impacta directamente al Instituto Tecnológico de Zacatepec, a la comunidad estudiantil y al desarrollo en el ámbito laboral del país. La implementación de estrategias efectivas por parte de los docentes permite que los y las estudiantes logren un desarrollo académico exitoso y aumenten sus oportunidades de inserción laboral, reafirmando así el papel del docente como un agente clave en la formación de profesionistas preparados y competitivos. De acuerdo con lo antes mencionado, se concluye que los docentes no solo tienen la responsabilidad de transmitir conocimientos, sino que también actúan como guías y formadores de profesionistas capaces de enfrentar los desafíos del mundo laboral. Su papel dentro del aula es crucial, ya que, a través de estas estrategias pedagógicas efectivas, pueden potenciar el desarrollo de habilidades técnicas y competencias esenciales en sus estudiantes. Además, al conocer las diversas formas en que los alumnos aprenden, pueden adaptar sus métodos de enseñanza para garantizar una formación más significativa y efectiva. De esta manera, no solo facilitan el proceso de aprendizaje, sino que también contribuyen a la preparación de individuos con bases sólidas para su inserción en el ámbito laboral.

Palabras Clave: Alternativas, Aprendizaje, Educación, Enseñanza, Estrategias.

Abstract -- This research focuses on a random sample of students in the Engineering in Business Administration program at the Zacatepec Institute of Technology. The purpose of this research is to identify the learning strategies most frequently used by students and, based on these findings, propose alternatives that meet their educational needs. Through data collection and analysis, this research seeks to identify learning strategies that contribute to improving the teaching process in the classroom. By applying more appropriate pedagogical strategies, it is hoped not only to optimize learning but also to reduce school dropout rates, a problem that directly impacts the Zacatepec Institute of Technology, the student community, and the country's workforce development. The implementation of effective strategies by teachers allows students to achieve successful academic development and increase their job placement opportunities, thus reaffirming the role of teachers as key agents in the development of prepared and competitive professionals. Based on the aforementioned, it is concluded that teachers not only have the responsibility of transmitting knowledge, but also act as guides and trainers of professionals capable of facing the challenges of the working world. Their role in the classroom is crucial because, through these effective pedagogical strategies, they can enhance the development of technical skills and essential competencies in their students. Furthermore, by understanding the different ways students learn, they can adapt their teaching methods to ensure more meaningful and effective training. In this way, they not only facilitate the learning process but also contribute to preparing individuals with a solid foundation for entering the workforce.

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

Key words – Alternatives, Learning, Education, Teaching, Strategies.

INTRODUCCIÓN

Las estrategias de aprendizaje desempeñan un papel fundamental en el ámbito educativo, ya que permiten alcanzar de manera efectiva los objetivos de formación profesional. Sin embargo, si no existe una estrategia adecuada, el proceso de enseñanza-aprendizaje puede resultar menos eficiente, teniendo como consecuencia la dificultad de la adquisición de nuevo conocimiento por parte de los estudiantes, desmotivación, desinterés por aprender, altos índices de reprobación e incluso desertar del programa educativo.

Si bien es sabido, que cada alumno(a) tiene su propio estilo de aprendizaje, e incluso pueden combinar varias estrategias simultáneamente. Sin embargo, en muchos casos, es difícil que el docente identifique estos estilos, a consecuencia de esto, se dificulta la implementación de métodos didácticos adecuados y esto se hace evidente en el proceso de evaluación, donde las y los profesores, de manera arbitraria, deben adaptar sus estrategias para medir el desempeño de las y los estudiantes de manera efectiva.

Derivado de esta situación, el propósito de la presente investigación es conocer y analizar cuál es el estilo y tipo de aprendizaje que más predomina en las y los estudiantes de nivel superior, esto con la finalidad de que el núcleo académico no solo conozca los tipos y estilos de aprendizaje de los estudiantes, sino también que sea una oportunidad para crear nuevos métodos y modelos de enseñanza-aprendizaje que sean innovadores y atractivos para el gremio estudiantil y esto a su vez sea con la intención de ofrecer no solo estrategias, sino también técnicas y herramientas que lleven a cada docente a desempeñarse de manera satisfactoria dentro del aula, siendo ésta una necesidad fundamental para el campo formativo, académico, y por consecuente, profesional.

MARCO TEÓRICO

Es importante tener en cuenta que la educación es un proceso continuo que impulsa de manera integral las capacidades físicas, mentales, emocionales y espirituales de los individuos [1].

Su propósito es guiar a las personas en la construcción de su identidad, su pensamiento crítico y su capacidad de acción, promoviendo el aprendizaje en diversas dimensiones: aprender a ser, aprender a pensar, aprender a hacer, aprender a aprender y aprender a convivir. Esto permite formar ciudadanos reflexivos, responsables y solidarios, capaces de contribuir al desarrollo sustentable y a la solución de problemas reales, garantizando así una vida plena y significativa [1].

En relación con el aprendizaje, el modelo educativo, desde su dimensión académica, lo define como un proceso dinámico y en constante evolución, representado por una espiral de complejidad creciente. Este proceso, de naturaleza tanto sociocultural como psicológica, requiere de un ejercicio intelectual constante, ya que es a través de este que los individuos pueden incorporar cognitivamente elementos de la realidad, transformar estructuras de pensamiento y desarrollar esquemas de acción. De esta manera, el aprendizaje permite la construcción y sistematización del conocimiento, asegurando que el desarrollo cognitivo de los estudiantes avance progresivamente a niveles más elevados de comprensión y aplicación [1].

A lo largo de los años se han planteado distintas teorías del aprendizaje, estas van centradas en el condicionamiento puro, tal es el caso de las siguientes filosofías:

- Bandura (1966), se concibe el aprendizaje como un proceso mediante el cual se da tanto por la observación como por la imitación, ambas juegan un papel primordial en la dinámica de aprendizaje." [2], por otro lado
- Skinner (1971), menciona que "La conducta de aprendizaje de los individuos es directamente afectada y guiada según los elementos del entorno donde se desarrollan, esto puedo tanto facilitar el aprendizaje como entorpecerlo" [2].
- Bandler y Grinder (1982), entienden que el aprendizaje se ve agrupado en tres grupos principales: aprendizaje visual, aprendizaje auditivo y aprendizaje kinestésico. Estos estilos van ligados directamente al perfil del individuo [3].
- Derivado a la teoría anterior, Dilts & Delozier (2000), argumentan que la manera eficaz de crear un estilo depende de los requerimientos según las necesidades del individuo y que se necesiten tanto fomentar como crear, estos se dividen en: Correctivo: centrado en el ambiente mismo y en comportamiento de los individuos, Generativo: centrado en la generación de capacidades y valores, Evolutivo: centrado en la evolución de la identidad y el sistema [3].

Si bien es claro que todas estas teorías se enfocan en un aprendizaje por medio del condicionamiento, no son un aprendizaje que hoy en día se imparta, esto debido a las necesidades de distintas competencias que se tienen que cumplir en los campos educativos actuales. a consecuencia de lo antes mencionado, se puede cuestionar sobre la creación de una teoría de aprendizaje

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

actual donde intervengan, objetivos, métodos, estrategias y metas.

En el proceso de enseñanza se utilizan distintas estrategias que facilitan la adquisición de conocimiento, esto basado en los perfiles a quienes van dirigidos.

Las estrategias pueden ser definidas como conductas y pensamientos que un estudiante emplea durante el proceso de aprendizaje y que intentan influir en los procesos de codificación de éste.

La meta de cualquier estrategia de aprendizaje particular puede afectar los estados motivacionales y afectivos de la o el estudiante, o la forma en la que éste selecciona, adquiere, organiza o integra el nuevo conocimiento [4]

Algunas de las estrategias de aprendizaje que se pueden definir, son:

- Resumen: "Un resumen bien elaborado es el párrafo más importante del artículo, y la primera información que evaluarán los editores y los árbitros y a su vez permite que los lectores reconozcan con rapidez el contenido" [5]. "Resumir no es un proceso mecánico, literal o meramente reproductivo. En efecto, implica la habilidad y la creatividad para aplicar lo que la lingüística textual ha denominado macrorreglas semánticas, propuestas por Teun van Dijk, (1992 [1978]), las cuales son de gran utilidad para realizar un resumen, a saber: omitir, seleccionar, generalizar e integrar." [5].
- Organizadores gráficos: (mapas mentales, mapas conceptuales, cuadros comparativos, infografías).
  De acuerdo con Novak y Musonda (1991), los mapas conceptuales creados en 1972, por el Dr. Joseph Novak, nacen como una idea de aprendizaje basado en la teoría de David Ausubel, en donde se centraba en el aprendizaje por asimilación y proposiciones en estructura conceptual [6].
- Mientras que los mapas mentales que surgen como propuesta en 1996 partiendo de una idea de Tony Buzan, en donde plantea una forma más intuitiva de entender los conceptos sin necesidad de un texto, sino más bien, de imágenes de referencia hacia el tema a exponer, esto con la finalidad de crear una relación que pueda ser usada en el futuro [6].
- Trabajo en equipo: este se debe comprender desde lo que es un Equipo: "Conjunto reducido de personas entre seis y ocho que se unen para alcanzar un objetivo común y en cuyo desarrollo establecen normas de funcionamiento y roles" [7].
- Herramientas digitales: estas parten de las nuevas tecnologías y herramientas con las que cuentan los alumnos y docentes, que son una parte fundamental de la evaluación formativa y sumativa, debido al fácil manejo que ahora tienen a lo que Borja y Carcausto, (2020) mencionan que, "En el campo educativo, se denomina herramientas digitales al cúmulo de aplicaciones y plataformas que sirven de ayuda tanto a docentes como a estudiantes en sus actividades académicas, contribuyendo en el proceso de enseñanza y aprendizaje, en la indagación y manejo de información adecuada, así como formas de comunicación digitales"[8].
- Análisis de casos: "Los estudios de caso constituyen una metodología que describe un suceso real o simulado complejo que permite al profesionista aplicar sus conocimientos y habilidades para resolver un problema." [9].
- Aprendizaje basado en problemas, El aprendizaje basado en problemas es una metodología en la que se investiga, interpreta, argumenta y propone la solución a uno o varios problemas, creando un escenario simulado de posible solución y analizando las probables consecuencias. El alumno desempeña un papel activo en su aprendizaje, mientras que el docente es un mediador que guía al estudiante para solucionar un problema. [9].
- Role playing, que se refiere a los juegos de rol surgen como un estudio que pretendía medir la capacidad de representar diversos papeles por un mismo individuo; también llamado al estudio Psicodrama didáctico o pedagógico [10].
  Herrán (2009) clasifica el rol playing en 4 grupos, sea el caso de su planificación:

1) Estructuradas, si el discurso y la escena están muy definidas.
2) Semi estructuradas, si se asigna un guión breve sobre la escena y se reparten unos papeles breves
3) No estructuradas, si únicamente se asignan los papeles.
4) Mixtas, si se mezclan dos de dichas variedades.

- Investigación: La investigación es un conjunto de procesos sistemáticos, críticos y empíricos que se aplican al estudio de un fenómeno. [11]

La investigación permite cuestionar, reflexionar y actuar sobre el acontecer histórico y social en la medida que favorece un criterio propio, fundamentado científicamente; criterio que beneficia a poblaciones atendidas, la creación novedosa de estrategias y métodos de intervención, el aumento de la calidad de la investigación, el rendimiento y respeto de la imagen profesional [12].

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

- Línea del tiempo, creadas por Karl Ploetz (1819-1881), donde publicó un libro en 1863, en el cual demostraba una investigación ordenada de tal manera que era fácil de identificar cronológicamente los acontecimientos en la historia mundial [13].
- Prácticas, Windschitl (2002), hace mención que "El desafío actual al que nos enfrentamos en materia de educación es muy difícil, debido a que se interaccionan variables de distinta naturaleza y cada vez más complejos" [14].
- Memorización, Siguiendo la distinción de Schacter (1987) el conocimiento almacenado en la memoria a largo plazo puede clasificarse en dos categorías: aquel conocimiento al que accedemos de forma consciente (memoria explícita) y que podemos expresar verbalmente o con otro tipo de código simbólico (saber qué), frente a otro conocimiento de carácter automático y procedimental (memoria implícita) que no requiere recuerdo consciente (saber cómo). [15]
- Foro de discusión y/o debates, Para Fedorov (2006), la estrategia metodológica del foro virtual incide positivamente en el desarrollo de diferentes elementos del pensamiento crítico. Este tiene una dimensión cognitiva en la que se conjugan las habilidades intelectuales de alto nivel: análisis, inferencia, interpretación, explicación, evaluación y autorregulación, mismas que sustentan el pensamiento de calidad, caracterizado por ser lógico, racional, claro, transparente, sintético, reflexivo, contextualizado, oportuno, argumentado y autorregulado. Estos aspectos toman formas de operaciones intelectuales, comunicativas, metacognitivas y autorregulativas. [16]. Esteban & Ortega (2017), El debate en el aula, como estrategia para un aprendizaje significativo, requiere que los estudiantes participen en reuniones previas de preparación, tanto con la orientación del docente como de manera autónoma. Durante este proceso, se promueven valores fundamentales como la cooperación y el trabajo en equipo, enfatizando la importancia de alcanzar un objetivo común. De esta manera, el debate no solo se enfoca en la confrontación de ideas opuestas, sino también en la construcción colaborativa del conocimiento, favoreciendo un entorno de aprendizaje más enriquecedor [16].
- Métodos de proyectos, Buendía & Asunción (2006), El Aprendizaje Basado en Proyectos es una metodología que organiza el aprendizaje a través de la realización de proyectos que requieren la aplicación de habilidades como investigación, resolución de problemas y toma de decisiones. Estos proyectos suelen estar relacionados con situaciones reales y permiten a los estudiantes trabajar de manera autónoma o en equipo. Además, esta estrategia fomenta la creación de productos concretos como resultado del proceso de aprendizaje [17].
- Pensamiento crítico, Sternberg (1985) determina que el pensamiento crítico son los procesos, estrategias y representaciones mentales que las personas utilizan para resolver problemas, tomar decisiones y aprender nuevos conceptos [18]. Estas estrategias se aplicarse de acuerdo con los estilos de aprendizaje.
  El individuo al estar evaluando o generando preguntas acerca de ciertos temas académicos, este al hacer un buen uso de su pensamiento crítico, podrá obtener respuestas constructivas en un contexto más analítico, el cual incluye razones y argumentos que se presentan al momento de analizar un texto [18].

El Modelo Educativo para el Siglo XXI expone la importancia de la relación didáctica entre el docente y el estudiante, destacando que en el proceso educativo se genera una interacción recíproca entre ambos. Tanto el estudiante como el docente son individuos con una formación previa, influenciados por su contexto histórico y social, lo que impacta directamente en su desarrollo y en la manera en que interactúan dentro del ámbito académico [1].

Este intercambio de conocimientos, experiencias y actitudes, conocido como relación didáctica, se caracteriza por ser un proceso dinámico, complejo y continuo. En este contexto, el docente tiene la responsabilidad de diseñar, aplicar y evaluar estrategias didácticas de manera crítica y fundamentada, con el objetivo de optimizar el aprendizaje. Por su parte, el estudiante, en su rol de profesional en formación, debe involucrarse activamente en su proceso educativo, participando de manera analítica, colaborativa y reflexiva. A través de esta interacción, se busca el desarrollo de competencias profesionales alineadas con el perfil de egreso de su carrera, garantizando así una preparación integral para su futuro desempeño laboral.

DESARROLLO

Metodología

Esta investigación se llevó a cabo en el Instituto Tecnológico de Zacatepec, con el propósito de identificar las estrategias de aprendizaje utilizadas por los estudiantes y determinar si existe una preferencia hacia el trabajo colaborativo o si aún predomina el aprendizaje basado en la visualización de la información.

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

Tipo y Enfoque de la investigación
El tipo de investigación que se llevó a cabo fue descriptiva y documental, de acuerdo con Sampieri, en una investigación existen actividades que se orientan según el tipo de investigación que sea, estas actividades van desde la simple observación, hasta un análisis más detallado del objeto de estudio [11]. No obstante, con el objetivo de analizar estas cualidades de manera más precisa, se busca cuantificarlas, transformándolas en un listado estructurado que permita su medición y análisis sistemático, esto permitirá obtener datos concretos sobre las elecciones de los estudiantes.

El enfoque es cualitativo ya que busca principalmente "dispersión o expansión" de los datos o información; mientras que el cuantitativo pretende intencionalmente "acotar" la información (medir con precisión las variables del estudio, tener "foco") en base esta realiza únicamente en un enfoque cualitativo, ya que los estudiantes participan en diversas actividades en las que demuestran sus habilidades y características individuales [11].

Población y muestra
La población total fue de 441 estudiantes del programa educativo de Ingeniería en Administración inscritos en el semestre enero-junio 2023, el cual fue de manera aleatoria para determinar la muestra se obtuvo a través del modelo estadístico definido para poblaciones grandes, se aplicó la formula, con un nivel de confianza del 95% y un margen de error máximo permisible del 5%, de esta manera sustituyendo los datos en la formula, se obtuvo un tamaño de muestra de 206 estudiantes.

Recolección de datos
La recolección de datos se llevó a cabo mediante:

1. Encuesta, está se diseñó en Google Forms, cuyo enlace fue proporcionado a los estudiantes, permitiéndoles seleccionar libremente las estrategias de aprendizaje que mejor se adaptaran a su estilo. Esta metodología facilitó la identificación de patrones y preferencias en el uso de estrategias didácticas, proporcionando información precisa sobre cuáles resultan más efectivas desde la perspectiva de los propios estudiantes.

DISCUSIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

De acuerdo con los datos obtenidos en los instrumentos de recolección de datos, se observó que con base en las listas proporcionadas por el Departamento de Ciencias Económico-Administrativas, un total de 238 estudiantes respondieron la encuesta, por lo que con esta cifra se considera adecuada para garantizar la validez y confiabilidad de la investigación.

Este dato permitió obtener el valor porcentual de la matrícula del programa de ingeniería en administración que respondió la encuesta, la cual fue del 54% de la población de 441 alumnos.

A continuación, se presentan las gráficas obtenidas a partir de la encuesta aplicada a los estudiantes del programa educativo de Ingeniería en Administración. La primera pregunta correspondió a conocer el semestre que más predominó en la aplicación de la encuesta, demostrando que el 27% de los estudiantes pertenecen al primer semestre, lo que representa un total de 119 participantes, constituyendo así casi la mitad de la muestra analizada (Figura 1).

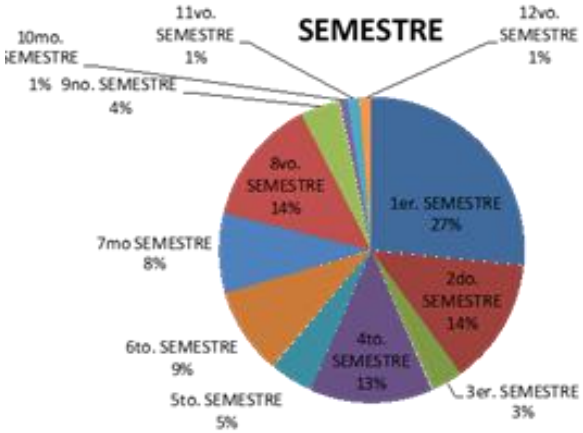


Figura 1. Semestre de estudiantes que más predomino en respuestas

Este dato resultó fundamental, ya que permitió identificar a los estudiantes que recién se incorporan al nivel superior y, con ello, diseñar estrategias de aprendizaje adecuadas para fortalecer su proceso de adaptación académica. Ya que no solo se busca aplicar ciertas estrategias de aprendizaje, sino también fomentar el uso de metodologías que, aunque no sean las más utilizadas por ellos, resultan esenciales para su formación profesional. De esta manera, se podrá ofrecer un enfoque más integral, asegurando que los estudiantes desarrollen habilidades clave desde las primeras etapas de su educación superior.

Posteriormente, se solicitó a los estudiantes que, eligieran la opción que mejor representara su estilo de aprendizaje enfatizando la importancia de esta elección para que pudieran reconocer la metodología que les permite adquirir conocimientos de manera más eficaz. Los resultados reflejaron un 52% (124) de los encuestados prefirió un enfoque de aprendizaje basado en estímulos visuales, lo que sugiere que este método facilita la identificación rápida de información y favorece la ejecución eficiente de tareas.

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

Asimismo, se observó que el 8% (18) de los estudiantes manifestó desconocer cuál es su estilo de aprendizaje (Figura 2). Esta falta de reconocimiento puede estar relacionada con un conocimiento limitado sobre las características y beneficios de cada tipo de aprendizaje o, en algunos casos, con la ausencia de una preferencia definida, lo que indicaría que estos estudiantes emplean diversas estrategias sin inclinarse por una en particular.

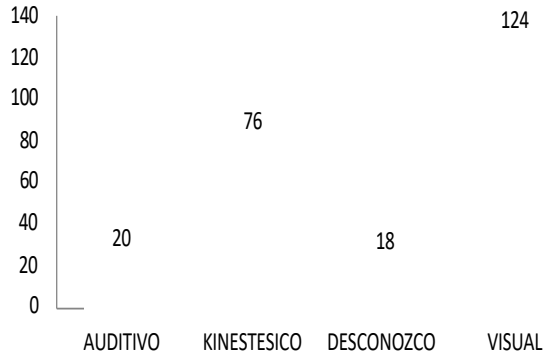


Figura 2. Estilo de aprendizaje

En la pregunta 5, se proporcionó a los encuestados un listado de 15 técnicas y estrategias de aprendizaje utilizadas con mayor frecuencia, en la cual se les solicitó seleccionar aquellas que consideraran más adecuadas para su proceso de aprendizaje, asegurando así que la elección reflejara una preferencia individual y no una influencia grupal (Figura 3).

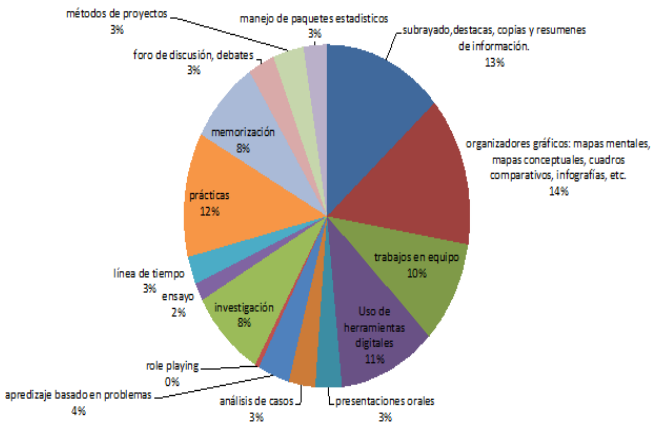


Figura 3. Estrategias de aprendizaje

El análisis de las respuestas anteriores permite identificar cuáles son las estrategias de aprendizaje más utilizadas y cuál es su impacto en el desarrollo académico y profesional de los estudiantes.

Los datos muestran que la estrategia de aprendizaje más utilizada por los estudiantes son los organizadores gráficos, con un 14% de preferencia.

En segundo lugar, con un 13%, se encuentran las estrategias de subrayado, copias y resúmenes, las cuales están directamente relacionadas con el aprendizaje visual. Estas técnicas no solo ayudan a resaltar información clave, sino que también fomentan la comprensión profunda del contenido a través de la lectura y la reformulación de ideas.

Otras estrategias con una alta frecuencia de uso incluyen:

- Aprendizaje basado en prácticas (12%), esta estrategia implica la aplicación del conocimiento a situaciones concretas, lo que permite a los estudiantes no solo llegar a una solución, sino también comprender el proceso para alcanzarla. Debido a su complejidad, su implementación representa un desafío, ya que requiere integrar múltiples elementos y aplicar habilidades analíticas y prácticas.
- Uso de herramientas digitales (11%), si bien es sabido que las nuevas tecnologías juegan un papel clave en el proceso de enseñanza-aprendizaje, facilitando tanto la evaluación formativa como sumativa, sin embargo, es fundamental asegurar un uso adecuado de estas herramientas, ya que su empleo inadecuado puede derivar en un aprendizaje superficial basado únicamente en la memorización mecánica.
- Trabajo en equipo (11%), aunque esta estrategia es ampliamente valorada por los estudiantes, la observación en el aula evidenció que, en muchos casos, el trabajo en equipo se limita a una división de tareas individuales en lugar de una colaboración efectiva. Si bien los estudiantes mencionaron que se sienten apoyados por sus compañeros, es necesario fortalecer el trabajo cooperativo genuino, promoviendo la participación y la responsabilidad compartida.
- Investigación (8%), a pesar de ser una estrategia clave en el desarrollo de competencias analíticas, su baja preferencia puede estar relacionada con el hecho de que suele realizarse de manera individual y, en algunos casos, con el uso de fuentes de información poco confiables. Es necesario reforzar la importancia de la investigación y guiar a los estudiantes en el uso adecuado de fuentes académicas.
- Memorización (8%), aunque esta estrategia es fundamental en el proceso de aprendizaje y ha estado presente en todas las etapas educativas, los estudiantes señalaron que puede resultar abrumadora, especialmente cuando se requiere aprender grandes volúmenes de información. Sin embargo, reconocen su utilidad en la preparación de exámenes.

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

En las estrategias con Baja Aplicación se encontraron:

- Aprendizaje basado en problemas (4%), esta estrategia, que se centra en la resolución de problemas reales, obtuvo un bajo porcentaje. Se observó que algunos estudiantes la confundieron con el análisis de casos, lo que pudo haber influido en su baja preferencia. Este hallazgo es relevante para los docentes, ya que resalta la necesidad de diferenciar y explicar claramente el propósito y aplicación de cada estrategia.

Estrategias con menor implementación (3% – 2%): Entre las estrategias menos utilizadas se encuentran el análisis de casos, línea del tiempo, métodos de proyectos, manejo de paquetes estadísticos, foros de discusión, debate, role playing, presentaciones orales (todas con un 3%) y el ensayo (2%). A pesar de su baja frecuencia, estas estrategias merecen una mayor atención, ya que muchas de ellas son habilidades altamente valoradas en el ámbito laboral.

CONCLUSIONES

Los resultados de esta investigación derivan que el estilo de aprendizaje que más predomina en las y los estudiantes del programa educativo de Ingeniería en Administración del Instituto Tecnológico de Zacatepec es el visual, ya que les resulta más sencillo aprender por medio de la visión, cuando la información está organizada de forma gráfica, seguido de los resúmenes.

Aunado a lo anterior, se discute la idea de implementar diversas estrategias de enseñanza-aprendizaje por parte de las y los docentes dentro del aula, así como técnicas que coadyuven a las y los estudiantes a incrementar su aprendizaje, algunos ejemplos de estas podrían ser; gráficos, infografías, tablas, videos, imágenes, diagramas, mapas, símbolos, lluvia de ideas e incluso video clases o tutoriales.

La investigación también supone la necesidad de que los docentes no solo reconozcan el tipo y estilo de aprendizaje que más sobresale en los estudiantes, sino también exhorta a implementar estrategias donde se abra la oportunidad de desarrollar y fortalecer los demás estilos de aprendizaje, pues el modelo educativo del Tecnológico Nacional de México supone que se deben trabajar las competencias así como las habilidades blandas para que los/las alumnos (as) pongan en practica no solo en el ámbito profesional, sino también en su día a día.

Se recomienda continuar indagando sobre la creación de estrategias innovadoras, promoviendo la capacitación y actualización docente relacionado a los estilos y tipos de aprendizaje, con la finalidad de que contribuyan al éxito académico, profesional y personal de las y los estudiantes.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos al Tecnológico Nacional de México-Instituto Tecnológico de Zacatepec por el apoyo brindado para la realización de esta investigación.
A los estudiantes del programa de Ingeniería en Administración por su valiosa participación y apertura hacia esta investigación, sin ustedes no habría sido posible el análisis y culminación de ésta.

BIBLIOGRAFÍA

[1] Modelo educativo para el siglo XXI: Formación y desarrollo de competencias profesionales. Tecnológico Nacional de México, DGEST, (2012). Recuperado de: http://www.dgest.gob.mx/director-general/modelo-educativo-para-el-siglo-xxi-formacion-y-desarrollo-de-competencias-profesionales-dp2

[2] Núñez, A. (2022). Teoría del aprendizaje desde las perspectivas de Albert Bandura y Burrhus Frederic Skinner: vinculación con aprendizaje organizacional de Peter Senge. http://uceciencia.edu.do/index.php/OJS/article/view/295

[3] Cruz, J et al. (2021) Programación Neuro Lingüística y Resiliencia Organizacional. Revista Venezolana de Gerencia, vol. 26, núm. 93, pp. 384-396 Recuperado de: https://www.redalyc.org/journal/290/29066223025/html/

[4] Muria, I. (1994). La enseñanza de las estrategias de aprendizaje y las habilidades metacognitivas. Recuperado de: http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=13206508

[5] Sánchez, A. (2011). Los resúmenes para artículos de investigación. Recuperado de: http://34.231.144.216/index.php/RevistaUCN/article/view/107

[6] Novak, J., & Cañas,A., (2006) La Teoría Subyacente a los Mapas Conceptuales y a Cómo Construirlos. Recuperado de: https://cmap.ihmc.us/docs/theory-of-concept-maps-spanish

[7] Duran, A., (2018) Trabajo en equipo (2018) Elearning

[8] Tello, Y., Ortega, O., & Guizado, F., (2023) Herramientas digitales en la evaluación formativa durante el contexto pandémico, Revista Scielo V.7(15) https://doi.org/10.33996/revistahorizontes.v7i27.527

[9] Pimienta, J., (2012) Estrategias de enseñanza-aprendizaje Docencia universitaria basada en competencias. Pearson

[10] García-Barrera, A. (2015). Importancia de la competencia argumentativa en el ámbito educativo:

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

una propuesta para su enseñanza a través del role playingonline. Revista de Educación a Distancia (RED) 45 Recuperado de: https://revistas.um.es/red/article/view/238191

[11] Hernández-Sampieri, R., Fernández, C. & Baptista, P. (2010). Metodología de la investigación (5° Ed.). McGrawHill

[12] Nieto, D., Gómez, N., & Eslava, S. (2015) Significado psicológico del concepto investigación en investigadores. Recueprado de: https://www.redalyc.org/pdf/679/67945904008.pdf

[13] Fernández, A., & Fernández, M., (2020) Humanidades y ciencias sociales; interrelaciones con las nuevas tecnologias en la sociedad del conocimiento. Narcea

[14] Windschitl, M. (2002). Enmarcando el constructivismo en la práctica como la negociación de dilemas: un análisis de los desafíos conceptuales, pedagógicos, culturales y políticos que enfrentan los profesores. Revista de investigación educativa, 72 (2), 131-175 https://doi.org/10.3102/0034654307200213

[15] Bernabéu, E., (2017) Universidad Francisco de Vitoria. La atención y la memoria como claves del proceso de aprendizaje. Aplicaciones para el entorno escolar. Recuperado de: https://www.ugr.es/~reidocrea/6-2-3.pdf

[16] Revistas Mexicanas de Investigación Científica y Tecnológica del CONACyT (2016) Innovación educativa: significado e importancia para el futuro. Recuperado de: https://www.ipn.mx/assets/files/innovacion/docs/Innovacion-Educativa/Innovacion-Educativa-70/innovacion-e-70.pdf

[16] Esteba, L., Ortega, J., (2017). El debate como herramienta de aprendizaje. Recuperado de: https://idus.us.es/server/api/core/bitstreams/af814957-c8a1-4486-b774-0ae478ff7da6/content

[17] Cárcel, F., (2016) El método de proyectos como técnica de aprendizaje en la empresa. Recuperado de: file:///Users/janetl.morenohernandez/Downloads/DialnetElMetodoDeProyectosComoTecnicaDeAprendizajeEnLaEmp-5366171.pdf

[18] Mackay, R., Franco, D. E., & Villacis, P. W. (2018). El pensamiento crítico aplicado a la investigación. Recuperado de http://rus.ucf.edu.cu/index.php/rus

[19] Medina, M. et al. Metodología de la investigación - Técnicas e instrumentos de investigación. Instituto Universitario de innovación ciencia y tecnología. Inudi Perú

[20] Kumon América del Sur Instituto de Educación Ltda (2025), Estilos de aprendizaje: ¿qué son y cómo identificarlos? Recuperado de: https://www.kumon.com.bo/blog/estilos-de-aprendizaje/#:~:text=de%20una%20situaci%C3%B3n.-,Pragm%C3%A1tico,temas%20que%20despiertan%20su%20atenci%C3%B3n.

AUTORIZACIÓN Y RENUNCIA.

Los autores del presente artículo autorizan al TecNM/Instituto Tecnológico de Zacatepec para publicar el escrito en el libro electrónico del CITID 2025. El TecNM/ITZ o los editores no son responsables ni por el contenido ni por las implicaciones de lo que está expresado en el escrito.

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

GESTIÓN FINANCIERA Y DE INNOVACIÓN TECNOLÓGICA DE LAS MICRO Y PEQUEÑAS EMPRESAS TURÍSTICAS DE OAXTEPEC

Norma Leticia Martínez Mata [1], Rosa Isela Covarrubias Pinzón [2], Josafat Leticia Romero Torres [3], Arturo Javier Martínez-Mata [4]

[1] Doctora en Administración. Centro de Estudios Tecnológico industrial y de servicios No. 99. Departamento de Servicios Docentes; normaleticia.martinez.ce99@dgeti.sems.gob.mx.Tel. 735 3941262. Yautepec, Morelos.
[2] Licenciada en Contaduría Pública. Centro de Bachillerato Tecnológico industrial y de servicios No. 76. Docente; rosaisela.covarrubias.cb76@dgeti.sems.gob.mx. 735 4184699. Plan de Ayala Cuautla, Morelos
[3] Maestra en Administración de Recursos Humanos, Centro de Estudios Tecnológico industrial y de servicios No. 99. Departamento de Servicios Docentes; josafatleticia.romero.ce99@dgeti.sems.gob.mx; 735 3941262. Yautepec, Morelos.
[4] Doctor en Ciencias en Ingeniería Mecánica. Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico de Zacatepec; arturo.mm@zacatepec.tecnm.mx, Departamento de Metalmecánica, Zacatepec, Morelos.

Resumen - Las micro y pequeñas empresas (Mypes) desempeñan un papel fundamental tanto en la economía global como en la nacional. Por lo tanto, es crucial que desarrollen estrategias efectivas para mejorar su competitividad. Este estudio exploró los manejos financieros y de innovación en Mypes turísticas de Oaxtepec, Morelos, analizando 18 indicadores establecidos por la Fundación para el Análisis Estratégico y Desarrollo de la Pequeña y Mediana Empresa (FAEDPYME) mediante una encuesta cuya validez se confirmó con un coeficiente de McDonald de 0.7 y una distribución normal Shapiro-Wilk = 0.13. En relación al análisis de la estrategia financiera, la prueba de Kruskal-Wallis, reveló una asociación con las ventas, pero no con la facturación ni las utilidades. En contraste, no se encontró asociación entre la estrategia de innovación y las variables analizadas. Se concluye que las Mypes turísticas implementan parcialmente estrategias financieras, pero muestran una limitada adopción de estrategias de innovación. Se recomienda que futuras investigaciones exploren otros factores específicos de estas entidades económicas, con el objetivo de desarrollar modelos de negocio flexibles y dinámicos que impulsen su competitividad y productividad.
Palabras Clave – FAEDPYME, financiera, innovación. Mypes.

Abstract – Micro and small enterprises (MSEs) play a fundamental role in both the global and national economies. Therefore, it is crucial that they develop effective strategies to improve their competitiveness. This study explored financial and innovation management in tourist MSEs in Oaxtepec, Morelos, analyzing 18 indicators from the Foundation for Strategic Analysis and Development of Small and Medium Enterprises (FAEDPYME) through a survey whose validity was confirmed with a McDonald's coefficient of 0.7 and a normal distribution Shapiro-Wilk = 0.13. Regarding the analysis of financial strategy, the Kruskal-Wallis test revealed an association with sales, but not with billing or profits. In contrast, no association was found between innovation strategy and the variables analyzed. It is concluded that tourist MSEs partially implement financial strategies but show a limited adoption of innovation strategies. It is recommended that future research explore other specific factors of these economic entities, with the aim of developing flexible and dynamic business models that boost their competitiveness and productivity.
Keywords – FAEDPYME, Financial, MSEs, innovation.

INTRODUCCIÓN

Las micro, pequeñas y medianas empresas (Mipymes) son una parte fundamental de la economía global, ya que representan un alto porcentaje de unidades económicas activas que son reconocidas por su papel en la distribución del ingreso, reducción de la pobreza y generación de oportunidades de empleo para la población [1]. A nivel mundial, el sector turismo es dominado por las Mipymes [2], y según la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos [3], estas empresas contribuyen significativamente a la generación de empleo, siendo responsables del 60% del mismo en casi todos los países miembros. En América Latina, este tipo de entidades económicas constituyen la principal actividad de emprendimiento, representando el 99% del parque empresarial y generando aproximadamente dos tercios del empleo en la región [4]. En la economía mexicana estas desempeñan un papel fundamental, sobresaliendo tanto por su capacidad para generar empleo como por su habilidad para adaptarse y responder a las cambiantes dinámicas del mercado; según el Instituto Nacional de Estadística y Geografía, existen 4,773,995 negocios a nivel nacional, de los cuales el 95% son Mipymes, las cuales contribuyen significativamente al empleo y a la generación de ingresos del país [5]. Estas organizaciones se inscriben en un contexto global [6], en el que a menudo surgen como microempresas informales, resultado de la integración de las economías al proceso de globalización, las cuales requieren impulsar su competitividad que está caracterizada por su participación en los mercados de capital, y de bienes y

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

servicios [7]; por lo cual tienen que desarrollar capacidades de adaptación y de anticipación para que puedan competir en mercados cada vez más extensos, dinámicos y exigentes. Por ello, [8] se debe mantener y/o ampliar sus ventajas competitivas a través de cambios en los procesos de producción, potenciando una demanda con elevados niveles de sofisticación y exigencias de productos de calidad, movilizándose en entornos transparentes, competitivos, con mejoras en las relaciones con competidores, proveedores, clientes y comunidad. Por ello el modelo de desarrollo (MN) debe ser una herramienta diseñada para determinar los elementos y componentes clave de la empresa [9] que, al configurar las actividades y recursos valiosos para la creación de valor y apropiación de la organización, contribuya al éxito y/o supervivencia de la organización. En este sentido al implementar el MN en estas entidades económicas se debe tener gestión estratégica para analizar y crear de forma dinámica su productividad empresarial [10]. No obstante, los modelos de negocio (MN) actuales presentan rigidez y limitaciones para adaptarse e implementarse en las necesidades específicas de estas organizaciones. En respuesta a esto se propone el diseño de nuevos modelos que consideren una implementación gradual de cambios, metodologías flexibles y de aplicabilidad en diversos contextos y sectores en los que operan la Mipymes [11] y en especial las micro y pequeñas empresas (Mypes). En aporte a esta propuesta, la Fundación para el Análisis Estratégico y Desarrollo de la Pequeña y Mediana Empresa (FAEDPYME) en su Informe México 2012 [12], entre otras cosas, propone una metodología para impulsar el desarrollo competitivo de dichas organizaciones, para lo cual, utiliza como instrumento de medición una encuesta que contiene 29 indicadores con diferentes variables, cuya aplicación permite obtener información cualitativa y cuantitativa de estas entidades económicas. Dentro de estos indicadores se encuentran aspectos sociodemográficos, de estrategias financieras y de innovación, los cuales fueron utilizados en esta investigación con el siguiente objetivo de trabajo.

Analizar en el modelo de negocio de las Mypes de la localidad de Oaxtepec, Morelos los aspectos: financieros y de innovación tecnológica a fin de plantear estrategias que contribuyan a impulsar su competitividad en el mercado.

DESARROLLO

Metodología. La presente investigación adopta un enfoque metodológico mixto, integrando técnicas cualitativas y cuantitativas para el análisis de las Mypes estudiadas. La recolección de datos se realizó mediante encuestas personalizadas, siguiendo las siguientes etapas:

- Muestreo: La selección de las Mypes se basó en los registros de la Coordinación de Licencias y Funcionamiento (CLF) del Ayuntamiento de Yautepec. La comunidad de Oaxtepec fue elegida como área de estudio debido a su relevancia turística, evidenciada por la alta densidad de microempresas registradas y la presencia de importantes centros recreativos, tales como el “Centro Vacacional Oaxtepec del IMSS-Bienestar”, el balneario ejidal “El Bosque”, el “Ex Convento Santo Domingo de Guzmán” y “Six Flags Hurricane Harbor”.

- El tamaño de la muestra se consideró tomando la población total de 152 Mypes registradas en la CLF, con un intervalo de confianza del 95 % con un margen de error de 0.05, con lo cual se obtuvo el tamaño de muestra poblacional de 110 Mypes ubicadas en la vialidad principal en la que se encuentran la mayoría de los lugares turísticos antes mencionados. El trabajo de campo se llevó a cabo mediante la aplicación de encuestas estandarizadas, diseñadas para recopilar datos cuantitativos, mismos que posteriormente fueron analizados utilizando pruebas estadísticas.

-El procesamiento y análisis de los datos empíricos obtenidos en el trabajo de campo se realizó utilizando el software Jamovi [13]. Se evaluó la normalidad de la muestra mediante el coeficiente omega de McDonald, y se aplicó la prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis para contrastar las siguientes hipótesis de investigación:

- H_1: La implementación de una estrategia financiera definida se asocia significativamente con la calidad de la atención al cliente, el nivel de facturación y las utilidades generadas por las Mypes.
- H_2: La implementación de una estrategia de innovación definida se asocia con la implementación de mejoras en los servicios de atención al cliente, ampliación de nuevos canales para ampliar redes de comercialización y realización de comercio electrónico.

El criterio de rechazo de las hipótesis se basó en un valor de Chi Cuadrado superior a 0.05 (α = 5%) o 0.10 (α = 10%), indicando la ausencia de una asociación estadísticamente significativa entre las variables analizadas.

-Investigación de campo. El instrumento de encuesta se desarrolló siguiendo las directrices metodológicas establecidas por la FAEDPYME en su "Informe México 2012" y las recomendaciones por Molina et al en [12]. El cuestionario utilizado en este estudio se estructuró en tres secciones: datos generales de las Mypes (edad, nivel educativo, género, sector productivo y número de empleados), estrategias financieras y estrategias de innovación. En la sección de estrategias financieras se incluyeron las preguntas:

- F1. ¿Evolución de ventas en los últimos 3 años?
- F2. ¿Identificación de costos variables?

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

- F3. ¿Identificación de costos fijos?
- F4. ¿Definición de estrategia financiera?
- F5. ¿Evolución de facturación en los últimos 3 años?
- F6. ¿Comportamiento de utilidades después de impuestos en los últimos 3 años?
- F7. ¿Intentos para tratar de comercializar en mercados nacionales?

Las respuestas se registraron en una escala Likert de 4 puntos (0 = nunca, 1 = algunas veces, 2 = casi siempre, 3 = siempre). La Tabla 1 proporciona las definiciones conceptuales de cada pregunta.

Tabla 1. Definición conceptual de la encuesta de financiamiento de las Mypes

No	Definición conceptual
F1	Comportamiento de sus ventas (con inflación) en últimos tres años.
F2	Mano de obra directa, insumos directos, costos variables indirectos, los que se identifican con: materia prima; fletes y acarreos de materia prima; combustibles y lubricantes; mantenimiento y conservación; fletes y acarreos de productos terminados; contratos preferenciales; y apoyos a concesionarios.
F3	Producción, comercialización, administración y finanzas, los que se identifican con: Rayas; Sueldos; IMSS, SAR e INFONAVIT; depreciaciones; gastos de administración; gastos de ventas y otros gastos de fabricación.
F4	Estrategias financieras para un largo plazo que comprenden: inversión, estructura financiera y conservación y/o reparto de beneficios. Las estrategias financieras, que se aplican a un corto plazo son acerca del capital de trabajo, el financiamiento corriente y la gestión del efectivo.
F5	Comportamiento de la facturación promedio.
F6	Comportamiento de utilidades en últimos tres años.
F7	Intentos para tratar de comercializar en mercados nacionales.

La estrategia financiera se planteó considerando su relación con las ventas, utilidades y facturación.

Para analizar la sección de estrategias de innovación (I), se incluyeron las siguientes preguntas en la encuesta (Tabla 2):

- I1. ¿Lleva a cabo estrategias de innovación, incluyendo cambios o mejoras en la presentación de productos, estructura organizativa y ampliación de redes de comercio?
- I2. ¿Incluye mejoras en los servicios de atención al cliente?
- I3. ¿Ha mejorado la calidad de sus productos o ha creado nuevos productos?
- I4. ¿Ha abierto nuevos canales para ampliar su red de comercialización?
- I5. ¿Ha implementado mejoras en los servicios administrativos de la organización?
- I6. ¿Ha realizado *e*-commerce para ampliar redes de comercialización?

Las respuestas a estas preguntas se codificaron en una escala numérica: 0 = nunca, 1 = algunas veces, 2 = casi siempre y 3 = siempre. La Tabla 2 describe la interpretación conceptual de cada pregunta.

Tabla 2. Definición conceptual de la encuesta de innovación de las Mypes

No	Definición conceptual
I1	Establece acciones a corto plazo al modificar presentación, mejoras en sabor, y tamaño requerido por el cliente. Es un nuevo concepto referente a productos, procesos y estructura organizativa que añade valor a la empresa y mejora el rendimiento de su gestión organizativa.
I2	Realiza mejoras en la estructura física del negocio y en el personal que está atendiendo al cliente, amplia cobertura de productos de acuerdo a las necesidades de sus clientes.
I3	Crea o modifica los productos que comercializa.
I4	Amplia nuevos canales de comercialización de productos.
I5	Implementación de novedades en sistemas de manejo de dirección, compras, aprovisionamientos, comercio y ventas.
I6	Con el objetivo de incrementar ventas ha realizado *e* commerce.

Las preguntas para establecer en la encuesta son retomadas de Molina [14] y fueron modificadas por los autores.

La estrategia de innovación se planteó considerando su relación con mejoras en los servicios de atención al cliente, ampliación de nuevas redes de comercialización y realización de comercio electrónico [15],[16].

DISCUSIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Distribución de la población. Los resultados de las encuestas aplicadas y que dan soporte a esta investigación están en el link: https://docs.google.com/forms/d/189t4ImqD9B35MLoK2QCo-c6R1voaHuz0wUn-cZNdU3I/edit#responses.

La evaluación de la distribución poblacional se realizó mediante el cálculo de los estadísticos de asimetría y curtosis, así como la aplicación de la prueba de Shapiro-Wilk para determinar la normalidad de los datos. Los resultados de este análisis se presentan detalladamente en la Tabla 3.

Tabla 3. Distribución de la Muestra Poblacional

Estadísticos	Total
N	50
Asimetría	0.136
Error est. asimetría	0.337
Curtosis	-0.88
Error est. curtosis	0.662
W de Shapiro-Wilk	0.964
Valor p de Shapiro-Wilk	0.13

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

Los resultados del análisis de la distribución poblacional revelaron los siguientes valores: asimetría 0.136 y curtosis -0.88. Estos valores, al alejarse significativamente de 0, junto con un valor p de Shapiro-Wilk de 0.13 (inferior a 0.05), indican que la muestra no sigue una distribución normal. Por lo tanto, se procedió al análisis mediante pruebas no paramétricas. La asimetría de la muestra poblacional se visualiza en la Figura 1.

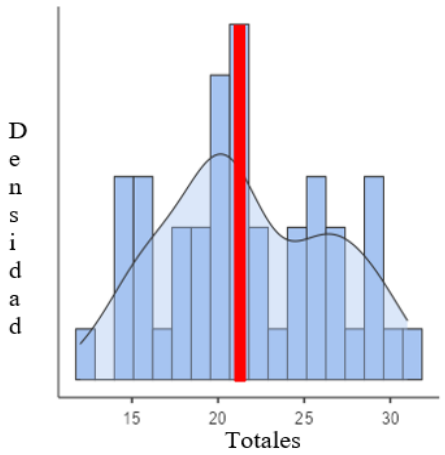


Figura 1. Comportamiento de la normalidad de la muestra poblacional.

Análisis de confiabilidad

La confiabilidad del instrumento de encuesta se determinó mediante el cálculo del coeficiente ω de McDonald, que es un estadístico adecuado para muestras de tamaño reducido, Campo et al. (2008). Se considera que un coeficiente omega entre 0.70 y 0.90 indica una alta confiabilidad, aunque valores cercanos a 0.65 pueden ser aceptables en algunos casos. Los resultados del análisis de confiabilidad se presentan en la Tabla 4.

Tabla 4. Coeficiente de McDonalds

Estadísticas de Fiabilidad de Escala		
	ω de McDonald	
Escala	0.704	

El coeficiente de omega de McDonald fue de 0.7 lo que indica que el instrumento aplicado es aceptable, para aplicar la prueba de Kruskal Wallis.

Estrategia Financiera

Se utilizó la prueba de Kruskal-Wallis para evaluar la asociación entre la estrategia financiera definida (F4) con la variable calidad de la atención al cliente, proveedores y empleados (F1), la facturación (F5) y las utilidades (F6). Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 5.

Tabla 5. *Kruskal Wallis Estrategia Financiera.*

Variables	χ^2	gl	P	ε^2
F1	12.18	3	0.007	0.2485
F5	4.66	3	0.198	0.0952
F6	5.37	3	0.146	0.1097

Derivado del análisis de los datos, se identificó una asociación estadísticamente significativa entre la estrategia financiera (F4) y el servicio de atención al cliente, proveedores y empleados (F1). En contraste, no se observaron asociaciones significativas entre F4 y la facturación (F5), ni entre F4 y las utilidades (F6). Estos resultados indican que la estrategia financiera (F4) se relaciona selectivamente con variables específicas.

Estrategia financiera comportamiento poblacional.

El análisis de la distribución de edad de los microempresarios encuestados en Oaxtepec, Morelos, reveló que la mayoría (62%) se encuentra en el rango de 31 a 50 años. El grupo de 51 años o más representa el 22%, mientras que los jóvenes de 18 a 30 años constituyen el 16% de la muestra (Figura 2)

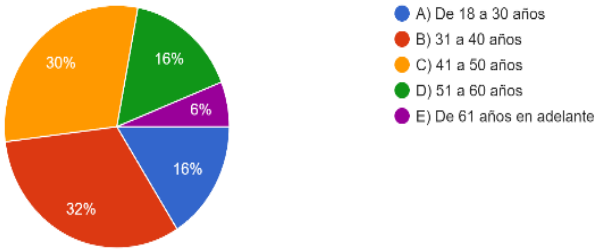


Figura 2. Edad de los microempresarios.

La Figura 3 ilustra la distribución de la actividad productiva en la muestra estudiada, donde se observa una clara predominancia del sector comercial (86%). Los sectores industriales y de servicios representan el 8% y 6%, respectivamente. Está marcada concentración en el comercio, superior al promedio nacional (70%), podría atribuirse a la fuerte demanda local. La baja participación del sector industrial (8%) sugiere una demanda de productos derivada del flujo turístico en la zona.

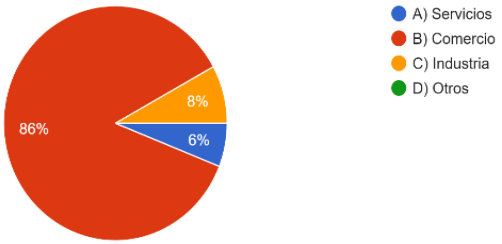


Figura 3. Sector productivo predominante.

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

La Figura 4 revela una distribución de género equitativa en las microempresas analizadas, con un 50% de participación tanto de hombres como de mujeres. Este hallazgo sugiere que la fuerza laboral en este sector es inclusiva, lo cual tiene implicaciones significativas para el desarrollo económico local. La participación igualitaria de las mujeres no solo empodera a este grupo demográfico, sino que también contribuye al crecimiento económico general y a la disminución de las disparidades socioeconómicas.

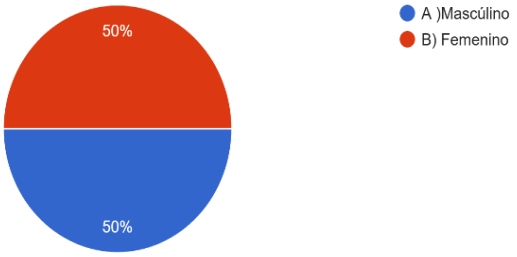


Figura 4. Género de la población.

La distribución del nivel educativo, ilustrada en la Figura 5, revela una tendencia hacia niveles medios de escolaridad. El nivel secundario es el más frecuente, con un 40% de los participantes, seguido por la preparatoria o equivalente (28%). La primaria representa el 20% de la muestra, mientras que la licenciatura alcanza el 12%. Estos datos sugieren una fuerza laboral con una base educativa sólida, aunque con una proporción relativamente baja de individuos con educación superior.

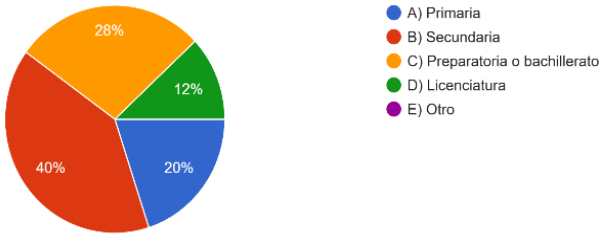


Figura 5. Escolaridad de microempresarios.

La Figura 6 muestra la distribución del tamaño de la fuerza laboral en las microempresas estudiadas. Se observa que la mayoría de las Mypes (68%) operan con un número reducido de empleados, entre 1 y 3. Un 24% emplean entre 4 y 6 personas, mientras que solo el 8% cuentan con una plantilla de 7 a 10 empleados.

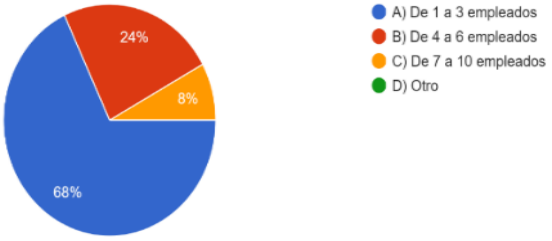


Figura. 6. Número de empleados de Mypes.

La Figura 7 presenta los resultados de la identificación de costos variables por parte de las microempresas estudiadas. Los resultados indican que el 38% identifican estos costos de manera consistente (siempre), el 48% lo hacen con alta frecuencia (casi siempre), y el 14% lo identifican solo ocasionalmente (algunas veces).

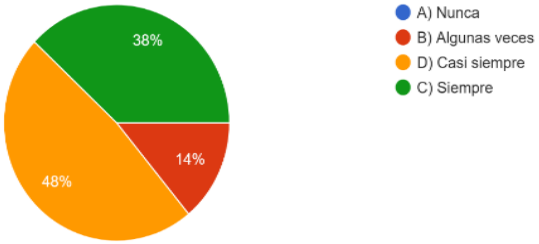


Figura. 7. Identificación de Costos Variables.

La Figura 8 presenta los resultados de la identificación de costos fijos por parte de las microempresas estudiadas. Los resultados indican que solo el 25% identifican estos costos de manera consistente (siempre), el 20% lo hacen con alta frecuencia (casi siempre), el 32% lo identifican ocasionalmente (algunas veces), y un 20% reporta no identificarlos nunca.

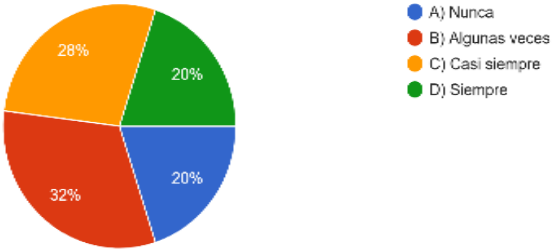


Figura 8. Identificación de costos fijos.

El análisis de la percepción del incremento de ventas en los últimos tres años (Figura 9) revela una distribución variada entre las microempresas estudiadas. Mientras que un 46% reporta un incremento siempre o casi siempre, un 40% lo percibe de forma intermitente (algunas veces) y un 6% no ha experimentado ningún incremento. Estos datos sugieren una heterogeneidad en el desempeño de ventas de las Mypes en el periodo analizado.

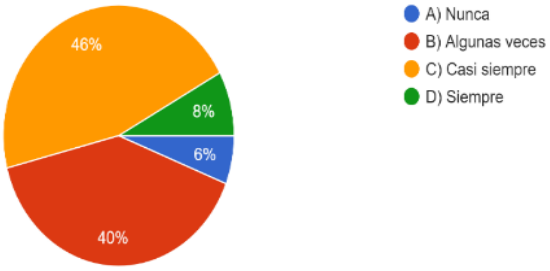


Figura 9. Incremento de ventas.

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

El análisis del uso de créditos por parte de las microempresas (Figura 10) revela una baja prevalencia de financiamiento externo. Más de la mitad de las Mypes (54%) reportan no haber utilizado créditos, lo cual podría indicar dificultades en el acceso a financiamiento o una preferencia por la autofinanciación. Solo un 6% utiliza créditos de manera regular, lo que sugiere posibles desafíos para el crecimiento y la expansión de estas empresas.

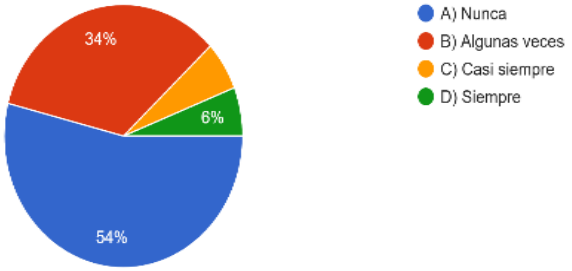


Figura 10. Mypes que han trabajado con crédito.

El análisis de la estrategia financiera implementada por las Mypes reveló un fortalecimiento en el servicio al cliente, proveedores y empleados. Este hallazgo es consistente con la evidencia proporcionada por Reyes et al. (2019), quienes reportaron una alta aceptación de las Mypes turísticas en Ecuador, atribuida a la excelente calidad del servicio de atención al cliente, caracterizado por la empatía, responsabilidad, capacidad de respuesta y fiabilidad.

Estos resultados también evidencian la falta de apoyos crediticios con los que operan estas entidades económicas.

Estrategia de Innovación

Se utilizó la prueba de Kruskal-Wallis para evaluar la asociación entre la estrategia de innovación (I1) y su asociación con la implementación de mejoras en los servicios de atención al cliente (I2), ampliación de nuevas redes de comercialización (I4) y realización de comercio electrónico (I6). Los resultados de la prueba se presentan en la tabla 6.

Tabla 6. Prueba de Kruskal Wallis Innovación

Kruskal-Wallis				
	χ^2	gl	p	ε^2
I2	0.522	2	0.77	0.0107
I4	2.052	2	0.358	0.0419
I6	1.733	2	0.42	0.0354

El análisis de los datos recopilados no reveló una asociación estadísticamente significativa entre la variable I1 y las variables I2, I4 e I6. Este resultado sugiere que las Mypes estudiadas no implementan estrategias de innovación. Por lo que se rechaza la hipótesis planteada.

Estrategia de innovación comportamiento poblacional

La Figura 11 muestra la distribución de las microempresas según su uso de ventas por medios electrónicos. Se observa que la mayoría (54%) no realiza comercio electrónico. Un 28% utiliza esta modalidad casi siempre, mientras que un 18% lo hace a veces.

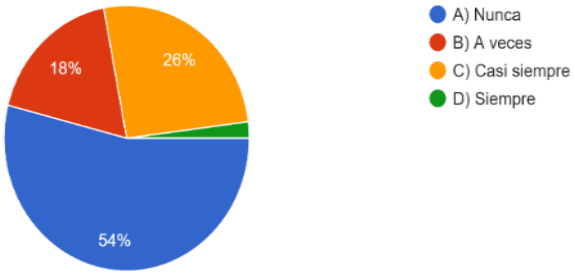


Figura 11. Comercio electrónico de Mypes.

La Figura 12 presenta los resultados del análisis sobre la elaboración de productos de marca propia, evidenciando una limitada expansión de esta práctica entre las microempresas analizadas. Un 52% de las empresas encuestadas no ha implementado esta estrategia, lo que podría indicar desafíos en su crecimiento productivo. Solo el 28% reportó una implementación, casi siempre, y un 20% a veces.

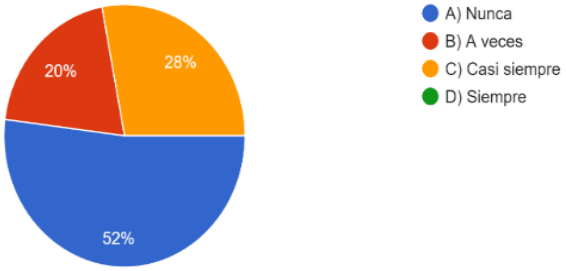


Figura 12.- Elaboración de productos marca propia.

El análisis de la apertura de nuevas sucursales (Figura 13) revela una baja tasa de expansión entre las microempresas estudiadas. Más de la mitad (68%) no ha abierto nuevas sucursales o lo ha hecho solo ocasionalmente, lo cual podría indicar limitaciones en el crecimiento o una preferencia por la consolidación. Solo un 4% reporta una expansión constante, lo que sugiere posibles desafíos para el crecimiento y la diversificación de estas empresas.

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

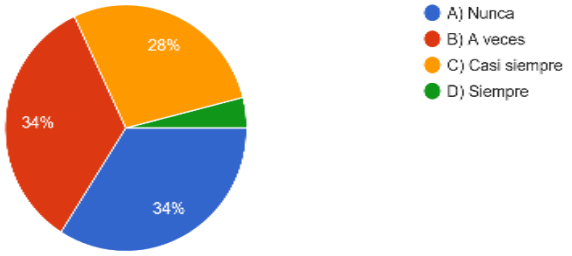


Figura 13. Apertura de nuevas sucursales

El análisis de la implementación de mejoras en servicios administrativos (Figura 14) revela una alta frecuencia de adopción de estas mejoras entre las microempresas estudiadas. La mayoría (72%) implementa mejoras de manera regular, lo cual sugiere una tendencia positiva hacia la optimización de procesos administrativos. Sin embargo, un 28% reporta una implementación inconsistente o nula, lo que indica un margen de mejora en este aspecto.

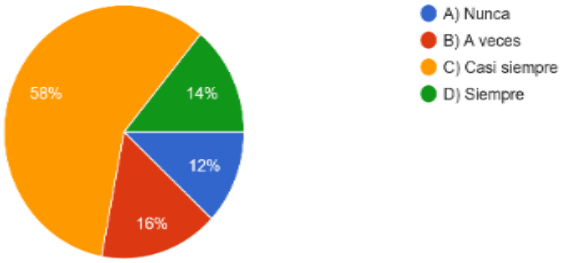


Figura. 14. Implementación de servicios administrativos.

Los resultados de este estudio indican que las Mypes turísticas de Oaxtepec muestran una limitada implementación de estrategias de innovación. Este hallazgo es consistente con un estudio realizado por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT, 2014) que también indica debilidad en la implementación de procesos de innovación en microempresas de Rio Sonora.

CONCLUSIONES

Este estudio destaca la relevancia de las Mypes turísticas en el desarrollo económico local, evidenciando su capacidad para mantener la actividad comercial a través de estrategias financieras centradas en la atención al cliente, proveedores y empleados, así como en la identificación de costos fijos. Estos hallazgos sugieren que la experiencia generacional y la adaptación a las preferencias del cliente son factores clave para su sostenibilidad. Sin embargo, se identifican áreas de oportunidad significativas, como la baja adopción de estrategias de innovación y tecnologías de la información. Se recomienda incrementar los estudios para generar modelos de negocios que sean flexibles y adaptativos a las Mypes, con el fin de impulsar su productividad y competitividad en el mercado actual.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a la Coordinación de Licencias y Manejos del Ayuntamiento de Yautepec por su colaboración, así como a la Universidad IEXPRO por su valioso apoyo.

BIBLIOGRAFÍA

[1] Bin Hashim, N. A., Raza, S., & Minai, M. S. (2018). Relationship between entrepreneurial competencies and small firm performance: Are dynamic capabilities the Academy of Strategic Management Journal, 17(2), 1–10.

[2] Cavlek, N. (2002). Business in Tourism: SMEs versus MNCs. Zagreb International Review of Economics & Business, 5(2), 39–48.

[3] OECD. (2010). Tourism in OECD Countries, Trends and Policies. OECD Publishing.

[4] Fernández, M. C., & Puig, P. (2020). Los desafíos del comercio electrónico para las Pymes: Principales claves en el proceso de digitalización. Banco Interamericano de Desarrollo. Recuperado de: *https://publications.iadb.org/es/los-desafios-del-comercio-electronico-para-las-pyme-principales-claves-en-el-proceso-de*

[5] Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2019). Censos Económicos 2019. Recuperado de *https://www.inegi.org.mx/contenidos/saladeprensa/aproposito/2020/MYPIMES20.pdf*

[6] Espino Barranco, L. E. (2016). Los recursos humanos como factor de competitividad en la PYME. Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo. Recuperado de *https://www.uaeh.edu.mx/investigacion/productos/4845/los_rec_humanos_como_factor.pdf.*

[7] López, V. (2018). La competitividad de las pymes en México: retos y oportunidades ante un mundo globalizado. Horizontes de la Contaduría en las Ciencias Sociales, 5(9), 79–91. Recuperado de *https://www.uv.mx/iic/files/2018/12/num09-art07-105.pdf*

[8] Porter, M. E., & Kramer, M. R. (2002). The competitive advantage of corporate philanthropy. Harvard Business Review, 80, 56–58. Edición en español: Porter, M. E., & Kramer, M. R. (2002). La filantropía empresarial como ventaja competitiva. Harvard Deusto Review, 112, 7–20.

[9] Molina Morejón, V. M., García Hernández, L. J., & Salas Jaramillo, V. V. (2013). Modelo de negocios de las Pyme: Un análisis de sus manejos financieros. Revista Raites antes Panorama Administrativo Journal, 7(13), 69–82.

[10] Pigneur, A. O. (2011). Generación de modelos de negocio. Centro Libros PAPF, S. L. U. Rodríguez, J. Qué es el diagrama de Ishikawa, para que sirve, cómo crearlo y ejemplos. Recuperado de Hubspot: *https://blog.hubspot.es/sales/diagrama-ishikawa*.

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

[11] Aparicio G., & Olvera T. (2023). Metodología para la integración del modelo de negocios en Mypes. Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar, 7(6), 1. *https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v7i6.8693*

[12] García Pérez de Lema, D., Armenteros Acosta, M. A., & Canibe Cruz, S. (2012). Metodología de la investigación. En S. López Chavarría, M. Medina Elizondo, & M. A. Armenteros Acosta (Eds.), Análisis del Desarrollo Estratégico de la micro, pequeña y mediana empresa Estado de Coahuila 2010-2012 (pp. 19–26). Editorial Grupo Gasca.

[13] The jamovi project. (2022). jamovi (Version 2.3) [Computer Software]. Recuperado de https://www.jamovi.org. R Core Team. (2021). R: A Language and environment for statistical computing (Version 4.1) [Computer software]. Recuperado de *https://cran.r-project.org*.

[14] Molina, M. V., García, L. H., & Salas, V. V. (2013). Modelo de negocios de las Pyme: Un análisis de sus manejos financieros. Revista Raites antes Panorama Administrativo Journal, 7(13). Recuperado de *https://biblat.unam.mx/hevila/Panoramaadministrativo/2013/vol7/no13/3.pd*f

[15] Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT). (2014). Agenda Sectorial de Innovación en Turismo de Sonora. Hermosillo, Sonora, México: CONACYT.

[16] Reyes, M. I., Romero, C. A., & Villacrés, E. A. (2019). Gestión de la calidad en el servicio al cliente y su incidencia en la sostenibilidad de las Pymes en el Ecuador a través del modelo Servqual. *Revista Espacios*, *40*(38), 1-13. Recuperado de *http://www.revistaespacios.com/a19v40n38/a19v40n38p01.pdf*

AUTORIZACIÓN Y RENUNCIA.

Los autores del presente artículo autorizan al TecNM/Instituto Tecnológico de Zacatepec para publicar el escrito en el libro electrónico del CITID 2025. El TecNM/ITZ o los editores no son responsables ni por el contenido ni por las implicaciones de lo que está expresado en el escrito.

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

INTEGRACIÓN DE LA CIBERSEGURIDAD Y LA GOBERNANZA DIGITAL EN LA EDUCACIÓN DE INGENIEROS EN TIC´S

MPEDT Hilda Díaz Rincón[1], Dr. José Antonio Navarrete Prieto[2], MTI Jesús Cayetano Flores Mercado[3], MTI José Antonio Gallardo Godínez[4], M.C. en E. Claudia Ruiz Muñoz[5]

[1]Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Tlalnepantla, Departamento de Sistemas y Computación, hilda.dr@tlalnepantla.tecnm.mx, Av. Instituto Tecnológico s/n Col. La Comunidad, Tlalnepantla de Baz, Estado de México.
[2]Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Tlalnepantla, Departamento de Sistemas y Computación jose.np@tlalnepantla.tecnm.mx, Av. Instituto Tecnológico s/n Col. La Comunidad, Tlalnepantla de Baz, Estado de México.
[3]Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Tlalnepantla, Departamento de Sistemas y Computación, jesus.fm@tlalnepantla.tecnm.mx, Av. Instituto Tecnológico s/n Col. La Comunidad, Tlalnepantla de Baz, Estado de México.
[4]Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Tlalnepantla, Departamento de Sistemas y Computación, jose.gg@tlalnepantla.tecnm.mx, Av. Instituto Tecnológico s/n Col. La Comunidad, Tlalnepantla de Baz, Estado de México.
[5]Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Tlalnepantla, Departamento de Sistemas y Computación, claudia.rm@tlalnepantla.tecnm.mx, Av. Instituto Tecnológico s/n Col. La Comunidad, Tlalnepantla de Baz, Estado de México.

Resumen.- En la actualidad, la transformación digital avanza a un ritmo acelerado, lo que exige que la formación de ingenieros en Tecnologías de la Información y Comunicaciones (TIC) evolucione para responder a los nuevos retos en materia de seguridad informática y gestión tecnológica. Una preparación integral en estas áreas es clave para que los futuros profesionales enfrenten de manera efectiva los desafíos del entorno digital. Este estudio analiza la manera en que los programas académicos de ingeniería en TIC han incorporado conocimientos en ciberseguridad y gobernanza digital, identificando oportunidades de mejora en su integración curricular. Para ello, se llevó a cabo un análisis detallado del plan de estudios de la carrera de Ingeniería en TIC del Instituto Tecnológico de Tlalnepantla, considerando tanto la estructura de las asignaturas como la alineación con las necesidades actuales del sector. Además, se consultó a especialistas del ámbito académico y profesional para conocer sus perspectivas sobre la preparación de los egresados en relación con estas competencias. Los resultados muestran que, si bien el programa aborda aspectos técnicos de la ciberseguridad, aún existe una oportunidad de fortalecer la enseñanza en áreas estratégicas, como la gestión de riesgos, el cumplimiento normativo y la ética digital. Asimismo, se observa una diferencia significativa entre las habilidades que los estudiantes adquieren y aquellas que el mercado laboral considera prioritarias. Ante este panorama, es fundamental actualizar los planes de estudio de ingeniería en TIC para garantizar una formación equilibrada que abarque tanto el desarrollo de soluciones tecnológicas seguras como la implementación de estrategias de gobernanza digital. Fortalecer estos conocimientos permitirá a los futuros ingenieros desempeñarse con mayor competitividad en un entorno donde la protección de la información y la gestión de la seguridad son cada vez más relevantes.

Palabras Clave: ciberseguridad, gobernanza, ITIC´s.

Abstract.- In today's rapidly evolving digital landscape, the training of engineers in Information and Communication Technologies (ICT) must adapt to meet the growing challenges of cybersecurity and digital governance. A comprehensive education in these areas is essential to ensure that future professionals can effectively address the complexities of the digital environment. This study examines how ICT engineering programs have integrated cybersecurity and digital governance into their curricula, identifying areas for improvement in their academic structure. To achieve this, a detailed analysis was conducted on the curriculum of the ICT Engineering program at the Instituto Tecnológico de Tlalnepantla, evaluating both the structure of its courses and its alignment with current industry demands. Additionally, insights from academic and industry experts were gathered to assess how well graduates are being prepared in these key competencies. The findings reveal that while the program covers technical aspects of cybersecurity, there is an opportunity to enhance instruction in strategic areas such as risk management, regulatory compliance, and digital ethics. Furthermore, a significant gap was identified between the skills students acquire and those that are most valued by the job market. Given this scenario, it is crucial to update ICT engineering curricula to ensure a balanced education that encompasses both the development of secure technological solutions and the implementation of digital governance strategies. Strengthening these competencies will better equip future engineers to compete in a landscape where information security and cybersecurity management are increasingly critical.

Key words – Cybersecurity , Governance, ICT Engineering (Information and Communication Technologies Engineering)

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

INTRODUCCIÓN

En la era digital actual, la importancia de la ciberseguridad y la gobernanza digital se ha catapultado al centro de las preocupaciones nacionales e internacionales, especialmente en lo que concierne a la protección de infraestructuras críticas y la seguridad de los datos personales y corporativos. Sin embargo, la integración de estas disciplinas críticas en los programas académicos de ingeniería en Tecnologías de la Información y Comunicaciones (TIC's) ha sido gradual y a menudo insuficiente. A pesar de los avances tecnológicos y una mayor conciencia sobre la seguridad informática, muchos currículos de ingeniería aún no consideran la ciberseguridad y la gobernanza digital como ejes fundamentales, creando una brecha significativa entre las habilidades impartidas y las requeridas en los mercados laborales modernos, particularmente en sectores altamente regulados o que manejan datos sensibles. [1]

Este estudio surge como respuesta a la necesidad crítica de evaluar y mejorar la forma en que los programas de ingeniería en TIC's abordan la ciberseguridad y la gobernanza digital. El problema central que aborda esta investigación es la insuficiente incorporación de competencias relevantes en ciberseguridad y gobernanza dentro de estos programas, lo que podría comprometer la preparación de los estudiantes para enfrentar los desafíos de la seguridad digital en el mundo contemporáneo. Por lo tanto, el objetivo principal de este trabajo es analizar la integración actual de estos temas en los currículos de ingeniería en TIC's y proponer un marco de integración que mejore su inclusión de manera efectiva. De manera secundaria, se pretende evaluar el impacto que una integración más profunda y sistemática de la ciberseguridad y la gobernanza digital tendría en la preparación práctica y ética de los futuros ingenieros.[2] [3].

La justificación de este estudio radica en la imperiosa necesidad de alinear la educación en ingeniería en TIC's con las demandas actuales y futuras del mercado laboral y las expectativas sociales respecto a la seguridad digital y la gobernanza de la información. La mejora en la integración de estas competencias es fundamental no solo para la seguridad individual y corporativa, sino también para fortalecer la resiliencia nacional e internacional ante las crecientes amenazas cibernéticas.

DESARROLLO

Para desarrollar la propuesta se inició con el Análisis Normativo: Revisión detallada del Plan Nacional de Desarrollo (PND) 2013-2018 y 2019-2024, MAAGTICSI, la Estrategia Nacional de Ciberseguridad (2017), la Estrategia Digital Nacional (2021 - 2024), y el Programa de Desarrollo Institucional (PDI 2019-2024) del TecNM. Este análisis buscará identificar directrices y prioridades que impacten directamente la formación en ITIC’s, especialmente en ciberseguridad y gobernanza digital.

Para ello se realiza el diagnóstico de la Oferta Educativa Actual a través de la evaluación de los planes y programas de estudio actuales del TecNM, específicamente en la carrera de ITIC’s, para determinar cómo se están integrando actualmente la ciberseguridad y la gobernanza digital, y detectar áreas de oportunidad.

El programa de Ingeniería en Tecnologías de la Información y Comunicaciones (ITIC´s) formar profesionales capaces de desarrollar y administrar soluciones de TI y comunicaciones. Dada la creciente relevancia de la ciberseguridad y la gobernanza digital en la industria, es fundamental analizar cómo estos temas se incorporan en el plan de estudios vigente a través de identificar áreas de mejora y compararlo con otros programas, así como revisar las tendencias educativas actuales. A continuación, se menciona las actividades realizadas para el análisis detallado siendo estas las siguientes: [5]

(1) La evaluación de la integración actual de ciberseguridad y gobernanza digital en las asignaturas de ITIC´s.
(2) Una comparación con la implementación en otros campus del Tecnológico Nacional de México
(3) La detección de áreas de oportunidad para fortalecer dichos temas
(4) La confrontación del plan con tendencias recientes en formación en seguridad informática y gobernanza, y
(5) Sugerencias concretas para mejorar la formación de los estudiantes en estas áreas.

El plan de estudios vigente cubre los primeros semestres con fundamentos de matemáticas, programación, redes y sistemas, incorporando los temas de seguridad de la información de forma más explícita hasta los semestres avanzados. En particular, a partir del 7° semestre se ofrecen asignaturas especializadas en ciberseguridad. Por ejemplo, la materia Introducción a la Ciberseguridad (7° semestre) la cual explora las “tendencias cibernéticas, las amenazas y cómo permanecer seguro en el ciberespacio”, brindando bases sobre pruebas de penetración, cibercrimen, privacidad de datos, firewalls y arquitectura de seguridad.

Asimismo, en 8° semestre se imparte Administración y Seguridad de Redes, donde el estudiante adquiere competencias para “diseñar, implementar y administrar redes de cómputo garantizando aspectos de seguridad y calidad” al implementar mecanismos de seguridad según políticas y estándares internacionales, protegiendo la integridad de la información de la organización. Esta asignatura cubre aspectos prácticos de configuración,

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

monitoreo, análisis y protección de redes, enfatizando que dichas habilidades son hoy imprescindibles en cualquier empresa. [6]

Además de esas materias técnico-prácticas, el plan incluye contenido relacionado con gobernanza de TI en la asignatura de Auditoría en Tecnologías de Información (normalmente ubicada en 8° o 9° semestre). Esta materia aporta al perfil del ingeniero la capacidad de realizar consultoría y auditoría para validar procesos y garantizar la calidad en el uso de las TI. Su temario abarca desde los fundamentos y planeación de una auditoría de sistemas, hasta la ejecución y elaboración de reportes, "sin dejar de lado el conocimiento y entendimiento del marco jurídico de la auditoría informática". Es decir, el estudiante aprende sobre controles internos, normas legales y estándares aplicables a TI, cubriendo implícitamente aspectos de gobernanza y cumplimiento (GRC). Esta asignatura, sugerida para el último semestre, complementa conocimientos de desarrollo de software, bases de datos y redes desde la óptica de control y evaluación, proporcionando una visión integral de seguridad de la información corporativa y gobierno de TI. [7]

En el Campus Tlalnepantla específicamente, la integración de ciberseguridad y gobernanza digital también se refleja en la elección de una especialidad orientada a esos temas. El currículo nacional contempla unidades de especialización en los semestres finales, y una de las rutas es la especialidad en Cómputo en la nube y ciberseguridad (25 créditos), que incluye asignaturas como Introducción a la Ciberseguridad, Gestión de Seguridad de la Información, Hardening Informático por mencionar las principales. [8]

Cabe señalar que, en el plan estándar, todas estas asignaturas de ciberseguridad aparecen a partir de 7° semestre, luego de que el estudiante domina los fundamentos de redes, sistemas operativos y bases de datos. Por su parte, el concepto de gobernanza digital (entendida como la gestión estratégica de las TIC alineada a objetivos del negocio, políticas y cumplimiento) está presente de forma transversal pero limitada. Fuera de la materia de Auditoría (que introduce gobierno de TI y legalidad) y algunas nociones en Administración Gerencial (3er semestre) o Desarrollo de Emprendedores (6° semestre), no hay en el tronco común una asignatura dedicada exclusivamente al gobierno de TI. Esta situación llevó al campus Tlalnepantla a desarrollar una especialidad propia denominada Gobernabilidad en TIC, posteriormente la de Gestión y Seguridad, cambiando por necesidades del entorno a Ingeniería de Software y actualmente surge la de Ciberseguridad y Cómputo Forense.

En resumen, actualmente la formación en seguridad informática dentro de ITIC se concentra en materias especializadas de los últimos semestres (redes avanzadas, ciberseguridad general y aplicada a negocios), mientras que la gobernanza y gestión de TI se cubre principalmente en la materia de Auditoría y, de forma más profunda, sólo si el estudiante cursa la especialidad mencionada.

Para el caso específico de Tlalnepantla se ha realizado la especialidad para integrar en el egresado el conocimiento sobre estas tecnologías emergentes que surgen en el entorno de las organizaciones para el desarrollo tecnológico de estas, pero se ha visualizado que a nivel nacional no se han integrado los temas como son Ciberseguridad y Gobernanza Digital ocasionando con ello falta de preparación en los egresados para integrar los temas que trata este artículo.

Actualmente en el TecNM existen un total 66 Institutos Tecnológicos que imparten la carrera por lo que el rezago sobre esto es muy amplio, ver figura 1.

Figura 1. Programas de licenciatura por campo de formación: Fuente: TecNM (2021).

Con este análisis y considerando los diagnósticos realizados por el Departamento de Sistemas y Computación de la región y a nivel nacional con la finalidad de que los egresados sean competitivos en cualquier lugar y organización que se integren con mayor facilidad en el mundo laboral, por lo que surgieron y se han implementado las especialidades mencionadas, incluyendo en estas asignaturas optativas complementarias, donde se incluyó en todas ellas una asignatura relacionada a gobernanza y a la seguridad informática y/o ciberseguridad.

Al revisar el total de las asignaturas que comprende el Plan de Estudios Genérico para la carrera y derivado del análisis, se propone integrar en todas y cada una de las siguientes asignaturas un tema relacionado a la Ciberseguridad según corresponda y/o a la Gobernanza Digital.

Ingeniería de Software, Taller de Ingeniería de Software, Negocios Electrónicos I - II, Administración de

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

Proyectos, Desarrollo Web, Aplicaciones Móviles, Desarrollo de Emprendedores, Taller de Investigación I, II.

Dentro de las actividades realizadas y con base en el diagnóstico del mismo, se muestra la interrelación con la gobernanza, y debido a la situación actual que se ha desencadenado con la pandemia y el uso de la tecnologías y los sistemas digitales que prevalecen en el gobierno digital y en las organizaciones e instituciones donde se hace necesario incluir la ciberseguridad la cual va desde realizar medidas básicas de protección como son bloqueo de puertos, instalación de antivirus, configuración de firewall, inclusión de VPN, implementar la criptografía, establecer nuevos estándares de desarrollo para los sistemas de información, surgimientos de nuevas legislaciones, formas de pago y de compra en línea, nuevos servicios digitales por parte de los gobiernos y empresas ha provocado que se incluya la ciberseguridad en los procesos que actualmente realizan empresa, organizaciones, instituciones y la sociedad en general.

Esta iniciativa reconoce que los ingenieros en TIC deben "implementar soluciones de forma estratégica, así como impulsar la gobernanza digital", y que las IES deben alinear sus programas académicos con esas necesidades.

En contraste, otros campus como Morelia han reforzado la vertiente técnica en ciberseguridad, respondiendo a la demanda de especialistas en protección de sistemas. No obstante, cabe señalar que todos los campus comparten el núcleo formativo: los estudiantes de cualquier instituto TecNM cursan las materias base (p. ej. redes, seguridad de redes, auditoría) donde adquieren conocimientos fundamentales de seguridad y gobierno de TI. La diferencia radica en las materias optativas de la etapa de especialización y en las iniciativas complementarias de cada campus (laboratorios, certificaciones, proyectos específicos, etc.).

En resumen, todos los egresados de ITIC TecNM reciben cierta formación en ciberseguridad y gobernanza, pero la profundidad y enfoque varía según la oferta local de especialidades. Un estudiante en Tlalnepantla obtendrá una mayor perspectiva en políticas, normativas y gestión de la seguridad (gobierno de TI), mientras que uno en Morelia profundizará más en habilidades técnicas de ciberdefensa. Esta flexibilidad permite al TecNM adaptarse a distintos perfiles profesionales, aunque implica que la experiencia formativa en estos temas no sea homogénea en todos los campus.

Áreas de oportunidad en el plan de estudios

Si bien el plan ITIC vigente incorpora ciberseguridad y gobernanza en su fase final, se identifican varias áreas de oportunidad para fortalecer la enseñanza de estos tópicos a lo largo de la carrera. A continuación, se destacan las principales brechas y posibilidades de mejora: Introducción temprana de seguridad informática, dejando los primeros 3 años de la carrera con escasa cobertura explícita de seguridad. Esta ausencia de formación temprana es un área para mejorar, pues retrasar la concientización en seguridad puede limitar la cultura preventiva del estudiante. Un análisis del sector educativo en México señala "la falta de programas de formación… en ciberseguridad en el sistema educativo" como un factor crítico.

Integrar conceptos básicos de seguridad desde primer o segundo año (por ejemplo, en Fundamentos de Programación, Bases de Datos o Sistemas Operativos) sería beneficioso para crear una mentalidad de "seguridad por diseño" en los futuros ingenieros.
Cobertura de seguridad en desarrollo de software: El plan de estudios cuenta con varias materias de programación e ingeniería de software (Programación Orientada a Objetos, Ingeniería de Software, Taller de Ingeniería de Software, etc.), pero no se evidencia en ellas un módulo dedicado a codificación segura o seguridad en el ciclo de desarrollo. La ausencia de estos contenidos es una oportunidad perdida, considerando que muchas vulnerabilidades nacen en la etapa de desarrollo. Incluir buenas prácticas de desarrollo seguro (validación de entradas, manejo seguro de errores, criptografía básica en aplicaciones, etc.) dentro de dichas asignaturas fortalecería las competencias del egresado para construir sistemas robustos. Esta carencia es común en muchas universidades y ha sido mencionada entre las causas de la escasez de talento en ciberseguridad – "la falta de programas educativos especializados" en áreas claves como desarrollo seguro influye en la brecha de habilidades.

Mayor profundidad en gobernanza de TI para todos los estudiantes: La gobernanza digital y el gobierno de TI adquieren cada vez más relevancia en las organizaciones, pero en el plan actual solo los estudiantes que toman la especialidad correspondiente en 7°-8° semestre profundizan en esos temas. Para el resto, los conocimientos de gobierno de TI se limitan a lo visto en Auditoría (marco jurídico, control interno) y algo en Administración Gerencial. Existe un área de oportunidad en ofrecer una formación más amplia en gestión de TI, administración de riesgos y cumplimiento para todos los alumnos. Esto podría materializarse en una asignatura obligatoria sobre Gestión de Servicios de TI y Gobierno (cubriendo estándares como COBIT, ITIL, ISO 27001, ley de protección de datos, etc.), o bien incorporando módulos de estos temas en materias ya existentes de administración. Dado que "una gobernanza de TI eficaz es un componente fundamental de la estrategia del negocio y de la gestión de riesgos"

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

Es importante que todos los ingenieros TIC egresados tengan claros los principios de alineación de TI con el negocio, roles y responsabilidades, y normativas digitales, más allá de lo visto tangencialmente en auditoría. La actualización debe ser en forma continua debido a las tendencias emergentes de seguridad: El campo de la seguridad informática evoluciona rápidamente (amenazas avanzadas, IoT, computación en nube, inteligencia artificial, etc.). Si bien el plan 2010 incorporó a través de sus especialidades incluyen tópicos novedosos (por ejemplo, Virtualización 7°-8° semestre), con el paso del tiempo surgen nuevas necesidades formativas en las áreas como seguridad en la nube e IoT, forensia digital, respuesta a incidentes, e identidad digital/privacidad que son cada vez más cruciales. Actualmente, algunas se tocan indirectamente (p. ej., seguridad en la nube podría abordarse en Cómputo en la Nube I/II; seguridad IoT tal vez en Redes Emergentes), pero no de forma explícita. Se identifica la oportunidad de refrescar el plan de estudios incorporando unidades o materias optativas sobre estas tendencias. Esto aseguraría que el egresado esté mejor preparado para el entorno actual. Por ejemplo, podría integrarse un tema de computación segura en la nube dentro de Virtualización o una unidad de IoT seguro en Redes de Computadoras, formalizando así contenidos que hoy podrían depender solo de la iniciativa de cada docente.

Además de que se debe reforzar la práctica y cultura de seguridad como un área de oportunidad importante es fortalecer la experiencia práctica y la cultura de ciberseguridad en la formación. Si bien las materias de seguridad de redes incluyen laboratorios, se podría potenciar la participación de los estudiantes en actividades complementarias como hackathones o CTFs (Capture The Flag) de ciberseguridad, proyectos aplicados con empresas, o laboratorios especializados. Asimismo, promover certificaciones reconocidas (Cisco CCNA Security, Comptia Security+, EC-Council CEH, etc.) como parte de las actividades complementarias o residencias profesionales sería una forma de convertir esta área de oportunidad en fortaleza.

En síntesis, aunque el plan de ITIC ya cubre ciberseguridad y gobernanza en cierto grado, existe espacio para adelantar, ampliar y profundizar estos contenidos. Esto permitiría responder mejor a las exigencias del mercado laboral y a las mejores prácticas internacionales, formando profesionistas más completos en protección de la información y gestión estratégica de tecnología.

Al contrastar el plan de ITIC´s con las tendencias educativas actuales en seguridad y gobernanza, se observan coincidencias, pero también rezagos que conviene atender. Algunas de las principales tendencias y cómo se compara el plan analizado son: Expansión de programas especializados en ciberseguridad: A nivel global y nacional, en los últimos años han surgido carreras dedicadas exclusivamente a ciberseguridad. Por ejemplo, la Universidad Autónoma de Nuevo León ofrece una Licenciatura en Seguridad en Tecnologías de Información de 8 semestres de duración. Instituciones privadas como es la Universidad Panamericana han lanzado ingenierías focalizadas en seguridad digital.

Por su parte el TecNM elabora el programa de Ciberseguridad, esto es positivo en el sentido de dar formación en ciberseguridad a nivel de ingeniería, pero con respecto a los ingenieros TIC, estos quedan rezagados frente a programas 100% especializados que profundizan desde el inicio. La tendencia muestra que la demanda de expertos en ciberseguridad está impulsando la creación de carreras dedicadas.

Incorporación de ciberseguridad en el currículo básico del programa de ITIC´s permitirá cumplir con lo que Organismos internacionales de educación en computación recomiendan incluir tópicos de seguridad a lo largo de todo el plan de estudios (“security across the curriculum”). Muchas universidades han empezado a insertar módulos de seguridad en cursos introductorios de programación, arquitectura de computadores, bases de datos, etc., además de ofrecer cursos específicos obligatorios de seguridad informática antes del último año. La intención es que todos los egresados de áreas de TI, no solo los especializados, tengan competencias básicas para “prevenir y resolver problemas de ciberseguridad”. La tendencia sería llevar ese contenido o sus fundamentos a semestres más tempranos. De hecho, voces expertas señalan que las universidades enfrentan el reto de enseñar “no sólo los principios generales de la ciberseguridad, sino también las leyes específicas y regulaciones” del entorno, mostrando la necesidad de un currículo más integral en estos temas.

Se puede afirmar que aún hay camino para que el plan ITIC´s se alinee plenamente con esta tendencia de distribución transversal de la seguridad en la formación. Énfasis en cumplimiento normativo y gobernanza en planes de estudio: Con el aumento de regulaciones de protección de datos y la importancia del gobierno de TI en las empresas, los programas académicos han ido incluyendo cursos de gestión de TI, ética y leyes informáticas. La tendencia actual es que el profesional de seguridad no solo domine la técnica, sino entienda el contexto legal y organizacional. En México, la ANUIES destaca que las IES deben formar recursos en ciberseguridad vinculándose con la industria y enseñar las normativas de distintas regiones

El economista menciona que existe una brecha de talento en ciberseguridad: A nivel mundial se reporta un déficit importante de profesionales en ciberseguridad. Un

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

estudio de ISC2 de 2021 estimó que en México existían 515 mil profesionales en seguridad, pero hacían falta 260 mil más para satisfacer la demanda. En 2023 esa brecha global creció a casi 4 millones de vacantes sin cubrir.

La educación superior está llamada a responder a esta necesidad aumentando la cantidad y calidad de especialistas formados. La tendencia observable es un esfuerzo por graduar más estudiantes con competencias en ciberseguridad, ya sea mediante programas dedicados, posgrados, o certificaciones. El TecNM ha contribuido mediante la inclusión de contenidos de seguridad en ITIC y la apertura de especialidades, pero dado que esta carrera no es exclusivamente de ciberseguridad, el número de egresados con alta especialización puede no ser suficiente comparado con la demanda nacional. Se espera que, en próximos rediseños curriculares, el TecNM enfatice aún más la seguridad (incluso evaluando la posibilidad de una carrera específica en ciberseguridad), en línea con la tendencia del mercado y las recomendaciones de organismos profesionales. La "escasez de habilidades en ciberseguridad" no solo es un desafío sino también una oportunidad para que instituciones como el TecNM ajusten sus planes formativos.

Otra tendencia educativa relevante es la adopción de metodologías prácticas (aprendizaje basado en proyectos reales, laboratorios especializados, simulaciones de ciberataques) y alianzas con la industria para brindar a los alumnos experiencia de campo. Muchas universidades están estableciendo centros de ciberseguridad, laboratorios con equipamiento de red y hacking ético, e involucrando a los estudiantes en proyectos empresariales o gubernamentales de seguridad desde etapas tempranas. Esto responde a la naturaleza dinámica de la ciberseguridad y a la necesidad de egresar profesionales "listos para contribuir". El plan de estudios por sí solo no detalla estas actividades, pero el TecNM a través de sus residencias profesionales y servicio social brinda la posibilidad de que los alumnos se integren temporalmente en organizaciones en roles de TI/seguridad. La tendencia sugiere potenciar este vínculo: por ejemplo, que más estudiantes de ITIC realicen residencias en áreas de ciberseguridad o gobernanza TI en empresas, o que se incluyan seminarios con expertos de la industria (CISOs, auditores, etc.) dentro de la formación. De esta manera, el egresado no solo tendría la teoría, sino también entendimiento práctico de cómo se gestionan la seguridad y la gobernanza en entornos reales. Algunas cifras recientes indican que más del 50% de las organizaciones mexicanas tenían dificultad para contratar y retener talento de ciberseguridad en 2023, por lo que estrechar la colaboración universidad-industria en este campo es una tendencia necesaria para beneficio mutuo: los estudiantes adquieren experiencia y las empresas ayudan a formar el talento que requieren.

En balance, el plan de ITIC del TecNM refleja ciertas tendencias positivas, como la incorporación de asignaturas de ciberseguridad y la flexibilidad para especializarse en áreas emergentes (cloud, datos, gobierno TI). Sin embargo, comparado con las mejores prácticas actuales, aún puede fortalecerse su carácter integral: comenzar antes con seguridad, asegurar que todos los egresados tengan nociones de gobernanza y cumplimiento, y adaptarse continuamente a las nuevas tendencias tecnológicas. La buena noticia es que el TecNM cuenta con la infraestructura y alcance nacional para implementar estas mejoras de forma coordinada, manteniendo su pertinencia en la era de la transformación digital.

DISCUSIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Derivado del análisis, se proponen a continuación acciones concretas para mejorar la formación de los estudiantes de Ingeniería en TIC del TecNM en las áreas de ciberseguridad y gobernanza digital. Estas sugerencias buscan cerrar las brechas detectadas y alinear el plan de estudios con las demandas actuales y futuras del entorno profesional:

Incluir un curso obligatorio de Seguridad Informática básica a mitad de la carrera: Desarrollar una asignatura específica, ubicada alrededor de 4° o 5° semestre, que siente las bases de seguridad de la información. Esta materia podría llamarse "Fundamentos de Seguridad Informática" e incluir conceptos de criptografía elemental, controles de acceso, vulnerabilidades comunes de software, seguridad en redes básicas y conciencia de amenazas (phishing, malware, etc.). Serviría de antesala a Introducción a la Ciberseguridad de 7° semestre, logrando que los alumnos lleguen a cursos avanzados con un bagaje previo y con la cultura de seguridad ya asimilada. Alternativamente, si no se añade una materia nueva, se podría subdividir alguna existente (por ejemplo, introducir un módulo de 4-5 semanas de seguridad en "Sistemas Operativos I" o en "Fundamentos de Redes"). Esto respondería a la necesidad de iniciar la formación en ciberseguridad más tempranamente, tal como sugieren las tendencias educativas globales.

Integrar prácticas de desarrollo seguro en las materias de programación y software: Aprovechar los cursos ya establecidos de programación (POO, Programación Web) e ingeniería de software para introducir contenidos de seguridad en el desarrollo. Por ejemplo, en Ingeniería de Software agregar una unidad sobre "Seguridad en el Ciclo de Vida de Desarrollo (SDLC)" que abarque análisis de requerimientos de seguridad, revisión de código seguro y pruebas de penetración en aplicaciones.

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

En Programación Web, incluir temas de seguridad web (OWASP Top 10: inyección SQL, XSS, CSRF, etc.) y exigir prácticas donde el estudiante deba corregir vulnerabilidades en una aplicación. Estas inserciones no alargarían el plan de estudios, pero sí garantizarían que todo egresado de TIC conozca principios de codificación segura. Esto mejoraría la preparación del estudiante para prevenir fallos de seguridad desde la construcción del software, una habilidad muy valorada en la industria de desarrollo actualmente.

Reforzar la formación en Gobernanza de TI y cumplimiento para todos los alumnos: Dado que no todos cursarán una especialidad de Gobierno TIC, es importante que al menos los conceptos esenciales de gobierno de TI, gestión de riesgos y cumplimiento legal sean abordados en el tronco común. Se sugiere dos vías (complementarias entre sí): (a) incluir en la materia Administración Gerencial o en Auditoría en TI unidades más explícitas sobre gobierno corporativo de TI, frameworks como COBIT e ISO 27000, gestión de continuidad de negocio, legislación local (Ley Federal de Protección de Datos Personales, normativas de gobierno digital, etc.); y (b) desarrollar talleres o seminarios interdepartamentales donde se discutan casos de estudio de gobernanza (por ejemplo, invitar a expertos de la industria o usar proyectos integradores donde los alumnos diseñen políticas de TI para una empresa simulada). Incluso podría crearse una materia electiva abierta a estudiantes de cualquier especialidad llamada “Gobernanza y Estrategia de TI”, de forma que quien no esté en la especialidad formal igual pueda cursarla optativamente. Así, todos los egresados tendrían al menos una exposición sustancial a gobernanza digital, preparando a aquellos que asuman roles de gestión o auditoría en su carrera profesional.

Actualizar contenidos con nuevas tendencias de seguridad y tecnologías emergentes: Formar un comité académico que periódicamente revise e incorpore las últimas tendencias en el plan. A corto plazo, por ejemplo, agregar contenidos de computación en la nube segura (security in cloud) en las materias ya tituladas de Cómputo en la Nube I/II; incluir aspectos de seguridad en Internet de las Cosas (IoT) dentro de Redes Emergentes o Redes de Computadoras; y contemplar nociones de inteligencia artificial en ciberseguridad (uso de machine learning para detección de amenazas) en alguna optativa. A mediano plazo, considerar nuevas optativas como Forensia Digital o Hacking Ético Avanzado. Mantener el currículo dinámico garantizará que la carrera no se rezague respecto al estado del arte. Una opción práctica es establecer convenios con organismos especializados (p. ej. AMIPCI, OWASP capítulo México, INCIBE México-España, etc.) que puedan asesorar sobre qué competencias emergentes incluir. También se puede recurrir a las directrices de marcos internacionales de formación en seguridad, como el NICE Framework del NIST, para identificar roles y habilidades no cubiertas actualmente y diseñar contenidos acordes.

Potenciar las actividades prácticas y extracurriculares en ciberseguridad: Como complemento a las clases formales, se sugiere institucionalizar actividades que enriquezcan la experiencia del estudiante en un entorno práctico de seguridad. Por ejemplo: organizar concursos internos de ciberseguridad (estilo CTF) entre los estudiantes del campus o inter-tecnológicos a nivel nacional; crear un capítulo estudiantil de ciberseguridad/gobernanza (club) que realice talleres y conferencias periódicas; facilitar la obtención de certificaciones (ofreciendo descuentos o integrando contenidos de certificación en las materias, de forma que el alumno pueda intentar exámenes como Cybersecurity Fundamentals de ISACA, o Cisco CyberOps, etc. al graduar). Adicionalmente, resulta pertinente fomentar la realización de las Residencias Profesionales en proyectos relacionados con la seguridad de la información para un mayor número de alumnos. Esto se podría conseguir mediante la firma de convenios con empresas e instituciones que cuenten con áreas especializadas en seguridad. De esta manera, cada semestre se dispondría de plazas específicas para residencias en ciberseguridad y gobierno de TI, dirigidas a los estudiantes de TIC. Tales medidas incrementarán la exposición práctica y la motivación de los alumnos en estas disciplinas, complementando la teoría vista en clase con habilidades aplicadas y certificaciones reconocidas. Como resultado, los egresados no solo cumplirán con el plan de estudios mejorado, sino que podrán demostrar experiencia y compromiso extra en ciberseguridad/gobernanza, haciéndolos más competitivos en el mercado laboral.

Evaluar la creación de un posgrado en Ciberseguridad dentro del TecNM: En el largo plazo, y considerando la alta demanda de especialistas, el TecNM podría analizar la viabilidad de establecer una maestría en Ciberseguridad.

Esto permitiría canalizar a aquellos estudiantes que deseen profundizar aún más después de ITIC´s. Si bien esto trasciende la mejora del plan de ITIC en sí, está relacionado con ofrecer una ruta académica continua en el campo de la seguridad de la información. Algunos tecnológicos ya cuentan con posgrados afines (p. ej. el IPN tiene una Maestría en Seguridad de la Información).

El TecNM, como rector de numerosos institutos, está en posición de montar programas de posgrado colaborativos entre campus, lo que podría ser una propuesta estratégica para consolidar la formación en ciberseguridad/gobernanza a nivel nacional. Esta

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

sugerencia aseguraría que la mejora no solo quede en el nivel de licenciatura, sino que exista un ecosistema educativo completo para formar desde el nivel básico hasta expertos altamente especializados.

Las recomendaciones anteriores buscan lograr un equilibrio en la formación de los ingenieros en TIC: que sean tanto competentes técnicamente en seguridad (capaces de diseñar sistemas y redes seguros, y de responder a incidentes) como conscientes del marco organizacional (políticas, normas y gobierno de TI). Implementar estas mejoras fortalecerá el perfil de egreso frente a los retos de la transformación digital. En palabras de especialistas, las universidades deben preparar profesionales que "analicen y evalúen las demandas de la era digital tecnológica... e impulsen la gobernanza digital", vinculando sus programas con las necesidades reales de los sectores productivos.

Al adoptar estas sugerencias, el TecNM asegurará que la carrera de Ingeniería en TIC se mantenga a la vanguardia, aportando al mercado egresados capaces de liderar la seguridad de la información y la gobernanza tecnológica en cualquier organización.

CONCLUSIONES

Las recomendaciones anteriores buscan lograr un equilibrio en la formación de los ingenieros en TIC: que sean tanto competentes técnicamente en seguridad (capaces de diseñar sistemas y redes seguros, y de responder a incidentes) como conscientes del marco organizacional (políticas, normas y gobierno de TI). Implementar estas mejoras fortalecerá el perfil de egreso frente a los retos de la transformación digital. En palabras de especialistas, las universidades deben preparar profesionales que "analicen y evalúen las demandas de la era digital tecnológica... e impulsen la gobernanza digital", vinculando sus programas con las necesidades reales de los sectores productivos.

Al adoptar estas sugerencias, el TecNM asegurará que la carrera de Ingeniería en TIC se mantenga a la vanguardia, aportando al mercado egresados capaces de liderar la seguridad de la información y la gobernanza tecnológica en cualquier organización.

BIBLIOGRAFÍA

[1] Tecnológico Nacional de México (TecNM), Programa de Desarrollo Institucional (PDI) 2019-2024, 2019. Disponible en: https://www.tecnm.mx/
[2] Instituto Tecnológico de Tlalnepantla, Planes y Programas de Estudio de Ingeniería en TICs, 2023. Disponible en: https://www.tlalnepantla.tecnm.mx/licenciatura/
[3] Tecnológico Nacional de México (TecNM), Retícula del Plan de Estudios de Ingeniería en Tecnologías de la Información y Comunicaciones, 2010. Disponible en: https://www.tecnm.mx/
[4] ISC2, Cybersecurity Workforce Study 2023, 2023. Disponible en: https://www.isc2.org/Research
[5] IBM Think, ¿Qué es la gobernanza de TI?, 2024. Disponible en: https://www.ibm.com/mx-es/topics/it-governance
[6] ONMEX, Escasez de talento en ciberseguridad: tu oportunidad, 2023. Disponible en: https://www.onmex.com.mx/
[7] AMIPCI, Tendencias en Seguridad y Ciberseguridad 2024, Asociación Mexicana de Internet, 2024. Disponible en: https://www.amipci.org.mx/
[8] Fortinet, Reporte Global sobre la Brecha de Talento en Ciberseguridad, 2023. Disponible en: https://www.fortinet.com/blog

AUTORIZACIÓN Y RENUNCIA.

Los autores del presente artículo autorizan al TecNM/Instituto Tecnológico de Zacatepec para publicar el escrito en el libro electrónico del CITID 2025. El TecNM/ITZ o los editores no son responsables ni por el contenido ni por las implicaciones de lo que está expresado en el escrito.

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

ANÁLISIS DE LA REPROBACIÓN EN ÉPOCA DE PANDEMIA EN ESTUDIANTES DE PRIMER SEMESTRE DE LA CARRERA DE INGENIERÍA EN GESTIÓN EMPRESARIAL DEL INSTITUTO TECNOLÓGICO DE ZACATEPEC

María del Socorro Contreras Ochoa[1], María Lidia Palacios Contreras[2], Cintia Esmeralda Cisneros Vargas[3], Rogaciano Velázquez Vázquez[4], Brenda Selene López Medina[5].

[1]Doctorado.TecNM/IT de Zacatepec, Depto. Ciencias Económico-Administrativos. maria.co@zacatepec.tecnm.mx, 7341000494, Calzada Tecnológico no.27, Col. Centro, Zacatepec, Mor. C.P. 62780.
[2]Doctorado.TecNM/IT de Zacatepec, División de Estudios de Posgrado e Investigación. maria.pc@zacatepec.tecnm.mx, 7341000194, Calzada Tecnológico no.27, Col. Centro, Zacatepec, Mor. C.P. 62780.
[3]Maestría.TecNM/IT de Zacatepec, Depto. Ciencias Económico-Administrativos. cintia.cv@zacatepec.tecnm.mx, 7442040156, Calzada Tecnológico no.27, Col. Centro, Zacatepec, Mor. C.P. 62780.
[4]Maestría.TecNM/IT de Zacatepec, Depto. Ciencias Económico-Administrativos. rogaciano.vv@zacatepec.tecnm.mx, 7341160819, Calzada Tecnológico no.27, Col. Centro, Zacatepec, Mor. C.P. 62780.
[5]Licenciatura.TecNM/IT de Zacatepec, Depto. Ciencias Económico-Administrativos. brenda.lm@zacatepec.tecnm.mx, 7776100392, Calzada Tecnológico no.27, Col. Centro, Zacatepec, Mor. C.P. 62780.

Resumen -- La presente investigación se centra en determinar las causas que originan la reprobación en época de pandemia, específicamente en estudiantes del Programa Educativo (PE) de Ingeniería en Gestión Empresarial (IGE) del Instituto Tecnológico de Zacatepec. El Instituto Tecnológico de Zacatepec (ITZ) pertenece al Tecnológico Nacional de México (TecNM), el cual ha logrado certificarse en normas internacionales como ISO 9001, ISO 14 001, R-025, y de igual manera ha logrado acreditar a la mayor parte de sus Programas Educativos ante CACEI y CACECA. El PE de Ingeniería en Gestión Empresarial logró dicha certificación ante CACECA el 19 de mayo de 2023, teniendo 42 observaciones a cumplir en el primer seguimiento, siendo uno de ellos el Criterio 2.6 "Índice de rendimiento escolar por cohorte generacional". Lo anterior hace necesaria una investigación, para conocer los motivos de la reprobación en los estudiantes de dicho programa considerando la pandemia vivida. Dentro de las actividades realizadas, se dio inicio con una investigación retrospectiva por medio del Sistema Integral de Información (SII), Sistema Integral de Información implementado por el ITZ, buscando por medio de sus kardex de las y los estudiantes de las generaciones 2020,2021 y 2022, y que en su primer semestre reprobaron. Identificando un total de 220 estudiantes.

Palabras Clave: Reprobación, Pandemia, Estudiantes.

Abstract -- The present investigation focuses on determining the causes that cause failure in times of pandemic, specifically in students of the Educational Program (PE) of Engineering in Business Management of the Technological Institute of Zacatepec. The Technological Institute of Zacatepec (ITZ) belongs to the National Technological Institute of Mexico (TecNM), which has achieved certification in international standards such as ISO 9001, ISO 14 001, R-025, and has also managed to accredit most of its Educational Programs before CACEI and CACECA. The PE of Business Management Engineering achieved said certification before CACECA on May 19, 2023, having 42 observations to comply with in the first follow-up, one of them being Criterion 2.6 "School performance index by generational cohort." The above makes an investigation necessary to find out the reasons for the failure of students in said program considering the pandemic experienced. Among the activities carried out, a retrospective investigation began through the Comprehensive Information System (SII), an internal system implemented by ITZ, searching through their kardex for the students of the 2020, 2021 and 2022 generations, and who failed in their first semester. Identifying a total of 220 students.

Key words – Failure, Pandemic, Students.

INTRODUCCIÓN

De acuerdo con informes de la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura y el Instituto Internacional para la Educación Superior en América Latina y el Caribe, como consecuencia de la pandemia por COVID-19 la mayor parte de las Instituciones de Educación Superior (IES) que dejaron de operar presencialmente, lograron afectar alrededor de unos 23,4 millones de estudiantes de educación superior y a 1,4 millones de docentes en América Latina y el Caribe (UNESCO IESALC, 2020).

Dejando la pandemia un problema más marcado en nuestras instituciones educativas, "la reprobación".

La reprobación como un problema educativo resultado de la pandemia, la cual con base al Documento de Human Rights Watch, es el cierre de escuelas provocado por el COVID-19 que afectó a los niños, niñas y

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

adolescentes de forma desigual, ya que no todos tuvieron las mismas oportunidades, las herramientas o el acceso necesario para seguir aprendiendo durante dicha pandemia (García, S. 2020). Fenómeno que ocasionó una gran dependencia del aprendizaje en línea y exacerbó la distribución desigual existente en la educación (Chirino, D.,2020).

Debido a la pandemia, la comunidad educativa se vio presionada a continuar con un diferente modo de impartir sus clases, provocando la causa de distintos factores que obligaron a estudiantes de educación superior a reprobar o desertar por no contar con las herramientas tecnológicas o medios de comunicación necesarias para continuar con sus clases, dando auge a las tecnologías digitales que cobran importancia en estos procesos de cambio, dando respuesta adecuada a las expectativas y necesidades de las y los estudiantes (Vega, Rodríguez y Botero, Suaza 2021).

Sin embargo, la nueva modalidad virtual ocasionó que muchos alumnos y alumnas de educación superior reprobaran o desertaran de clases, debido a que no contaban con las herramientas o recursos económicos necesarios para sustentar y mantener una conectividad a internet para realizar las actividades que les permitieran continuar sus estudios por esta modalidad, así lo refieren Ramírez, Melo et ál., (2022) que los sistemas educativos no se encontraban preparados en su totalidad para sobrellevar aspectos técnicos, de ayuda psicológica y/o económica hacia los estudiantes, añadiendo a esto lo mencionado por Azuara et ál., (2023), diciendo que el acceso a internet, aunque aumenta en el caso de estudiantes universitarios, no llega al 100% de cobertura, por lo que hay una población que no cuenta con el recurso y a esto habría que añadir, que existe un porcentaje que renta un servicio de internet, no permitiendo tomar sus clases en línea.

La importancia de implementar las nuevas tecnologías en el área educativa para continuar con las clases en línea debido a la pandemia por COVID-19 fue un proceso complicado por parte de profesores y aún más por los receptores de las clases que fueron los alumnos de educación superior, pues esas circunstancias los obligó a tomar ciertas decisiones como la deserción o se vieron afectados en su aprovechamiento escolar. Urbina, Nájera et ál., (2021) menciona en su artículo titulado “Patrones que identifican a estudiantes universitarios desertores aplicando minería de datos educativa”, que para estudiar el fenómeno de la deserción escolar es pertinente identificar todos aquellos factores que intervienen en la decisión de abandonar los estudios universitarios.

En los sistemas educativos en México la reprobación escolar siempre ha estado presente, Diaz y Ruiz (2018) mencionan que uno de los problemas que siempre ha enfrentado el sistema educativo nacional es la deserción escolar, al igual que el rezago académico y la baja eficiencia terminal, que lejos de ser un asunto local, es una temática en el ámbito mundial.

En contraste con lo anterior se menciona la presencia de cuatro factores que influyen en el aprovechamiento académico los cuales son: Factores fisiológicos, Factores pedagógicos, Factores psicológicos y Factores sociológicos (Izar et ál., 2011), resumiéndolo a lo mencionado por Diaz y Ruiz (2018) el cual, afirma que la deserción, baja eficiencia terminal y bajo rendimiento escolar está relacionado con elementos familiares, sociales, psicológicos, económicos, perfiles de ingreso limitados o falta de hábitos de estudio.

En el caso del Instituto Tecnológico de Zacatepec se agudiza en esta época, con base a los indicadores que se proponen en Sistema de Gestión de la Calidad (SGC), que son utilizados para dar cumplimiento a criterios de acreditación del Consejo de Acreditación de Ciencias Administrativas, Contables y Afines (CACECA) en el programa educativo de Ingeniería en Gestión Empresarial. El CACECA en su Categoría 2 “Estudiantes”, criterio 2.6 “índices de rendimiento escolar por cohorte generacional”, solicita un promedio menor al 10% de la reprobación de las últimas tres generaciones. Criterio que no se cumple y hace necesaria esta investigación, detectando por los resultados obtenidos que es la pandemia el principal motivo por el que se reprobó en el periodo evaluado, la que, por no contar con las oportunidades, herramientas y el acceso necesario para aprender en casa o a distancia originó un mayor número de reprobados en el periodo evaluado 2020-2022.

DESARROLLO

El problema de la reprobación puede tener una causa principal de acuerdo con Corzo y Reyes (2017) es la falta de aplicación de las diferentes técnicas de estudio, como pueden ser:

- Falta de organización en tiempos.
- Toma de apuntes, desarrollo de tareas, etc.
- Distracción por medio de aparatos prendidos como la televisión, radio, celular etc.
- La inasistencia a clases.

El problema de la reprobación es una causa de la deserción del estudiante de nivel superior y ésta se da principalmente en los primeros semestres de la carrera. De acuerdo con estudios realizados por Guadalupe Cu Balan (2005) se detectaron causas probables de deserción, reprobación y bajo rendimiento escolar de los estudiantes en los dos primeros semestres de la carrera; falta de orientación vocacional, falta de motivación de

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

los educandos y bajos conocimientos adquiridos en el nivel medio superior.

Elin Martínez, investigadora principal de educación de Human Rights Watch, "El objetivo no debería ser simplemente volver a cómo eran las cosas antes de la pandemia, sino arreglar los defectos de los sistemas que durante mucho tiempo han impedido que las escuelas sean abiertas y acogedoras para todos los niños y niñas". Y que también aplica a los adolescentes atendidos en las instituciones de enseñanza superior que, capacitando a sus docentes y alumnos para la utilización de las tecnologías de la información, implementando estrategias de enseñanza acordes a estas tecnologías y situaciones.

Este análisis utilizó la metodología de tipo descriptivo y retrospectivo. Descriptivo porque, la meta de la investigación consiste en describir el fenómeno de la reprobación, en unas situaciones (Hernández, 2018) para detectar las causas que influyen en la reprobación en la Ingeniería en Gestión Empresarial en el periodo 2020-2022.

En esta investigación, se determinan por medio de la utilización retrospectiva del SII el total de 457 estudiantes del programa educativo de Ingeniería en Gestión Empresarial, del Instituto Tecnológico de Zacatepec, perteneciente al Tecnológico Nacional de México y al periodo a evaluar 2020-2022. Se identificaron datos de 220 estudiantes que reprobaron en el primer semestre en el periodo 2020-2022.

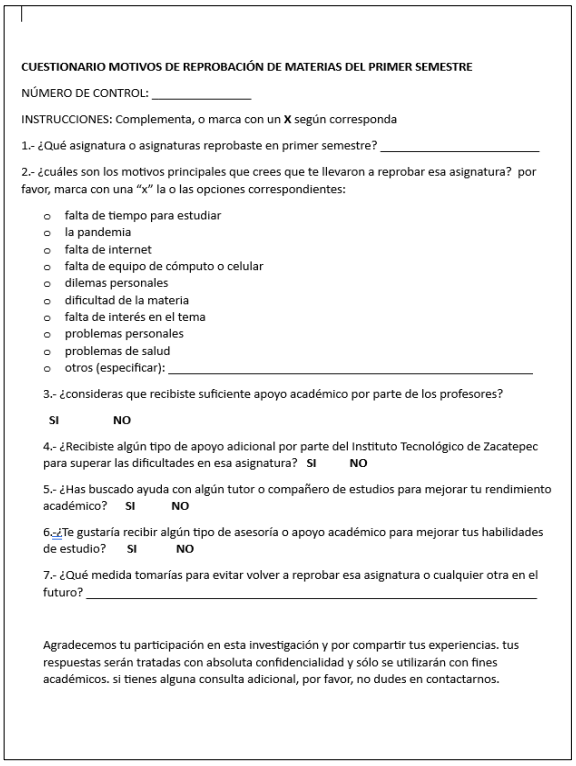
La metodología utilizada fue la siguiente:

1. Recopilación de datos (se retrocederá a los años 2020-2022 para determinar el número total de alumnos que reprobaron en primer semestre, por medio de información del SII (Sistema Integral de Información) obteniéndose un total de 220 estudiantes reprobados.

2. Determinación de factores que influyen en la reprobación (diseño de instrumento, aplicando un test piloto previo al test definitivo).

3. Aplicación del cuestionario (Total de 220 estudiantes reprobados, investigando con su coordinadora el horario presente para acudir a sus aulas y aplicarles el test, se pidió enviar por correo electrónico oficial a los asesores de residentes (estudiantes que ya se encontraban en residencia profesional) y se pidió al departamento de servicios escolares aplicar al momento de asistir a firmar documentos oficiales de egreso, a los estudiantes detectados como egresados de ese periodo a investigar).

El cuestionario consta de 7 preguntas (ver figura 1)



CUESTIONARIO MOTIVOS DE REPROBACIÓN DE MATERIAS DEL PRIMER SEMESTRE

NÚMERO DE CONTROL: _____

INSTRUCCIONES: Complementa, o marca con un **X** según corresponda

1.- ¿Qué asignatura o asignaturas reprobaste en primer semestre? _____

2.- ¿cuáles son los motivos principales que crees que te llevaron a reprobar esa asignatura? por favor, marca con una "x" la o las opciones correspondientes:

- o falta de tiempo para estudiar
- o la pandemia
- o falta de internet
- o falta de equipo de cómputo o celular
- o dilemas personales
- o dificultad de la materia
- o falta de interés en el tema
- o problemas personales
- o problemas de salud
- o otros (especificar): _____

3.- ¿consideras que recibiste suficiente apoyo académico por parte de los profesores?

SI **NO**

4.- ¿Recibiste algún tipo de apoyo adicional por parte del Instituto Tecnológico de Zacatepec para superar las dificultades en esa asignatura? **SI** **NO**

5.- ¿Has buscado ayuda con algún tutor o compañero de estudios para mejorar tu rendimiento académico? **SI** **NO**

6.-¿Te gustaría recibir algún tipo de asesoría o apoyo académico para mejorar tus habilidades de estudio? **SI** **NO**

7.- ¿Qué medida tomarías para evitar volver a reprobar esa asignatura o cualquier otra en el futuro? _____

Agradecemos tu participación en esta investigación y por compartir tus experiencias. tus respuestas serán tratadas con absoluta confidencialidad y sólo se utilizarán con fines académicos. si tienes alguna consulta adicional, por favor, no dudes en contactarnos.

Fig. 1 Cuestionario Motivos de reprobación

4. Análisis de resultados, se aplica la estadística (tablas y gráficos resultantes).

DISCUSIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

De los resultados obtenidos de la prueba realizada a las y los estudiantes de primer semestre de IGE, se observa que la materia con mayor índice de reprobación fue la materia de tutoría, siguiendo la materia calculo diferencial (ver figura 2).

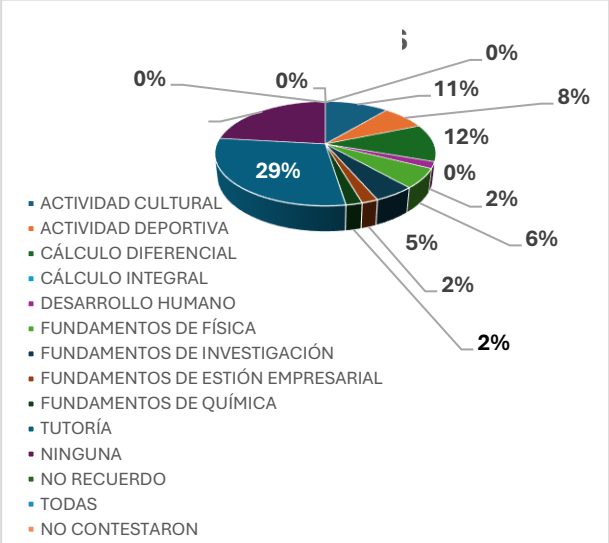


Figura 2. Asignaturas reprobadas en primer semestre por alumnos y alumnas del PE de IGE

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

Se muestra en la figura 3 que los principales motivos de reprobación fue la pandemia y dificultad de la materia.

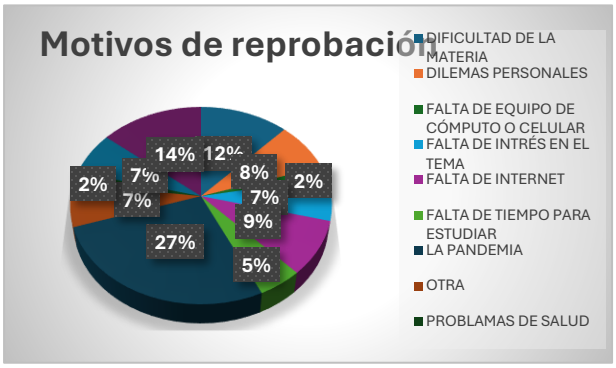


Figura 3. Motivos de reprobación

Se observa en la figura 4 si consideraron que recibieron suficiente apoyo académico por parte de los profesores los estudiantes del Programa educativo de IGE: 52% respondieron que no recibieron suficiente apoyo académico por parte de los profesores, 47% que si recibieron suficiente apoyo y 1% no contestaron.

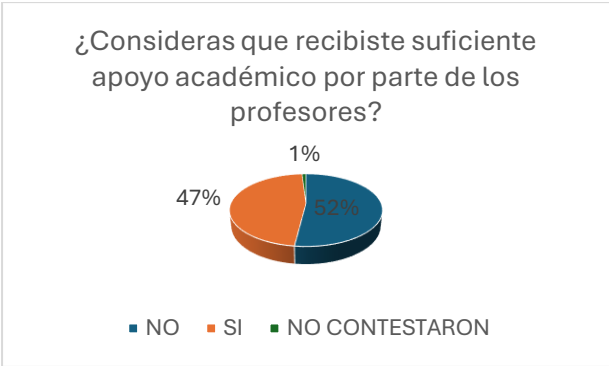


Figura 4. Recibieron apoyo académico

Se puede ver que los estudiantes han buscado ayuda con algún tutor o compañero de estudios para mejorar su rendimiento (66%), ver fig. 5

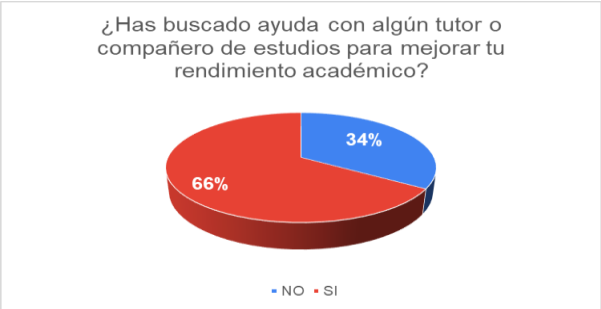


Figura 5. Ayuda buscada para mejorar el rendimiento

En la figura 7 consideran los estudiantes que si les gustaría recibir asesoría o apoyo académico para mejorar sus habilidades de estudio. (ver figura 7)

Figura 7 ¿Te gustaría recibir algún tipo de asesoría o apoyo académico para mejorar tus habilidades de estudio?

En la figura 8, observamos que las medidas implementadas por las y los estudiantes para evitar volver a reprobar alguna asignatura en un futuro, sería comprometerse con sus estudios y acudir a sus asesorías.

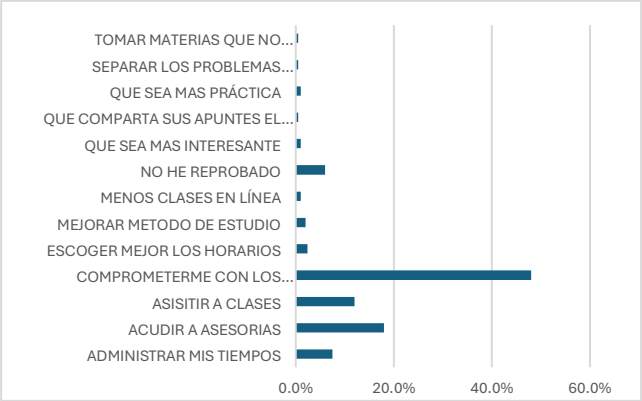


Figura 8. Medidas que tomarían los estudiantes para no reprobar.

CONCLUSIONES

Con base en datos del INEGI, del total de inscritos al ciclo escolar 2019-2020, los alumnos de nivel superior utilizaron como herramienta principal para su estudio el celular inteligente con un 33.4%, la computadora portátil fue usada en educación superior un 52.4% y otros equipos electrónicos fueron menos usados.

En este análisis de la figura 1, se puede concluir que la asignatura de Cálculo Diferencial es la asignatura más reprobada en primer semestre, con un porcentaje de 12% de reprobación, y en la cual se debe realizar una acción que favorezca el aprendizaje (ciencias básicas); no se

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

considera la materia Tutoría ya que en nuestro sistema es una actividad complementaría, guiada por un profesor nombrado Tutor y que al verificar se ha descubierto, que las y los estudiantes desconocen el haber reprobado la materia de tutoría, cuyo valor crediticio es 1, lo que abre las puertas para investigar a fondo por qué los alumnos desconocen el haber reprobado dicha materia.

Continuando con la pregunta 2, observamos la figura 3, cuyo resultado concluye que la pandemia es el motivo de reprobación con mayor porcentaje (27%), otro motivo es la dificultad de la materia con 12%, en la respuesta "Falta de internet" es igual al 9%. Le sigue el porcentaje del 8% que brinda motivos "dilemas personales","otro" y "falta de respuesta como causa de reprobación con un 7% de valor.

En la pregunta 3 los estudiantes consideran que no recibieron suficiente apoyo académico por parte de los profesores en un 52%, yn 47% si consideran que recibieron suficiente apoyo por parte de los profesores, y un 1% no contestaron.

De acuerdo con la pregunta 4 no se obtuvo algún tipo de apoyo por parte del Instituto Tecnológico de Zacatepec para superar sus dificultades (74%), un 23% si recibieron algún tipo de apoyo por parte del Instituto Tecnológico de Zacatepec para superar sus dificultades con la asignatura reprobada. Un 3% no contestó.

En seguida, la pregunta 5 se tiene un 66% de respuesta que, si ha buscado ayuda con algún tutor o compañero de estudios para mejorar su rendimiento académico, y un 34% no la ha buscado.

Se concluye en la pregunta 6 que un 73% les gustaría recibir algún tipo de asesoría o apoyo académico para mejorar sus habilidades de estudio. Un 26% no les gustaría, y un 1% no contesto esta pregunta.

Para finalizar concluiremos que los alumnos proponen medidas que tomarían para no reprobar y serían: Comprometerme con los estudios (48%), acudir a asesorías (18%), y asistir a clases (12%).

Dicho lo anterior, es necesario comentar que estos resultados serán otorgados a la Subdirección Académica del ITZ, donde al analizar los datos obtenidos se podrán generar una serie de estrategias que busquen mitigar los índices obtenidos.

Algunas de las propuestas son:

a) Analizar la situación de las materias que presentan mayor índice de reprobación.
    a. Verificar el nivel de asistencia.
    b. Identificar los estilos de enseñanza-aprendizaje de los profesores y alumnos.
    c. Identificar el interés de los alumnos por la materia.
    d. Validar que las clases sean impartidas en tiempo y forma.
b) Desconocimiento de aprobación/reprobación
    a. Identificar si los alumnos conocen el plan de estudios y las materias.
    b. Identificar si los alumnos tienen conocimiento del uso de las plataformas y medios para conocer su desempeño académico.
    c. Establecer estrategias para dar a conocer la existencia e importancia de esa materia.
c) Atender los motivos de reprobación expresados por los alumnos
    a. Preparar estrategias para la atención de situaciones como pandemias.
    b. Mantener a los alumnos informados sobre el aprovechamiento de sus materias.
    c. Concientizar y socializar a los alumnos en relación con la importancia de la acreditación de materias.
    d. A través del programa de tutorías, identificar cualquier problema personal que pueda afectar a los alumnos durante el aprovechamiento escolar.
    e. Proponer Asesorías fuera de horario de clase.

A partir de lo anterior, será posible realizar un nuevo estudio como trabajo futuro, identificando si los cambios o estrategias propuestas e implementadas benefician de manera significativa al PE de Ingeniería en Gestión Empresarial, para poder implementar las propuestas en otros PE de la institución de estudio.

AGRADECIMIENTOS
Se agradece el apoyo del Instituto Tecnológico de Zacatepec por las facilidades brindadas para la realización de la presente investigación.

BIBLIOGRAFÍA

[1] Azuara, W. G., Silva, M. P. y De los Santos, G. (2023). Innovación tecnológica en ambientes universitarios. Ventajas y limitaciones durante la pandemia de COVID 19. Revista Dilemas Contemporáneos: Educación, Política y Valores. (2). https://doi.org/10.46377/dilemas.v2i10.3496
[2] CACECA, https://www.caceca.org/

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

[3] Chirino, D. (2020). Repercusiones de la pandemia COVID-19 EN LA EDUCACIÓN. Rev. UNAM Global Revista en mayo 4 de 2020 en https://unamglobal.unam.mx/global_revista/repercusiones-de-la-pandemia-covid-19-en-la-educacion/

[4] Corzo Salazar, C., & Reyes Espinoza, C. M. (2017). Principales causas de reprobación de alumnos de los grupos de quinto semestre grupo seis y ocho de la escuela preparatoria número tres. (Capítulo I Antecedentes). Con-Ciencia Boletín Científico De La Escuela Preparatoria No. 3, 4(7). Recuperado a partir de https://repository.uaeh.edu.mx/revistas/index.php/prepa3/article/view/2079

[5]Cruz-Picón, P. E., & Hernández-Correa, L. J. (2022). La educación inclusiva en la escuela contextualizada desde la pandemia. CULTURA EDUCACIÓN Y SOCIEDAD, 13(1), 255–268. https://doi.org/10.17981/cultedusoc.13.1.2022.15

[6] Cu Balam, Guadalupe. (2005) El impacto de la escuela de procedencia del nicel medio superior en el desempeño de los alumnos en el nivel universitario. Revista Iberoamericana sobre Calidad, Eficacia y Cambio en Educación. Vol. 3, No. 1, 2, pags. 764-769. Recuperado de https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=1130398

[7] Díaz, D. y Ruiz, A. (2018). Reprobación escolar en el nivel medio superior y su relación con el autoconcepto en la adolescencia. Revista latinoamericana de estudios educativos, 48(2). 125-142. https://doi.org/10.48102/rlee.2018.48.2.49

[8] García, S. (2020). COVID-19 y educación primaria y secundaria: repercusiones de la crisis e implicaciones de política pública para América Latina y el Caribe.unicef consultado en octubre de 2024 en https://www.unicef.org/lac/media/16851/file/CD19-PDS-Number19-UNICEF-Educacion-ES.pdf

[9] Hernández, R. (2018). Metodología de la investigación. Las rutas cuantitativas, cualitativa y mixtas. (6ª edición). México: Mc Graw Hill.

[10] HUMAN RIGHTS WATCH. (2021). El grave impacto de la pandemia en la educación mundial. Tronco, c https://www.hrw.org/es/news/2021/05/16/el-grave-impacto-de-la-pandemia-en-la-educacion-mundial

[11] Izar, J. M., Ynzunza, C. B., y López, H. (2011). Factores que afectan el desempeño académico de los estudiantes de nivel superior en Rioverde, San Luis Potosí, México. Revista de Investigación Educativa, (12), 1-18. https://doi.org/10.25009/cpue.v0i12.50

[12]Ramírez-Melo, L., Delgado-Ávila, E. R. y Montufar-Benítez, M. A. (2022). Aplicación de técnicas de minería de datos para la caracterización de estudiantes bajo el efecto de la COVID-19. Padi Boletin científico de ciencias básicas en ingeniería del ICBI, 10(2), 75-81. https://doi.org/10.29057/icbi.v10iEspecial2.8669

[13] Urbina-Nájera, A. B., Téllez-Velázquez, A. y Cruz, R. (2021). Patrones que identifican a estudiantes universitarios desertores aplicando minería de datos educativa. Revista Electrónica de Investigación Educativa, 23, e29, 1-15. https://doi.org/10.24320/redie.2021.23.e29.3918

[14] UNESCO. (2020). La educación en tiempos de Covid-19. Santiago: Cepal. Disponible en https://www.cepal.org/es/publicaciones/45904-la-educacion-tiempos-la-pandemiacovid-19

[15] Vega-Rodríguez, L. Y. y Botero-Suaza, L. E. (2020). Formación profesional inmersa en la transformación digital con el fin de mejorar la calidad en la educación. Cultura, Educación y Sociedad, 12(1), 37–46. https://doi.org/10.17981/cultedusoc.12.1.2021.03

AUTORIZACIÓN Y RENUNCIA.

Los autores del presente artículo autorizan al TecNM/Instituto Tecnológico de Zacatepec para publicar el escrito en el libro electrónico del CITID 2025. El TecNM/ITZ o los editores no son responsables ni por el contenido ni por las implicaciones de lo que está expresado en el escrito.

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

TÉCNICAS DE ANÁLISIS QUÍMICO PARA EXTRACCIONES LÍQUIDO-LÍQUIDO: UNA PRÁCTICA PARA IMPLMENETACIÓN EN EL LABORATORIO DE ESEÑANZA

David Pitalúa Calleja[1,2], Camiel Herman Cornelis Janssen[3*]

[1] Licenciatura en Química, Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Química, Departamento de Ingeniería Química. E-mail: pitaluarhe@gmail.com, tel: 55 56225355, C.P. 04510, Ciudad de México.
[2] Licenciatura en Química, University of Groningen, Faculty of Science and Engineering, Engineering and Technology Institute Groningen (ENTEG). E-mail: d.p.c.pitalua-calleja@gmail.com, tel: 55 6172 4909 Nijenborgh 3, 9747 AG Groningen, Países Bajos.
[3*] Dr. en Ingeniería Química, Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Química, Departamento de Ingeniería Química. Correo: engineerjanssen@gmail.com, Tel: 55 56225355, C.P. 04510, Ciudad de México.

Resumen -- En el presente trabajo se propone una nueva práctica experimental enfocada en la introducción de dos técnicas analíticas y sus conceptos asociados. Esta práctica contribuye a que la comunidad estudiantil de ingenierías y ciencias a nivel licenciatura incorporen estas técnicas analíticas y su teoría en sus habilidades para su futura carrera. Se desarrollarán los conceptos de análisis cualitativo y cuantitativo, curva de calibración y extracción líquido-líquido mediante el desarrollo y caracterización de un disolvente eutéctico profundo como problema de aplicación práctica, realizable y económico en un entorno educativo.

Palabras Clave: disolventes novedosos, enseñanza del análisis cualitativo, enseñanza del análisis cuantitativo, espectrofotometría UV/Vis, infrarrojo, química analítica

Abstract -- In this work, a novel lab practice focused on the introduction of two analytical techniques and associated concepts is proposed. This lab practice involves contributes to the undergraduate engineering and sciences student community to incorporate these analytical techniques and theory in their skillset for their future career. Concepts such as qualitative and quantitative analysis, calibration curves, liquid-liquid extractions will be illustrated through the development and characterization of a deep eutectic solvent as a practical, feasible and economical applicable problem in an educational environment.

Keywords – analytical chemistry, infrared, novel solvents, teaching qualitative analysis, teaching quantitative analysis, UV/Vis spectrometry.

INTRODUCCIÓN

En la actualidad, el desarrollo de técnicas de análisis químico es de gran importancia en todo el mundo [1, 2]. Particularmente, estas técnicas son muy relevantes para los departamentos de investigación y desarrollo en numerosas industrias [3]. Por lo general, se realizan los análisis al inicio de un proceso para evaluar la calidad de las materias primas y al final del proceso para evaluar las propiedades de un producto terminado [4]. Por esta razón, el análisis constituye una gran área de importancia en el desarrollo educativo en las ingenierías y ciencias [5].

Las dinámicas del mundo moderno requieren una formación del alumnado diversificada e integral para afrontar los retos del mercado laboral [6]. Este mercado laboral no se limita al enorme entramado industrial, sino que también involucra en gran medida la contribución de las nuevas investigaciones por medio de posgrados o en espacios de investigación públicos. Cada vez es más importante la forma en que la sociedad percibe el impacto que tiene la actividad humana en el planeta [7]. Por tal motivo, este conjunto de herramientas son clave debido a su uso cotidiano e indispensable dentro del entorno de la investigación y desarrollo [8].

Existen técnicas sencillas y efectivas para introducir al alumnado a la química analítica, por ejemplo: la espectroscopía de infrarrojo y la espectrofotometría. Para estas y otras técnicas el alumnado debe desarrollar habilidades teóricas y prácticas con la finalidad de realizar los análisis. Este tipo de habilidades se pueden poner en práctica para resolver problemas no solo para materias de química analítica, sino también en casos de otras áreas como fisicoquímica, química inorgánica o química orgánica. Este enfoque es particularmente atractivo en contextos de enseñanza. Por lo general, el alumnado aprende mejor al realizar experimentos sencillos y analizarlos posteriormente.

En todo enfoque pedagógico de química analítica, es fundamental diferenciar entre análisis cuantitativos y cualitativos. Mientras que ciertas técnicas brindan información cualitativa relacionada con la naturaleza de los solutos, otras técnicas brindan información valiosa para la cuantificación de dichos solutos en una muestra. Un aprendizaje necesario se basa en diferenciar ambos enfoques para elegir la técnica correcta. A menudo, se utiliza una determinada técnica para cuantificar un soluto y otra para dilucidar cualitativamente este. Sin embargo, la complementación de dichas técnicas es muy común en las investigaciones integrales que el alumnado realizará al final de su carrera en nivel de pregrado y/o posgrado.
Algunos ejemplos de las técnicas cualitativas son la espectrometría de masas, la resonancia magnética nuclear o diferentes pruebas químicas como la prueba de Fehling para azúcares reductores. Mediante estas técnicas se puede determinar la presencia de ciertas sustancias, o las estructuras de sustancias presentes a través de reacciones

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

químicas. Adicionalmente, pueden utilizarse para evaluar propiedades de ciertas sustancias como su masa molar, el arreglo estructural, la viscosidad, la estructura cristalina, y la estimación de su pureza.

Por otra parte, las técnicas cuantitativas son utilizadas para determinar la concentración de uno o varios analitos. Algunos ejemplos de estas técnicas involucran a la gravimetría, volumetría, espectrofotometría, índice de refracción, entre otros [9]. Para realizar análisis cuantitativos, el estudiantado necesita familiarizarse y entender la necesidad de procedimientos adicionales previos al análisis. Entre estos procedimientos se encuentra la necesidad de desarrollar una curva de calibración, tratamiento previo de muestras y conocer los límites de cuantificación que tienen los equipos que se van a utilizar.

Se pueden realizar análisis en cualquier sistema o muestra química, pero hay algunas que pueden ser notablemente convenientes para la enseñanza de técnicas analíticas. Entre otras, una propuesta atractiva es, el desarrollo de un disolvente de nueva generación [10]. Los DES pertenecen a los llamados disolventes de nueva generación, donde también están incluidos los líquidos iónicos, sales fundidas y algunos polímeros [11]. Los DES consisten en un aceptor y donador de puentes de hidrógeno, los cuales conducen a una formación de una red de puentes de hidrógeno entre ellos. En un diagrama de fases de composición contra temperatura, existe un punto característico de los DES llamado *punto eutéctico* [12], causado por esta red. La principal propiedad que distingue a los DES de otras mezclas es que su punto de fusión es considerablemente menor que el de los componentes en que consiste. Este punto indica el punto de fusión menor en este tipo de mezclas en una composición determinada [13]. Un típico diagrama de fases de un DES se presenta en la figura 1.

Los DES son mezclas que se caracterizan por ser excelentes disolventes y han sido utilizados para diversas aplicaciones [14]. Estos disolventes son alternativas menos contaminantes a los disolventes convencionales debido a que su presión de vapor suele ser baja o despreciable. Esta característica limita la emisión de vapores contaminantes a la atmósfera y previene su ingesta por parte del personal en contacto con ellos.

Los DES exhiben características adicionales que pueden captar la atención del alumnado de manera eficaz debido a que representan alternativas hasta hace tiempo poco conocidas en contraste con por ejemplo los disolventes tradicionales como hidrocarburos y alcoholes.

El uso de los DES en un entorno educativo conlleva varias ventajas. Proveen un repaso de la química general a través de la identificación de grupos funcionales que pueden actuar como aceptor o donador de puentes de hidrógeno, así como de la termodinámica mediante los estudios de diagramas de fases.

Estrictamente, los DES exhiben una desviación negativa de la idealidad inusual en la química. Este comportamiento termodinámico anómalo es particularmente interesante desde un punto de vista de la enseñanza.

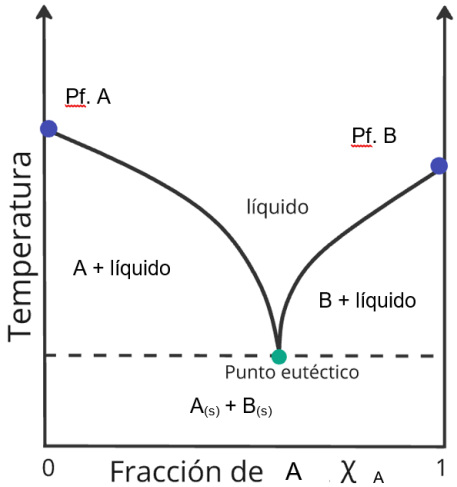


Figura 1. Diagrama de fases de un DES, adaptado de [15].

Para mejorar la comprensión del comportamiento termodinámico anómalo de los DES, A mero es necesario entender el comportamiento de fases de una mezcla convencional [16]. Cuando dos compuestos sólidos inmiscibles o parcialmente inmiscibles se mezclan en condiciones isobáricas, los puntos de fusión generalmente disminuirán, como se caracteriza por la ecuación 1.

$$\ln(X_i\gamma_i) = \frac{\Delta_{fus}H_i}{R}\left(\frac{1}{T_{m,i}} - \frac{1}{T_i}\right) \quad \text{Ec. (1)}$$

En esta ecuación, X_i, γ_i, $\Delta_{fus}H_i$, $T_{m,i}$ y T_i representan la fracción molar, el coeficiente de actividad, la entalpía de fusión (J mol–1), el punto de fusión del compuesto puro (K) y el punto de fusión en la mezcla (K) del componente *i*, respectivamente. *R* es la constante de los gases ideales, expresada como 8.3145 $Jmol^{-1}K^{-1}$. El cálculo de T_i en un rango de valores de 0 a 1 produce una curva de fusión para cada componente de la mezcla. En una mezcla binaria, el punto eutéctico surge donde se cruzan las curvas de fusión de los dos constituyentes, y los ejes *x* y *y* representan la fracción molar eutéctica y la temperatura eutéctica asociadas, respectivamente [16]. Si la mezcla exhibe un comportamiento ideal, la actividad $\gamma_i \approx 1$. Sin embargo, las mezclas eutécticas reales pueden mostrar una desviación positiva (>1) o negativa (<1) de esta idealidad. La última característica define una DES [12].

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

En el caso de los DES, las desviaciones de la idealidad tienen un efecto notable en la disminución de la energía para formar sólidos [13].

Esta desviación es atribuida particularmente a la formación de redes de puentes de hidrógeno entre sus componentes. Es posible obtener información sobre esta formación de puentes de hidrógeno, por ejemplo, mediante espectroscopía de infrarrojo [12].

Los DES han sido ampliamente utilizados para realizar extracciones líquido-líquido. Estas extracciones a menudo involucran la recuperación de metales, la purificación de las fases acuosas de compuestos nocivos o la purificación de compuestos de interés [17].

Las ventajas de utilizar estos disolventes novedosos en entornos educativos son numerosas. Por ejemplo, se pueden sintetizar a partir de compuestos económicos y, a menudo poco tóxicos o biodegradables [18]. Otra ventaja es que los DES representan casos distintos a los paradigmas tradicionales, algo muy atractivo para la comunidad estudiantil. Finalmente, las técnicas de análisis son relativamente sencillas, mientras que proporcionan una excelente contribución al aprendizaje. Con esta práctica, el alumnado se puede familiarizar con dos técnicas de análisis muy comunes e implementarlas en un entorno práctico: la espectroscopía de infrarrojo como método cualitativo y la espectrofotometría UV/Vis como método cuantitativo. En esta propuesta de prácticas, se combina esta teoría con el aprendizaje de análisis cualitativos y cuantitativos. Además, tiene una implementación de manera fácil en laboratorios de enseñanza para ciencias e ingeniería.

DESARROLLO

Metodología

Materiales

Se utilizó trioctilamina (T8A) 98% m/m, (±)Mentol 98% m/m que puede ser extraído de fuentes vegetales como la menta (*Mentha spicata*) y el eucalipto (Eucalyptus); Ácido Octanoico (144.21 g/mol) >99% m/m, que puede encontrarse en leche animal y en aceite de palma; $CuSO_4 \cdot 5H_2O$ 98% m/m, $CoSO_4 \cdot 7H_2O$ >99% m/m. Los reactivos fueron adquiridos por Sigma-Aldrich Se utilizó H_2O ultrapura (18.2 MΩ·cm) para preparar las disoluciones acuosas metálicas.

Síntesis de DES

La síntesis de DES se realizó mediante la técnica de "*one pot*". Se mezclaron los reactivos T8A, Mentol y Ácido Octanoico en un recipiente de plástico en una relación molar de 1:2:2 respectivamente. La mezcla fue calentada a 60°C durante 10 minutos mediante un horno de convección forzada MEMMERT UF-55 hasta que se observó un líquido homogéneo transparente. Posterior a su calentamiento, se agitó la mezcla en un vórtex Scientific Industries GENIE 2 durante 3 minutos para garantizar su homogeneidad. La estructura del DES formado se muestra en la figura 2.

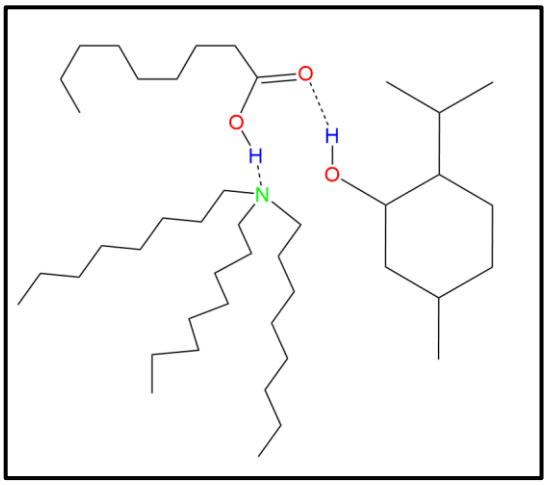


Figura 2. Propuesta de estructura del DES formado por trioctilamina: mentol: ácido octanoico 1:2:2.

Disoluciones de sales metálicas

Se prepararon disoluciones de $CuSO_4$ y de $CoSO_4$ a partir de sus sales hidratadas, cada una con una concentración 100 mM, utilizando agua ultrapura como disolvente. En esta parte del procedimiento, se puede indicar al alumnado que las disoluciones son coloridas y por lo tanto pueden ser analizadas fácilmente mediante espectrofotometría UV/Vis.

Extracciones líquido-líquido

Se realizaron extracciones líquido-líquido entre el DES sintetizado y cada una de las disoluciones metálicas. Se mezclaron masas iguales del DES y de cada una de las disoluciones para realizar una extracción de cada sal metálica. Posteriormente, el sistema heterogéneo se agitó durante 15 minutos mediante el uso de un vórtex para disminuir el tiempo de extracción. Posteriormente, las mezclas se separaron mediante centrifugación a 6000 revoluciones/minuto, durante 5 minutos utilizando una centrífuga OHAUS Frontier 5714. En el caso que el laboratorio no cuenta con una centrifuga, este paso puede ser omitido y la separación se puede realizar a través de la gravedad. Finalmente, se separaron las fases acuosa y orgánica para su posterior análisis, utilizando jeringas y agujas desechables. En la figura 3 se esquematiza el proceso de extracción líquido-líquido. A la izquierda se muestra la fase orgánica (gris) con la fase acuosa (azul) enriquecida con partículas de la sal metálica. A la derecha se muestra la fase orgánica (morado) enriquecida con partículas de la sal metálica y la fase acuosa (azul).

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

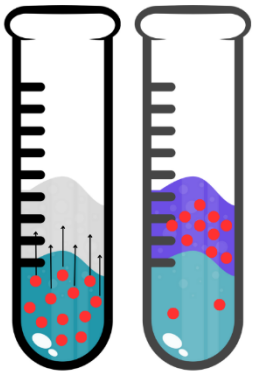


Figura 3. Esquema de extracción líquido-líquido utilizada.

Espectroscopía de FT-IR

Se realizaron los análisis de espectroscopía de infrarrojo para los reactivos utilizados: T8A, Mentol, Ácido Octanoico, del DES sintetizado y de las fases orgánicas (enriquecidas de DES y el metal extraído). Se utilizó un equipo de FT-IR Perkin Elmer Espectrum 400 (figura 4). En un laboratorio de enseñanza se puede utilizar cualquier equipo de infrarrojo que disponga de transformada de Fourier. Para cada espectro, se realizó un barrido desde 400 hasta 4000 cm^{-1}. En cada uno de los espectros, se identificaron las señales características dependiendo de los grupos funcionales involucrados en la muestra.

Espectrofotometría UV/Vis

Se obtuvo el espectro UV/Visible a las fases acuosas extraídas. En primer lugar, se determinó un blanco con H_2O ultrapura y posteriormente se determinó la longitud de onda para la muestra con $CuSO_4$ y para $CoSO_4$. Posteriormente, se compararon con las fases originales (100 mM) con las cuáles se determinó la eficiencia de extracción del disolvente. Para esto se utilizó un espectrofotómetro Perkin Elmer Lambda 365 (figura 5).

Figura 4. Espectrómetro de FT-IR utilizado.

Sin embargo, en un laboratorio de enseñanza se pueden utilizar otros modelos de equipos de espectrofotometría UV/Vis. En la práctica, será necesario también realizar una curva de calibración con las sales metálicas en disolución para comparar la intensidad de señal obtenida después de la extracción con las concentraciones conocidas de disoluciones estándar pertenecientes a la curva.

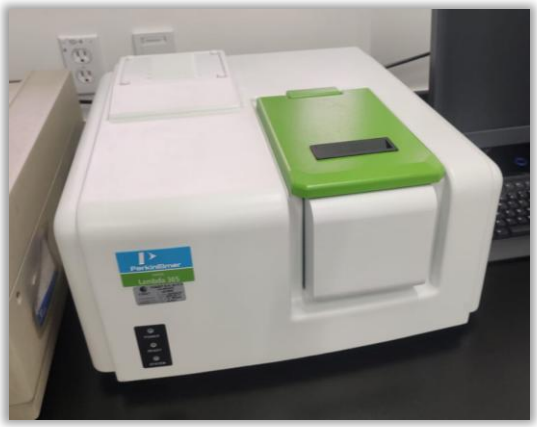


Figura 5. Espectrofotómetro UV/Vis utilizado.

Una curva de calibración debe constar de diferentes puntos coordenados que relacionen dos variables. En este caso, las variables a relacionar serán la intensidad de señal provista por el detector y la concentración que será conocida a partir de las diluciones preparadas. El alumnado puede elaborar y planear la curva de calibración tomando en cuenta diferentes ventajas y desventajas dentro de su planteamiento como: intervalo de concentración entre punto y punto, cantidad de puntos en la curva, tiempo requerido para realizar la curva y la manera más eficaz de obtener todas las diluciones.

Una vez realizada la curva, se determinará una ecuación que relacione la intensidad de la señal con la concentración como se muestra en la ecuación 2:

$$Int = a[C] + b \qquad \textit{Ec. (2)}$$

Donde *Int* será la intensidad de señal provista por el equipo, [C] será la concentración del analito, a representa la pendiente de la recta y b representa la ordenada al origen.

Una vez que se haya medido la concentración después de realizar la extracción se determinará la eficiencia de extracción del procedimiento. Para calcular dicha eficiencia expresada en porcentaje se utilizará ecuación 3:

$$\%E_{eff} = \frac{C_f - C_i}{Ci}\ x\ 100 \qquad \text{Ec. (3)}$$

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

Donde $\%E_{eff}$ representa la eficiencia de la extracción representada en porcentaje, C_f es la concentración final y C_i es la concentración inicial de la disolución.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Inspección visual de las extracciones de sales metálicas

Antes de realizar alguna medición analítica, conviene que el alumnado se familiarice mediante sus propios sentidos con los sistemas con que trabajan de manera directa. Esto con la finalidad de obtener una idea preliminar del resultado. Este es el primer contacto que puede tener el alumnado para conocer la naturaleza de las sustancias con las que trabajan. Se realizará una inspección inmediata al sistema con la finalidad de explotar el cúmulo de conocimientos que tiene el alumnado años pasados, así como estimular su curiosidad. Esta práctica puede tener grandes ventajas para aumentar la motivación del alumnado y así estimular la retención de los conceptos clave de esta práctica a largo plazo. En la figura 6 se puede observar las muestras después de las extracciones y antes de su separación como referencia para la práctica.

Espectroscopía de FT-IR

En la figura 7 se presentan los resultados de FT-IR de los compuestos determinados. En estos resultados de espectroscopía FT-IR es importante que el alumnado pueda conocer para qué sirve esta técnica analítica. Desde el punto de vista de la enseñanza de técnicas analíticas, el estudiantado puede adquirir diversos conocimientos: los espectros son distintos dependiendo de los grupos funcionales de las moléculas.

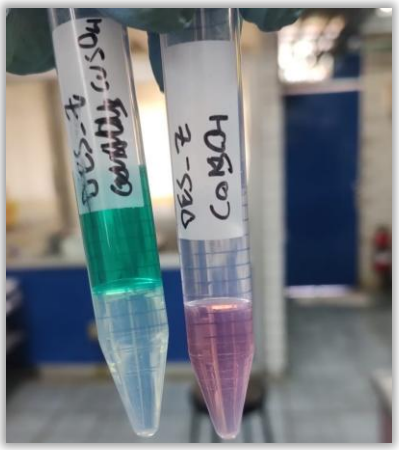


Figura 6. Sistemas después de la extracción.

Esto significa que el arreglo molecular influye directamente en propiedades y señales que se pueden obtener de una sustancia al analizarla o interactuar con la materia. Por otra parte, la identificación de los distintos grupos funcionales conlleva directamente un repaso en la nomenclatura de los compuestos. Este es un recurso que podría aplicar fácilmente el/la responsable de la práctica para garantizar un aprendizaje integral por parte del alumnado.

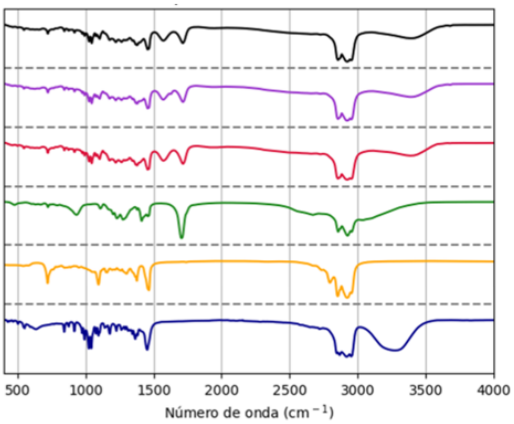


Figura 7. Espectros de infrarrojo de los reactivos, DES y de las fases orgánicas (DES con sales metálicas. De arriba por abajo se muestran respectivamente T8A, mentol, C_8OOH, DES, DES c/ $CuSO_4$ y DES c/$CoSO_4$

En esta práctica, se pueden distinguir tres tipos de muestras en el espectro de infrarrojo: los reactivos originales, el DES y el DES con alguno de los metales. Por lo general, se utiliza la técnica de FT-IR para distinguir grupos funcionales de nuevos compuestos sintetizados, pero también para corroborar la existencia de compuestos en mezclas. Sin embargo, también se puede obtener información mediante esta técnica sobre asociaciones intermoleculares como los puentes de hidrógeno. En esta práctica, el alumnado podrá utilizar los espectros para observar la formación de estos mismos en el DES. En la tabla 1 se presentan las bandas más características de cada uno de los espectros.

Tabla 1. Señales características de cada muestra en FT-IR.

Sustancia	Bandas características (cm^{-1})			
Trioctilamina	721	1095	1465	2791
	2853	2922	-	-
Mentol	1042	1024	1366	1454
	2845	2919	2951	3272
Ácido Octanoico	934	1109	1231	1275
	1412	1458	1706	2672
	2857	2925	2956	3034
DES	1046	1378	1456	1465
	1573	1716	2856	2923
	2854	3387	-	-
DES c/ $CuSO_4$	1378	1465	1572	1716
	2856	2923	2954	3388
DES c/ $CoSO_4$	1378	1465	1574	1715
	2856	2923	2954	3395

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

Para asociar las señales de un espectro de FT-IR con los grupos funcionales de una muestra, el estudiantado requerirá consultar bases de datos que pueden contribuir a la identificación de estos mismos. Estas bases de datos se encuentran en diferentes sitios online. Por ejemplo, en: https://www.ccmr.cornell.edu [18] o en https://www.chem.ucla.edu [19]. Particularmente, se puede observar la formación de puentes de hidrógeno en muestras, cuyas señales se encuentran entre 3600 y 3500 cm^{-1} para dímeros de puente de hidrógeno, y entre 3400 y 3200 cm^{-1} para redes de puentes [20]. La última señal es particularmente notable debido a la gran anchura y tamaño de la señal. En el DES analizado, se puede observar la formación de la red de puentes de hidrógeno en 3387 cm^{-1}, aunque su intensidad es menor.

En este caso en particular, la determinación no se realiza solamente para verificar los compuestos presentes en el DES, sino también se identifica la formación de puentes de hidrógeno. Después de obtener los espectros, el alumnado puede determinar la naturaleza de las señales utilizando bases de datos como NIST [21] y SDBS [22]. Mediante esta técnica de análisis se puede llevar la discusión con el alumnado acerca de la importancia, uso y alcances de un análisis cualitativo. En este sentido es importante involucrar al alumnado con las siguientes preguntas:

- ¿Qué información provee un espectro de infrarrojo?
- ¿Qué información brinda acerca de los componentes utilizados?
- ¿En qué situación se requiere un análisis de este tipo?
- ¿Qué limitaciones tiene este análisis?

Espectrofotometría UV/Visible

Se llevaron a cabo mediciones de espectros UV/Vis para determinar la concentración de $CuSO_4$ y $CoSO_4$ en las disoluciones acuosas antes y después de la extracción. En las figuras 8 y 9 se muestran los espectros para las extracciones de $CuSO_4$ y $CoSO_4$, respectivamente.

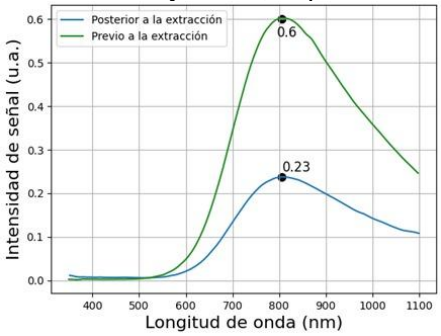


Figura 8. Espectros de absorción UV/Vis de $CuSO_4$. En verde se muestra la curva de la disolución previo a la extracción y en color azul se muestra la fase acuosa después de la extracción.

Uno de los aprendizajes más importantes en un análisis cuantitativo se basa en la determinación de una concentración por medio de una comparativa con un estándar o una curva patrón.

Una idea errónea muy común en el alumnado que empiecen con su carrera en las ingenierías y ciencias es asociar la intensidad de la señal del detector de un equipo directamente con la concentración. Sin embargo, es importante señalar que esta intensidad de señal puede variar debido a las características del analito en cuestión.

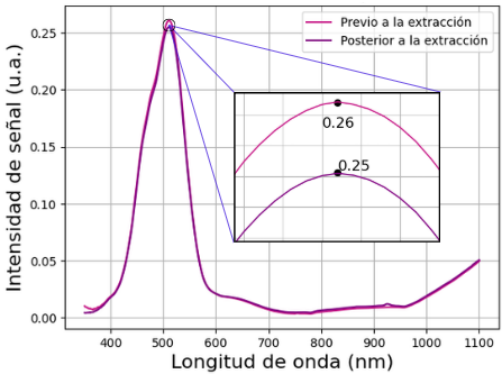


Figura 9. Espectros de absorción UV/Vis de $CoSO_4$. En morado se muestra la curva de la disolución previo a la extracción y en rosa se muestra la fase acuosa después de la extracción.

Como se puede observar en los espectros de las figuras 8 y 9, existen diferencias entre los compuestos de cobre y cobalto. En ellos, no solo las intensidades de señal son distintas, sino que también absorben en diferentes longitudes de onda. Por tal motivo, es necesario relacionar la intensidad de las señales con concentraciones del analito para poder conocer la concentración de dicho analito en una muestra. Para determinar las concentraciones finales se realizó una curva de calibración para cada una de las sales metálicas. Las curvas de calibración para cada sal se muestran en la Figura 10.

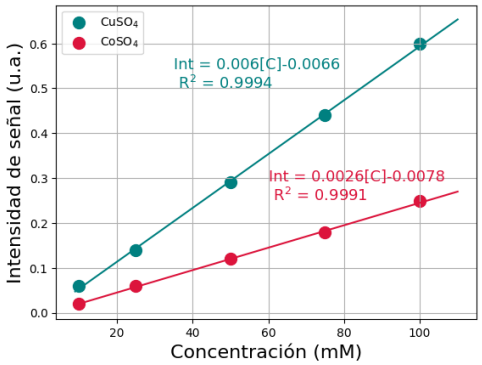


Figura 10. Curvas de calibración para $CuSO_4$ y $CoSO_4$ en disolución acuosa.

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

En la Tabla 2. Se muestran los resultados de extracción de acuerdo con el análisis cuantitativo de UV/Vis.
El alumnado podrá realizar la curva de calibración a partir de una disolución madre de cada sal metálica y diluirlas sistemáticamente. Con esta curva de calibración, el estudiantado puede poner en práctica habilidades para calcular y realizar diluciones, elegir los intervalos adecuados y determinar una función que compare la concentración de un analito con la intensidad de la señal. Se realizó una regresión lineal de los datos obtenidos mediante el programa Microsoft Excel. Una vez realizada la regresión lineal, se obtiene una función que correlaciona directamente la concentración del analito con la intensidad de la señal.

Tabla 2. Resultados de extracción de metales mediante DES.

Sal metálica	Concentración al inicio (mM)	Absorbancia después de la extracción (u.a)	Concentración después de la extracción (mM)	Eficiencia de extracción (%)
$CuSO_4$	100	0.23	39.43	60.57
$CoSO_4$	100	0.25	99.15	0.85

A partir de las mediciones realizadas mediante UV/Vis, se pueden generar las siguientes reflexiones e incorporarlas en una discusión posterior a la práctica de laboratorio:

- ¿En qué se basa la espectroscopía infrarroja?
- ¿Por qué se eligió esta técnica para cuantificar los metales y su extracción?
- ¿Puede utilizarse esta técnica como un método cualitativo?
- ¿Qué ventajas y/o desventajas presenta esta técnica con respecto a otras disponibles para cuantificar estos analitos?
- ¿Se puede evitar el uso de una curva de calibración?

CONCLUSIONES

En el presente trabajo se desarrolló una propuesta de implementación para una práctica experimental del alumnado de ingenierías y ciencias a nivel licenciatura. En esta práctica el alumnado sintetiza de manera accesible los DES para posteriormente utilizarlos en extracciones líquido-líquido de sales metálicas. Estos se pueden sintetizar de manera sencilla a partir de compuestos económicos. La naturaleza de los DES y su caracterización contribuyen no solamente en las habilidades del alumnado en la identificación de grupos funcionales a través de los espectros de FT-IR, sino también la determinación de presencia de puentes de hidrógeno. La red de puentes de hidrógeno, una característica clave de este tipo de disolventes ofrece un repaso de la termodinámica a través de sus diagramas de fases. El alumnado determina las eficiencias de la extracción de las sales metálicas mediante el uso de espectros de UV-Vis.

En este trabajo se proponen algunas preguntas que ayuden al alumnado reflexionar sobre sus observaciones en la experimentación, así como pueden desarrollar nuevas estrategias por ellos/ellas mismos/mismas para utilizar análisis cualitativos y cuantitativos. Este trabajo puede contribuir notablemente a la formación del alumnado en el área del análisis químico: la introducción a los análisis en un entorno práctico y también la introducción de conceptos complementarios como curvas de calibración, puentes de hidrógeno, punto eutéctico y extracciones líquido-líquido.

A un lado el alumnado estudia estrategias importantes sobre los análisis cualitativos utilizando FT-IR. Al otro lado aprende estrategias y el desarrollo de metodologías de análisis cuantitativos. Esta práctica combina ambos tipos de análisis y por esta razón contribuye a mejorar la comprensión del papel que juegan los análisis cualitativos y cuantitativos no solamente en un entorno educativo, sino también en la futura carrera del alumnado.

AGRADECIMIENTOS

A la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) por la beca de doctorado otorgada (CVU: 1202214). Investigación realizada gracias al Programa UNAM-PAPIIT IN108523. A Maricela Gutiérrez Franco por su valioso apoyo con los análisis de FT-IR y a la Unidad de Servicios de Apoyo a la Investigación y la Industria.

BIBLIOGRAFÍA

[1] Sajid, M., & Płotka-Wasylka, J. (2022). Green analytical chemistry metrics: A review. *Talanta, 238*(2), 123046. DOI: 10.1016/j.talanta.2021.123046.

[2] Tobiszewski, M., Marć, M., Gałuszka, A., & Namieśnik, J. (2015). Green chemistry metrics with special reference to green analytical chemistry. *Molecules, 20*, 10928-10946. DOI: 10.3390/molecules200610928.

[3] McGill, C. (2005). Process analysis. In *Encyclopedia of Analytical Science* (Second Edition, pp. 298-303).

[4] Panne, U. (2025). Silvio Vaz Jr.: Applications of analytical chemistry in industry. *Analytical and Bioanalytical Chemistry, 417*, 229–230. DOI: 10.1007/s00216-024-05666-2.

[5] Hamer, M., Vago, M. J., & Leal Denis, M. F. (2024). Real-world sample-based teaching in analytical chemistry: Afterthoughts on a hands-on experience. *Journal of Chemical Education, 101*(1), 205–214. DOI: 10.1021/acs.jchemed.3c00817.

[6] Šíma, J. (2016). Modern analytical chemistry in the contemporary world. *Cultural Studies of Science*

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

Education, 11, 1269–1273. DOI: 10.1007/s11422-015-9663-y.

[7] Piunno, P. A. E., & Shahmuradyan, A. (2024). A science, technology, society, and environmental impact assignment for senior-level analytical chemistry students. *Journal of Chemical Education, 101*(3), 1348–1355. DOI: 10.1021/acs.jchemed.3c00883.

[8] Kissinger, P. T. (1992). Analytical chemistry: What is it? Who needs it? Why teach it? *Trends in Analytical Chemistry, 11*(2), 54-57. DOI: 10.1016/0165-9936(92)80077-J.

[9] Del Monache, G., Gogoi, P., Ge, X., Wang, X., Snider, R., Szeglowski, O., Cook, T. R., Wang, Z., & Li, Y. C. (2025). Multipurpose DIY spectrophotometer for teaching analytical chemistry. *Journal of Chemical Education, 102*(2), 852–856. DOI: 10.1021/acs.jchemed.4c01229.

[10] Joos, B., Van Bael, M. K., & Hardy, A. T. (2020). Construction of a room-temperature eutectic binary phase diagram by use of differential scanning calorimetry. *Journal of Chemical Education, 97*(8), 2265-2272. DOI: 10.1021/acs.jchemed.0c00204.

[11] Saini, R., Kumar, S., Sharma, A., Kumar, V., Sharma, R., Janghu, S., & Suthar, P. (2022). Deep eutectic solvents: The new generation sustainable and safe extraction systems for bioactive compounds in the agri-food sector: An update. *Journal of Food Processing and Preservation, 46*, e16250. DOI: 10.1111/jfpp.16250.

[12] Abbott, A. P., Boothby, D., Capper, G., Davies, D. L., & Rasheed, R. K. (2004). Deep eutectic solvents formed between choline chloride and carboxylic acids: Versatile alternatives to ionic liquids. *Journal of the American Chemical Society*,, 126, 29, 9142–9147. DOI: 10.1021/ja048266j.

[13] Smith, E. L., Abbott, A. P., & Ryder, K. S. (2014). Deep eutectic solvents (DESs) and their applications. *Chemical Reviews, 114*(21), 11060-11082. DOI: 10.1021/cr300162p.

[14] Smith, E. L., Fullarton, C., Harris, R. C., Saleem, S., Abbott, A. P., & Ryder, K. S. (2010). Metal finishing with ionic liquids: Scale-up and pilot plants from IONMET consortium. *Transactions of the Institute of Metal Finishing, 88*(6), 285-291. DOI: 10.1179/174591910X12856686485734.

[15] Fajar, A. T. N., Hanada, T., Hartono, A. D., et al. (2024). Estimating the phase diagrams of deep eutectic solvents within an extensive chemical space. *Communications Chemistry, 7*, 27. DOI: 10.1038/s42004-024-01116-3

[16] Liu, Y., Friesen, J. B., McAlpine, J. B., Lankin, D. C., Chen, S. N., & Pauli, G. F. (2018). Natural deep eutectic solvents: Properties, applications, and perspectives. *Journal of Natural Products, 81*(3), 679–690. DOI: 10.1021/acs.jnatprod.7b00945.

[17] Usmani, Z., Sharma, M., Tripathi, M., Lukk, T., Karpichev, Y., Gathergood, N., Singh, B. N., Thakur, V. K., Tabatabaei, M., & Gupta, V. K. (2023). Biobased natural deep eutectic system as versatile solvents: Structure, interaction, and advanced applications. *Science of The Total Environment, 881*, 163002. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.163002.

[18] Cornell Center for Materials Research. (n.d.). Retrieved from https://www.ccmr.cornell.edu

[19] UCLA Department of Chemistry & Biochemistry. (n.d.). Retrieved from https://www.chem.ucla.edu

[20] Bernardina, S. D., Paineau, E., Brubach, J. B., Judeinstein, P., Rouzière, S., Launois, P., & Roy, P. (2016). Water in carbon nanotubes: The peculiar hydrogen bond network revealed by infrared spectroscopy. *Journal of the American Chemical Society, 138*(33), 10437-10443. DOI: doi.org/10.1021/jacs.6b02635.

[21] NIST Chemistry WebBook. (n.d.). Retrieved from https://webbook.nist.gov/chemistry/

[22] SDBS Spectral Database for Organic Compounds. (n.d.). Retrieved from https://sdbs.db.aist.go.jp/

AUTORIZACIÓN Y RENUNCIA.

Los autores del presente artículo autorizan al TecNM/Instituto Tecnológico de Zacatepec para publicar el escrito en el libro electrónico del CITID 2025. El TecNM/ITZ o los editores no son responsables ni por el contenido ni por las implicaciones de lo que está expresado en el escrito.

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

ANÁLISIS DE LOS FACTORES QUE INCIDEN EN LA DESERCIÓN ESTUDIANTIL A NIVEL LICENCIATURA, TecNM-CAMPUS CUAUTLA

Enedina Benítez Torres[1], Mónica Leticia Acosta Miranda[2], Julio Pérez Machorro[3], Víctor Hugo Antonio López[4]

[1]Lic. en Educación, Estudiante de Maestría en Ingeniería Administrativa en TecNM/Cuautla. M23680002@cuautla.tecnm.mx, Tel 7351054499, C.P. 62748
[2] Doctora en Ciencias Administrativas. Tecnológico Nacional de México campus Cuautla, Docente del Depto. de Ciencias Económico-Administrativas. monica.acosta@cuautla.tecnm.mx Tel. 77732717810 C.P. 62470
[3] Maestro en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica, Tecnológico Nacional de México Campus Cuautla, Docente del Depto. de Mecatrónica, julio.perez@cuautla.tecnm.mx Tel. 7351459654
[4] Ingeniero Industrial, Tecnológico Nacional de México Campus Cuautla, Docente del Depto. de Metal-mecánica, victor.antonio@cuautla.tecnm.mx

Resumen -- La satisfacción es la sensación de agrado o bienestar que experimenta una persona al ver cumplidas sus expectativas. En el contexto educativo, este concepto está relacionado con el grado de confort y satisfacción que las y los estudiantes sienten al ver atendidas sus necesidades y expectativas académicas. Este estudio tiene como propósito analizar los factores que inciden en la satisfacción de los estudiantes de los diferentes programas educativos del TecNM campus Cuautla. Inicialmente se realizó una revisión a la literatura en bases de datos como RedALyC, Scielo, and Scopus, para identificar estudios relacionados con el tema, publicados entre los años 2020 a marzo 2025, utilizando como término de búsqueda "satisfacción estudiantil", encontrando que los países de América Latina como Brasil, México, Chile y Colombia cuentan con el mayor número de publicaciones. Las investigaciones realizadas presentan un análisis de carácter mixto y el alumnado de licenciatura es el más estudiado mediante cuestionarios. En el caso de esta investigación, el estudio es de carácter cuantitativo, para lo cual se realizó una encuesta en formulario de Google, distribuido por medio de los correos institucionales de los estudiantes, con preguntas relacionadas a algunos de los factores que pueden incidir en la satisfacción estudiantil, como son la infraestructura, los servicios de apoyo y aspectos académicos. El análisis de los resultados mostró que los componentes que los estudiantes identifican como satisfactorios son los servicios e infraestructura de la institución (Centro de información, laboratorios, cafetería, áreas deportivas), las actividades académicas, el apoyo por medio de tutorías y la motivación. El presente estudio ofrece un enfoque práctico porque permite conocer los factores que, de manera global, impactan en la satisfacción estudiantil, por ende, brinda información útil para la toma de decisiones eficaces y ayuda a resolver problemas educativos asociados con la deserción escolar y bajo rendimiento académico.

Palabras Clave: Calidad educativa, *E*ducación superior, Factores de deserción, Instituciones de educación Superior (IES), Motivación y Satisfacción estudiantil.

Abstract -- Satisfaction is the feeling of pleasure or well-being that a person experiences when their expectations are met. In the educational context, this concept is related to the degree of comfort and satisfaction that students feel when their academic needs and expectations are met. The purpose of this study is to analyze the factors that influence student satisfaction in the different educational programs at the TecNM Cuautla campus. Initially, a literature review was conducted in databases such as RedALyC, Scielo, and Scopus to identify related studies published between 2020 and March 2025. The search term used was "student satisfaction." It was found that Latin American countries such as Brazil, Mexico, Chile, and Colombia have the highest number of publications. The research presented a mixed analysis, with undergraduate students being the most frequently studied using questionnaires. In this research, the study is quantitative in nature. A Google Form survey was conducted, distributed through students' institutional emails, with questions related to some of the factors that can influence student satisfaction, such as infrastructure, support services, and academic aspects. The analysis of the results showed that the components that students identified as satisfactory were the institution's services and infrastructure (information center, laboratories, cafeteria, sports areas), academic activities, support through tutoring, and motivation. This study offers a practical approach because it allows us to understand the factors that globally impact student satisfaction, thus providing information that can be used to make effective decisions and help solve educational problems associated with school dropouts and poor academic performance.

Keywords: Educational quality, Higher education, Dropout factors, Higher education institutions (HEIs), Student motivation and satisfaction

INTRODUCCIÓN

La satisfacción estudiantil es un tema de suma importancia en la educación superior, ya que se encuentra directamente relacionada con la calidad de la educación y el bienestar de los estudiantes. En ese contexto, la satisfacción estudiantil, como indicador fundamental de

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

la calidad educativa, no solo impacta en el bienestar individual de los estudiantes, sino también tiene implicaciones en la reputación y sostenibilidad de las Instituciones de Educación Superior (IES).

En la actualidad, el factor humano en las instituciones educativas ha cobrado mucha importancia para el desarrollo de las mismas, aspecto a lo que hace unas décadas no se le daba tanta importancia. Hoy los estudiantes son los clientes y, por lo tanto, la parte central de toda institución educativa, por lo que se exige y es necesario que se desenvuelvan en un ambiente saludable y satisfactorio, en un clima de bienestar que favorezca su desarrollo profesional por lo que, las instituciones, en especial las de educación superior, como en la que se enfocó esta investigación, tiene que trabajar para cumplir sus objetivos, analizando los problemas que pueden repercutir en la educación integral que se persigue y considerando que la "satisfacción estudiantil" es, finalmente, un referente e indicador de calidad.

Si se considera la satisfacción de los estudiantes como uno de los indicadores para evaluar la calidad de los servicios académicos ofrecidos por las instituciones de educación, conocer y atender los requerimientos de los estudiantes debe ser una prioridad para las IES. Por lo tanto, es preciso realizar estudios que permitan medir el nivel de satisfacción integral de calidad. (Peralta Mazariego, Sudez Pérez, & Garcia Rodríguez, 2020)

La Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO), menciona que "*los estudiantes y sus necesidades deben formar parte de las prioridades de las instituciones de Educación Superior, considerándolos participantes activos de los procesos educativos"*. (UNESCO, 2024, pág. 7).

En este contexto, la satisfacción estudiantil se convierte en un tema de gran importancia, ya que se relaciona directamente con la calidad de la educación y el bienestar de los estudiantes.

Satisfacción estudiantil en educación superior

La satisfacción se define como la sensación de contentamiento que experimenta una persona cuando sus expectativas son satisfechas. En el contexto educativo, esto se relaciona con el grado de confort y contento que experimentan los estudiantes al ver cumplidas sus aspiraciones y requerimientos académicos. (Mireles Vázquez & García García, 2022)

Por otra parte, la calidad de un servicio se evalúa en función de la satisfacción que genera en el usuario al cubrir sus necesidades tanto psicológicas como materiales. En el caso de la educación superior, conocer el nivel de satisfacción de los estudiantes resulta fundamental para medir la calidad institucional, ya que ellos son los principales beneficiarios de los esfuerzos académicos. Sus opiniones, basadas en percepciones, expectativas y requerimientos, sirven como indicadores clave de la eficiencia en la gestión educativa. La satisfacción estudiantil puede entenderse como el grado de bienestar que sienten los alumnos al ver cumplidas sus expectativas académicas gracias a las acciones implementadas por la institución para responder a sus necesidades formativas. (Surdez Pérez, Sandoval Caraveo, & Lamoyi Bocanegra, 2018)).

Si se relaciona lo anterior con los sistemas de gestión de calidad, estos incluyen el principio de enfoque al cliente y hace énfasis en la dependencia que tienen las organizaciones respecto a ellos por lo que deben "*esforzarse por comprender sus necesidades actuales y futuras, satisfacer sus requisitos y exceder sus expectativas*" (OBP, 2018). En el enfoque de Organización Internacional de Normalización (ISO) se menciona también la importancia de realizar un seguimiento de la percepción del cliente respecto al cumplimiento de sus expectativas y establece que las organizaciones deben determinar métodos para recopilar y utilizar esta información como parte de la mejora continua (Normas ISO, s/f).

Es por esto por lo que, las investigaciones sobre la satisfacción estudiantil en el ámbito universitario son fundamentales como referencia para evaluar la calidad educativa. Esto se debe a que una mayor satisfacción de los estudiantes contribuye a un mejor desempeño académico, disminuye la tasa de abandono y reduce la frecuencia de cambios de carrera entre los alumnos inscritos. y, como señalan Colón y Delgado (2020)), es un requisito para el éxito en el aprendizaje.

De acuerdo con la UNESCO (2024), garantizar una educación inclusiva y equitativa de calidad, y promover oportunidades de aprendizaje permanente para todos es transformar vidas a través de la educación. Una educación de calidad y un aprendizaje permanente son esenciales en el aprendizaje.

Por lo tanto, la percepción positiva de los estudiantes respecto a su experiencia académica influye directamente en su motivación, rendimiento y permanencia en los programas educativos. Sin embargo, diversos factores pueden afectar esta satisfacción, como la calidad de la enseñanza, la infraestructura, los servicios de apoyo académico y la gestión administrativa. Del mismo modo, la relación entre estudiantes y profesores, así como la implicación en actividades extracurriculares, tiene un impacto significativo en la forma en que los estudiantes perciben su experiencia educativa y también desempeñan un papel crucial en la percepción de los estudiantes sobre su vida universitaria (Palacio Fierro & Guadalupe Lanas, 2017).

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

Dada la importancia de la satisfacción estudiantil como indicador para la gestión de la calidad educativa, es un importante objeto de estudio en el ámbito académico. Explicado con la teoría de las organizaciones, como la Teoría de la Jerarquía de Necesidades de Abraham Maslow desarrollada en 1943, que establece que las personas tienen diferentes niveles de necesidades que deben ser satisfechas para alcanzar la motivación y la realización personal (Cafiel Cuello, 2024). En este sentido, la satisfacción estudiantil puede entenderse en función de estos niveles, ya que el bienestar y el desempeño académico de los estudiantes dependen en gran medida de la satisfacción de sus necesidades (Loli Monzón, 2022):

- Necesidades Sociales. Todas las personas buscan relacionarse, en el caso de los estudiantes con sus compañeros y docentes, recordando que el ser humano es un ser social, debe satisfacer su necesidad de pertenecer a, ya que por naturaleza humana el individuo nace y crece en grupos, desde que nace, nace dentro de una familia y se desarrolla dentro de una sociedad.
- Necesidad de estima, los estudiantes buscan reconocimiento y respeto por sus logros y esfuerzos, lo que contribuye a su autoestima y satisfacción.
- Necesidades de autorrealización: los estudiantes buscan oportunidades para crecer y desarrollarse personal y profesionalmente, lo que contribuye a su satisfacción y realización.

Según estudios recientes, "*Los componentes de la satisfacción estudiantil más importantes fueron: la buena imagen y calidad de la institución, docencia, tutorías y motivación. Estos factores impactan la satisfacción estudiantil y aportan información útil para tomar decisiones escolares más eficientes*" (Mireles Vázquez & García García, 2022, pág. 1).

Lo mencionado anteriormente, nos lleva a analizar los factores que inciden en la satisfacción estudiantil en el Tecnológico Nacional de México (TecNM) campus Cuautla con el objetivo de diseñar estrategias para mejorar la calidad en el servicio ya que estudios previos han demostrado que una alta satisfacción estudiantil se asocia con menores tasas de deserción y mayor éxito académico que, finalmente, es uno de los objetivos que toda institución educativa superior quiere alcanzar. Por lo tanto, es esencial identificar y abordar los factores que contribuyen a la insatisfacción para implementar estrategias efectivas y correctivas que mejoren la experiencia educativa de los estudiantes en el Instituto Tecnológico de Cuautla.

DESARROLLO

La investigación para este trabajo fue de tipo Cuantitativa, descriptiva.

La población objeto de estudio fueron los estudiantes inscritos, durante el semestre enero-junio 2025, en los seis programas educativos que se ofertan en la institución que, de acuerdo con el Sistema Integral de Información del plantel son 2936 estudiantes. El tamaño de la muestra se determinó por medio de la fórmula para poblaciones finitas (Herrera Castellanos, s/f):

$$n = \frac{N * Z_\alpha^2 * p * q}{e^2 * (N - 1) + Z_\alpha^2 * p * q} \qquad \text{Ec.. (1)}$$

Dónde:

n = tamaño de la muestra
N = tamaño de la población
Z = valor Z correspondiente al nivel de confianza deseado (para un nivel de confianza del 95%, Z = 1.96)
p = proporción esperada de la población, si no se conoce, se puede utilizar 0.5
E= margen de error permitido
Q= (1- P)

Sustituyendo valores:

$$n = \frac{2936 * (1.96)2 * 0.5 * (1-0.5)}{(0.05)2 * (2936-1) + (1.96)2 * 0.5 * (1-0.5))}$$

n = 342 = 342 estudiantes

El tamaño de la muestra recomendado para una población de 2936 estudiantes es de 342 estudiantes, con un nivel de confianza del 95% y un error máximo permitido del 5%.

Por otra parte, el instrumento de recolección de datos consistió en una encuesta de 12 preguntas: cinco en escala de Likert de 1 a 5 puntos que miden el grado de acuerdo o desacuerdo con una afirmación, una pregunta de respuesta matricial, que combina varias preguntas en una tabla para evaluar múltiples aspectos a la vez, tres de opción múltiple y una de opción cerrada estandarizada con SI/NO. El instrumento se realizó a través de Google Forms y se distribuyó por medio de los correos institucionales de los estudiantes obteniendo 846 respuestas.

DISCUSIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Es importante destacar que el bienestar del estudiante constituye el pilar fundamental de los procedimientos implementados en las IES, dado que la enseñanza se focaliza primordialmente en su experiencia. Aunque la calidad de las instituciones de educación superior puede evaluarse desde diversas perspectivas, resulta esencial considerar la opinión del estudiante, ya que es el receptor directo de la educación y, por ende, de los efectos derivados de su calidad (Junge, 2025).

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

En el caso de los Institutos Tecnológicos, la satisfacción estudiantil es un tema que ha sido abordado en varias investigaciones y se ha demostrado que es de suma importancia para las instituciones. En este sentido, el presente estudio tiene como objetivo analizar la satisfacción estudiantil en el Campus Cuautla del TecNM e identificar los factores que influyen en ella.

El total de estudiantes que respondieron el cuestionario fue de 846 (367 mujeres y 473 hombres). La distribución de acuerdo con el semestre cursado actualmente se presenta en la tabla No. 1 en donde se puede observar que el mayor número de respuestas se obtuvo de estudiantes de 2º., 4º. y 6º. semestre.

Tabla 1. Alumnos por semestre.

Semestre	Estudiantes
1	3
2	379
3	7
4	190
5	5
6	149
7	3
8	77
9	6
10	13
12	2
No respondieron	12
Total	*846*

La edad es un aspecto que modifica las perspectivas y expectativas de los individuos. Las edades de los estudiantes que atendieron a la encuesta se muestran en la tabla No. 2

Tabla 2. Edades de los estudiantes.

Edad	17-20	21-25	26-30	31-35	36 o más	No respondieron
Estudiantes	541	275	15	3	5	7

La mayoría de los estudiantes de la institución se encuentran en un rango de edad de 17 a 20 años.

La tabla No. 3 nos permite observar en que Programa educativo se encuentran inscritos los estudiantes.

Tabla 3. Estudiantes por programa educativo.

Programa Educativo	Estudiantes
Ingeniería Industrial	131
Ing. en Gestión Empresarial	189
Ing. en Sistemas Computacionales	104
Ing. Mecatrónica	125
Ing. Electrónica	57
Ing. Civil	76
Contador Público	157
No respondieron	7

La Fig. 1, que corresponde a la pregunta 6, muestra la satisfacción de los estudiantes con los diversos espacios con que cuenta la institución (Centro de Información, Cafetería, Laboratorios y Espacios deportivos). El instrumento arrojó que los estudiantes están más satisfechos con el servicio que ofrece el Centro de Información calificándole como excelente, los laboratorios los describen como un espacio con un servicio bueno, la cafetería para los estudiantes ofrece un servicio regular, mientras los espacios deportivos con un grado de insatisfacción están calificados como malos.

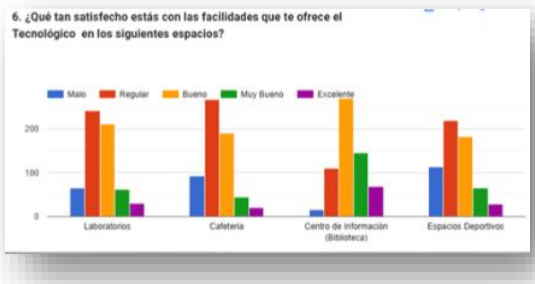


Fig. 1. Valoración de los espacios

La pregunta 7 (Fig. 2) se refiere a la participación de los estudiantes en cursos impartidos en la institución para complementar y reforzar los conocimientos en el aula

Figura 2. Participación en cursos

.

El 8% de los estudiantes que contestaron la encuesta ha tomado de cuatro a seis cursos, el 53% de los estudiantes ha tomado solo de uno a tres cursos y el 34.2% de los estudiantes no ha tomado ningún curso adicional, por lo que se puede inferir que una proporción significativa de estudiantes no está aprovechando las oportunidades de aprendizaje adicionales que ofrece la institución. Estos resultados sugieren que la institución podría necesitar:

- Promocionar más efectivamente las oportunidades de aprendizaje adicionales disponibles para los estudiantes.
- Identificar y abordar las barreras que impiden que los estudiantes participen en cursos adicionales.

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

- Desarrollar estrategias para fomentar la participación de los estudiantes en una variedad de cursos adicionales.

En general, este análisis sugiere que la institución tiene oportunidades para incrementar la participación de los estudiantes en cursos adicionales y, al mismo tiempo, fomentar una cultura de aprendizaje continuo.

En la Fig. 3, que corresponde a la pregunta 8 se puede observar una gran variedad de respuestas. El 40.8% de los estudiantes encuestados no tienen una opinión clara o definida sobre la satisfacción con los docentes y sus prácticas pedagógicas. El 35% se encuentra "satisfecho", una minoría de estudiantes está muy contenta (11 %) pero, desafortunadamente, el resto de los encuestados (13.1%) respondió "insatisfecho", "muy insatisfecho" o "extremadamente insatisfecho", lo que representa un aspecto que requiere de atención por parte de las autoridades educativas.

Fig. 3 Nivel de satisfacción con los docentes y sus prácticas educativas.

En la pregunta 9 (Fig. 4) se trató el punto de las asesorías académicas en donde el 43.1% de los encuestados considera que los servicios de asesoría académica son "útiles" y les brindan apoyo en sus actividades académicas. El 38.8% de los encuestados no tiene una opinión clara o definida sobre la utilidad de los servicios de asesoría académica, el 11.3%, considera que estos servicios son extremadamente valiosos y, para el resto de los encuestados. (6.8%), los servicios de asesoría académica son "poco útiles" o "muy poco útiles y no les brindan el apoyo que necesitan.

Fig. 4. Asesorías Académicas

La Fig.5 muestra las respuestas a la pregunta 10, que se refiere al apoyo recibido del personal administrativo del Tecnológico en los procesos de inscripción y reinscripción encontrando que para el 45.5% de los encuestados el personal de apoyo fue "útil" ya que les brindó apoyo y asistencia efectiva durante el proceso de inscripción y reinscripción. El 26.5% respondió "neutral", por lo que se puede considerar que no tienen una opinión clara o definida al respecto, el 21.8% lo consideran "muy útil" y, el 6.2% considera que el personal de apoyo no les brindó el apoyo y la asistencia que necesitaban durante el proceso.

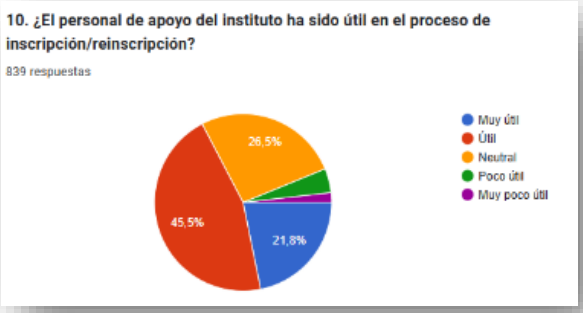


Fig. 5 Apoyo del personal administrativo en los procesos de inscripción y reinscripción.

La pregunta 11 toca un tema que se considera de suma importancia: la probabilidad de regresar al Tecnológico el próximo semestre, en donde la respuesta resultó ser muy positiva ya que el 42.3 % de los encuestados respondió que es "probable", el 42.3 % "extremadamente probable" y el 13.2 % algo probable, por lo que se puede concluir que la mayoría de los estudiantes continuarán

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

cursando sus estudios en el Tecnológico el próximo semestre (Fig. 6).

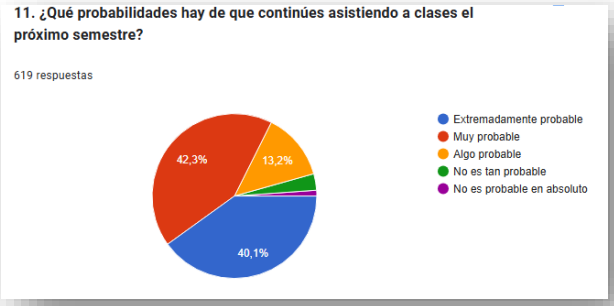


Fig. 6 Permanencia en la institución

En la Fig. 7 encontramos los resultados de la pregunta 12, cuyo tema es la experiencia general de los estudiantes en la institución. Es importante destacar que la mayoría de los estudiantes que respondieron (61.8%) expresaron una opinión positiva sobre su experiencia en la institución.

Fig. 7 Experiencia general con la institución

La pregunta 1 se refiere a silos estudiantes recomendarían el Tecnológico de Cuautla a otras personas. Se incluyó el tema considerando que es una medida importante de la satisfacción y lealtad de los estudiantes hacia la institución. Los resultados muestran que el 64.3% de los estudiantes sí recomendaría el TecNM Campus Cuautla a otras personas ya que la mayoría de los estudiantes están satisfechos con su experiencia en la institución y están dispuestos a recomendarla a otros.

Solo una minoría del 8% de los estudiantes respondió que no lo recomendaría. Pese a lo bajo del porcentaje es importante prestar atención y analizar a detalle cuáles son los motivos que llevaron a esa respuesta, ya que, si bien no existen instituciones perfectas, se debe intentar satisfacer a la gran mayoría de los estudiantes. Estos aspectos se consideran como complemento de la investigación. La figura 8 muestra a detalle las respuestas.

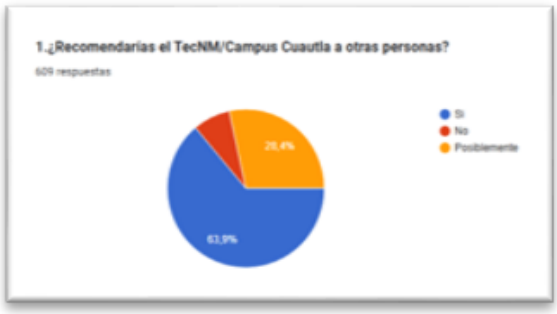


Fig. 8. Recomendación de la institución

Estos resultados abordan exclusivamente lo que respecta a la satisfacción de los estudiantes en diversos aspectos institucionales, sin embargo, la investigación pretende abordar temas que pueden impactar en aspectos significativos como son la reprobación y la deserción, con la intención de proponer estrategias que permitan incrementar la eficiencia terminal en el plantel.

CONCLUSIONES

El bienestar estudiantil es clave en las instituciones de educación superior, ya que la enseñanza se centra en la experiencia del estudiante. En este estudio participaron un total: 846 estudiantes (367 mujeres y 473 hombres). La mayoría de los estudiantes se encuentran cursando el segundo semestre y su edad está en el rango de 17-20 años. Los programas educativos de los que se obtuvo el mayor número de respuestas fueron Ingeniería en Gestión Empresarial e Ingeniería Industrial que son los que cuentan con la mayor cantidad de población estudiantil.

Analizando los principales resultados se puede decir que los estudiantes están satisfechos con el servicio e instalaciones del Centro de Información y los espacios deportivos calificaron como los menos satisfactorios.

Como ya se mencionó, respecto al tema de Cursos o actividades adicionales, se sugiere promover activamente estos programas, reducir las barreras de acceso e intentar que los temas resulten atractivos para los estudiantes al tiempo que complementan su educación.

Respecto a la satisfacción con los docentes y sus estrategias didácticas, una tercera parte se encuentra satisfecho, pero es importante profundizar en por qué un alto porcentaje expresó una opinión neutral. Es el mismo caso de las Asesorías académicas donde si bien un alto porcentaje las considera útiles se da la misma respuesta de opiniones neutrales al respecto. Esta situación puede presentarse por desconocimiento de la actividad o por experiencias poco favorables por lo que es importante investigar más a fondo en ambos temas.

Como aspectos positivos es importante mencionar que la experiencia general de los estudiantes de la institución es

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

positiva y eso los lleva a recomendar a la institución reflejando así su satisfacción general y la lealtad a la institución. En términos generales, existen áreas de mejora que no deben descuidarse y aspectos que ameritan profundizar en el trabajo de investigación de manera de contar con un mayor número de elementos que permitan el diseño de la propuesta de mejora.

Es importante considerar que la satisfacción de los estudiantes en las instituciones de educación superior es un factor clave que influye en múltiples aspectos del sistema educativo y en el éxito tanto de los alumnos como de las propias instituciones. Su importancia radica en los siguientes puntos (Marcano, 2022):

1. Mejora del rendimiento académico. Los estudiantes satisfechos suelen estar más motivados, lo que mejora su rendimiento académico. La satisfacción contribuye a la retención de conocimientos y al desarrollo de habilidades críticas.
2. Aumento de la retención y reducción de la deserción. Instituciones con altos niveles de satisfacción estudiantil tienen menores tasas de abandono. La deserción escolar puede estar relacionada con factores como la falta de apoyo académico, infraestructura deficiente o problemas administrativos.
3. Impacto en la reputación institucional. Universidades con altos niveles de satisfacción suelen atraer más estudiantes y mejorar su prestigio. Un ambiente positivo fomenta recomendaciones de boca en boca y mejores clasificaciones en rankings educativos.
4. Desarrollo de habilidades y empleabilidad. Un entorno educativo satisfactorio facilita el desarrollo de competencias profesionales y habilidades interpersonales. La calidad de la enseñanza y los recursos disponibles influyen en la preparación para el mundo laboral.
5. Fomento del bienestar y la salud mental. La satisfacción con el entorno universitario reduce el estrés y la ansiedad. Un clima positivo mejora la integración social y el sentido de pertenencia.
6. Compromiso y participación estudiantil. Estudiantes satisfechos participan más en actividades extracurriculares, lo que enriquece su experiencia educativa. El compromiso con la institución puede traducirse en una mayor vinculación con proyectos de investigación y extensión.
7. Retroalimentación para la mejora continua. Evaluar la satisfacción de los estudiantes permite identificar áreas de mejora en la enseñanza, infraestructura y servicios. La implementación de cambios basados en la opinión estudiantil fortalece la calidad educativa.

Por lo tanto, la satisfacción estudiantil no solo es un indicador del éxito académico individual, sino también un factor esencial para el crecimiento y sostenibilidad de las instituciones de educación superior.

Por otra parte, no se debe perder de vista que es necesario adoptar una perspectiva de aprendizaje permanente y un enfoque integral para la educación. Como lo mencionan Acosta, Pérez y Angeles (2022) estamos en periodos donde es necesario el rediseño y adaptación de los contenidos curriculares, así como optar por nuevas formas de enseñar y aprender para alcanzar el éxito académico.

La forma en que las Instituciones de Educación Superior atienden las necesidades de sus estudiantes se encuentra directamente relacionada con su satisfacción. Es por ello que en los últimos años la realización de este tipo de estudios de satisfacción se ha incrementado, convirtiéndolos en pieza clave de la valoración de la calidad de las IES debido a que contribuyen a las mejoras de los servicios educativos y, en general, mejores condiciones para que los estudiantes cuenten con las herramientas que les permitan enfrentar los retos del siglo XXI (Peralta & Silva Payros, 2019).

AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mi sincero agradecimiento al Tecnológico Nacional de México, Campus Cuautla, por ofrecerme las herramientas, el respaldo y el entorno académico que me permitiera realizar este estudio y análisis exhaustivo y relevante del tema “Análisis de los factores que inciden en la deserción estudiantil a nivel licenciatura”. Su compromiso con la excelencia educativa y el desarrollo de la investigación fue fundamental para concretar este trabajo.

Asimismo, extiendo un agradecimiento especial a la Autoridades del Instituto Tecnológico de Cuautla por su apoyo y a mis compañeros coautores, cuya colaboración, dedicación y compromiso fueron esenciales para llevar a cabo este proyecto. Su trabajo en equipo y sus perspectivas enriquecieron el enfoque de la investigación.

Finalmente, hago un reconocimiento a la comunidad estudiantil, cuya participación, experiencias y puntos de vista aportaron valiosos insights para este análisis. Su voz es el motor que impulsa la mejora continua en esta institución.

BIBLIOGRAFÍA

[1]Acosta Miranda, M. L., Pérez Machorro, J., & Ángeles Hernández, L. (2022). Evaluación del desempeño docente desde la perspectiva de los estudiantes de Educación superior. (T. N. Tecnológico., Ed.) *Tecnología y Ciencia Aplicada, 5*(1), 389-394. Recuperado el marzo de 2025, de https://jcyta.cenidet.tecnm.mx/revistas/jcyta/08-Revista_JCyTA_Vol-5-Num-1_Ene-Jun_2022.pdf

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

[2]Cafiel Cuello, Y. (2 de mayo de 2024). La pirámide de Maslow y el proceso educativo contemporáneo: revisión literaria. (U. CESMAG, Ed.) *Revista Electrónica en Educación y Pedagogia, 8*(14). doi: https://doi.org/10.15658/rev.electron.educ.pedagog24.02081402

[3]Colón Ortiz, A. J., Hernández Ortiz, C., & Delgado Quiñones, I. (1 de mayo de 2020). La satisfacción en las practicas de enseñanza con aprendizaje activo y el aprovechamiento académico de estudiantes en carreras de STEM. (U. N. Venezuela, Ed.) *Educación en contexto, 6*(12), 25. Obtenido de https://educacionencontexto.net/journal/index.php/una/article/view/129

[4] Herrera Castellanos, M. (s/f). Obtenido de Formula para el calculo de la muestra en poblaciones finitas: https://investigacionpediahr.wordpress.com/wp-content/uploads/2011/01/formula-para-cc3a1lculo-de-la-muestra-poblaciones-finitas-var-categorica.pdf

[5] Junge, R. (30 de enero de 2025). *El bienestar estudiantil: Pilar fundamental en la formación integral de los estudiantes*. (D. d. Araucania, Editor) Obtenido de Clave-CL: https://www.clave9.cl/2025/01/30/el-bienestar-estudiantil-pilar-fundamental-en-la-formacion-integral-de-los-estudiantes/

[6] Loli Monzón, J. L. (2022). *Pirámide de Maslow en el desarrollo de aprendizaje, estudiantes del V ciclo.* (E. d. Posgrado, Ed.) Lima, Perú: Universidad Cesar Vallejo. doi:orcid.org/0000-0002-2064-3201

[7]Marcano, P. U. (2022). Satisfacción estudiantil como un indicador de la calidad educativa. (I. d. Tecnologías, Ed.) *Ciencias Pedagógicas e Innovación, 10*(1), 79-84. doi:https://doi.org/10.26423/rcpi.v10i1.520

[8] Maslow, A. (1991). *Motivación y personalidad.* Casa del libro.

[9] Mireles Vázquez, M. G., & García García, J. A. (2022). Satisfacción estudiantil en universitarios: una revisión sistemática de la literatura. (U. d. Rica, Ed.) *Revista Educación, 46*(2), 16. doi:https://doi.org/10.15517/revedu.v46i2.47621

[10] Normas ISO. (s/f). *Norma ISO 21001*. Obtenido de https://normasiso.org/norma-iso-21001/#:~:text=Esta%20norma%20se%20basa%20en%20el%20ciclo%20de,el%20enfoque%20en%20los%20resultados%20de%20los%20estudiantes.

[11]OBP. (2018). *Sistemas de gestión para organizaciones educativas*. Obtenido de Online Browsing Platform (OBP): https://www.iso.org/obp/ui#iso:std:iso:21001:ed-1:v1:es

[12] Palacio Fierro, A. A., & Guadalupe Lanas, J. (junio de 2017). Principales Factores Organizativos que Influyen en la Satisfacción Estudiantil de las Universidades. *Economía y negocios, 8*(1). Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/321172953_PRINCIPALES_FACTORES_ORGANIZATIVOS_QUE_INFLUYEN_EN_LA_SATISFACCION_ESTUDIANTIL_DE_LAS_UNIVERSIDADES

[13]Peralta Mazariego, E. R., Sudez Pérez, E. G., & Garcia Rodríguez, J. F. (2020). Validación de Modelo de Medición de Satisfacción estudiantil Universitaria con los servicios académicos recibidos. *Revista Investigación Operacional, 41*(3), 472-481. Obtenido de https://rev-inv-ope.pantheonsorbonne.fr/sites/default/files/inline-files/41320-16.pdf#:~:text=El%20objetivo%20de%20este%20estudio%20fue%20validar%20un,educativa%2C%20y%20una%20medida%20multidimensional%3A%20Servicios%20institucionales%20%28servici

[15] Peralta, M. E., & Silva Payros, M. P. (2019). Análisis de la satisfacción estudiantil en las Instituciones de Educación Superior de México. (Atenas, Ed.) *Revista Cientifico Pedagógica, 4*(48), 144-157. Recuperado el 2025, de https://www.researchgate.net/publication/336362059_Analisis_de_la_satisfaccion_estudiantil_en_las_Instituciones_de_Educacion_Superior_de_Mexico

[16]Surdez Pérez, E. G., Sandoval Caraveo, M. d., & Lamoyi Bocanegra, C. L. (2018). Satisfacción estudiantl en la valoración de la calidad educativa universitaria. (U. d. Sabana, Ed.) *Educaión y Educadores, 21*(1), 9-26. doi:https://doi.org/10.5294/edu.2018.21.1.1

[17] UNESCO. (2024). Reunión Mundial sobre la Educación 2024. *Reunión Mundial sobre la Educaión 2024* (pág. 7). Brasil: UNESCO. Obtenido de https://www.unesco.org/sdg4education2030/es/2024-global-education-meeting

AUTORIZACIÓN Y RENUNCIA.

Los autores del presente artículo autorizan al TecNM/Instituto Tecnológico de Zacatepec para publicar el escrito en el libro electrónico del CITID 2025. El TecNM/ITZ o los editores no son responsables ni por el contenido ni por las implicaciones de lo que está expresado en el escrito.

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

SISTEMA DE EVALUACIÓN DE COMPETENCIAS A TRAVÉS DE UN SEMÁFORO QR UTILIZANDO TIC'S PARA LA EVALUACIÓN DE PROYECTOS COLABORATIVOS.

[1] Daniel Domínguez Estudillo, [2]Edi Ray Zavaleta Olea, [3]Ma. Del Rubí Hernandez Andrade, [4] Monica Leticia Acosta Miranda, [5]Leonor Angeles Hernández

[1] Ing Industrial, Instituto Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Cuautla Departamento de Metal-Mecánica. daniel.dominguez@cuautla.tecnm.mx, 7351222242, 62743.
[2] M. C., Instituto Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Cuautla Departamento de Metal-Mecánica, edi.zavaleta@cuautla.tecnm.mx, 7351222242, 62743.
[3] M. A.N., Instituto Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Cuautla Departamento de Metal-Mecánica, rubi.hernandez@cuautla.tecnm.mx, 7351222242, 62743.
[4] DR. EN C.A., Instituto Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Cuautla Departamento de Economico-Administrativas, monica.acosta@cuautla.tecnm.mx, 7351222242, 62743.
[5] M.A., Instituto Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Cuautla Departamento de Sistemas Computacionales, leonor.angeles@cuautla.tecnm.mx, 7351222242, 62743.

Resumen -- En este artículo se presenta el uso de un semáforo académico para la evaluación de proyectos colaborativo de aprendizaje, para el seguimiento de su evaluación, utilizando la información de una base de datos que contiene QR y rubricas para la evaluación del aprendizaje, que es soportado por un sistema Web, el cual trabaja con la información de los alumnos, docentes y las competencias a alcanzar en el curso mediante el uso de QR. Este método de evaluación facilita la simplificación, aclaración y eliminación de obstáculos en la gestión de la información al interactuar con diversos sistemas de gestión de información. Permite analizar y evaluar los proyectos colaborativos de forma ágil y eficiente, proporcionando resultados inmediatos a los actores del proceso de enseñanza-aprendizaje, para tomar decisiones oportunas y, de esta manera, realizar las recomendaciones necesarias que permitan conocer el nivel de competencias alcanzadas por los estudiantes de nivel superior.

Palabras Clave: Tecnologías de la información, Rúbricas, Evaluación en educación.

Abstract -- This article presents the use of an academic traffic light for the evaluation of collaborative learning projects through the assessment of competence, using information from a database that is used for the evaluation of learning with electronic rubrics, which is supported by a Web system, which works with information from students, teachers and the competencies to be achieved in the course through QR. This means of evaluation allows to abstract, clarify and eliminate difficulties in the management of information, by interacting with different institutional information management systems. Allowing the analysis and evaluation of collaborative projects quickly and effectively, providing immediate results to the actors in the teaching-learning process, for decision making at the right time and thus make the relevant recommendations in order to know the degree of competencies achieved by the higher level student.

Key words – Information technologies, Rubrics, Evaluation in education.

INTRODUCCIÓN

Este sistema de evaluación de las competencias en el desarrollo de proyectos colaborativos, en grupos de alumnos a nivel superior, con el fin de apoyar las actividades diarias de docentes y estudiantes, donde se desarrollan actividades relacionadas con el trabajo colaborativo, y el uso de las Tecnologías de la Información y la Comunicación (TIC´s).

El aprendizaje basado en proyectos colaborativos (ABPC), se define como "una metodología didáctica para organizar el proceso de enseñanza-aprendizaje, mediante la elaboración de proyectos colaborativo, en grupos de estudiantes" (Badia 2006). El concepto de proyecto es un producto generado por los estudiantes, obtenido de manera colaborativa y finalmente los estudiantes obtienen el producto de su trabajo, de forma colaborativa denominado proyecto. Se puede utilizar diferentes criterios para clasificar los diferentes tipos de proyectos que dependerán de las áreas de conocimiento: ingeniería electrónica, sistemas computacionales, ingeniería mecatrónica, gestión empresarial, etc; según el contenido: proyectos de investigación, residencias profesionales, desarrollo tecnológico, creatividad o bien el tipo de objeto producido.

El aprendizaje basado en proyectos mediante TIC, se ha aplicado en diferentes disciplinas de educación superior en la interacción docente-estudiantes (Girón Chávez & Cruz Maldonado, 2023) . Esta metodología didáctica es importante para aquellas asignaturas de la carrera de ingeniería industrial que tienen un enfoque claramente aplicado ya se desarrollan para la aplicación del conocimiento, promueve la generación de los conocimientos generalmente con un alto grado transferencia fuera de los contextos académicos.

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

En el aprendizaje colaborativo el conocimiento es generado mediante un proceso de construcción por un grupo de estudiantes, durante la realización de un proyecto colaborativo, involucrando al docente. No se trata solo de la aplicación de técnicas grupales, sino de promover el intercambio de ideas y la participación de manera conjunta de todos los miembros en la generación de conocimiento. Una vez definido el proyecto, los alumnos construyen diferentes competencia utilizando habilidades cognitivas, en la resolución del problema realizado diversas estrategias de aprendizaje, como puede ser la búsqueda de información, el uso de la Tics; esto permite a los alumnos la reflexión sobre el conocimiento adquirido, la colaboración debe ser el producto de un objetivo grupal , que permite a los integrante de un grupo trabajó colaborativo realizar la tarea de un proceso, consensado entre los miembros del grupo de trabajo.

En la actualidad se tienen diferentes trabajos en sistemas y arquitecturas para soportar el aprendizaje basado en la tarea colaborativa, estas aportaciones hacen referencia a la colaboración de proyectos que utilizan las Tics para dar soporte: a) Recursos educativos, evaluación de proyecto; b) Docentes c) Alumnos. En la figura 1, se presentan lsa interconexión entre estos elementos utilizando las Tics.

Figura No.1. Componentes principales del proceso de enseñanza-aprendizaje utilizados la realización de proyectos colaborativos mediante las Tics.

Las tecnologías de la información han transformado la vida en que los estudiantes colaboran. Surgen herramientas como Google (Classroom, Drive, etc.,) driver, Microsoft Teams y el uso facilitan la comunicación y el trabajo en equipo, permitiendo a los estudiantes colaborar de manera efectiva, independientemente de su ubicación mediante uso de códigos QR (Quick Response), en la enseñanza , Los QR almacena datos de una sola dimensión y se asocian a una las direcciones URL son a veces muy larga, se necesita facilitar su lectura del tipo http://bit.ly/.., para recuperar información de los cursos (manual de prácticas, videos, apuntes, manuales, rúbricas, etc.,), almacenada generalmente en drive de Google, ver figura 2.

Figura No.2. Uso de QR en el proceso de enseñanza aprendizaje virtual

Actualmente al realizar los proyectos colaborativos por parte de los estudiantes, se requiere de su evaluación mediante el uso de las Tics, esto permite una nueva forma de aprendizaje que requiere que todos los actores implicados en el proceso aprendizaje colaboren en su construcción. La formación del aprendizaje colaborativo tiene su base teórica en las corrientes constructivistas y sociales del aprendizaje. La TICs ayudar al docente en la planeación, el diseño, en la implementación, el seguimiento y evaluación de las actividades del aprendizaje en línea. Cuando el grupo de estudiantes es heterogéneo se tiene una mayor dificultad en la gestión del curso, por ejemplo, riesgo en discusiones, mal entendidos, estudiantes inconformes; la necesidad de unas normas claras de control (determinadas en acuerdo de academias por los docentes o en consenso por el propio grupo), en este caso surge la necesidad de una vigilancia rigurosa por parte del docente, para monitorear el progreso del trabajo colaborativo.

Este artículo está integrado por los siguientes apartados: En la sección 1, metodología de investigación. Sección 2, el proceso de evaluación de rúbricas y la generación de los estados de un semáforo. En la sección 3, se presenta el proceso para la creación de la base de datos para de evaluación del aprendizaje colaborativo. En la sección 4, se describen los resultados de la investigación, al final se presentan las conclusiones obtenidas y los trabajos futuros.

DESARROLLO

Metodología de investigación

Para acelerar el proceso de asimilación y generación de conocimiento en este proyecto, se implementará una estrategia de investigación y desarrollo tecnológico estrechamente relacionada con la construcción de un aparato experimental. Esta estrategia tiene como objetivos específicos formular hipótesis que puedan contrastarse con el sistema real y ajustar el aparato experimental a los problemas concretos relacionados con la deserción escolar en las instituciones de educación superior en México.

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

Proceso de evaluación de los proyectos colaborativos y la generación de los estados del semáforo

Actualmente se evalúa a los alumnos mediante el uso del Sistemas de Evaluación de Rúbricas (SER), ver figura 2 , se utiliza un código QR para el acceso a las rubricas almacenadas en google Driver, con el objetivo es reducir el tiempo de gestión del proceso de evaluación, para determinar en cada etapa del proceso de aprendizaje colaborativo el avance de cada uno de los alumnos y de las competencias alcanzadas del proyecto o bien que ajustes se deben realizar para asegurar el aprendizaje de las competencias; esto es realizado por un conjunto de agentes de interoperabilidad (Zavaleta 1997), que interactúan con la información de otros sistemas gestores de información utilizando un servidor Web: Apache Tomcat, Servidor de base de datos Mysql, la tecnología JSP (JavaServer Pages) para el desarrollo del sistema.

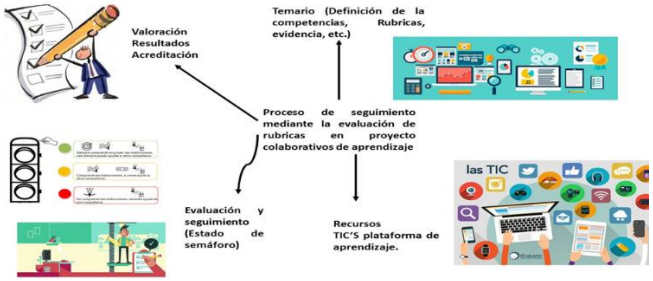


Figura 3. Proceso de seguimiento para la evaluación de proyecto colaborativos para mediante rubricas.

En el proceso de seguimiento para la evaluación mediante rúbricas (Cano 2019), se requiere que el Servidor Web tenga la información cargada previamente: instrumentación didáctica, lista de materias, competencias específicas de cada unidad, instrumentación didáctica con las fechas de inicio y fin de cada actividad del proyecto, (figura 3) con la cual el docente puede seleccionar el tipo de Instrumento de evaluación. para crear la Base de Datos en el sistema. Esto permite al docente generar los estados del semáforo (Tabla 1).

Tabla 1. Estado del semáforo para la evaluación de competencias.

Rojo: indica que el estudiante no ha logrado las competencias específicas del proyecto: p.e. deficiencia en 2 unidades de aprendizaje	Amarrillo: el estudiante no ha logrado desarrollar una de las competencias específicas del proyecto: p.e. deficiencia en 1 unidad de aprendizaje	Verde: el estudiante ha desarrollado las competencias específicas del proyecto, con una calificación igual o mayor al 70 %.

DISCUSIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Proceso de la creación de la base de datos para el aprendizaje colaborativo

Al inicio del curso el docente captura en el sistema, con la información proporcionado por el departamento académico la siguiente información:

- Materias (clave, nombre, número de unidades, número de alumnos).
- Temario: Nombre de la unidad de cada materia y competencia específica.

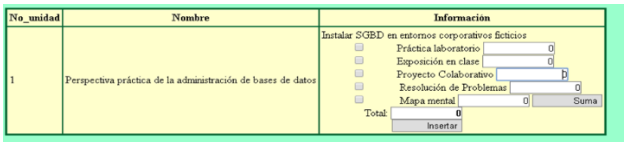
Para la importación de la información de los alumnos, se realiza a través de un archivo planos de Excel, el cual contiene (número de control y el nombre del alumno) por de cada materia. Para definir las actividades del proyecto colaborativo se requiere seleccionar de cada materia las actividades de aprendizaje de cada equipo, las cuales están definidas en los contenidos temáticos de cada asignatura (Practicas de laboratorio, resolución de problemas, proyecto colaborativo, exposición en clase, mapa mental, etc.), la cuales se almacena su link, para genera su QR por el sistemas, así como la ponderación cuantitativa de cada una de las actividades de aprendizaje, cubriendo el total del100% (Tabla 1).

Visualizador de practicas con QR

Nombre materia	Instrumento de Evaluación	Link
Gestión de sistemas de calidad	Examen diagnóstico	https://docs.google.com/forms/d/e/1FAIpQLSczyTUu35BiNMbkfPc8i-nx_8HtGkFJ8ryrSk-CRfrF80_Mxw/viewform?usp=sharing
Materias	Rubricas	https://docs.google.com/document/d/1HLKKBMZwFHFKHPls_ooQPyCwtQbSiao/edit?usp=drive_link&ouid=108063018637746822574&rtpof=true&sd=true
Taller de INV II	Reglas y acuerdos	https://docs.google.com/document/d/1HLKKBMZwFHFKHPls_ooQPyCwtQbSiao/edit?usp=drive_link&ouid=108063018637746822574&rtpof=true&sd=true

Figura 4. Generación QR de los recursos de aprendizaje colaborativo.

La información generada en la base de datos se deben especificar las actividades de las diferentes fases del proyecto, realizando su evaluación mediante el uso rúbricas para lograr una evaluación formativa durante el desarrollo del proyecto y la sumativa al final del curso (figura 5).



No_unidad	Nombre	Información
1	Perspectiva práctica de la administración de bases de datos	Instalar SGBD en entornos corporativos ficticios Práctica laboratorio 0 Exposición en clase 0 Proyecto Colaborativo 0 Resolución de Problemas 0 Mapa mental 0 Suma Total 0 Insertar

Figura No 5. Asignación de actividades a las etapas del proyecto.

El semáforo proporciona una representación gráfica del nivel de evaluación de los estudiantes. Como en todo proceso, la evaluación debe medirse para facilitar la toma de decisiones por parte de los actores involucrados en el proceso de enseñanza-aprendizaje, con el objetivo de comparar los resultados obtenidos con los resultados planificados y, de esta manera, impulsar la mejora continua.

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

El sistema de evaluación mediante QR ayuda al docente a esclarecer la problemática relacionada con la gestión de la información en la evaluación de proyectos colaborativos. Este sistema incluye indicadores que reflejan las competencias adquiridas por los estudiantes y permite comparar dichos resultados con los objetivos planificados en la instrumentación didáctica de los cursos.

a) Compartición de recursos: Los códigos QR pueden dirigir a los alumnos a documentos compartidos en la nube, como Google Drive o Dropbox, ver figura 7. Esto permite a los miembros de los equipos acceder fácilmente a la información necesaria.

Generar Código QR

Figura No 7. Generación de código QR para la asignación de actividades a las etapas del proyecto.

b) Recolección de datos: Se pueden crear formularios o encuestas en línea (Form de Google), cuyos enlaces se distribuyen mediante códigos QR. Esto facilita la recolección de opiniones o información de manera rápida y organizada.

c) Comunicación: Los equipos pueden utilizar QR para compartir rápidamente enlaces a plataformas de comunicación (Grupo de whatsApp), o redes sociales relevantes para el proyecto. d) Organización de tareas: Al escanear un código QR, los miembros del equipo pueden acceder a un tablero de tareas, donde pueden ver el progreso y asignaciones, facilitando la colaboración en tiempo real.

CONCLUSIONES

En la construcción de un proyecto colaborativo se instruye a los estudiantes a utilizar las estrategias para solución de problemas reales en su vida profesional, lo cual implica la planificación de los tiempo de cada una de las actividades, fortaleciendo la capacidad de análisis y síntesis, de organización y planificación, la comunicación entre los participantes, la solución de problemas, la toma de decisiones, así como la motivación hacia la asignatura, fomentando su capacidad innovadora y creativa, logrando una mayor profundidad de su aprendizaje significativo. Los resultados de un proyecto colaborativo mediante TIC dependen en gran medida de cómo se gestionen las herramientas tecnológicas y de la cultura de colaboración que se fomente entre los alumnos.

Con el fin potenciar los resultados del proceso de aprendizaje se requieren realizar ajustes al proceso de seguimiento de las actividades para tener mayor confiabilidad en los resultados de las evaluaciones de las actividades aprendizaje con el uso de los estados del semáforo, TIC's y código QR. Así poder ajustar los tiempos en la solución a situaciones problemáticas en el desarrollo del proyecto.

El propósito de este trabajo es presentar una alternativa o solución factible en la integración de la evaluación de las competencias mediante el uso de las tecnologías de información y comunicaciones que soporta el uso de proyectos colaborativos de aprendizaje con los sistemas de información integral de la institución. La alternativa propuesta permite visualizar la retroalimentación para conocer qué factores causan un atraso del proyecto. El principal problema encontrado es presentar la visualización fácil de los resultados de la evaluación a los diferentes actores que participan para la toma de decisiones en la gestión del curso. Se sugiere ampliamente el desarrollo de un sistema Web que permita la generación de indicadores gráficos que visualicen el nivel de las competencias alcanzadas por los alumnos para la toma de decisiones eficientes y permanentes, que sea incluyente para todos los actores del proceso educativo.

BIBLIOGRAFÍA

[1] Badia, A. G. (2006, Octubre). Incorporación de las TIC en la enseñanza y el aprendizaje basados en la elaboración colaborativa de proyectos. Universities and Knowledge Society Journal., Pág. 42-54.
[2] Cano, E. (6 de Agosto de 2019). Las rúbricas: un instrumento útil para la evaluación de competencias". Obtenido de https://www.redalyc.org: https://www.redalyc.org/pdf/567/56741181017.pdf
[3] OECD. (17 de 08 de 2016). Programa Internacional para la Evaluación del Estudiante. Obtenido de http://www.funlam.edu.co: http://www.funlam.edu.co/revistas/index.php/lampsakos/article/view/926.
[4] Román P. Martin A. (2013). (Román Graván & Martín Gutiérrez, 2013).
[5] Zapata, M. (2010). Evaluación de competencias en entornos virtuales de aprendizaje y docencia universitaria. Revista de Educación a Distancia.
[6] Zavaleta . O. (Marzo 1997). Arquitectura de Agente de Interoperabilidad. Cenidet.

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

AUTORIZACIÓN Y RENUNCIA.

Los autores del presente artículo autorizan al TecNM/Instituto Tecnológico de Zacatepec para publicar el escrito en el libro electrónico del CITID 2025. El TecNM/ITZ o los editores no son responsables ni por el contenido ni por las implicaciones de lo que está expresado en el escrito.

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

DESARROLLO DEL PROCESO COGNITIVO SUPERIOR DEL PENSAMIENTO EN EL APRENDIZAJE DE LOS CIRCUITOS ELÉCTRICOS EN EL ÁREA DE TECNOLOGÍA

Marlene L Guerrero-Julio [1]

[1]Doctora en Proyectos, Secretaría de Educación de Bucaramanga, Grupo de Investigación SEBInvestiga, Institución Educativa José Celestino Mutis. marleneguerrerojulio@gmail.com, Bucaramanga, Santander (Colombia)

Resumen -- Según Piaget (1896-1980), los procesos cognitivos se transforman continuamente del nacimiento de un niño a través de varias etapas (sensoriomotor, preoperatorio, operaciones concretas y operaciones formales). Este artículo centra su atención en el desarrollo del proceso cognitivo superior del pensamiento y la forma como éste se desarrolla en el aprendizaje de los circuitos eléctricos en el área de Tecnología. Inicialmente, se exponen las nociones sobre pensamiento como proceso cognitivo superior, para posteriormente presentar las percepciones de los docentes del área y contrastarlas teóricamente, utilizando un paradigma interpretativo con un enfoque cualitativo y método de teoría fundamentada, con la finalidad de plantear un constructo teórico que contribuya a comprender la forma como dicho proceso cognitivo se desarrolla en niños de primaria en edades de 7 a 11 años, para el aprendizaje de los circuitos eléctricos.

Palabras Clave: Circuitos eléctricos, Constructo teórico, Pensamiento, Proceso cognitivo superior, Tecnología.

Abstract -- According to Piaget (1896-1980), cognitive processes are continuously transformed from the birth of a child through several stages (sensorimotor, preoperational, concrete operations and formal operations). This article focuses on the development of the higher cognitive process of thinking and the way it develops in the learning of electrical circuits in the area of Technology. Initially, the notions about thinking as a higher cognitive process are presented, to later present the perceptions of teachers in the area and contrast them theoretically, using an interpretive paradigm with a qualitative approach and grounded theory method, in order to propose a theoretical construct that contributes to understanding the way in which said cognitive process develops in primary school children aged 7 to 11 years, for the learning of electrical circuits..

Key words – Electrical circuits, Theoretical construct, Thinking, Higher cognitive process, Technology.

INTRODUCCIÓN

Autores como [1], definen el pensamiento como un proceso de orden superior que permite relacionar las diversas ideas que se almacenan en el cerebro de forma comprensible y utilizarlas para realizar análisis, juicios y deducciones adicionales. El pensamiento está relacionado con otros procesos cognitivos de orden superior como el lenguaje, la inteligencia y la creatividad.

En el ámbito educativo, existen varios factores que inciden en el desarrollo del pensamiento. Es por ello por lo que, como parte de cualquier desarrollo curricular, la enseñanza y el aprendizaje de circuitos eléctricos requiere de ambientes de aprendizaje en los que se desarrollen habilidades de análisis de problemas y pensamiento crítico y en los cuales se reconozcan las preconcepciones que tienen los estudiantes sobre el fenómeno en estudio y la ciencia en general. Según autores como [2], la enseñanza de circuitos eléctricos debe priorizar la relación del tema con la vida cotidiana del estudiante.

Los resultados que se presentan en este artículo hacen parte de los hallazgos encontrados en la tesis doctoral denominada "Constructos teóricos sobre los factores pedagógicos que inciden en el desarrollo de procesos cognitivos superiores en el aprendizaje de circuitos eléctricos" desarrollada por [3] en el doctorado en educación de la Universidad Pedagógica Experimental Libertador Instituto Pedagógico Rural "Gervasio Rubio y se enfocará sólo en el constructo teórico relacionado con el desarrollo del proceso cognitivo superior del pensamiento.

DESARROLLO

Abordaje metodológico

El estudio fue orientado con un paradigma interpretativo, debido a su naturaleza holística y su capacidad para orientar la comprensión del fenómeno de estudio desde una perspectiva no sólo teórica, sino desde las percepciones de los docentes del área. Así mismo, el enfoque cualitativo desde el método de la teoría fundamentada propuesto por [4], el cual permitió generar teorías a partir de datos recolectados cualitativamente del mundo real objeto de estudio y de procesos sistemáticos de comparación teórica.

El resultado final desencadenó en la generación de un constructo teórico que permite explicar el desarrollo del proceso cognitivo superior del pensamiento. Esta teoría

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

se derivó de procesos de recolección, transcripción, codificación y análisis de datos que permitieron la creación de categorías y subcategorías, hasta llegar a una categoría "nuclear".

Tabla 1. Fases de la investigación.

Fase	Descripción
Fase de definición del problema y revisión de la literatura	Se establecieron preconcepciones e hipótesis a partir de los conceptos teóricos y sistemas de referencia como base para orientar el proceso de investigación y determinar el curso de acción a través del establecimiento de los objetivos, categorías preestablecidas y preguntas para las herramientas de recolección de información.
Fase de recolección de experiencias y análisis de datos	Se realizaron entrevistas a tres docentes del área con el fin de conocer sus percepciones sobre los factores pedagógicos que contribuyen con desarrollo del proceso cognitivo de orden superior del pensamiento. Así mismo, se realizaron observaciones de clase para analizar el desarrollo de dicho proceso cognitivo en los estudiantes.
Fase de teorización	Se generó la teoría sobre los factores pedagógicos que contribuyen al desarrollo del proceso cognitivo de orden superior del pensamiento para el aprendizaje de los circuitos eléctricos.

El proceso de documentación, transcripción y análisis de las entrevistas y observaciones de clase se realizó utilizando el software Atlas.ti, el cual permitió consolidar las subcategorías y categorías y crear las redes de conexión entre las mismas.

Principales hallazgos

La teoría del desarrollo de procesos cognitivos de [5], sirvió como base para estructurar el análisis y desarrollar las interpretaciones, abordando su conexión con el deseo de comprender cómo los estudiantes de cuarto grado de primaria en su etapa preoperacional aprenden sobre los circuitos eléctricos.

Así mismo, se tuvo en cuenta el enfoque sociocultural del desarrollo cognitivo y la teoría del desarrollo próximo planteada por [6], con la finalidad de comprender los factores pedagógicos implicados en el desarrollo del proceso cognitivo superior del pensamiento, desde el análisis de la didáctica y la práctica pedagógica de los docentes del área de Tecnología e Informática y de la carga cognitiva de los estudiantes según lo expuesto por [7].

En la etapa preoperacional, los niños comienzan a tener la capacidad de entender conceptos más abstractos. No obstante, el estudio de circuitos eléctricos implica pensar en conceptos invisibles, como el flujo de corriente o la energía, que pueden ser difíciles de comprender para ellos. Por tal motivo, el docente debe generar estrategias pedagógicas pertinentes que ayuden a volver estos conceptos más tangibles para los niños, a través de ejemplos prácticos y visuales que faciliten su comprensión.

Como se presenta en la figura 1, es importante resaltar que la subcategoría "pensamiento", se codificó al interior de la categoría "procesos cognitivos en el aprendizaje de los circuitos eléctricos". Esta subcategoría se encontró en el proceso de codificación axial,

Figura 1. Proceso de codificación de la subcategoría Pensamiento

Nota. Figura adaptada de los hallazgos de [3]

El proceso cognitivo del pensamiento es una actividad humana natural que tiene lugar dentro de la mente y busca significado en lo conocido y experimentado, así como en la planificación y dirección de acciones posteriores. Para [8], el pensamiento implica procesos mentales abstractos que pueden ser voluntarios o involuntarios y a través de los cuales se relacionan recuerdos, ideas, creencias, sentimientos y emociones.

En este mismo orden de ideas, para [9], el pensamiento permite planificar acciones que ayuden a los niños a superar los desafíos que enfrentan en su vida diaria. Al trabajar con circuitos eléctricos, los niños enfrentan desafíos y deben pensar en soluciones. El desarrollo del

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

proceso cognitivo superior del pensamiento les permite perseverar ante dificultades y reflexionar sobre cómo las decisiones afectan el resultado.

Como parte del análisis de la subcategoría del pensamiento se encontraron varias subcategorías en el proceso de codificación abierta a saber: el pensamiento crítico, el pensamiento computacional, el pensamiento matemático, la investigación, la abstracción, la conceptualización, los esquemas, el análisis y la comprensión. Cada una de ellas relacionadas entre si como se presenta en la figura 2.

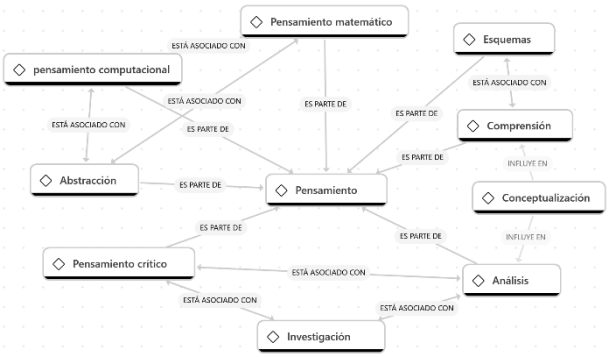


Figura 2. Análisis de la subcategoría Pensamiento

Nota. Figura tomada de [3].

Como se puede observar, los esquemas mentales juegan un papel fundamental en el proceso cognitivo superior del pensamiento, ya que influyen en la forma como el niño se enfrenta y resuelve un problema o genera estrategias o procedimientos para abordarlo a través de procesos de adquisición, recuperación, elaboración, asimilación y utilización del conocimiento. Como lo expresa [10], el niño sólo podrá asimilar nuevos conocimientos si dispone de esquemas mentales que le permitan acogerlos.

En el ámbito del aprendizaje de los circuitos eléctricos, el docente debe propiciar escenarios en los que el pensamiento pase de ideas y prejuicios previos, a concepciones e ideas más científicas. Así los explica [11], quien manifiesta que los docentes deben propiciar que los niños vayan transformando gradualmente las ideas iniciales y cotidianas que traen desde su hogar y experiencias previas para que las estrategias y metodologías logren una contribución real a la comprensión de los fenómenos y el mundo que los rodea.

Según [8], el pensamiento crítico permite comprender y analizar adecuadamente nuevas ideas o fenómenos, y a su vez, la comprensión y el análisis de un fenómeno o concepto relacionado con la electricidad o el funcionamiento de circuitos eléctricos se deriva de los procesos de conceptualización que el docente utiliza como facilitador del proceso de aprendizaje y los que desarrolla el estudiante con base en procesos de indagación e investigación realizados dentro o fuera del aula.

A continuación, en la tabla 2, se presentan algunas de las percepciones de los docentes en relación con el desarrollo del proceso cognitivo superior del pensamiento y posteriormente, en la tabla 3, se presentan algunas de las observaciones de clase que estuvieron relacionadas con dicho proceso.

Tabla 2. Percepciones de los docentes del área sobre el desarrollo del proceso cognitivo superior del pensamiento.

Docente	Descripción
DATI1	"*…el pensamiento inicialmente empieza con comprender las nociones generales …sobre lo que están aprendiendo en circuitos eléctricos, …los estudiantes primero requieren conceptualizar … para posteriormente empezar a analizar estos conceptos aplicados a la realidad*"
DATI2	"*hay que desarrollar diferentes tipos de pensamientos, no sólo de pronto el matemático, ni el pensamiento, digámoslo el crítico, también de pronto algunos como el pensamiento computacional*"
DATI3	"*el pensamiento se va ejercitando seguramente a través de actividades que le generan a ellos, inquietud que se convierten muchas veces en retos en desafíos"*

Nota. La sigla DATI significa docente de Tecnología e Informática. Información tomada de [3].

Como se puede observar, además del pensamiento crítico, se destacó el pensamiento computacional y el pensamiento matemático como parte importante de esta categoría.

Los docentes entrevistados plantean que el pensamiento computacional es necesario para que los estudiantes puedan modelar y simular el comportamiento de los circuitos eléctricos y comprender la complejidad de su naturaleza, aplicando la lógica y el pensamiento algorítmico, lo cual coincide con lo expresado por [12], quien expresa que el pensamiento computacional posibilita que los estudiantes pueden utilizar la simulación para corregir errores, comprender cómo funcionan los circuitos y sus componentes, conocer como se comportan ante determinados cambios y/o configuraciones y tomar decisiones sobre nuevas o mejores soluciones.

Aunado al pensamiento computacional, el pensamiento matemático según [13], contribuye a que los estudiantes

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

les encuentren sentido a las variables de un modelo y a su incidencia en el circuito eléctrico. Además, fomenta el desarrollo de habilidades matemáticas y lógicas, ya que los circuitos involucran relaciones entre voltaje, corriente y resistencia, conceptos que están relacionados con principios matemáticos.

Tabla 3. Observaciones de clase sobre el desarrollo del proceso cognitivo superior del pensamiento.

Observación	Descripción
ODC1	*"Se observa que el estudiante ETI1 pierde la atención con facilidad, le gusta terminar rápido las simulaciones, pero no profundiza en lo que hay detrás. No siempre las termina de forma correcta. El estudiante ETI2 por su parte, presenta dificultades para comprender lo que debe realizar con el paso a paso. Espera con frecuencia que otro compañero le ayude a terminar. La estudiante ETI3 logra desarrollar la actividad propuesta en el tiempo establecido, le gusta profundizar en la forma de realizar nuevas conexiones*."
ODC2	"*Se observa que el estudiante ETI1 nuevamente pierde la atención con facilidad. No desarrolló la investigación previa, pero tiene una gran capacidad para absorber rápidamente lo que lee de las investigaciones de otros y asocia con facilidad lo leído con su contexto. El estudiante ETI2 no desarrolló la investigación previa y dado que se encuentra en proceso de ajuste razonable, no lee con tanta facilidad las investigaciones que otros realizaron. Conecta algunos conceptos con su realidad, pero de forma empírica si profundizar sobre los aprendido. La estudiante ETI3 realiza la investigación previa y logra desarrollar la actividad propuesta en el tiempo establecido. Con facilidad asocia los conceptos con situaciones de su vida cotidiana.*"
ODC3	"*Se observa que el estudiante ETI1 analiza con facilidad el caso de estudio, pero no logra identificar con exactitud todos los elementos de circuito necesarios. Durante la actividad al interior del aula se evidencia motivación, participación, pero también distracción. El estudiante ETI2 presentó dificultades en la comprensión del caso de estudio. No logró identificar a cabalidad los elementos de circuito necesarios y en algunas ocasiones los confundía con otros. La estudiante ETI3 logró desarrollar la actividad de análisis del caso de estudio de forma adecuada, evidenciando que logra identificar todos los elementos de control de circuito de forma correcta y además llevarlos a modelamiento y simulación.*"

Nota. La sigla ODC significa Observación del diario de campo y la sigla ETI significa Estudiante de Tecnología e Informática. Información tomada de [3].

Como resultados de las observaciones de clase, se pudo evidenciar que existe una diferencia en los niveles de desarrollo del proceso de pensamiento en los tres estudiantes. Es evidente que el estudiante ET1 presentaba una fuerte tendencia a la acción, pero sin comprender ni conceptualizar adecuadamente la situación, tiende a distraerse con facilidad y a tener dificultades para el desarrollo del pensamiento matemático y crítico, la lectura de textos y el razonamiento, lo que se correspondía con la naturaleza de su trastorno de déficit de atención y perturbación de la actividad [14].

Por su parte, en el caso del estudiante ET2, se observa que, a pesar de compartir el mismo trastorno de déficit de atención que el estudiante ET1, sus condiciones de aprendizaje son completamente diferentes en lo que respecta al desarrollo del proceso cognitivo del pensamiento, ya que el estudiante no muestra interés en desarrollar actividades investigativas o analíticas. No obstante, sus dificultades específicas de aprendizaje están ligadas a su neurodiversidad adicional relacionada con el bajo rendimiento académico. En este sentido, autores como [15], explican que los estudiantes que presentan ciertas dificultades de aprendizaje suelen tener dificultades a la hora de realizar investigaciones, extraer conclusiones, conceptualizar, etc.

DISCUSIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Como parte de los resultados encontrados en el análisis de los factores pedagógicos que inciden en el desarrollo del proceso cognitivo superior del pensamiento, se evidenció que aspectos como la práctica docente, las condiciones socioeconómicas de los estudiantes, la motivación hacia el aprendizaje y los elementos del contexto, tienen un peso significativo.

Es importante resaltar que el análisis de los factores pedagógicos no hace parte de los resultados que se pretenden presentar en este artículo, por lo cual sólo se abordarán los constructos generados en relación con el pensamiento.

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

En primera instancia, se analizará el papel de las estrategias pedagógicas en el desarrollo del proceso de pensamiento. De acuerdo con [16] y [11], el docente debe diseñar estrategias que no sólo se centren en la transmisión de conocimiento sobre los fundamentos de la electricidad, sino que generen un aprendizaje significativo y experiencial y que a su vez se adapten a los diferentes ritmos y estilos de aprendizaje.

En la tabla 4 se presentan las estrategias orientadas al desarrollo del pensamiento en el aprendizaje de los circuitos eléctricos.

Tabla 4. Estrategias propuestas para el desarrollo del pensamiento en el aprendizaje de los circuitos eléctricos.

	Descripción
Estrategia	Observación
	Formulación de hipótesis
	Investigación
	Obtención de conclusiones
	Comunicación

Nota. Adaptado de [3].

De otro lado, los estudiantes que enfrentan circunstancias económicas adversas pueden experimentar altos niveles de estrés que perjudican su capacidad de concentrarse y retener información porque el cerebro no puede procesar la información de manera óptima cuando está constantemente en un estado de alerta. En diversos estudios de investigación, el factor antes mencionado combinado con una nutrición inadecuada puede perjudicar significativamente el rendimiento académico y el desarrollo de habilidades intelectuales como la resolución de problemas, la creatividad y la comprensión [17].

Cuando el docente se preocupa por resignificar los escenarios de enseñanza y aprendizaje de los circuitos eléctricos, se hace relevante plantear enfoques didácticos y metodológicos innovadores, dinámicos, flexibles, motivantes y disruptivos que se orienten hacia el estudiante, que impulsen el interés y el compromiso de éste por aprender y en los cuales pueda comprender mejor los conceptos complejos relacionados con la electricidad.

Los niños de 7 a 11 años aprenden de manera más efectiva cuando están involucrados en actividades prácticas. Las estrategias que promueven el uso de materiales concretos, como kits de circuitos, experimentos con luces e interruptores, o la construcción de modelos, permiten a los niños visualizar cómo funciona un circuito eléctrico y vuelven su experiencia de aprendizaje más significativa y memorable.

Lo anterior implica indudablemente, la necesidad de capacitación de los docentes no sólo para el diseño de estrategias y ambientes de aprendizaje adaptados a las necesidades e intereses de los estudiantes, sino también para la incorporación de recursos tecnológicos innovadores en sus procesos de enseñanza [18].

En el desarrollo de la investigación se encontró que algunos estudiantes pueden presentar en el aula trastornos de déficit de atención y perturbación de la actividad, por lo cual, el docente debe estar preparado para diseñar estrategias orientadas hacia estas neurodiversidades. A continuación, en la tabla 5, se presentan algunas estrategias propuestas para desarrollar el proceso cognitivo del pensamiento en estudiantes con déficit de atención y perturbación de la actividad.

Tabla 5. Estrategias propuestas para estudiantes con déficit de atención y perturbación de la actividad en el aprendizaje de los circuitos eléctricos.

Proceso cognitivo superior	Problema detectado	Estrategia propuesta
Pensamiento	Perdida de la atención. Falta de profundización. No se interesan por desarrollar investigaciones previas. Falta de planificación en el desarrollo de las actividades. Falta de comprensión del paso a paso. Dificultades en la comprensión de casos de estudio y generación de inferencias.	Realizar lecturas cortas. Fraccionar las actividades para que las instrucciones sean más cortas, sencillas y manejables para los niños. Utilizar simuladores de circuitos. Realizar experimentaciones controladas.

Nota. Tomado de [3].

Ahora bien, teniendo en cuenta que los estudiantes de grado 4º de primaria se encuentran en una etapa preoperacional, es importante que el docente diseñe estrategias posibiliten la correlación entre el fenómeno que observa y la conceptualización sobre el mismo, a la vez que vayan siendo capaces de aplicar formulas sencillas para analizar la capacidad de una resistencia o para calcular la corriente eléctrica en un circuito, para realizar posteriormente modelaciones, simulaciones o construcciones de maquetas y comprender las interacciones entre los diferentes componentes de dicho circuito.

A continuación, en la tabla 6, se presentan algunas estrategias que pueden favorecer el desarrollo del pensamiento crítico, el pensamiento computacional y el

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

pensamiento matemático en los estudiantes de grado 4º y las habilidades que favorecen dichas estrategias.

Tabla 6. Estrategias de acción para favorecer el desarrollo del pensamiento

Tipos de pensamiento	Habilidades que favorece	Estrategia de acción
Pensamiento Crítico	Conceptualización Argumentación Abstracción Comprensión Cuestionamiento Comunicación Resolución de problemas Toma de decisiones Reflexión crítica	Actividades de indagación e investigación Exploración y resolución de problemas. Discusión y confrontación de ideas. Actividades de trabajo en equipo. Formulación y comprobación de hipótesis.
Pensamiento Computacional	Planificación Observación Predicción Resolución de problemas Comunicación Toma de decisiones Curiosidad Flexibilidad	Actividades de modelamiento y simulación de circuitos eléctricos. Actividades de trabajo en equipo. Formulación y comprobación de hipótesis.
Pensamiento Matemático	Lógica Razonamiento Resolución de problemas	Aplicación de fórmulas y ecuaciones sencillas. Modelado y simulación.

Nota. Tomado de [3].

Finalmente, es importante resaltar el papel del trabajo en equipo y la comunicación entre pares el desarrollo del pensamiento al aprender sobre circuitos eléctricos. Las estrategias de aprendizaje colaborativo, como proyectos grupales donde los niños construyen circuitos eléctricos juntos, promueven habilidades sociales, con las cuales los niños aprenden a escuchar y compartir ideas, a trabajar de manera conjunta para resolver problemas, y a comunicar de manera clara sus descubrimientos y razonamientos.

CONCLUSIONES

De la investigación desarrollada, se concluye que estrategias como la observación, la formulación de hipótesis, la investigación, la obtención de conclusiones y la comunicación coadyuvan con el desarrollo del proceso cognitivo superior del pensamiento en el aprendizaje de los circuitos eléctricos, ya que como lo explica [11], este tipo de estrategias posibilitan la enseñanza y el aprendizaje de las ciencias en niños, propiciando la comprobación de ideas, la discusión, la ampliación de la experiencia infantil, el uso pertinente del lenguaje técnico y el desarrollo de actitudes científicas.

Generar estrategias que propicien el desarrollo del proceso cognitivo superior del pensamiento en niños de 7 a 11 años para aprender sobre circuitos eléctricos se convierte en un tema de especial interés para garantizar un adecuado crecimiento cognitivo, social y creativo del niño, ya que permite que cuenten con esquemas mentales adecuados para comprender el mundo que los rodea, desarrollar habilidades prácticas y científicas, y prepararse para los desafíos y oportunidades que la tecnología les ofrecerá a medida que crezcan.

En el desarrollo del proceso cognitivo superior del pensamiento, en el ámbito del aprendizaje de los circuitos eléctricos se destaca la necesidad de propiciar estrategias que coadyuven al fortalecimiento del pensamiento crítico, el pensamiento computacional y el pensamiento matemático. Algunas estrategias de acción que promueven el desarrollo del pensamiento crítico son entre otras, las actividades de indagación e investigación, la exploración y resolución de problemas, la formulación y comprobación de hipótesis.

En cuanto al pensamiento computacional, el docente puede generar escenarios de aprendizaje que involucren actividades de modelamiento y simulación de circuitos eléctricos, actividades de trabajo en equipo, etc. Para el caso del desarrollo del pensamiento matemático, se pueden plantear estrategias como la aplicación de fórmulas y ecuaciones sencillas y el modelado y simulación.

Se destaca, por último, la necesidad de que el docente cuante con el conocimiento y experiencia práctica para diseñar estrategias y utilizar recursos tecnológicos innovadores que contribuyan con el desarrollo del proceso cognitivo superior del pensamiento en los niños. Lo anterior, debido a que a medida que los niños crecen, necesitan no solo que se les trasmita conocimiento de la forma tradicional, sino también aprender a reflexionar sobre ellos, cuestionar, sintetizar información y aplicar lo aprendido en contextos nuevos.

Un docente bien capacitado sabe cómo crear ambientes de aprendizaje que estimule el desarrollo del pensamiento, utilizando estrategias didácticas que favorezcan la curiosidad, el razonamiento lógico, la creatividad, el pensamiento crítico, el análisis y la resolución de problemas. Esto incluye el uso de metodologías activas, como el aprendizaje basado en proyectos, el uso de tecnologías educativas, el fomento de debates y la integración de actividades que promuevan la reflexión.

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

AGRADECIMIENTOS
Se extiende el agradecimiento al grupo de investigación SEBInvestiga de la Secretaría de educación de Bucaramanga y a la Institución Educativa José Celestino Mutis por permitir el desarrollo de la tesis doctoral en el contexto educativo y así mismo a la Universidad Pedagógica Experimental Libertador Instituto Pedagógico Rural "Gervasio Rubio" por orientar la tesis y sus resultados.

BIBLIOGRAFÍA

[1] Díaz, D., y Latorre, J. (2021). Psicología médica. España: Elservier.
[2] Ruiz, A. Rosado, L. & Oliva, J. (1991). Investigación de las ideas de los alumnos de enseñanza secundaria sobre la corriente eléctrica. Innovaciones didácticas. Recuperado https://raco.cat/index.php/Ensenanza/article/view/51376.
[3] Guerrero, M. (2025). Constructos teóricos sobre los factores pedagógicos que inciden en el desarrollo de procesos cognitivos superiores en el aprendizaje de circuitos eléctricos. Tesis doctoral. Doctorado en educación. Universidad Pedagógica Experimental Libertador Instituto Pedagógico Rural "Gervasio Rubio.
[4] Glaser, B. y Strauss, A. (1967). The discovery of grounded theory: Strategies for qualitative research. New York: Aldine. http://www.sxf.uevora.pt/wp-content/uploads/2013/03/Glaser_1967.pdf
[5] Piaget, J (1991). Seis estudios de psicología. Editorial Labor. S. A., (1a edición). España.
[6] Vygotsky, L. S. (1978). Mind in Society: Development of Higher Psychological Processes (M. Cole, V. Jolm-Steiner, S. Scribner, & E. Souberman, Eds.). Harvard University Press. https://doi.org/10.2307/j.ctvjf9vz4
[7] Sweller, J. (1988). Cognitive load during problem solving: Effects on learning. Cognitive Science, 12(2), 257-285. https://doi.org/10.1016/0364-0213(88)90023-7
[8] Llanga, E., Montesdeoca, D., y León, S. (2019). El pensamiento y el razonamiento como un proceso cognitivo en el desarrollo de las ideas. Revista caribeña de ciencias sociales, 6 (1), 947-104. https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=9150921
[9] Ríos Cabrera, P. (2014). La aventura de aprender. Editorial Cognitus, (5a ed.). Venezuela.
[10] Rivas, M. (2008). Procesos cognitivos y aprendizaje significativo. Editorial Comunidad de Madrid, España.
[11] Harlen, W. (1989). Enseñanza y aprendizaje de las ciencias. Ediciones Morata (6ª. edición), Madrid.
[12] Wing, J. (2006). Computational thinking. Communications of the ACM, 49 (3), 33–35. https://goo.gl/CHS4Yp.
[13] Becerra, D. (2014). Estrategia de aprendizaje basado en problemas para aprender circuitos eléctricos. Revista Innovación educativa, 14(64), 73-99. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1665-26732014000100007&lng=es&tlng=es.
[14] Ministerio de Educación Nacional (2017). Documento de orientaciones técnicas, administrativas y pedagógicas para la atención educativa a estudiantes con discapacidad en el marco de la educación inclusiva. Bogotá: Autor
[15] Semrud-Clikeman, M. y Teeter, P. A. (2009). Child neuropsychology. Assessment and interventions for neurodevelopmental disorders. editorial Springer (2.ª ed.). Nueva York.
[16] Díaz Barriga, F. (2002). Estrategias docentes para un aprendizaje significativo, una interpretación constructivista. México: McGraw-Hill Interamericana.
[17] Herrera-Mora, D., Munar-Torres, Y., Molina-Achury, N., y Robayo-Torres, A. (2019). Desarrollo infantil y condición socioeconómica. Artículo de revisión. Revista de la Facultad de Medicina, 67(1), 145-152. https://doi.org/10.15446/revfacmed.v67n1.66645
[18] Gómez, l., Muñoz, L. y Londoño-Vásquez, D. (2019). El papel del docente para el logro de un aprendizaje significativo apoyado en las TIC. Revista Encuentros, 17(2), 118-131. https://www.redalyc.org/journal/4766/476661510011/html/#:~:text=Adem%C3%A1s%2C%20el%20papel%20del%20docente,de%20conocimientos%2C%20habilidades%20y%20valores.

AUTORIZACIÓN Y RENUNCIA.
Los autores del presente artículo autorizan al TecNM/Instituto Tecnológico de Zacatepec para publicar el escrito en el libro electrónico del CITID 2025. El TecNM/ITZ o los editores no son responsables ni por el contenido ni por las implicaciones de lo que está expresado en el escrito.

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

EXPERIENCIAS EN LA CREACIÓN DE ESTRATEGIAS DOCENTES CON EL EMPLEO DE LA IA.

Claudia Gabriela Bustillos Gaytán[1], Ana Celia Campos Hernández[2]

1Maestra en Tecnología de la Información, Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Zacatepec, Dpto. Sistemas Computacionales, claudia.bg@zacatepec.tecnm.mx, 734342110 ext. 277, CP 62780.

2Doctora en Ciencias Técnicas, Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Zacatepec, Dpto. Sistemas Computacionales, celia.ch@zacatepec.tecnm.mx, 734342110 ext. 277, CP 62780.

Resumen -- La Inteligencia Artificial (IA) se ha convertido en una herramienta clave en el contexto educativo, permitiendo transformar la manera en que los docentes diseñan e implementan estrategias de enseñanza-aprendizaje. Este trabajo presenta los resultados de una encuesta aplicada a docentes y estudiantes del área de Sistemas Computacionales del Instituto Tecnológico de Zacatepec, con el objetivo de identificar el nivel de uso, fines y percepción del empleo de herramientas de IA. Asimismo, se describen dos experiencias concretas de aplicación de ChatGPT como asistente en la generación de actividades didácticas. Los hallazgos permiten reflexionar sobre el potencial de estas tecnologías para motivar a los estudiantes, desarrollar competencias clave y optimizar la labor docente.

Palabras Claves: Inteligencia Artificial, Estrategias Docentes, Herramientas de IA

Abstract -- Artificial Intelligence (AI) has become a key tool in the educational context, transforming the way teachers design and implement teaching-learning strategies. This paper presents the results of a survey conducted among teachers and students in the Computer Systems area of the Instituto Tecnológico de Zacatepec, aiming to identify the level of use, purposes, and perceptions regarding the employment of AI tools. In addition, two specific experiences using ChatGPT as an assistant in the design of didactic activities are described. The findings allow for reflection on the potential of these technologies to motivate students, develop key competencies, and optimize teaching performance.

Keywords: Artificial Intelligence, Teaching Strategies, AI Tools

INTRODUCCIÓN

Aunque la Inteligencia Artificial (IA) tiene más de medio siglo de existencia y ha sorprendido con sus avances en distintas etapas, los últimos diez años han sido especialmente reveladores. En este periodo, la IA se ha integrado de forma natural en la vida cotidiana. Al situarla en el contexto educativo, es evidente que la IA se ha convertido en una herramienta fundamental. No solo apoya la gestión administrativa, sino que también facilita la creación de estrategias didácticas diversas. Estas estrategias promueven la motivación y fortalecen el aprendizaje desde distintos enfoques. Motivar es una acción esencial para todo docente que desea captar la atención de sus estudiantes. Esta motivación, además, debe nacer también desde el estudiante, quien debe buscar aprender con o sin la guía del profesor. [5][7]

Desde la perspectiva del aprendizaje, el uso adecuado de herramientas de IA puede convertirse en un verdadero motor para el desarrollo de habilidades. Estas herramientas ofrecen un abanico de recursos accesibles para el estudiante. No obstante, su efectividad dependerá de si se emplean como complemento al esfuerzo personal, y no como un simple sustituto del trabajo individual. [8]

DESARROLLO

Algunas herramientas de IA interesantes.

Existen numerosas herramientas de IA que han sido diseñadas para asistir tanto a docentes como a estudiantes. ChatGPT, por ejemplo, se ha convertido en un asistente virtual ampliamente utilizado. Su utilidad no se limita a tareas administrativas, sino que permite generar estrategias de aprendizaje que estimulan el pensamiento crítico y la creatividad, contribuyendo al desarrollo de competencias clave. [3][6]

Algunos importantes recursos de IA que han abierto completamente el panorama de herramientas de los docentes, por sólo mencionar algunos, son:

- Para brindar asesoría y tutoría virtual: Chatbots y Khanmigo.
- Para realizar evaluaciones diversas y generar preguntas evaluativas: Gradescope, Sistemas de evaluación automatizados y MagicSchool.
- Para hacer recomendaciones de cursos y recursos docentes: Coursera
- Para que los docentes generen fácilmente contenidos incluso interactivos: Jasper, Canva, Edcafe.
- Para escribir contenidos textuales con buena gramática y de forma correcta: QuillBot, Grammarly.

…, etc. [1][2]

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

En el Instituto Tecnológico de Zacatepec, el uso de estas herramientas no es homogéneo entre las distintas áreas.

Tabla 1: Resultados de la encuesta realizada a los profesores del área de Sistemas Computacionales

Pregunta	*Respuesta*	
	Si	*%*
¿Ha utilizado o utiliza herramientas de IA en el proceso de aprendizaje?	*106*	*97*
¿Su utilización le ha permitido generalmente sustituir su esfuerzo de aprendizaje?	*20*	*16*
¿Su utilización le ha permitido generalmente potenciar su esfuerzo de aprendizaje?	*94*	*81*
¿Con la utilización de la IA ahorra tiempo importante solamente al hacer su tarea?	*40*	*34*
¿Con la utilización de la IA ahorra tiempo importante en el aprendizaje de los temas y además al hacer su tarea?	*74*	*65*
Al utilizar la IA, los resultados que le brinda, ¿los utiliza tal cual, sin revisarlos o incluso enriquecerlos?	*18*	*16*
Al utilizar la IA, considera usted que los resultados que le brinda ¿siempre son perfectos, lógicos, sin necesidad de modificación para emplearlos?	*22*	*19*
¿La herramienta de IA que usted más emplea es ChatGPT?	*75*	*66*

Aunque se han ofrecido cursos institucionales, los docentes adoptan estas herramientas con diferentes niveles de profundidad. En contraste, los estudiantes, como nativos digitales, muestran un mayor dominio. Sin embargo, este uso intensivo no siempre se traduce en un manejo ético. [4]

¿Qué aplicaciones de IA se utilizan en Ingeniería en Sistemas Computacionales, cómo y quienes?

A partir de la experiencia acumulada en aula y de observar los comportamientos de nuestros estudiantes y compañeros docentes, es fácil imaginar que la IA es empleada cotidianamente, ahora bien, ¿en qué medida y cómo? Para conocer mejor la situación, se aplicaron dos encuestas: una a 16 docentes y otra a 118 estudiantes del área de Sistemas Computacionales. Los resultados muestran que:

- El 80% de los docentes utilizan IA en su práctica docente.
- El 88% afirma que estas herramientas les permiten ahorrar tiempo.
- Solo el 44% las utiliza para generar estrategias de enseñanza.

En el caso de los estudiantes:

- El 97% utiliza herramientas de IA.
- El 81% considera que la IA potencia su aprendizaje.
- El 66% usa principalmente ChatGPT.

A continuación, en las tablas 1 y 2 se evidencian los resultados obtenidos con las encuestas aplicadas a profesores y estudiantes.

Tabla 2: Resultados de la encuesta realizada a los estudiantes del área de Sistemas Computacionales.

Pregunta	*Respuesta*	
	Si	*%*
¿Ha utilizado o utiliza herramientas de IA en el proceso de enseñanza?	*13*	*80*
¿Las utiliza para la gestión del curso?	*13*	*80*
¿Las utiliza para generar estrategias de enseñanza/aprendizaje?	*7*	*44*
¿Con la utilización de la IA ahorra tiempo importante al hacer su labor?	*14*	*88*
Al utilizar la IA, los resultados que le brinda, ¿los utiliza tal cual, sin revisarlos o incluso enriquecerlos?	*2*	*12*
Al utilizar la IA, considera usted que los resultados que le brinda ¿siempre son perfectos, lógicos, sin necesidad de modificación para emplearlos?	*6*	*38*
¿La herramienta de IA que usted más emplea es ChatGPT?	*13*	*80*
¿Su aprendizaje de las herramientas de IA ha sido autodidáctico?	*2*	*12*
¿Su aprendizaje de las herramientas de IA ha sido a través de cursos?	*14*	*88*
¿Ha utilizado alguna otra herramienta de IA además del ChatGPT?	*13*	*80*

Reflexionando sobre los resultados mostrados en las tablas anteriores, se aprecia:

- Se confirma que el uso más frecuente de las herramientas de IA se presenta en los estudiantes, lo cual es lógico, pero no tan deseable, en tanto se están desperdiciando recursos que pueden potenciar sustantivamente la labor del docente, sobre todo para aquel que carece de experiencia docente.
- Los docentes conocen y emplean las herramientas que han aprendido básicamente a través de capacitaciones y eso implica que demoran un tiempo en lograr cierto dominio en ellas. [9]
- Los estudiantes, predominantemente de forma autodidáctica, hacen uso de dichas herramientas y logran el dominio rápidamente.
- La mayoría de los docentes emplean las herramientas para la gestión del curso, lo cual es

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

loable, pero no en igual medida para la generación de estrategias de enseñanza que podría mejorar mucho el proceso de aprendizaje, hacerlo más motivante, completo y sobre todo incentivar el pensamiento y la creatividad de los estudiantes, aspectos que no se presentan frecuentemente en la actualidad y son competencias básicas que debemos fomentar en los estudiantes de ingeniería. [10][11]

- Se observó que algunos estudiantes tienden a aceptar los resultados generados por IA sin cuestionarlos ni validarlos. Esta actitud impide el desarrollo de habilidades analíticas y críticas necesarias para su formación. [5]
- No obstante, se encontraron casos exitosos donde los docentes, al emplear IA en el diseño de actividades, fomentaron el pensamiento reflexivo en sus estudiantes. Esto demostró que el uso guiado de estas herramientas puede enriquecer el proceso educativo.[3]
- Sería interesante contrastar los resultados de la presente encuesta con los que se obtendrían al hacerlas en otras áreas de la institución.

A partir de este diagnóstico, se implementaron dos experiencias de aula:

En la asignatura "Taller de Investigación I", se diseñó una actividad apoyada por IA para clasificar tipos de investigación en ciencias computacionales.

En "Ingeniería de Software", se utilizó IA para apoyar la transición del análisis al diseño de software, fortaleciendo competencias prácticas.

Ambas actividades incluyeron instrumentos de evaluación generados con ayuda de IA y promovieron el aprendizaje activo y significativo.[12][13]

Experiencia No 1: Impartición del Tema 1 de Taller de Investigación I que se centra en la enseñanza de los diferentes tipos de investigación existentes.

Es importante destacar a priori que este tema tiene un marcado contenido conceptual, que es una asignatura de tronco común en todas las ingenierías, pero dependiendo de la que se trate en cuestión, puede tener cierta modificación, en tanto no todas las ingenierías son iguales, ni con igual frecuencia se realizan investigaciones de igual tipo.

Igualmente es loable destacar que, por la naturaleza del contenido del tema, muchas veces es poco motivante su aprendizaje por parte de los estudiantes y su "aprendizaje" se reduce a escuchar al profesor en algunos casos y a plasmar lo que se les informa en alguna evaluación en un corto tiempo posterior o en limitarse a hacer una búsqueda bibliográfica de dichos conceptos, si es posible utilizando ChatGPT para no emplear mucho tiempo y con ello es evaluado su conocimiento. Es evidente que así casi nunca se les ejemplifica en su área de conocimiento.

La experiencia consistió en idear una actividad que rompiera con el esquema descrito y para ello se empleó justamente ChatGPT, se le solicitó a esta herramienta concebir una actividad de enseñanza/aprendizaje (y así expresamente se le precisó) donde el estudiante a partir de un tema que se le entregue sobre ciencias computacionales y que resulte relevante para él, pudiera con ayuda de la propia herramienta, buscar las posibles investigaciones que se estuvieran haciendo actualmente o que serían interesantes realizar, en cada una de la posibles clasificaciones. Las clasificaciones coincidirían con las más frecuentes en el área de conocimiento. Finalmente, el resultado de la búsqueda sería expuesto a sus compañeros. De igual forma se le solicitó a la herramienta que generara una rúbrica que facilitara la evaluación de la actividad.

En específico la actividad que se obtuvo fue: A partir de la información analizada en clases y lo que refiere la literatura y haciendo uso de ChatGPT, a partir de un tema que sea de su interés dentro de su área, ejemplifique a través de al menos cinco clasificaciones distintas posibles investigaciones y destaque en que consiste dichas investigaciones. Los resultados obtenidos por usted serán compartidos en plenaria y entregadas por escrito al profesor. La rúbrica se ilustra en la tabla 3.

Tabla 3: Rúbrica de la actividad de enseñanza/aprendizaje de la clasificación de las investigaciones

Aspectos	Indicadores	Cumple	
		Si	No
Cantidad de clasificaciones 10p. 5 c/u	Ejemplifica las clasificaciones mencionadas		
	Destaca 5 clasificaciones de las conocidas		
Definición conceptual 30p. 15 c/u	Explica cada concepto de forma adecuada con fluidez.		
	Es explícito y puntual al definir cada clasificación		
Organización y claridad 5p. 2.5 c/u	Plasma la clasificación de forma organizada.		
	Cada clasificación se distingue perfectamente		
Asp. Generales 5 p.	Redacción correcta en español con ortografía el informe.		
Total: 50 puntos			

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

Experiencia No 2: Impartición del Tema 2 de Ingeniería de Software que se centra en la enseñanza del proceso del Análisis al Diseño.

Para ubicar al lector no experto en la materia, este tema tiene un marcado contenido en la transición del análisis al diseño, una fase crítica donde las necesidades y requerimientos identificados en el análisis se transforman en una solución estructurada que guiará la implementación del software. Así mismo esta asignatura es fundamental dentro del plan de estudio de la carrera de ingeniería en Sistemas Computacionales, que tiene por objetivo proporcionar los principios, metodologías y herramientas necesarias para el desarrollo de sistemas de software eficientes, escalables y mantenibles. En particular dicho tema tiene una competencia específica a alcanzar el desarrollo de soluciones de software, considerando la metodología y herramientas para la elaboración de un proyecto aplicativo en diferentes escenarios.

Con relación a la naturaleza del contenido del tema, en general el aprendizaje del contenido se hace difícil para los estudiantes y sin embargo es fundamental, lo que provoca que una vez cursada la materia se tienda a no aplicarlos posteriormente, ello trae consecuencias importantes en términos del diseño, que es una etapa necesaria en cualquier trabajo de elaboración de un software a solicitud de un usuario, lo cual es cotidiano en un ingeniero que egrese en el área, más aún, desde la propia realización de la residencia se evidencia que estos conocimientos son carentes en el futuro profesionista.

¿En qué consistió la experiencia? Se concibió una actividad que realmente motivara al alumno y que comprendiera e interiorizara la esencia del diseño y alcanzara las habilidades prácticas necesarias en ello, para lo cual se utilizó también ChatGPT, solicitándose a esta herramienta que sugiriera una actividad de enseñanza/aprendizaje donde el estudiante comprenda y aplique la transición del análisis al diseño en el desarrollo de software, utilizando herramientas de IA para optimizar el proceso. De igual forma se le solicitó a la herramienta que generara una rúbrica que facilitara la evaluación de la actividad.

En específico la actividad que se obtuvo fue:

Inicio: Presentar una explicación breve sobre la Ing. de Software y su importancia, el proceso de cambio del análisis al diseño y se ejemplifica cómo la IA facilita este cambio.

Etapa 1: Modelo de Análisis:

Los estudiantes conformados en equipos eligen un problema para desarrollar un software. Deben elaborar el modelo de análisis, incluyendo: Casos de uso y Modelo de dominio (clases conceptuales y relaciones). Pueden emplear herramientas de IA como ChatGPT, GitHub Copilot o Modelado UML Asistido por IA para generar ideas.

Etapa 2: Transición al Diseño:

A partir del análisis los equipos generan los modelos de diseño: Diagrama de clases (con atributos y métodos) y Diagrama de secuencia (para la interacción entre objetos). Pueden utilizar herramientas de IA para: Refinar la estructura de clases y relaciones, validar el modelo de diseño y su coherente con los requisitos analizados y generar código base a partir del diagrama de clases.

Etapa 3: Reflexión grupal:

Cada equipo presenta su trabajo en clase y se hace reflexión guiada con preguntas como:
¿Cómo facilitó la IA la transición del análisis al diseño?, ¿Qué desafíos enfrentaron al integrar IA en su proceso? y/o ¿Cómo podrían mejorar el uso de IA en futuros proyectos de software?

Su rúbrica se ilustra en la tabla 4.

Tabla 4: Rúbrica de la actividad de enseñanza/aprendizaje del Análisis al Diseño.

Aspectos		*Cumple*	
		Si	*No*
Claridad y precisión de los modelos de análisis (30 ptos.)	*¿El modelo de casos de uso es claro y bien estructurado?*		
	¿El modelo de dominio presenta clases y relaciones correctamente definidas?		
	¿Los modelos reflejan adecuadamente los requisitos del sistema?		
Coherencia en la transición del análisis al diseño (30 ptos.)	*¿El diseño mantiene consistencia con los modelos de análisis planteados?*		
	¿El diagrama de clases está bien definido en relación con el modelo de dominio?		
	¿El diagrama de secuencia representa correctamente la interacción entre los elementos del sistema?		
Uso adecuado de herramientas de IA (20 ptos.)	*¿El uso de IA contribuyó a mejorar la precisión o eficiencia del análisis y diseño?*		
	¿El equipo utilizó la IA de manera crítica y no como una		

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

	simple generación automática de contenido?		
Presentación y argumentación del proceso (20 ptos.)	*¿El equipo explicó de manera clara cómo se dio la transición del análisis al diseño?*		
	¿La presentación fue estructurada, con argumentos sólidos y comprensibles?		
Total: 100 puntos			

DISCUSIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS.

Teniendo como punto de partida los resultados de la encuesta, que sólo permitieron verificar las creencias que previamente se tenían y realizadas las experiencias descritas en las materias mencionada que abordan las problemáticas tanto de una asignatura común a todas las ingenierías, como a las propias el área y por supuesto sintetizando los resultados observados en dichas experiencias se encuentra que:

- Existe un conjunto prácticamente infinito de actividades de enseñanza/aprendizaje que el docente puede crear y que son verdaderamente interesantes, motivadoras y creativas en cualquier materia, que permiten incentivar el pensamiento del estudiante y desarrollar otras tantas competencias imprescindibles, haciendo uso de las herramientas de IA. Más aún, le pueden brindar una propuesta de instrumentos de evaluación que le permitirán medir de forma certera el aprendizaje de los estudiantes.
- Algo que verdaderamente es importante destacar del conjunto prácticamente infinito de actividades mencionadas, es que las herramientas de IA le pueden dar un contexto a las mismas muy propio al área a que esté destinada la actividad, con problemáticas muy interesantes hasta para el profesor más experimentado en la propia área, que le costaría trabajo imaginar y ello es un plus importante, pues coadyuva a que la impartición de las materias estén muy cercana al perfil de la propia carrera y por ende, los estudiantes perciban la aplicabilidad de dicho conocimiento.
- Desde luego que las herramientas son excelentes para apoyar la gestión docente, pero al menos para las autoras, son una fuente increíble de recursos para facilitar el diseño de verdaderas instrumentaciones didácticas con actividades poco frecuentes, motivadoras, dirigidas de manera muy concreta al desarrollo de las competencias que los programas especifican, perfectamente dosificadas y otro tanto sucede con la forma en que se evaluarán los resultados del aprendizaje, con objetividad, abarcando todo el espectro de aspectos posibles a considerar e integrando conocimiento.
- Se logró en todos los casos una marcada motivación por el aprendizaje de los contenidos, se les mostró de manera convincente la utilidad de estos en la vida profesional y ello a su vez contribuyó a un mejor y mayor aprendizaje de los temas.
- En las materias de marcado carácter práctico, el uso de las herramientas de IA potencian la creación de habilidades prácticas y por ello fortalecen en mayor y mejor manera el conocimiento, sin grandes gastos de recursos educativos.
- Por la propia naturaleza de los estudiantes actuales con sus virtudes digitales y carencias: de atención, de hábitos de estudio, de formación básica en muchos casos, las experiencias lograron que se pudieran aprovechar sus virtudes y trabajar indirectamente en las carencias y al final lograr un aprendizaje progresivo y una sensación agradable en ellos al transitar por tales experiencias.
- Se percibió que los estudiantes aprecian mucho más las clases presenciales que se caractericen por el empleo de actividades que involucren a las herramientas de IA, quizás por sentirse más imbuidos en el mundo digital contemporáneo, en el cual ellos tienen dominio por sí mismos.
- De forma análoga se apreció que los estudiantes muestran más destreza en la operación de las herramientas desde el punto de vista digital, pero no así del dominio de las propias herramientas en el contexto del aprendizaje, en lo cual la experiencia de uso del profesor resulta ser invaluable y ello refuerza la figura del docente en el contexto educativo y más aún, el que los estudiantes recurran a él con frecuencia para reforzar el conocimiento adquirido.
- Tanto la concepción de las actividades con los asistentes virtuales como la propia realización en aula de estas actividades, además de ser un proceso de aprendizaje para los estudiantes lo es para el docente, pues al menos en las experiencias realizadas se enriqueció notablemente el acervo profesional de las autoras, en aspectos pedagógicos y profesionales y cada día en que se vuelven a emplear se aprende algo nuevo de ellas y de las posibilidades de empleo en las diferentes materias que se imparten.

CONCLUSIONES.

A partir de las reflexiones sintetizadas, se concluye que:

1. Integración pedagógica efectiva de la IA: La incorporación de herramientas de IA en la docencia universitaria de sistemas computacionales ha demostrado posibilitar estrategias didácticas más efectivas y motivadoras, plenamente alineadas con el enfoque por competencias. Las experiencias analizadas evidencian que la IA facilita la personalización del aprendizaje (adaptando

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

contenidos y retroalimentación al ritmo y nivel de cada estudiante) y proporciona retroalimentación inmediata, lo que incrementa el compromiso activo del alumnado con su formación. Asimismo, el uso de estas herramientas favorece una evaluación integral del aprendizaje, al generar diversas evidencias del desempeño estudiantil que complementan la evaluación tradicional. En conjunto, estos hallazgos subrayan que el aprovechamiento pedagógico de la IA puede mejorar la calidad del proceso de enseñanza-aprendizaje en la educación superior, especialmente en áreas tecnológicas.[14]

2. Adopción y beneficios para el profesorado: El profesorado universitario muestra un creciente interés y adopción de las herramientas de IA como apoyo en su práctica docente. En este estudio, los docentes reportaron que dichas herramientas les permitieron optimizar las tareas rutinarias de enseñanza (por ejemplo, generar cuestionarios, retroalimentar ejercicios o calificar pruebas objetivas), liberando tiempo para actividades de mayor valor educativo. Esta tendencia se refleja también a nivel global: se estima que alrededor del 60% de los docentes ya emplean herramientas de IA en el aula para agilizar labores administrativas, lo que les ha permitido centrarse más en brindar retroalimentación significativa y en facilitar actividades colaborativas.

3. Uso e impacto en el estudiantado: Desde la perspectiva estudiantil, se observa igualmente una adopción creciente de la IA como parte de las experiencias de aprendizaje. Este uso extensivo de la IA por parte del alumno resalta la importancia de que las instituciones y docentes orienten su empleo ético y responsable.[15]

4. Resultados de aprendizaje y desempeño: La evaluación del impacto de las experiencias de aula apoyadas con IA sugiere resultados positivos en el aprendizaje. En las asignaturas intervenidas, se registró un aumento en la participación activa de los estudiantes y en la calidad de sus entregables, junto con una mejora en indicadores de desempeño académico.

5. Propuestas para trabajos futuros: A partir de este estudio se delinean líneas de investigación futuras que resultan pertinentes para ampliar y profundizar el conocimiento sobre la IA en la educación superior. Sería valioso replicar estas experiencias de integración de herramientas de IA en la enseñanza en otras áreas disciplinares más allá de los sistemas computacionales con el fin de evaluar la generalización de los beneficios observados y adaptar las estrategias didácticas a diferentes contextos. También se recomienda realizar un cabo de estudios longitudinales que examinen el impacto de las herramientas de IA en el desarrollo de competencias a lo largo del tiempo, finalmente, resulta relevante investigar estrategias de formación docente específicas para la adopción efectiva de la IA.

6. Los estudiantes del siglo XXI agradecen estrategias de aprendizajes como las ilustradas.

AGRADECIMIENTOS
Se desea agradecer el apoyo dado por las autoridades institucionales para la realización de la experiencia pedagógica, en especial al Departamento de Sistemas y Computación, que nos brindó la oportunidad de obtener la mayoría de la valiosa información que nos permitió hacer el análisis mostrado.

BIBLIOGRAFÍA

[1] Baltazar, C. (2023). Herramientas de IA aplicables a la educaciónRevista de. Revista Tecnología Lluvia, 2(2). Ecuador.
[2] Berrones, LP, y Salgado, SA (2023). La aplicación de la inteligencia artificial para mejorar la enseñanza y el aprendizaje en el ámbito educativo. Puerta de investigación. https://www.researchgate.net
[3] Campos, A C y Bustillos, C G (2021). Análisis pedagógico de las carencias de habilidades de los estudiantes de sistemas computacionales. Congreso CITID 2021. México.
[4] Campos, A C, Bustillos, C G, & Villegas, L. (2023). Un caso de estudio que evidencia el daño mayor, en términos educativos, provocado por el COVID. Congreso CITID 2023. México.
[5] Frade Rubio, L. (2009). Desarrollo de competencias en educación: Desde preescolar hasta bachillerato. Inteligencia Educativa.
[6] González Vallejo, R. (2024). Inteligencia artificial aplicada a la enseñanza y el aprendizaje. Dykinson. Colección Conocimiento Contemporáneo. ISBN: 978-84-1170-769-5.
[7] Martínez, ME y Sánchez, JR (2023). La inteligencia artificial como apoyo en la docencia universitaria: Aplicaciones, beneficios y desafíos. Revista de Tecnología Educativa, 18(1), 45-61. https://doi.org/10.1234/rte.v18n1.2023.45
[8] Ramírez, PL y Ortega, V. (2022). ChatGPT en el aula: ¿asistente educativo o riesgo académico?. Educación y Futuro, 12(2), 101-118.
[9] Ortega, L., & Méndez, D. (2023). Percepciones de los docentes sobre la implementación de IA en entornos híbridos de enseñanza. Congreso Latinoamericano de Educación Superior, 2023.

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

[10] UNESCO. (2021). Inteligencia artificial en la educación: Desafíos éticos, pedagógicos y tecnológicos. Oficina Regional de Educación para América Latina y el Caribe. https://unesdoc.unesco.org/

[11] Pérez, R., & Mendoza, A. (2023). Uso de asistentes virtuales basados en IA para la retroalimentación formativa en educación superior. Revista Iberoamericana de Educación a Distancia, 26(2), 89-110. https://doi.org/10.5944/ried.26.2.32345

[12] OCDE. (2021). IA y el futuro de las competencias, Volumen 1: Capacidades y evaluaciones. Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos. https://www.oecd.org/education/ai-future-skills/

[13] Díaz, R., & Márquez, J. (2023). El rol de la inteligencia artificial en la evaluación automatizada del aprendizaje. Educación Digital, 9(3), 133-147.

[14] López, H., & Barrera, M. (2022). Transformación de la práctica docente mediante herramientas digitales inteligentes. Revista de Educación Innovadora, 11(4), 75-92.

[15] Núñez, C. (2023). Ética y responsabilidad en el uso de inteligencia artificial en contextos educativos. En J. Torres (Ed.), Innovación educativa con tecnología (págs. 115-130). Editorial Académica.

AUTORIZACIÓN Y RENUNCIA.

Las autoras del presente artículo autorizan al TecNM/Instituto Tecnológico de Zacatepec para publicar el escrito en el libro electrónico del CITID 2025. El TecNM/ITZ o los editores no son responsables ni por el contenido ni por las implicaciones de lo que está expresado en el escrito.

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

ASPECTOS RELEVANTES EN EL ENLACE DEL ENFOQUE DIDÁCTICO CONSTRUCTIVISTA CON LA DIVERSIÓN EN EL DISEÑO DE VIDEOJUEGOS FORMATIVOS

Arístides Caballero Alfaro[1], Juan Reyes Reyes[2], Gloria Lilia Osorio Gordillo[3], Carlos Manuel Astorga Zaragoza[4], Rodolfo Amalio Vargas Méndez[5]

[1]Mtro.Arístides Caballero Alfaro, [2]Dr.Juan Reyes Reyes, [3]Dra. Gloria Lilia Osorio Gordillo, [4]Dr. Carlos Manuel Astorga Zaragoza, [5]Dr. Rodolfo Amalio Vargas Méndez, TecNM/ Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, Coordinación de Ciencias de la Ingeniería, Interior Internado Palmira S/N, Col. Palmira, Cuernavaca, Morelos, 62490, MÉXICO

Resumen -- En este estudio se examina la relación entre los conceptos claves del enfoque didáctico constructivista y los tipos de diversión identificados en los videojuegos comerciales, analizando la intersección que de esta relación emerge, se plantea que la actual percepción de los juegos formativos como "aburridos" surge de una falta de comprensión sobre cómo integrar efectivamente estas dos áreas. Por lo anterior, se propone un marco de referencia y dos modelos que alinean cada actividad constructivista con su correspondiente tipo de diversión, potenciando así tanto el aprendizaje como la motivación a través del juego. Este enfoque busca proponer una estrategia para aplicarse en el desarrollo de los videojuegos formativos de tal forma que estas herramientas puedan mantener el interés y permitan generar un enganche más profundo para los usuarios, facilitándoles un aprendizaje significativo y duradero que trascienda más allá de la simple memorización de la información.

Palabras Clave: Aprendizaje, Constructivismo, juegos formativos, lúdico, diseño de juegos.

Abstract -- This study examines the relationship between the key concepts of the constructivist didactic approach and the types of fun identified in commercial video games, analyzing the intersection that emerges from this relationship, and suggests that the current perception of training games as “boring” stems from a lack of understanding of how to effectively integrate these two areas. Therefore, a frame of reference and two models are proposed that align each constructivist activity with its corresponding type of fun, thus promoting both learning and motivation through play. This approach seeks to propose a strategy to be applied in the development of training video games in such a way that these tools can maintain interest and generate a deeper engagement for users, facilitating meaningful and lasting learning that goes beyond the simple memorization of information.

Keywords – Learning, Constructivism, educational games, playfulness, game design.

INTRODUCCIÓN

Antecedentes del problema

La integración de tecnologías educativas ha evolucionado significativamente en las últimas décadas, pasando de simples presentaciones digitales a entornos interactivos complejos. Los videojuegos educativos emergieron como una promesa para revolucionar el aprendizaje. Sin embargo, la realidad actual revela una brecha significativa entre el potencial teórico y la implementación práctica de estos recursos educativos. La tendencia ha resultado en productos que o bien priorizan el aprendizaje a expensas del entretenimiento, o bien enfatizan la diversión sin una base pedagógica sólida. [1]

Esta disonancia plantea un reto crucial para educadores y desarrolladores, quienes deben encontrar el equilibrio adecuado entre diversión y aprendizaje efectivo para maximizar el impacto de los videojuegos en el proceso educativo.

Se tiene evidencia de utilización del enfoque constructivista en videojuegos como lo podemos encontrar en casos como el de “Minecraft: Education Edition, que permite a los estudiantes explorar conceptos matemáticos y científicos en un entorno interactivo, fomentando la creatividad y el trabajo colaborativo” [2] y actualmente en el caso de “Roblox Education”, que ofrece a los estudiantes la oportunidad de aprender programación y diseño de juegos mientras colaboran en proyectos creativos, fortaleciendo así sus habilidades técnicas y sociales [3] pero no están alineados a una currículo o agenda educativa y no profundizan en la integración del enfoque constructivista y sus actividades. Esto plantea la necesidad de desarrollar marcos educativos que integren de manera efectiva estos videojuegos, asegurando que se alineen con los objetivos curriculares y promuevan un aprendizaje más profundo y significativo.

Los juegos educativos o formativos ya se utilizan, pero existe una falla en cuanto a mantener interesados a los estudiantes en su uso. Para enfrentar esta brecha, es

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

fundamental desarrollar experiencias de aprendizaje más inmersivas que integren elementos narrativos y retos interactivos que capten la atención de los estudiantes y fomenten su participación activa en el proceso educativo [4]

Es aquí donde planteo la propuesta de entender a profundidad el enfoque constructivista y empatar con la metodología formal en desarrollo de videojuegos y su estudio formal sobre los tipos de diversión para enganchar de manera natural al estudiante a través de dinámicas que promuevan la colaboración, la resolución de problemas y el pensamiento crítico, transformando así el aprendizaje en una experiencia atractiva y memorable. [5] Implementar estas estrategias no solo puede mejorar la retención del conocimiento, sino también preparar a los estudiantes para enfrentar desafíos en un mundo laboral cada vez más complejo y dinámico.

Desinterés por el uso de videojuegos educativos
La integración de los videojuegos a la educación ha cobrado relevancia en los últimos años, con un creciente interés por parte de educadores y académicos en explorar su potencial para promover habilidades blandas y técnicas. Ya es común que las universidades dediquen estudios profundos a este tema, como es el caso de la Universidad de Salamanca donde se están realizando investigaciones que demuestran cómo los videojuegos pueden ser utilizados como herramientas efectivas para el aprendizaje interactivo y la colaboración entre los estudiantes. [6].

En la actualidad, el mercado de videojuegos educativos experimenta un crecimiento exponencial, con una valoración global estimada de 200 mil millones de dólares, lo que refleja un creciente interés por parte de instituciones educativas y desarrolladores por crear experiencias de aprendizaje inmersivas y atractivas [7].
No obstante, las investigaciones recientes señalan que la mayoría de estos juegos formativos fallan en mantener el interés de los estudiantes, presentando tasas de abandono superiores al 60%, lo que plantea un reto importante para los diseñadores y educadores en la búsqueda de métodos efectivos que integren el aprendizaje con la diversión [8].

El desinterés y el abandono en los videojuegos educativos son problemas críticos que pueden afectar significativamente la retención de los jugadores y los resultados de aprendizaje. Las tasas de abandono del juego, que reflejan el porcentaje de jugadores que dejan de comprometerse con un juego a lo largo del tiempo, a menudo están influenciadas por factores como la falta de interés o compromiso [9]

Para enfrentar este desafío, es fundamental explorar enfoques innovadores que no solo capten la atención de los estudiantes, sino que también fomenten su participación activa y el desarrollo de habilidades críticas a través del juego. Esta situación plantea interrogantes sobre la efectividad real de los actuales enfoques de gamificación educativa.

Paralelamente, las investigaciones demuestran que los juegos comerciales implementan inadvertidamente principios constructivistas de manera más efectiva que muchos juegos educativos, lo que sugiere la necesidad de un análisis más profundo de cómo estas estrategias comerciales exitosas pueden adaptarse al contexto educativo. [10]

Problema de investigación.
Actualmente el desinterés y/o abandono hacia los videojuegos formativos por parte de los usuarios se evidencia en el bajo índice de participación y compromiso, presentando tasas de abandono superiores al 60% lo que plantea cuestionamientos sobre el diseño e implementación de estos recursos digitales en entornos académicos.

La falta de interés en estos recursos educativos por parte de los usuarios resulta particularmente problemática porque se deja de aprovechar una herramienta que demuestra ser ampliamente eficiente en la mejora del aprendizaje y la retención de conocimientos. Los factores que contribuyen a este problema incluyen la falta de personalización en los contenidos, la escasa interactividad y el diseño poco atractivo de los videojuegos educativos, lo que limita su capacidad para captar y mantener la atención de los estudiantes.

Esta investigación busca comprender cómo se puede mejorar el diseño de videojuegos educativos para aumentar el interés estudiantil, alineando las actividades constructivistas con los diferentes tipos de diversión planteados en las metodologías para desarrollo de videojuegos que puedan crear experiencias educativas que sean tanto pedagógicamente efectivas como intrínsecamente motivadoras.

Objetivos de trabajo.
Objetivo General: Desarrollar un marco teórico que establezca las correspondencias naturales entre actividades constructivistas y lúdicas.

Objetivos específicos.
- Identificar las sinergias naturales entre actividades constructivistas y elementos lúdicos.
- Analizar cómo diferentes tipos de diversión pueden potenciar específicamente distintos aspectos del aprendizaje constructivista.
- Proponer pautas de diseño para la integración efectiva de ambos elementos.

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

- Evaluar casos de éxito donde la complementariedad ha sido lograda efectivamente.

Justificación.
La necesidad de esta investigación se fundamenta en el potencial desaprovechado de los juegos formativos. Al comprender y aprovechar la complementariedad natural entre actividades constructivistas y los tipos de diversión planteados en las metodologías del desarrollo de videojuegos, podemos desarrollar experiencias educativas que sean genuinamente atractivas y efectivas. Esto podrá, no sólo enriquecerá el proceso de aprendizaje, sino que también promoverá la motivación y el compromiso de los estudiantes, permitiéndoles alcanzar un mayor nivel de comprensión y retención de conocimientos.

Esto se traduce en un enfoque educativo más dinámico y participativo, donde los estudiantes no solo absorben información, sino que también aplican sus conocimientos de manera práctica y creativa.
Este análisis permitirá implementar una estrategia que incluye un enfoque didáctico y un recurso tecnológico que se alineen con los objetivos de aprendizaje, facilitando la creación de un ambiente donde el juego y la educación convergen para maximizar el impacto en el desarrollo de habilidades y competencias de los usuarios.

DESARROLLO

Metodología.

Análisis documental de teorías constructivistas.
El enfoque didáctico constructivista se ha nutrido de las contribuciones fundamentales de cuatro teóricos principales: Piaget, Ausubel, Bruner y Vygotsky. Cada uno ha aportado perspectivas únicas que, en conjunto, conforman los pilares del constructivismo educativo moderno.

Cada una de las contribuciones se mantienen vigentes. Piaget dejó como aportes fundamentales al constructivismo, conceptos como; la construcción activa del conocimiento, las etapas del desarrollo cognitivo que permiten comprender las capacidades cognitivas en cada edad que a su vez guían la secuenciación del aprendizaje y el ajuste a condiciones externas, el factor de desarrollo para la construcción del conocimiento, base para el diseño de situaciones de aprendizaje [11].

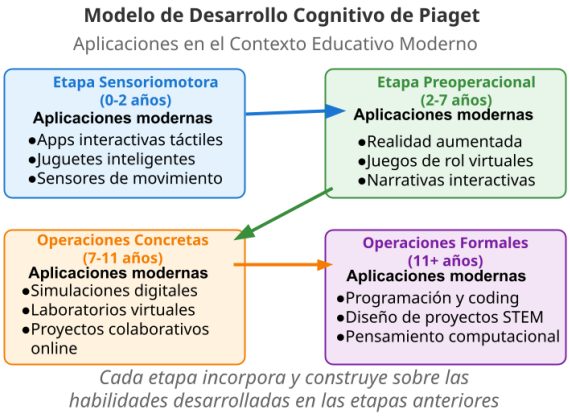


Figura 1. Modelo de Piaget contexto moderno

Ausubel, por su parte, enfatizó la importancia del conocimiento previo en el aprendizaje significativo, sugiriendo que la nueva información debe estar relacionada con lo ya conocido para facilitar una comprensión profunda y duradera. [12].

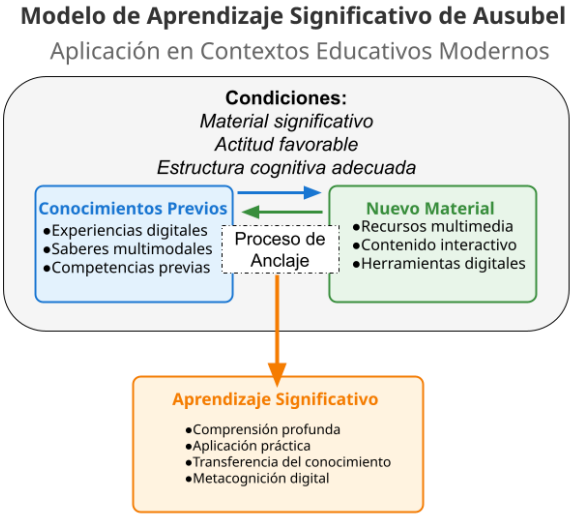


Figura 2. Modelo de Ausubel contexto moderno

Bruner planteó la idea de que el aprendizaje es un proceso activo y social, donde los estudiantes construyen su propio entendimiento a través de la interacción con los demás y la exploración del entorno [13]. Bruner también aporta los modos de representación que son tres formas o sistemas mediante los cuales las personas representan y procesan la información de la realidad [14].

Estos modos de representación incluyen enactivo, que se basa en la acción y la manipulación directa; icónico, que involucra imágenes y representaciones visuales; y simbólico, que utiliza símbolos y lenguaje para expresar conceptos más abstractos.

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

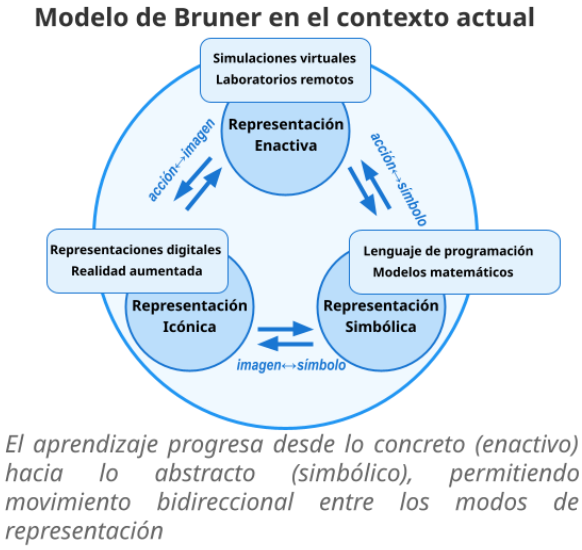


Figura 3. Modelo de Bruner contexto actual

Y Lev Vygotsky planteó que el desarrollo cognitivo ocurre a través de la interacción social, enfatizando la importancia del contexto cultural y del lenguaje en el aprendizaje [15]. El concepto vygotskyano de Zona de Desarrollo Próximo (ZDP) ha sido fundamental para entender cómo los educadores pueden apoyar el aprendizaje de los estudiantes proporcionándoles tareas que están justo más allá de su nivel actual de competencia, permitiendo así un crecimiento significativo [16].

En la actualidad se propone un modelo educativo que integra las cuatro teorías fundamentales del constructivismo adaptadas al contexto moderno.

El modelo integrado de teorías constructivistas es un modelo educativo que integra las cuatro teorías fundamentales del constructivismo adaptadas al contexto moderno. De Piaget incorporan la consideración de las etapas de desarrollo y la construcción activa del conocimiento; de Vygotsky, el aprendizaje colaborativo digital y la mediación cultural a través de herramientas tecnológicas; de Ausubel, la evaluación de conocimientos previos mediante herramientas digitales y la creación de materiales significativos multimedia; y de Bruner, el descubrimiento guiado en entornos virtuales y el andamiaje digital adaptativo [17].

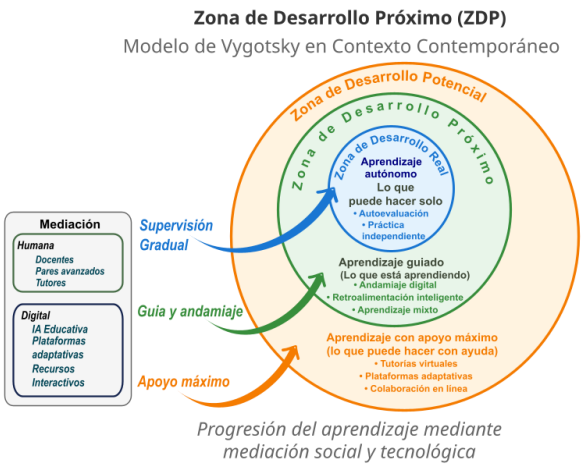


Figura 4. Modelo ZDP de Vygotsky contexto actual

Este modelo se implementa a través de metodologías activas como el aprendizaje basado en proyectos, aula invertida y gamificación, apoyándose en herramientas tecnológicas como plataformas adaptativas y recursos multimedia interactivos [18].

Conceptos clave del enfoque didáctico Constructivista.
El enfoque didáctico constructivista se organiza actualmente a través de componentes esenciales que constituyen un ecosistema de aprendizaje cohesivo. Para comprender las complejidades y amplitud de este enfoque, es imperativo analizar sus conceptos fundamentales, que funcionan como fundamentos interrelacionados y mutuamente solidarios dentro de la práctica educativa. Estos componentes no funcionan de manera independiente; más bien, crean un sistema dinámico que promueve la construcción significativa del conocimiento. [19]

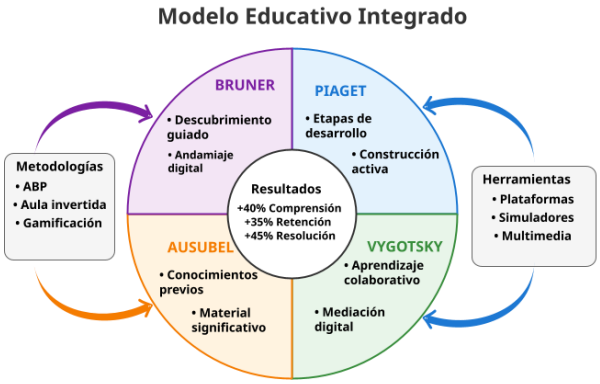


Figura 4. Modelo integrado y el contexto actual

Aprendizaje activo.
En este tipo de aprendizaje se trata de involucrar a los estudiantes, aumentar su motivación a través de actividades prácticas que realmente los hacen pensar y resolver las cosas. Este método ayuda a los estudiantes a

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

hacerse cargo de su propio aprendizaje, desarrollando las habilidades que necesitarán para enfrentar los desafíos de la vida real. [20]

Construcción del conocimiento.
Este proceso implica que los alumnos integren nueva información con sus experiencias previas, facilitando una comprensión más profunda y duradera de los conceptos. Este enfoque no solo mejora la retención de conocimientos, sino que también fomenta el pensamiento crítico y la creatividad al permitir que los estudiantes exploren diferentes perspectivas y soluciones. Este tipo de aprendizaje activo promueve una mayor participación en el aula, dando como resultado un ambiente educativo más dinámico y colaborativo [21].

Importancia del contexto social.
El aprendizaje situado en contextos sociales relevantes mejora significativamente la transferencia de conocimientos y habilidades. Existe una correlación directa entre la contextualización social del aprendizaje y el desarrollo de competencias. Esta relación subraya la necesidad de integrar experiencias del mundo real en el currículo educativo, lo que no solo hace que el aprendizaje sea más significativo, sino que prepara a los estudiantes para enfrentar desafíos en su vida profesional y personal. [22]

Zona de desarrollo próximo.
El concepto de zona de desarrollo proximal, propuesto por Vygotsky, enfatiza la importancia de la interacción social en el aprendizaje, donde los estudiantes pueden alcanzar mayores niveles de comprensión y capacidad con el apoyo adecuado. La colaboración entre pares y la orientación de los educadores son esenciales en este proceso, ya que promueven un ambiente dinámico de aprendizaje que promueva el crecimiento individual y colectivo. [23]

Aprendizaje basado en problemas.
Este enfoque pedagógico fomenta la participación activa de los estudiantes ante situaciones del mundo real, desafiandolos a aplicar sus conocimientos y habilidades para encontrar soluciones efectivas. Este método no solo mejora la retención de conocimientos, sino que también desarrolla habilidades críticas como el pensamiento analítico y la creatividad, esenciales para enfrentar los desafíos contemporáneos. [21]

Reflexión y metacognición.
Estas prácticas permiten a los estudiantes evaluar su propio proceso de aprendizaje, identificando fortalezas y áreas de mejora, ayudándoles a convertirse en aprendices más autónomos y efectivos. Implica que el estudiante podrá resolver problemas de manera más eficiente, a medida que toman conciencia de sus estrategias y métodos de estudio, lo que les permite ajustar su enfoque para un aprendizaje continuo y significativo. [24]

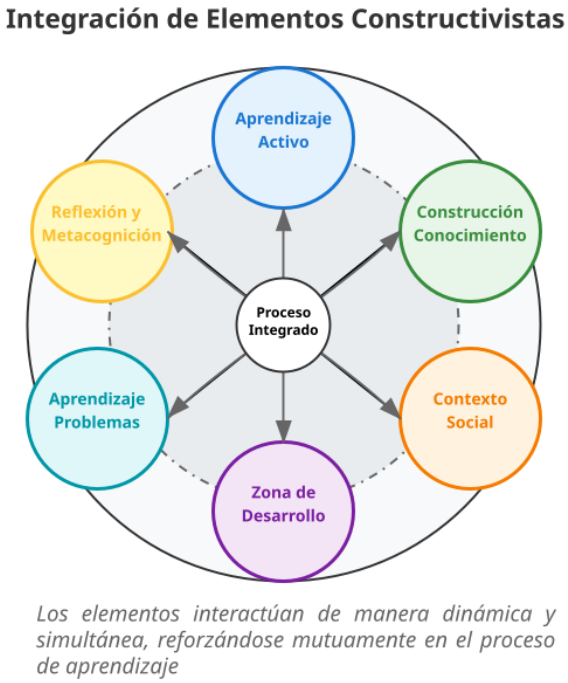


Figura 5. Conceptos claves del enfoque constructivista

Enfoque formal para la comprensión del juego. Para nuestro estudio nos centraremos principalmente en identificar qué hace que los usuarios se sienten atraídos por ciertas experiencias en un juego, explorando factores como la jugabilidad, la estética visual y la conexión emocional que establecen con personajes e historias.

Existe un modelo formal para el estudio del juego en el cual se ha basado la industria del videojuego, que se centra en las mecánicas, las dinámicas y la estética del juego y proporciona un marco valioso para comprender cómo estas experiencias impactan a los jugadores y su interacción con el medio ambiente. Este enfoque permite a los diseñadores de juegos crear experiencias más inmersivas y atractivas, considerando no sólo las reglas del juego, sino también cómo se traducen en emociones y comportamientos dentro del contexto del juego. Es importante identificar que este marco pretende diseñar juegos que no solo sean entretenidos, sino que además fomenten una conexión emocional profunda con los jugadores, lo que puede resultar en una mayor lealtad y satisfacción a largo plazo. Estos componentes permiten a los diseñadores analizar y ajustar cada aspecto del juego, asegurando que las mecánicas no solo sean funcionales, sino que también generen dinámicas que fomenten interacciones significativas y estéticas que resuenen emocionalmente con los jugadores.

Estos componentes son los que hacen divertido y entretenido el proceso de jugar, creando experiencias

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

memorables que pueden atraer a los jugadores una y otra vez [25].

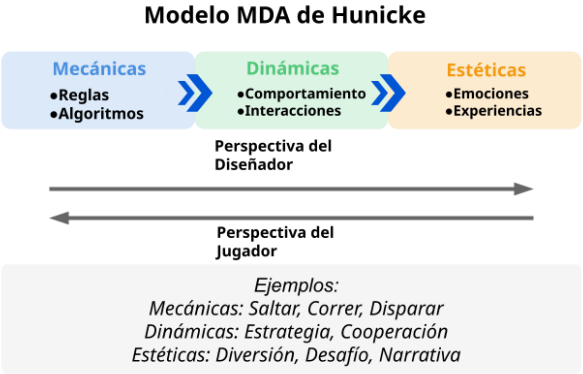


Figura 6. Modelo MDA de Hunicke

Tipología de la diversión.
El enfoque formal basado en mecánicas, dinámicas y estéticas, es un modelo lineal en donde las mecánicas producen dinámicas y estas en conjunto le dan el atractivo a los juegos en lo que se ha denominado estéticas, de tal manera que el componente "estético" de un juego es esencial para generar una conexión emocional con los jugadores, ya que influye en sus percepciones y experiencias, estableciendo un ambiente inmersivo que puede transformar el acto de jugar en algo profundamente significativo. La "diversión" se convierte en el elemento que engancha a los jugadores a participar y explorar el mundo del juego, fomentando la creatividad y la interacción social mientras enfrentan desafíos que estimulan su pensamiento crítico y habilidades estratégicas.

La tipología de diversión se refiere a los diferentes tipos de experiencias que un juego puede ofrecer, categorizando las motivaciones y preferencias de los jugadores para maximizar su disfrute. Esta clasificación permite a los desarrolladores diseñar mecánicas que se alineen con estas motivaciones, creando así un juego más atractivo y satisfactorio para una variedad de jugadores.

A continuación, se describirán los ocho tipos de diversiones identificados por este modelo formal:

Sensación: la búsqueda de experiencias emocionales intensas y estimulantes, que pueden incluir desde momentos de adrenalina hasta fascinantes exploraciones visuales.

Fantasía: la creación de mundos imaginarios y narrativas inmersivas que permiten a los jugadores escapar de la realidad y experimentar aventuras únicas, fomentando la creatividad y el asombro.

Narrativa: la importancia de contar historias convincentes que conecten emocionalmente con los jugadores, permitiéndoles sumergirse en tramas complejas y personajes memorables que enriquecen su experiencia de juego.

Desafío / reto: la necesidad de superar obstáculos y lograr metas, lo que proporciona una sensación de logro y competencia al enfrentar desafíos que ponen a prueba las habilidades del jugador.

Comunidad: el aspecto social del juego, donde los jugadores pueden reunirse, colaborar y compartir experiencias, creando vínculos significativos que enriquecen su disfrute y fomentan un sentido de pertenencia dentro de un grupo más grande.

Descubrimiento: la emoción de explorar nuevos mundos y descubrir secretos ocultos, lo que no solo estimula la curiosidad, sino que también invita a los jugadores a experimentar el entorno de formas sorprendentes e inesperadas.

Expresión: la capacidad de personalizar personajes y entornos, permitiendo a los jugadores mostrar su creatividad y estilo único, agregando una dimensión personal al juego y enriqueciendo la experiencia general.
Sumisión: representa la diversión como pasatiempo sin exigencias cognitivas que permite a los jugadores desconectarse del estrés diario y disfrutar de momentos de relajación, promoviendo el bienestar mental y emocional a través del entretenimiento. [26]

DISCUSIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

A continuación, presentaremos nuestra propuesta de la relación identificada entre los componentes clave o actividades del enfoque didáctico constructivista integrado y la tipología de diversiones, clasificada por el enfoque formal MDA para el desarrollo de videojuegos. Esta perspectiva nos permitirá identificar sinergias entre los principios del constructivismo y elementos de diseño de juegos, facilitando la creación de entornos de aprendizaje que no solo sean lúdicos, sino también profundamente significativos y alineados con los objetivos educativos establecidos.

Cabe señalar que la sinergia entre ambos enfoques podría funcionar en distintas maneras, para lo cual nosotros iniciaremos con esta idea. Nuestra propuesta de conexiones demostrará una integración coherente entre los principios pedagógicos constructivistas y los elementos de diseño de juegos, creando un marco educativo que aprovecha las fortalezas de ambos enfoques.

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

Aprendizaje Activo contra Descubrimiento, Fantasía, Sensaciones.
Esta conexión se justifica por la manera en que el descubrimiento, las experiencias sensoriales y los elementos fantásticos fomentan la participación activa del estudiante. La exploración de nuevos conceptos se enriquece mediante experiencias sensoriales significativas, mientras que los elementos de fantasía proporcionan un contexto atractivo que motiva la participación continua en el proceso de aprendizaje.

Construcción del Conocimiento contra Expresión, Narrativo.
La relación se fundamenta en cómo la expresión personal y la narrativa facilitan la integración de nuevos conocimientos con experiencias previas. Las narrativas proporcionan marcos coherentes para organizar la información, mientras que la expresión permite a los estudiantes articular y consolidar su comprensión de manera significativa.

Importancia del Contexto Social contra Comunidad.
Esta sinergia es particularmente robusta ya que el compañerismo en los juegos refleja directamente la necesidad de contextualización social en el aprendizaje. Las interacciones sociales y la colaboración entre pares crean un entorno de aprendizaje auténtico donde el conocimiento se construye colectivamente.

Zona de Desarrollo Próximo (ZDP) contra Sumisión, Expresión.
La conexión se justifica por cómo los momentos de sumisión permiten la asimilación y reflexión necesarias para el progreso en la ZDP, mientras que la creatividad facilita la exploración de nuevas capacidades dentro de un entorno seguro y controlado.

Aprendizaje Basado en Problemas (ABP) contra Sumisión, Expresión.
Esta relación se basa en cómo la creatividad enriquece la resolución de problemas, mientras que los momentos de sumisión permiten la contemplación necesaria para abordar desafíos complejos. La combinación fomenta un enfoque equilibrado para la resolución de problemas.

Figura 7. Modelo de Constructivismo-Diversión.

Reflexión y Metacognición contra Desafío/Reto.
La sinergia se establece en cómo los retos y el desafío provocan naturalmente la reflexión sobre el proceso de aprendizaje. La superación de desafíos requiere una evaluación constante de las estrategias utilizadas, promoviendo así la metacognición.

Teniendo clara la sinergia entre actividades constructivistas y topologías de la diversión, las mecánicas y dinámicas se diseñarán para trabajar en conjunto, creando un ecosistema de aprendizaje procurando una implementación flexible y adaptable según las necesidades específicas del contexto educativo y los objetivos de aprendizaje.

Como mencionamos anteriormente, las sinergias se pueden lograr en maneras más complejas y establecer relaciones significativas entre sus componentes y resultados de aprendizaje.
En el siguiente modelo, los ocho tipos de diversión se distribuyen estratégicamente, estableciendo conexiones específicas con los componentes constructivistas.

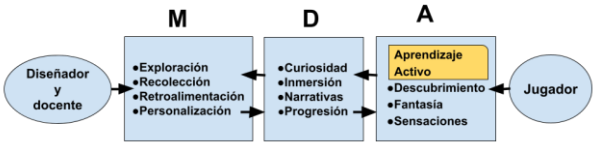


Figura 8. Modelo MDA con actividades constructivistas.

Podrían distinguirse conexiones más fuertes para relaciones particularmente significativas. Por ejemplo, el Descubrimiento, la Fantasía y la Sensación mantienen conexiones robustas con el Aprendizaje Activo, mientras que la Expresión y la Narrativa se vinculan estrechamente con la Construcción del Conocimiento.
Estas interacciones no solo enriquecen la experiencia de aprendizaje, sino que también fomentan un ambiente colaborativo donde los estudiantes pueden explorar y expresar su creatividad de manera efectiva.

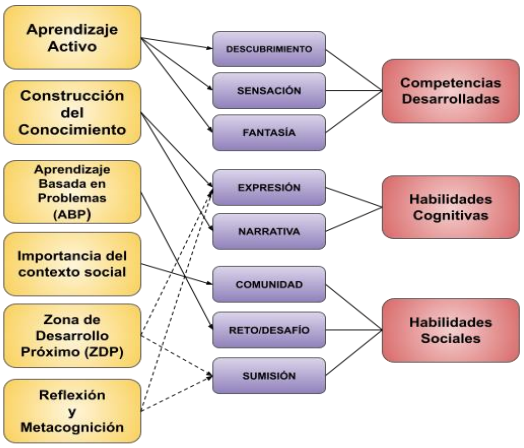


Figura 9. Modelo de Integración Constructivismo-Diversión.

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

Dentro del ámbito de los videojuegos comerciales, hay varios ejemplos que han utilizado de manera innovadora estos principios para involucrar a los jugadores en un proceso de aprendizaje dinámico. Como parte final de esta investigación analizaremos algunos ejemplos de videojuegos que aplicaron conceptos del enfoque constructivista y metodologías de desarrollo de videojuegos.

Ejemplo A de análisis de la propuesta: Minecraft, Education Edition.
Este videojuego, diseñado específicamente para entornos educativos, permite a los estudiantes construir y explorar mundos virtuales mientras desarrollan habilidades en áreas como matemáticas, ciencias y trabajo en equipo.

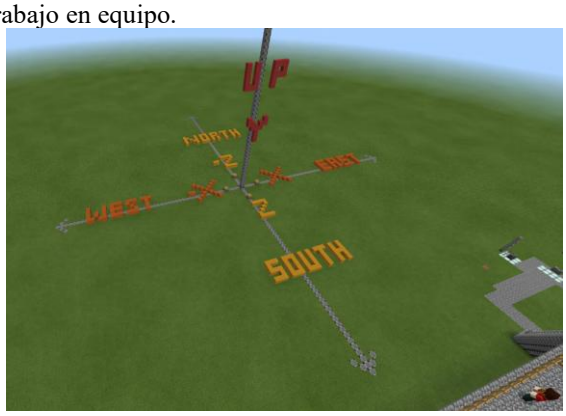


Figura 10. Interfaz gráfica de Minecraft: Education Edition
.

Encontramos sinergia entre enfoque constructivista y tipologías de la diversión en el aspecto en que se fomenta la creatividad y la colaboración, lo que a su vez mejora el aprendizaje significativo al permitir a los jugadores experimentar y resolver problemas en un entorno seguro y controlado.

Figura 11. Interfaz gráfica de Kerbal Space Program

Ejemplo B de análisis de la propuesta: Kerbal Space Program.
Este juego permite a los jugadores diseñar y administrar su propio programa espacial, el cual implica la aplicación de conceptos de física y matemáticas en un contexto lúdico, aplica conceptos del constructivismo al permitir que los estudiantes experimenten con la construcción de cohetes y naves espaciales, fomentando así su curiosidad y motivación para aprender mientras enfrentan desafíos reales en el diseño y exploración del espacio, es evidente que el tipo de diversión estaría definido por varios factores, incluyendo la creatividad del jugador y la voluntad de experimentar con diferentes enfoques para la resolución de problemas.

Ejemplo C de análisis de la propuesta: Tetris.
Por último, analizaremos el videojuego de Tetris, que a primera vista parece ser un simple juego de bloques y en realidad ofrece una profunda experiencia de aprendizaje sobre geometría y planificación espacial. El Tetris, creado por Alexey Pajitnov en 1984, representa un caso paradigmático en el estudio de videojuegos con potencial educativo inherente sus mecánicas fundamentales se alinean naturalmente con principios constructivistas y facilitan el desarrollo de habilidades cognitivas específicas [28].

El Tetris incorpora varios elementos que promueven el aprendizaje constructivista. Los jugadores construyen activamente soluciones espaciales, alineándose con el principio constructivista de que el conocimiento se construye a través de la experiencia direct [29]. Dentro de las habilidades cognitivas desarrolladas, estudios recientes demuestran mejoras significativas en la capacidad de rotación mental entre jugadores regulares de Tetris. [30] En otro estudio similar, los participantes mostraron una mejora del 43% en pruebas estandarizadas de visualización espacial después de 12 semanas de juego regular. [31]

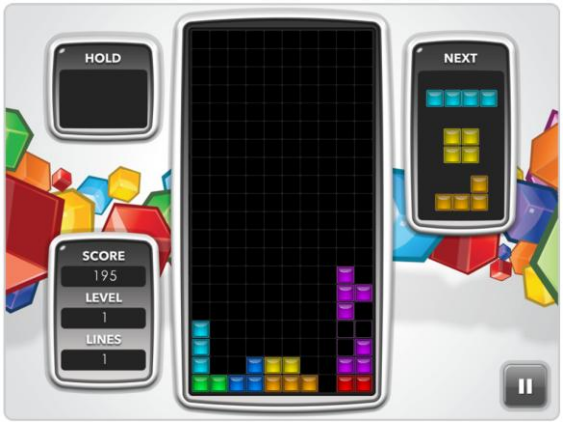


Figura 13. Interfaz gráfica de Tetris.

Los estudiantes que utilizaron Tetris como herramienta complementaria mostraron una mejora del 28% en la comprensión de conceptos geométricos básicos [32].

El análisis del Tetris como caso de estudio revela su potencial significativo como herramienta educativa, particularmente en el desarrollo de habilidades espaciales y cognitivas. Su estructura inherentemente constructivista y su capacidad para generar engagement

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

sostenido lo convierten en un modelo valioso para el diseño de futuros juegos educativos [33].

CONCLUSIONES

El cruce entre constructivismo y videojuegos formativos representa un campo de estudio emergente con un potencial significativo para transformar la educación contemporánea. Este análisis permite comprender que la integración de principios constructivistas con elementos lúdicos en el diseño de videojuegos no solo puede mejorar la experiencia de aprendizaje, sino también aumentar la motivación y mantener interesado a los usuarios en la construcción de su propio conocimiento.
A medida que la educación enfrenta desafíos como el desinterés y el abandono en el uso de los videojuegos educativos, se vuelve crucial comprender las estrategias que impulsan la participación activa y el aprendizaje significativo. A través de un enfoque que combina teorías constructivistas con metodologías de diseño de juegos, esta investigación, propone un marco teórico que puede establecer conexiones efectivas entre las actividades educativas y los tipos de diversión, fomentando así un ambiente de aprendizaje dinámico y colaborativo. En esta investigación se realizan dos propuestas de posibles soluciones con relaciones naturales en donde los aspectos atractivos para los usuarios en un videojuego resuelven las condiciones que los aspectos claves del enfoque didáctico constructivista necesita para la promoción del conocimiento.

Los casos de estudios seleccionados para su análisis ilustran cómo en videojuegos educativos y comerciales se han implementado enfoques didácticos y lúdicos, en diferentes contextos educativos, de tal forma que puedan tener resultados positivos en la motivación y desempeño académico de los estudiantes por lo tanto, es fundamental continuar explorando y proponiendo nuevas metodologías que integren la tecnología y el juego en el aula, ya que esto puede abrir oportunidades innovadoras para mejorar la enseñanza y el aprendizaje.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al CONAHCYT por la beca de apoyo para Arístides Caballero Alfaro durante sus estudios de doctorado de igual manera nuestro agradecimiento al TecNM/Centro Nacional de investigación y Desarrollo Tecnológico, por su incansable labor formativa.

BIBLIOGRAFÍA

[1] R. H. Parada and E. Mackenzie, “Why and How to Define Educational Video Games?,” Games and Culture, Jun. 2023, doi: 10.1177/15554120231183495.
[2] C. Solomonidou, “Constructivist design and evaluation of interactive educational software: a research-based approach and examples,” Jun. 2016, doi: 10.12681/JODE.9693.
[3]“Constructivism, gamification, learning,” Jul. 2023, doi: 10.59295/sum5(165)2023_02.
[4]A. C. Acosta, “The Use of Immersive Tools in Higher Education: Escape Rooms,” Nov. 2022. doi: 10.1145/3578837.3578848.
[5]E. Gaeta et al., “Evaluation of the Create@School Game-Based Learning–Teaching Approach,” Sensors, Jul. 2019, doi: 10.3390/S19153251.
[6]L. Goodman and X. Gu, “Novel 3D Contextual Interactive Games on a Gamified Virtual Environment Support Cultural Learning Through Collaboration Among Intercultural Students,” SAGE Open, Apr. 2022, doi: 10.1177/21582440221096141.
[7]S. Selvakumar and P. Sivakumar, “Immersive Learning: Unlocking the Future of Education,” May 2023, doi: 10.34293/eduspectra.v5is1-may23.003.
[8]Z. V. Smirnova, “Game Teaching Methods as a Means of Integration in Educational Activities,” 2022. doi: 10.1007/978-981-16-9069-3_46.
[9]J. PETERSEN, “Dropout Reduction in MOOCs Through Gamification and Length of Videos,” 2022. doi: 10.1007/978-981-19-3383-7_20.
[10]L. G. Polin, “A Constructivist Perspective on Games in Education,” 2018. doi: 10.1007/978-3-319-66050-9_9.
[11]K. A. Naeim, “Jean Piaget’s Constructivist Theory of Learning,” 2022. doi: 10.4324/9781003288077-2.
[12]T. G. K. Bryce and E. Blown, “Ausubel’s meaningful learning re-visited,” Current Psychology, Apr. 2023, doi: 10.1007/s12144-023-04440-4.
[13]L. M. P. Angin, “Analysis of the Application of Bruner’s Theory in Improving Mathematics Learning Outcomes in Geometry Materials at SD Negeri 14 Sei Meranti,” Jun. 2023, doi: 10.55927/jeda.v2i2.4422.
[14]A. Miglani, “Representation,” 2023. doi: 10.1093/oso/9780198865698.003.0007.
[15]S. P. Satpathy, “Paradigm Shifts in Language Acquisition and its Application in the Present Scenario,” Jan. 2020, doi: 10.37534/BP.JHSSR.2019.V1.N1.ID1010.P45.
[16]V. K. Zaretsky, “One More Time on the Zone of Proximal Development,” Cultural-Historical Psychology, Jan. 2021, doi: 10.17759/CHP.2021170204.
[17]R. P. Wojda, “The conceptual ideas of the constructivism theory as a basis for the modernization of the educational space and the organization of the personal learning environment of students of higher education institutions,” 2023. doi: 10.54055/fqwa4301.

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

[18]B. J. Jones and K. Sturrock, "Just by being here, you aren't halfway there: Structured active learning and its integration in virtual learning environments and assessment.," Science & Justice, Jun. 2022, doi: 10.1016/j.scijus.2022.05.005.

[19]N. R. Mishra, "Constructivist Approach to Learning: An Analysis of Pedagogical Models of Social Constructivist Learning Theory," Journal of research and development, Jun. 2023, doi: 10.3126/jrdn.v6i01.55227.

[20]I. Pratiwi, "Application of the Problem Based Learning (PBL) Model on Environmental Pollution Materials to Increase Motivation and Learning Outcomes," Journal Of Biology Education Research, May 2023, doi: 10.55215/jber.v4i1.7466.

[21]D. A. Udu et al., "Innovative Pedagogy and Improvement of Students' Knowledge Retention in Science Education: Learning Activity Package Instructional Approach," Pertanika journal of social science and humanities, Sep. 2022, doi: 10.47836/pjssh.30.3.25.

[22]"Students learning in a social context," 2023. doi: 10.4324/9781003154853-39.

[23]B. Eun, "The zone of proximal development as an overarching concept: A framework for synthesizing Vygotsky's theories," Educational Philosophy and Theory, Jan. 2019, doi: 10.1080/00131857.2017.1421941.

[24]P. M. Chauhan, "Innovative Educational Practices in Teaching, Learning and Evaluation," International Journal of Advanced Research in Science, Communication and Technology, Nov. 2022, doi: 10.48175/ijarsct-7421.

[25]S. D. Putra and V. Yasin, "Mda framework approach for gamification-based elementary mathematics learning design," Jul. 2021, doi: 10.52088/IJESTY.V1I3.83.

[26]B. Fritz and S. Stöckl, "Why do We Play? Towards a Comprehensive Player Typology," Games and Culture, May 2022, doi: 10.1177/15554120221094844

[27]K.-E. Briones-Cevallos and C. E. Vélez-Villavicencio, "Métodos lúdicos creativos en el proceso de animación a la lectura en entornos virtuales," Identidad bolivariana, Jan. 2022, doi: 10.37611/ib6ol142-54.

[28]H. Zhang, "A Genetic Approach to the Formulation of Tetris Engine," Nov. 2022. doi: 10.1145/3577117.3577134.

[29]V. Perna and G. Ferri, "In and out domains: Playful principles to in-form urban solutions; a dialogue between architects and game scholars," Jan. 2020. doi: 10.1145/3377290.3377297.

[30]T.-S. Lee and S.-H. Yi, "The Effects of Tetris Game on the Cognitive Abilities of Students with Mental Retardation," Aug. 2012, doi: 10.7583/JKGS.2012.12.4.77.

[31]G. Gambino et al., "Reducing Visuospatial Pseudoneglect in Healthy Subjects by Active Video Gaming," Brain Sciences, May 2023, doi: 10.3390/brainsci13060877.

[32]H. Crompton, "Using Mobile Learning to Support Students' Understanding in Geometry: A Design-Based Research Study," Educational Technology & Society, Jul. 2017.

[33]T. Agren, J. M. Hoppe, L. Singh, E. A. Holmes, E. A. Holmes, and J. Rosén, "The neural basis of Tetris gameplay: implicating the role of visuospatial processing," Current Psychology, Aug. 2021, doi: 10.1007/S12144-021-02081-Z.

AUTORIZACIÓN Y RENUNCIA.

Los autores del presente artículo autorizan al TecNM/Instituto Tecnológico de Zacatepec para publicar el escrito en el libro electrónico del CITID 2025. El TecNM/ITZ o los editores no son responsables ni por el contenido ni por las implicaciones de lo que está expresado en el escrito

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

ENSEÑAR QUÍMICA DESDE UNA PERSPECTIVA MODERNA PARA EL DESARROLLO DE CONCEPTOS Y TÉRMINOS TÉCNICOS

Jessica J. Sánchez García[1], Edgar Aguilar Ortíz[2], Pablo Labra-Vázquez[3], Carolina Flores Avila[4], Minerva Monroy Barreto[5]

[1]Doctora en Ciencias Químicas, Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Química, Departamento de Química Analítica, heparina250ml@quimica.unam.mx, tel. 56223899 ext. 44448, CP. 04510.
[2]Doctor en Ciencias Químicas, Universidad Nacional Autónoma de México, Unidad Radiofarmacia, División de Investigación, Facultad de Medicina, edgaraguilar08@gmail.com, CP. 04510.
[3]Doctor en Ciencias Químicas, Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Química, Departamento de Química Orgánica, pab.labra@gmail.com, tel. 56223899, CP. 04510.
[4]Maestra en Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Química, Departamento de Química Analítica, caroflores@quimica.unam.mx, tel.56223849, CP. 04510.
[5]Doctora en Ciencias Químicas, Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Química, Departamento de Química Analítica, mmonroyb@quimica.unam.mx, tel. 56223749, CP. 04510

Resumen – En esta investigación se presentan los resultados obtenidos de una serie de ejercicios utilizados para enseñar los conceptos de Química General en el primer semestre de la carrera de Biología de la Facultad de Ciencias, UNAM. El objetivo principal es apoyar en el proceso de enseñanza-aprendizaje de los conceptos fundamentales de la química de una forma más fácil y significativa, a través del diseño de actividades que integren herramientas digitales y recursos audiovisuales, junto con la aplicación de ejemplos cotidianos, para que los estudiantes aprendan los principios fundamentales de fisicoquímica, como son las tres leyes de la termodinámica, de una forma activa y entretenida. Se observó que al usar caricaturas como recurso pedagógico lograban asimilar mejor los conceptos y una comprensión más profunda, fomentando su participación al ofrecer un enfoque más interactivo y dinámico. Se concluyó, por tanto, que utilizar este tipo de actividades ayuda a captar y mantener la atención de los estudiantes y fomentan el interés en los temas de química.

Palabras Clave: Videos, YouTube, Termodinámica, Química General, Conceptualización.

Abstract – This research presents the results obtained from a series of exercises used to teach the concepts of General Chemistry in the first semester of the Biology degree at the Faculty of Sciences, UNAM. The main objective is to support the teaching-learning process of the fundamental concepts of chemistry in an easier and more meaningful way, through the design of activities that integrate digital tools and audiovisual resources, along with the application of everyday examples, so that students learn the fundamental principles of physical chemistry, such as the three laws of thermodynamics, in a dynamic and entertaining way. It was observed that by using cartoons as a pedagogical resource they were able to better assimilate the concepts and a deeper understanding, encouraging student participation by offering a more interactive and dynamic approach. It was therefore concluded that using this type of activities helps to capture and maintain the attention of students and encourage interest in chemistry topics.

Keywords – Videos, YouTube, Thermodynamics, General Chemistry, Conceptualization.

INTRODUCCIÓN

En la actualidad, vivimos rodeados de tecnología y medios de comunicación en donde las redes sociales captan más nuestro interés. Teniendo esto en consideración se han planteado nuevos retos para atraer la atención de las nuevas generaciones, en particular cuando se tratan temas relacionados a la ciencia.
Con anterioridad nuestros referentes eran profesores especialistas en la disciplina, quienes a través del habla lograban encantarnos con la materia (con un concepto romántico de la belleza de la ciencia), sin embargo, en estos tiempos es muy importante tener en cuenta el desarrollo tecnológico y la transformación del lenguaje para realizar la enseñanza de la química.

Cuando se les encuesta a los profesores sobre su opinión de la enseñanza de la química y las ciencias básicas, muchos de ellos se expresan con cierta preocupación por la poca importancia que los alumnos y la opinión pública le dan a las ciencias, desde la educación básica hasta la educación superior. Lamentablemente se tiene la idea de que la educación en química se debería de suprimir ya que es considerada difícil de entender, con conceptos complejos, nombres de los compuestos que no se pueden escribir, fórmulas matemáticas, etc. Generando una predisposición a la percepción de esta disciplina como algo difícil.

Esto se puede ver con la reforma a la educación básica primaria en donde los nuevos libros de la SEP, a partir del ciclo escolar 2023, no incluyen las ciencias Naturales, optando por un esquema transdisciplinario que busca atender criterios de formación de lenguajes, como ética, naturaleza y sociedad, etc., marcando una

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

diferencia con los que crecimos con el enfoque tradicional de la enseñanza de la química. Por esta razón resulta un reto motivar a estas nuevas generaciones para transmitirles la importancia de la química y lograr que la educación en esta disciplina sea razonable y racional. [1].

Se debe tomar en cuenta que los alumnos de nivel secundaria se enfrentan a los primeros conocimientos de química y, sin embargo, es frecuente que se les exija aprenderse la tabla periódica de memoria o resolver ejercicios para calcular la cantidad de materia, como el mol, interactuar con ecuaciones, enfrentarse a conceptos de química cuántica, etc., de forma que todo esto los hace pensar que es imposible comprender estas ideas.

Es por lo que resulta importante tener en cuenta que el estudiante pocas veces tiene una comprensión completamente clara de los conceptos cuando se le deja resolver problemas mediante la aplicación directa de ecuaciones (lo que se conoce como "formulazo") o ejecutar una rutina, aunque después intente recordar los métodos de resolución.

Consecuentemente, hacer que la química sea comprensible a nivel universitario o preuniversitario requiere que se comprendan los conceptos teóricos y prácticos para lograr que el estudiante pueda unificarlos, de forma que logre plantear una solución a los problemas, inculcando de esta manera el método científico [2].

Es por esto que la forma de impartir el conocimiento científico se debe de modificar, es decir, enseñar a partir de las vivencias con las que nos enfrentamos día a día y de la cultura.

La propuesta didáctica que se pretende establecer se basa en que los estudiantes desarrollen la capacidad de analizar y evaluar sus ideas y las de otros para generar diferentes criterios. Por lo que se considera que la educación debería de orientarse hacia el desarrollo de competencias, aprender a ser, a hacer, a conocer y a convivir.

El aprendizaje de las ciencias, en particular de la química, es de utilidad ya que nos permite comprender el mundo que nos rodea, a desarrollar un pensamiento crítico, resolver problemas, apoyar a otras ciencias además de favorecer el desarrollo de actitudes y hábitos intelectuales.

¿Es necesario enseñar química con fórmulas?
Como un primer acercamiento de química no es factible o recomendable enseñar química desde las fórmulas ya que muchas veces no son comprensibles, a primera vista resultan muy difíciles. Si se empieza a hablar del almidón, por ejemplo, es más fácil visualizar sus aplicaciones, para qué los usamos, construir una analogía con los azúcares antes de introducir las fórmulas (Figura 1).

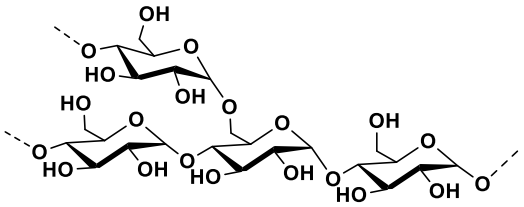


Figura 1. Estructura química del almidón.

Si bien las fórmulas son un lenguaje de química, ante todo estas deben de ser de intuición, ya que no se debe de pensar que química es igual a fórmulas, por lo tanto, no siempre resulta conveniente enseñar desde la perspectiva de clases tradicionales, sino con estrategias que logren que el alumno adquiera conocimientos basados en lo que se conoce y lo que no se conoce [3].
Por lo tanto, se propone que la enseñanza de la química puede abordarse también a través de una metodología que emplea caricaturas o programas como recurso educativo.

Podemos sembrar en ellos el pensamiento crítico y la curiosidad proporcionando un contexto histórico, por ejemplo, sobre los problemas que Alfred Nobel experimentó cuando producía nitroglicerina a escala industrial a partir de ácido sulfúrico y nítrico sobre glicerina; cómo el producto obtenido es muy difícil de manejar por su inestabilidad, ocurrieron varios accidentes. incluyendo la muerte de su hermano por una explosión.

Nobel con problemas cotidianos como cualquier persona, se motivó a buscar una manera más segura para el manejo de la nitroglicerina y armó su laboratorio. En él realizó ensayos buscando darle estabilidad (Figura 2), pero como la suerte es de los que trabajan, se percató de una fuga en los contenedores, sin embargo, la nitroglicerina fue adsorbida por el material que servía de protección. Nobel evalúo este material y descubrió que de esta forma podía ser manejada de manera segura y no explotaba fácilmente, pues era necesaria una fuente de ignición, conservando su poder explosivo; la denominó dinamita.

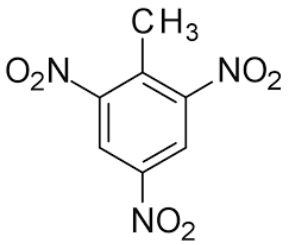


Figura 2. Estructura molecular del trinitrotolueno

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

Al presentar un tema y relacionarlo con experiencias cotidianas o caricaturas, se puede lograr introducir diferentes conceptos, que sin ayuda de un contexto, serían más difíciles de asimilar.

¿Podemos enseñar química y cocina?
La cocina es el primer laboratorio que conocemos al cual tenemos acceso desde temprana edad, por ejemplo, el cloruro de sodio, NaCl, o simplemente sal de mesa.

Si observamos detenidamente granos de sal, identificaremos pequeños cristales, la sal es un sólido cristalino, es decir los átomos de los que está constituida siguen un orden, ¿Por qué pasa esto? Porque está constituida de átomos de Sodio (Na) y Cloro (Cl), los cuales se unen. En este caso, el Na tiene un sólo electrón y el Cl tiene 7 electrones en sus órbitas más externas (Figura 4). Buscando estabilidad, los átomos se unen compartiendo estos electrones, el Na cediendo su electrón y el Cl aceptando, formando un enlace iónico.

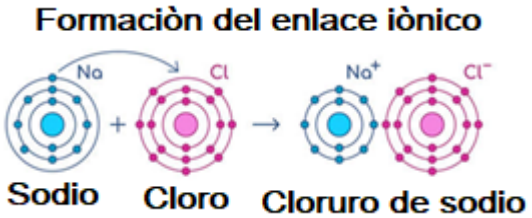


Figura 4. Formación de enlaces en el cloruro de sodio (sal de mesa)

Con este tipo de explicación se favorecer la enseñanza de la formación de los enlaces iónicos y las estructuras químicas cristalográficas.

Por lo anterior, se sugiere una planeación didáctica y una selección adecuada del material. Con el objetivo de que los alumnos se familiaricen de manera adecuada con términos y definiciones, haciendo que puedan aplicar los temas vistos, con sucesos cotidianos.

Didáctica de las ciencias en Química
La didáctica de la química se va a definir como la actuación del docente para facilitar los aprendizajes de los estudiantes.

Cuando se enseña ciencias o química a nivel no universitario los profesores deben de ser capaces de lograr que los alumnos adquieran motivación y gusto por los temas a tratar. Para lograr este objetivo, se requiere preparar minuciosamente cada clase, así como estar constantemente actualizando sobre los temas científicos que son "tendencia" (modelado de proteínas, secuenciación genética, etc. y sus aplicaciones en el día a día. Esto se puede hacer empleando técnicas convencionales como: búsqueda de artículos científicos y complementar con el uso de las herramientas actuales como videos, programas de televisión, videos de TikTok, videos de Youtube, etc., con la finalidad de que el contenido sea siempre novedoso.
Lo más importante es que el alumno logre construir su propio conocimiento con ayuda de estos medios. El docente adquiere el rol de facilitador para conseguir que se cumpla con ese objetivo.

Las actividades de enseñanza que se realizan deben de estar vinculadas a los procesos de aprendizaje, principalmente basándose en los conocimientos que el estudiante ya posee o con temas de actualidad que sea capaz de desarrollar e interactuar con ellos, logrando una mayor asimilación de los conceptos [4]. Figura 5.

Figura 5. Esquema de las estrategias de enseñanza en el marco didáctico.

En este marco el empleo de medios didácticos como actividades lúdicas, videos de YouTube, TikTok, Instagram, promueven un primer acercamiento a temas científicos de una manera más amigable, sembrado la curiosidad e interés en los estudiantes [5].

Actividades dentro del enfoque de Ciencia, Tecnología y Sociedad.
La formación de nuevos profesionales debe de concretase con el impacto en la integración de un individuo adulto con su familia y la sociedad [6].

Las actividades con el enfoque de Ciencia, Tecnología y sociedad se centran en un paradigma de trabajo para comprender el fenómeno científico-tecnológico en el contexto social con especial atención a las condiciones y consecuencias sociales y ambientales. [7] Figura 6.

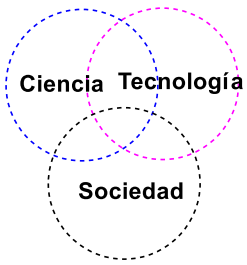


Figura 6. Modelo de educación en ciencia, tecnología y sociedad

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

Por lo tanto, el diseño de material didáctico debe de contribuir a fomentar que los alumnos y futuros profesionistas tengan no sólo un conocimiento científico, sino también un conocimiento socialmente distribuido, para que, una vez insertado en el ámbito laboral, la toma de decisiones tenga un compromiso social, reflexividad y una cultura científico-tecnológica [8-9].

Diseño de una ciencia que se aprende

Al impartir materias de química se debe de procurar que los temas se impartan con una perspectiva moderna, empleando términos adecuados y que sean atractivos para los jóvenes. Además, se debe de considerar que estos sean racionales y razonables. En este aspecto White en 1994 proporcionó una serie de contenidos a considerar en una clase de ciencias [10-11]. Tabla 1.

La finalidad educativa con consenso social debe de tener una aceptación por parte de los estudiantes, por lo que esta se debe de vincular con los valores humanos y sociales. Los programas de estudio deben de organizarse en núcleos temáticos por medio de conocimientos estructurados que logren integrar conceptos abstractos como la estructura de la materia, las trasformaciones de la materia y de la energía, etc.

De forma que estos modelos teóricos se deben de acompañar con ejemplos que sean significativos y de aporten conocimientos para todas las personas con la finalidad de asimilarlos.

Se deben desarrollar procesos de lo que se ha de saber hacer, lo que se debe de escribir, y lo que se puede representar mentalmente, para plantear estrategias de aprendizaje. [12]

La ciencia y en especial la química es para todos.

Las ideas que hemos ido aportando en este trabajo nos ayudaran a diseñar la enseñanza de las ciencias y química a partir de ideas generadas por experiencias, aunque no se proceda directamente de la disciplina o de la enseñanza tradicional, implementándose desde la educación básica hasta la educación universitaria. Como alternativa a los procedimientos tradicionales, en donde se inicia con la enseñanza de fórmulas y de la estructura atómica como primer acercamiento, en vez de enfocarse en comprender conceptos y términos que ayuden a percibir el conocimiento científico como algo que es accesible y fácil de asimilar a través del uso de recursos cotidianos, como caricaturas, redes sociales, medios de comunicación, videos en TikTok, YouTube, etc [13-14].

DESARROLLO

Objetivos:

Los objetivos de este trabajo son:

- Plantear un modelo de enseñanza eficaz para visualizar los conceptos básicos de química.
- Enseñar los fundamentos de términos teóricos de química de una forma accesible para todo el alumnado desarrollando una motivación por el aprendizaje en el área de química.
- Preparar a los alumnos para su ejercicio profesional mediante el desarrollo de habilidades blandas, como el trabajo en equipo.
- Realizar un método de enseñanza centrado en los alumnos y su contexto.

Tabla 1. Dimensiones de los contenidos (White, 1994) y las aportaciones actuales de la didáctica química.

Dimensiones de los contenidos	Aportaciones de la didáctica en ciencias
Abstracción Los conceptos deben de ser demostrables, no arbitrarios	Organizar una actividad escolar a partir de los modelos teóricos o de las ideas estructuradas. Utilizar un modelo de la ciencia de realismo, estructurado.
Apertura a la ciencia común Aceptar la presencia de palabras y lenguaje común. Tener en cuenta que los alumnos suelen utilizar modelos alternativos para realizar explicaciones. Ser capaces de promover la comprensión de conceptos a partir de los cuales se motive la búsqueda de nuevos términos.	Se deben de tener en cuenta ideas y conceptos previos, con temas actuales. Se debe de dar una prioridad a la comunicación, mediante un lenguaje cotidiano y actual, antes de introducir los términos científicos. Se debe de desarrollar argumentos científicos, en el salón de clases, para sustentar el proceso de realizar modelos científicos.
Asimilar conceptos complejos Se requieren asimilarlos con aceptación social por medio de una dimensión social. Tener la capacidad de relacionar los conocimientos que se van aprendiendo. Integrar los diferentes conocimientos adquiridos con dimensión curricular, y conectiva [11].	Trabajar en las tres dimensiones educativas (hacer-pensar-comunicar). Identificar los motivos que hacen que los estudiantes quieran y necesiten aprender. Se deben de estructurar las ideas básicas para continuar aprendiendo. Tener en cuenta las inteligencias múltiples y diseñar diferentes estrategias de ascenso y progreso.

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

Metodología (Población muestra)
La población de la investigación comprende a los estudiantes de la carrera de Biología en el primer semestre de la Facultad de Ciencias de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) que cursaron la materia de Química, para este tema de investigación que comprendió al grupo 1, del semestre 2024-1 y que estaba conformado por 20 estudiantes, para ello se diseñaron las siguientes etapas para el trabajo del docente:

a) Búsqueda de la información: se realizó una búsqueda y revisión bibliográfica sobre los temas del curso, se seleccionaron tres leyes de la termodinámica y se desarrollaron
b) Diseño de la Actividad de visualizar videos.
El proceso consiste en la elaboración de la planificación didáctica, esto permitió definir claramente los objetivos, el contenido temático para abordar el mecanismo de aplicación de los temas correspondientes, especificando las preguntas necesarias para lograr cubrir los temas del curso.
c) Implementación de los ejercicios: estos consisten en que a partir de un ejemplo se solicita a cada equipo de 4 integrantes seleccionar una caricatura y con base en ella desarrollar y ejemplificar las tres leyes de la termodinámica, aplicando los conceptos y observando si estas cumplen o no.

Recursos:
Computadora, tableta o celular.

DISCUSIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Diseño de la actividad:

a) Búsqueda de información:
Se realizó una revisión bibliográfica sobre las tres leyes de la termodinámica, para tener delineados los conceptos que se abordarán, tomando como base el temario oficial de la materia y las unidades temáticas. [15-17]

Las leyes fundamentales de la termodinámica están descritas a continuación.

- Ley cero, Principio del equilibrio termodinámico.
- La primera ley, Principio de la conservación de la energía.
- La segunda ley, Principio de entropía.
- La tercera ley, Postulado de Nerst.

En esta sección se deben de establecer claramente los conceptos básicos como los son temperatura, energía, equilibrio térmico, energía interna, entropía, cero absoluto, así como conocer cuáles son las características de los sistemas termodinámicos, comportamiento y fenómenos físicos y químicos.

b) Intercambio de ideas en equipo:
La dinámica de la actividad se refiere a un trabajo en equipo el cual se enfocará en que cada uno de los integrantes del equipo intercambien información, y planteen los diferentes escenarios en donde se pueden aplicar los principios o leyes de la termodinámica.

Esta discusión e intercambio de información en grupos pequeños permitirá a los estudiantes definir claramente los objetivos de aprendizaje de cada ley, el contenido temático que se requiere abordar y la estructura del planteamiento completo del tema, todo esto debe de estar con respecto a la información recopilada de la bibliografía.

c) Elección de la caricatura
Lo indicado para esta etapa es que los alumnos trabajen en equipo y con la información recopilada de manera individual en su investigación bibliográfica compartan y seleccionen algunas caricaturas, que representen los conceptos de cada uno de los temas, que les permitan explicarlos de forma más sencilla y simple.

d) Exposición de los alumnos frente al grupo
En esta sección los alumnos se enfocarán en preparar una presentación en donde se muestre la caricatura elegida y con base en ello, explicarán los principios de la termodinámica. Se solicita que resalten el rol de los personajes principales, en el contexto de las caricaturas y su entorno, para observar si son sistemas abiertos o cerrados, etc.

e) Debate en el salón de clases
En el salón de clases se propone realizar un debate y defensa de la caricatura con la finalidad de que los alumnos con los conceptos comprendidos sean capaces de defenderlos. Al finalizar su presentación se retroalimenta a cada uno de los equipos sobre los puntos que consideraron y con ello si cumplen o no con lo solicitado.

RESULTADOS
A continuación, se muestra una tabla de los diferentes equipos y las caricaturas que fueron seleccionadas por ellos (Tabla 2).

Tabla 2. Equipos y caricaturas escogidas para los estudiantes

No. De Equipo	Caricatura elegida
1	Caballeros del zodiaco
2	Las chicas superpoderosas
3	Superman
4	Naruto
5	Los supercampeones

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

Se encontró durante los temas de exposición que los estudiantes lograban asimilar los conceptos, ya que debían de explicarlos detalladamente a todo el grupo, en esta actividad estaba permitido reproducir los videos para ejemplificar correctamente la idea y posteriormente logar explicarla, la exposición tendrá una duración de 20 minutos, con 15 minutos de preguntas y unos 10 minutos de conclusiones, observaciones, opiniones personales de la actividad.

Con la finalidad de ilustrar correctamente la actividad a continuación se describirá un ejemplo utilizado por los alumnos para que se tenga una mejor visualización de este tipo de estrategia didáctica.

Una de las caricaturas seleccionada por un equipo de alumnos fue "Caballeros del zodiaco", que es una serie de manga japonesa. escrita e ilustrada por Masami Kurumada, transmitida de 1986 a 1989 con un total de 114 episodios.

Los alumnos proporcionan una introducción de los personajes principales y la trama de la historia para aquellos que no conocen la serie, por ejemplo, mencionaron que en la serie, un grupo de jóvenes guerreros (caballeros) luchan del lado de la diosa guerrera Athena, reencarnada en una humana, protegen a la al universo de las fuerzas del mal y el cosmos es la energía que permite a los personajes de la serie generar sus habilidades (tiempo invertido un minuto). Después de ello presentan cada uno de los puntos de las leyes de la termodinámica, por ejemplo:

Ley cero o ley del equilibrio químico
El equilibrio térmico se da cuando dos cuerpos con temperaturas diferentes se igualan, fenómeno producido cuando el cuerpo más caliente cede el calor al más frio (Figura 7).

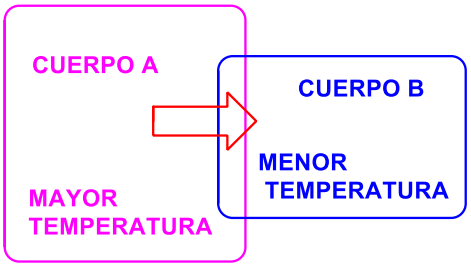


Figura 7. Esquema del equilibrio térmico

En la serie se observa el equilibrio térmico en la escena en la cual el caballero cisne es congelado por el caballero dorado Acuario, y a su rescate acude el caballero Andrómeda quien, con el objetivo de revivirlo, se recuesta junto a él y le transmite su "energía". Llegando de esta manera a calentar el cuerpo congelado del caballero cisne. Todo esto ocurre por medio de la ley cero de la termodinámica.

Primera ley de la termodinámica
Un sistema intercambia energía con su entorno, esto se realiza a través de la transmisión de calor y la realización de un trabajo, donde la energía neta intercambiada es igual al cambio en la energía mecánica total de las moléculas del sistema (Figura 8).

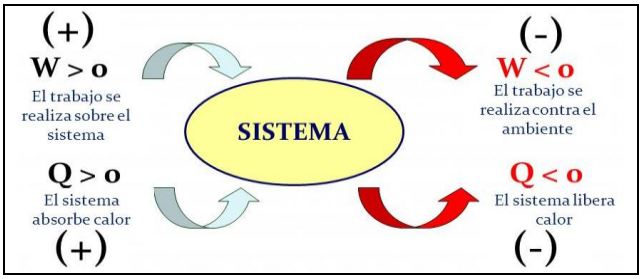


Figura 8. Esquema del primer principio de la termodinámica

Para ejemplificar la aplicación de esta ley, los alumnos seleccionaron el poder del caballero dragón, quien es capaz de intercambiar su energía con la cascada dando como resultado la inversión del flujo de esta.

Segunda ley de la termodinámica

En un cambio en equilibrio a otro, el estado en equilibrio resultante será aquel que tenga el valor máximo de entropía. Figura 9.

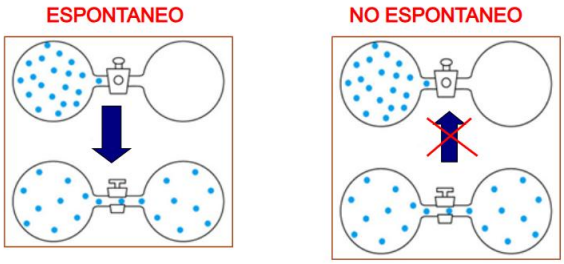


Figura 9. Esquema de la segunda ley de la termodinámica

Para la explicación de esta ley, se recurre al caballero Mu de Aries quien es capaz de pulverizar a sus contrincantes enviando esta energía al espacio, con lo que la entropía "energía" de este se incrementa.

La tercera ley de la termodinámica y el cero absoluto
En la literatura el cero absoluto es la temperatura más baja que se puede alcanzar, en termodinámica está definida como el punto en que las moléculas de cualquier material dejaran de moverse. Está definida a -273.15ºC (0 Kelvin).

En la tercera ley de la termodinámica establece límites respecto a la posibilidad de alcanzar el cero absoluto.

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

En la serie se menciona que el cero absoluto es "la temperatura en la que todo detiene su movimiento molecular".

Opinión de los estudiantes
Los comentarios que se recibieron por parte de los estudiantes, después de esta práctica, fueron: ejercicio divertido, interesante, interactivo, creativo, algunos mencionaron aprendizaje divertido.

En cuanto a las oportunidades los estudiantes comentaron la dificultad de lograr visualizar a primera instancia las leyes de la termodinámica. Es entendible, ya que para lograr comprender un tema primero deben entender los conceptos y los estudiantes lo lograron debido a su investigación bibliográfica para la que tuvieron que leer y entender para poder explicar sus caricaturas.

Se observó que después de realizar el ejercicio los alumnos adquirieron los conocimientos relacionados con los temas porque en la evaluación se observó que las respuestas con respecto a los conceptos principales fueron abordadas completamente y de manera acertada

Fortalezas y oportunidades:
Las fortalezas que se detectaron principalmente son:

- Las actividades fueron consideradas por los estudiantes como divertidas, lo que facilitó el aprendizaje.
- Las actividades permitieron a los estudiantes aplicar los conocimientos teóricos que deberían de correlacionar con eventos cotidianos que les divertía o entretenía.
- Incorporar el uso de tecnología al mundo educativo apoya el desarrollo de tareas que favorecen la enseñanza y la adquisición de conocimiento
- El trabajo y la interacción en equipo fortalece las habilidades blandas de un estudiante, para mejorar el desarrollo personal y profesional.

Las oportunidades que estas actividades presentan son las siguientes:

- El acceso a dispositivos con internet puede ser uno de los principales desafíos.
- Lograr que el desarrollo de las habilidades blandas en los estudiantes de licenciatura no represente un reto desmotivante, en cuyo caso, en un principio, se sugiere permitir que ellos elijan a sus compañeros de equipo, para evitar que parezca una imposición y, por lo tanto, genere un rechazo a la actividad.
- Se recomienda el uso de plataformas que permitan al alumno experimentar de manera virtual si es que las instalaciones del colegio no cuentan con los recursos necesarios. [17]

CONCLUSIONES

El uso de estas herramientas en el aprendizaje de los alumnos ha sido bien recibido por el grupo de trabajo. Si bien es cierto que la asimilación de conceptos expuestos y abordados por primera vez resulta complejo, el uso de técnicas de comparación, empleando dibujos animados, dio como resultado una mejor comprensión por parte de los alumnos.

En muchos casos, los alumnos evocaban experiencias que les sucedían en su día a día, ya sea en la cocina o en el camino a casa, y trataban de entender el fenómeno observado llegando a encontrar una explicación científica relacionada a cada uno de los eventos que ellos habían observado.

Si bien la implementación de estas técnicas puede resultar en una carga extra de trabajo, los beneficios encontrados, como mejorar el aprendizaje, el índice de aprobación, la motivación por el estudio de la ciencia, etc., pueden ser factores suficientes para justificar la implementación de estas herramientas de manera recurrente en los cursos que tengan que ver con el aspecto científico.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación por la beca de estancia posdoctoral.

Pablo Labra-Vázquez, agradece al CONAHCYT (CVU 589363) y a la Facultad de Química de la Universidad Nacional Autónoma de México (FQ-UNAM) por el soporte económico a través del programa de repatriación (Beca No. I1200/111/2024).

Se agradece el apoyo al proyecto PAPIME PE216424 Implementación de un laboratorio virtual para la enseñanza de la Química analítica instrumental y sus aplicaciones.

BIBLIOGRAFÍA

[1] Merce Izquierdo (2006). Por una enseñanza de las ciencias fundamentada en valores humanos
[2] Erduran, S., Duschl, R.A. (2004). Interdisciplinary Characterizations of Models and the Nature of Chemical Knowledge in the Classroom. Studies in Science Education, 40, pp. 105-138
[3] Izquierdo, M.,: Sanmartí, N., Espinet, M., García, M.P., Pujol, R.M. (1999b). Caracterización y fundamentación de la ciencia escolar, Enseñanza de las Ciencias, número extraordinario, pp. 79-92.

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

[4] Jorba, J.; Sanmarti, N. (1996). Enseñar, aprender y evaluar: un proceso de regulación continua. Propuestas didácticas para las áreas de ciencias de la naturaleza y matemáticas. Madrid: MEC.
[5] Izquierdo, M. (2005). Un nuevo enfoque de la enseñanza de la química: contextualizar y modelizar. Journal of Argentinian Chemical Society, 12
[6] Millar, R., Osborne, J. (1998). Beyond 2000: Science education for the future. London: Kings College, University of London.
[7] Dagnino, R., Thomas, H. & Gómez, E. (1998). Elementos para un "estado del arte" de los estudios en ciencia, tecnología y sociedad en América Latina. *REDES, V* (11), pp. 231-255
[8] Acevedo, J. A. (1996). La tecnología en las relaciones CTS. Una aproximación al tema. Enseñanza de las Ciencias, 74(1), p.p 35-44. Agazzi, E. (1996). El Bien y el Mal de la Ciencia. Madrid: Tecnos.
[9] Sara I. Matin-Zapata (2022). Soft skils, do we know what we are talking about? 16: 969-1000. Review of Managerial Science
[10] WHITE, R. (1994). The dimensions of Content, en «The content of Science».
[11] Guidoni, P. (1985). On natural thinking. European Journal of Science Education, 7(2), pp. 133-140.
[12] Sibel Erduran (2004). Interdisciplinary Characterizations of Models and Nature of Chemical Knowledge in the Classroom. 40, pp. 105-138. Studies in Science Education.
[13] Irma L. Chávez-Márquez. (2015). Redes sociales como facilitadoras del aprendizaje de ciencias exactas en la educación superior. 7,(2), Revista Apertura.
[14] Hemarj Ramsurrum (2024). Digital Tools in Informal Science Education Sites; A systematic Literature Review. 33:569-589. Journal of Science Education and Technology.
[15] Jael L. Reyes García (2023). Las leyes de la termodinámica como herramienta didáctica para la enseñanza conceptual de la termodinámica en un curso de química general. 34 (4), 2023. Educación Química.
[16] Normah Mulop (2012). A review on Enhancing the teaching and learning of thermodynamics. 56, pp. 703-712. Procedia Social and Behavioral Sciences.
[17] Veljko Potkonajak (2016). Virtual laboratories for education in science, technology, and engineering: A review. 96, pp. 309-327. Computers & Education.

AUTORIZACIÓN Y RENUNCIA.

Los autores del presente artículo autorizan al TecNM/Instituto Tecnológico de Zacatepec para publicar el escrito en el libro electrónico del CITID 2025. El TecNM/ITZ o los editores no son responsables ni por el contenido ni por las implicaciones de lo que está expresado en el escrito.

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

ESTUDIO DE LOS MECANISMOS DE REACCIÓN DE LA TRICAPRILINA Y ÁCIDO CAPRÍLICO COMO MODELOS EN LA PRODUCCIÓN DE DIÉSEL VERDE

Rodrigo Navarro Severiano[1], David Ochoa Resendiz[2], Juan Pablo Pérez Orozco[3] y Alfredo Quinto Hernández[4].

[1]Ingeniero Químico, Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Zacatepec. División de Estudios de Posgrado e Investigación. nava_rodrigo@outlook.com, Calz. Tecnológico 27. CP 62780, Zacatepec, Morelos.
[2]Maestro en ciencias de la ingeniería, Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Zacatepec. Departamento de Ingeniería Química y Bioquímica. ochoadr@gmail.com, Tecnológico 27. CP 62780, Zacatepec, Morelos.
[3]Doctor en ciencia en ingeniería química, Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Zacatepec. División de estudios de posgrado e investigación. Departamento de Ingeniería Química y Bioquímica. juan.po@zacatepec.tecnm.mx, Tecnológico 27. CP 62780, Zacatepec, Morelos.
[4]Doctor en filosofía (fisicoquímica), Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Zacatepec. División de estudios de posgrado e investigación. Departamento de Ingeniería Química y Bioquímica. alfredo.qh@itzacatepec.edu.mx, Tecnológico 27. CP 62780, Zacatepec, Morelos.

Resumen – En este estudio, la tricaprilina y el ácido caprílico se emplean como moléculas modelo para comprender las reacciones involucradas en la producción de diésel verde. Durante la producción de diésel verde, pueden ocurrir reacciones indeseadas que afectan negativamente el poder calorífico del biocombustible final. Por ello, es fundamental analizar las rutas de descomposición y optimizar las condiciones operativas para maximizar la formación de hidrocarburos. Bajo este contexto, la descomposición unimolecular de la tricaprilina y el ácido caprílico se estudia de manera teórica mediante herramientas de química computacional.

Primero, se identifican de manera automatizada los puntos estacionarios de la superficie de energía potencial utilizando simulaciones de dinámica molecular en AutoMeKin. Posteriormente, las estructuras de estado de transición se optimizan a nivel PM7 en MOPAC. Finalmente, se calculan las coordenadas intrínsecas de reacción para garantizar que el punto silla conecta correctamente los reactivos y productos, confirmando la validez de las rutas de reacción identificadas.

El análisis de la descomposición de la tricaprilina revela dos vías de reacción para la formación de ácido caprílico, obteniéndose como contra fragmentos diglicéridos insaturados. Ambas rutas se caracterizan por la migración de un átomo de hidrógeno desde la molécula de glicerol del triglicérido hacia un oxígeno del grupo éster, diferenciándose en la posición de la fragmentación: en un caso se escinde una cadena alquílica lateral, mientras que en el otro, la fragmentación ocurre en la cadena central.

En la descomposición del ácido caprílico se identifican diversos productos, incluyendo gases como H_2, CO_2, CO y H_2O, junto con hidrocarburos saturados e insaturados, tales como heptano, 1-hepteno, 1-hexeno y eteno. Además, se observan compuestos oxigenados como etenona, 1-heptanal, ácido 5-hexenoico y ácido acrílico, los cuales podrían afectar la calidad del biocombustible producido.

Palabras Clave: Ácido caprílico, Diésel verde, Tricaprilina, Química computacional.

Abstract -- In this study, tricaprylin and caprylic acid are used as model molecules to understand the reaction mechanisms involved in the production of green diesel. During this process, undesirable reactions may occur that negatively affect the calorific value of the final biofuel. Therefore, it is essential to analyze the decomposition pathways and optimize the operating conditions to maximize the formation of hydrocarbons. In this context, the unimolecular decomposition of tricaprylin and caprylic acid is theoretically studied using computational chemistry tools.

First, stationary points on the potential energy surface are automatically identified using molecular dynamics simulations in AutoMeKin. Subsequently, the transition state structures are optimized at the PM7 level in MOPAC. Finally, the intrinsic reaction coordinates (IRC) are calculated to ensure that the saddle point correctly connects the reactants and products, confirming the validity of the identified reaction pathways.

The analysis of tricaprylin decomposition reveals two main reaction pathways for the formation of caprylic acid, yielding unsaturated diglycerides as counter fragments. Both pathways are characterized by the migration of a hydrogen atom from the glycerol molecule of the triglyceride to an oxygen atom of the ester group, differing in the fragmentation position: in one case, a lateral alkyl chain is cleaved, while in the other, the fragmentation occurs in the central chain.

In the decomposition of caprylic acid, various products are identified, including gases such as H_2, CO_2, CO, and H_2O, along with saturated and unsaturated hydrocarbons, such as heptane, 1-heptene, 1-hexene, and ethene. Additionally, oxygenated compounds such as ketene, 1-heptanal, 5-hexenoic acid, and acrylic acid are observed, which could affect the quality of the produced biofuel.

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

Key words – Caprylic acid, Green diesel, Tricaprylin, Computational chemistry,

INTRODUCCIÓN

En México, el 77.2% de la energía eléctrica total se genera a partir de tecnologías convencionales como vapor, turbogás, ciclo combinado, combustión interna y carboeléctrica [15], todas ellas caracterizadas por el uso de combustibles fósiles como materia prima. Estas tecnologías, si bien han garantizado un suministro energético constante, presentan importantes desventajas ambientales, como la emisión de gases de efecto invernadero hacia la atmósfera, contribuyendo al cambio climático y la contaminación ambiental. Por su parte, el 22.8% de la energía eléctrica proviene de tecnologías sostenibles como la hidráulica, nucleoeléctrica, eoloeléctrica, geotérmica y solar fotovoltaica [15], sin embargo, destaca la ausencia de biocombustibles como fuente de generación de energía eléctrica en el país.

Los biocombustibles, como el diésel verde, representan una opción alternativa para reducir la dependencia del uso de los hidrocarburos fósiles en sectores como el transporte y la generación de electricidad. Este biocarburante se genera a partir de fuentes renovables, como aceites vegetales, grasas animales y algas. El diésel verde al ser una mezcla de hidrocarburos tiene propiedades físicas y químicas similares al diésel convencional [1], siendo una alternativa para la transición hacia fuentes de energía sostenibles.

La producción de diésel verde se basa en la desoxigenación de los triglicéridos mediante procesos catalíticos como la descarboxilación, descarbonilación e hidrodesoxigenación, con el fin de obtener una mezcla de hidrocarburos utilizables como combustible [2]. Durante este proceso, los ácidos grasos se generan como productos intermedios clave, ya que a partir de ellos se llevan a cabo las reacciones de eliminación de oxígeno, lo que permite la formación de diferentes hidrocarburos [3], como se ilustra en la Figura 1. No obstante, la eficiencia del proceso se ve afectada por la aparición de reacciones secundarias indeseadas, como la ciclación de alcanos, la metanización, el desplazamiento agua-gas y la reacción de Boudouard [1], que comprometen el rendimiento energético del diésel verde.

Las reacciones secundarias no solo generan compuestos no deseados, como cetonas, aldehídos y gases de efecto invernadero, sino que también provocan un consumo excesivo de hidrógeno (H_2), la desactivación del catalizador y la formación de coque [1], lo que reduce la viabilidad económica del proceso. Por esta razón, es fundamental comprender los mecanismos de reacción involucrados para optimizar las condiciones operativas y minimizar la formación de subproductos.

El estudio de las reacciones químicas en la producción de diésel verde, se han utilizado compuestos modelo que simplifican la complejidad estructural de las moléculas presentes en los aceites y grasas. Estos compuestos permiten el análisis detallado de las rutas de descomposición para identificar los elementos que influyen en la eficacia de la conversión hacia hidrocarburos. Ejemplos de moléculas modelo empleadas en estudios previos incluyen la triacetina [4], [5], la tripropionina [6], la tricaproina [7] y la tricaprilina [8], [9].

En este contexto, la tricaprilina se ha seleccionado como la molécula modelo para el presente estudio, debido a que es un triglicérido saturado de cadena media compuesto por tres cadenas de ácido caprílico (C8:0), lo que le otorga similitud estructural con los triglicéridos presentes en los aceites. Además, su tamaño molecular moderado facilita los estudios computacionales y experimentales, reduciendo los costos y mejorando la eficiencia del análisis. El análisis de la descomposición de la tricaprilina permite obtener información valiosa sobre las etapas de reacción implicadas en la producción de diésel verde, contribuyendo a la optimización de las condiciones operativas.

La hidro conversión de la tricaprilina ha sido estudiada en reactores de flujo continuo a altas presiones, utilizando diferentes catalizadores para identificar los productos no deseados en la producción de hidrocarburos. Se han empleado catalizadores comerciales como 9Mo2.5Ni(P,Si) y 5PdC bajo condiciones de 21 bar y 380°C, logrando un rendimiento inferior al 38% en la producción de hidrocarburos [8]. Sin embargo, estudios posteriores emplearon catalizadores sintetizados de Pd/Al_2O_3 con diferentes porcentajes de fósforo (1%, 2.5% y 5%) bajo idénticas condiciones de operación. Los experimentos revelaron que el catalizador con un 2.5% de fósforo alcanzó el mejor rendimiento, logrando una conversión del 85% en la producción de n-heptano [9]. Estos resultados resaltan la importancia del ácido caprílico como un intermediario clave en la formación de hidrocarburos como el heptano, lo que sugiere que esta molécula también puede utilizarse como modelo para el estudio de la dinámica de reacción en la producción de diésel verde.

En el presente trabajo, se estudia la descomposición unimolecular de la tricaprilina y el ácido caprílico mediante herramientas de química computacional para comprender las trayectorias de reacción durante la producción de diésel verde. Primero, se explora la superficie de energía potencial utilizando simulaciones de dinámica molecular con el software AutoMeKin [10], [11], [12]. Luego, las estructuras candidatas a estados de transición se optimizan en MOPAC [16] a nivel de teoría semiempírico PM7 [13].

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

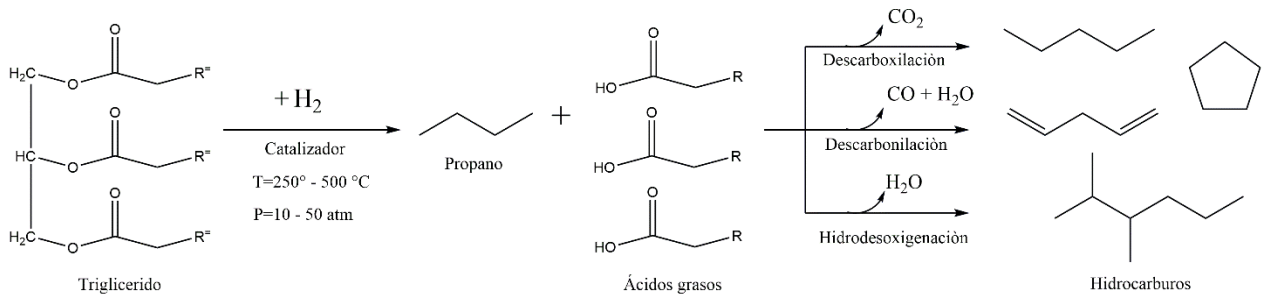


Figura 1. Proceso de desoxigenación de los triglicéridos.

El enfoque computacional utilizado en este estudio permite identificar los caminos de reacción más favorables, así como los productos intermedios que surgen durante la descomposición térmica de la tricaprilina. La información obtenida contribuirá a mejorar el diseño de procesos para la producción de diésel verde, optimizando las condiciones de operación y minimizando la formación de subproductos no deseados.

La producción de diésel verde a partir de triglicéridos representa una alternativa prometedora para disminuir la dependencia energética del petróleo. Sin embargo, su eficiencia se ve afectada por la complejidad de los mecanismos de reacción involucrados. La selección de la tricaprilina como molécula modelo permite un estudio detallado de estos procesos, proporcionando información clave para el desarrollo de tecnologías más eficientes y sostenibles.

DESARROLLO

Metodología

La búsqueda de puntos estacionarios (estados de transición y productos) en la superficie de energía potencial de la tricaprilina y el ácido caprílico se llevó a cabo utilizando el software AutoMeKin [10], [11], [12]. Este software permite la exploración automatizada del espacio de reacciones mediante simulaciones de dinámica química y algoritmos de búsqueda avanzada.

AutoMeKin emplea simulaciones de dinámica química bajo un ensamble micro canónico, en el cual las moléculas se modelan considerando condiciones de energía total constante. Este enfoque permite explorar de manera eficiente la evolución del sistema molecular a lo largo de la superficie de energía potencial. Posteriormente, el algoritmo *Bond Breakage/Formation Search* (BBFS), que representa el sistema molecular mediante una matriz de adyacencia (Figura 2), selecciona estructuras candidatas de posibles trayectorias reactivas mediante criterios matemáticos.

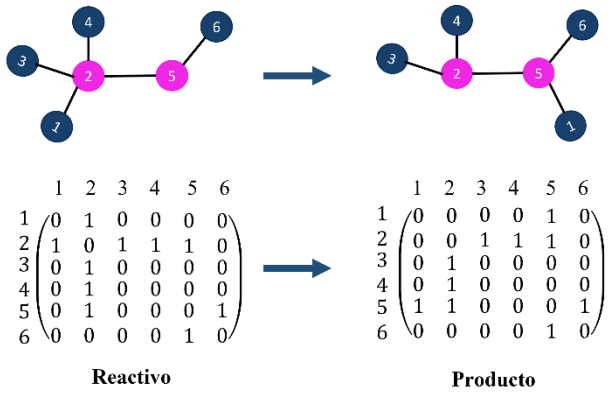


Figura 2. Representación de un sistema molecular a través de una matriz de adyacencia.

Las estructuras seleccionadas son parcialmente optimizadas a nivel PM7 [13] utilizando el software MOPAC [16], con el objetivo de minimizar el costo computacional. Durante la optimización, se congelan los átomos que no participan directamente en la reacción, lo que reduce significativamente los tiempos de cálculo y permite focalizar el análisis en las regiones químicamente activas de la molécula.

Una vez identificados los estados de transición, se calculan las coordenadas intrínsecas de reacción para verificar que el punto silla conecta correctamente con los reactivos y productos en la superficie de energía potencial. Este análisis es fundamental para asegurar la validez de los estados de transición y garantizar que las trayectorias reactivas identificadas representen verdaderos caminos de reacción.

En las Figuras 3A y 3B, se presentan las geometrías moleculares utilizadas en las simulaciones de dinámica molecular para la tricaprilina y el ácido caprílico, respectivamente, en AutoMeKin. En estas figuras, los átomos de carbono se muestran en color gris, los átomos de hidrógeno en azul y los átomos de oxígeno en rojo, lo que permite identificar visualmente las diferencias estructurales entre los compuestos estudiados.

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

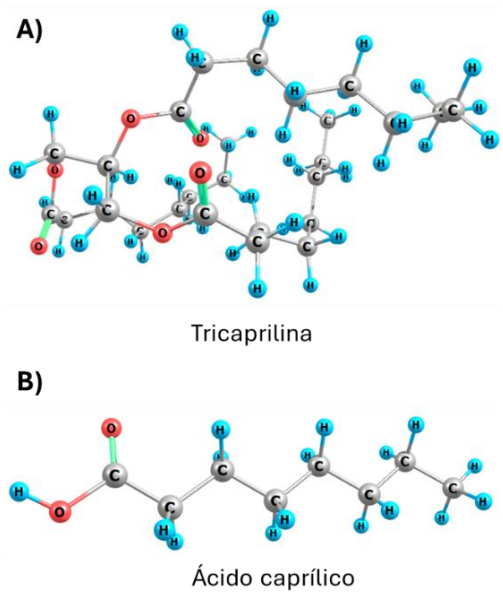


Figura 3. Geometrías usadas en las simulaciones de dinámica molecular A) tricaprilina y B) ácido caprílico.

Las simulaciones de dinámica molecular se llevaron a cabo utilizando una serie de parámetros cuidadosamente seleccionados para garantizar una exploración exhaustiva de la superficie de energía potencial:

- Se establecieron 10 trayectorias por iteración mediante la palabra clave *ntraj*, con un total de 5 iteraciones para la tricaprilina y 10 iteraciones para el ácido caprílico. Este número de iteraciones permite una adecuada cobertura de la superficie de energía potencial, asegurando la identificación de posibles caminos reactivos relevantes.
- Se optimizaron aquellas estructuras que presentaban una frecuencia imaginaria superior a 0 min^{-1}, lo que garantiza la naturaleza de estado de transición de las estructuras seleccionadas.
- Se estableció un valor de 0.1 para el valor propio más bajo del Laplaciano (parámetro *eigLmax*), lo que permite diferenciar con precisión las estructuras de transición de los productos de fragmentación de los intermedios [14].
- Se emplearon los valores de 0.002 y 1.5 para los descriptores *mapemax* y *bapemax*, dado en ese orden, en el proceso de filtrado de las estructuras obtenidas a partir de las simulaciones de dinámica molecular. Estos parámetros permiten seleccionar únicamente aquellas estructuras con mayor relevancia química y energética, evitando la consideración de trayectorias no reactivas o de baja significancia [14].

La optimización de las estructuras se realizó utilizando el método PM7, un método semiempírico que ofrece un equilibrio entre precisión y eficiencia computacional para sistemas orgánicos de gran tamaño.

PM7 permite capturar adecuadamente los efectos electrónicos relevantes para la descomposición de triglicéridos, con un costo computacional reducido en comparación con métodos *ab initio* o de la teoría funcional de la densidad.

DISCUSIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Descomposición de tricaprilina

En la Figura 4, se presenta un esquema detallado de las reacciones de descomposición de la tricaprilina para la formación de ácido caprílico. La formación de ácido caprílico se lleva a cabo a través de dos posibles estados de transición, TS_1 y TS_2, los cuales conducen a diferentes contra fragmentos en cada caso.

En la reacción P1, se observa que el hidrógeno del carbono central de la molécula de glicerol de la tricaprilina se desplaza hacia un oxígeno del grupo carbonilo de las cadenas alquílicas laterales del triglicérido, resultando en la formación de dioctanoato de prop-2-eno-1,2-diilo. Por otro lado, en la reacción P2, ocurre una transferencia de hidrógeno hacia el oxígeno del grupo éster de la cadena alquílica central del triglicérido, generando como producto dioctanoato de prop-1-eno-1,3-diilo.

El análisis de estas rutas revela que la diferencia en la ubicación de la transferencia de hidrógeno influye en la formación de productos estructuralmente distintos, lo que sugiere posibles diferencias en las propiedades fisicoquímicas de los compuestos generados.

Descomposición de ácido caprílico

En la Figura 5, se presentan siete canales de reacción para la descomposición del ácido caprílico, un producto intermedio clave en la producción de diésel verde. Los mecanismos de reacción incluyen rutas de descarboxilación, descarbonilación e hidrólisis, cada una generando distintos productos finales.

En la descomposición de ácido caprílico se identifican diferentes productos tal como gases como H_2, CO_2, CO, H_2O, junto con hidrocarburos de cadena alquílica saturada e insaturada, heptano, como 1-hepteno, 1-hexeno, eteno, 1-hepteno y compuestos oxigenados como etenona, 1-heptanal, ácido 5-hexenoico y ácido acrílico.

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

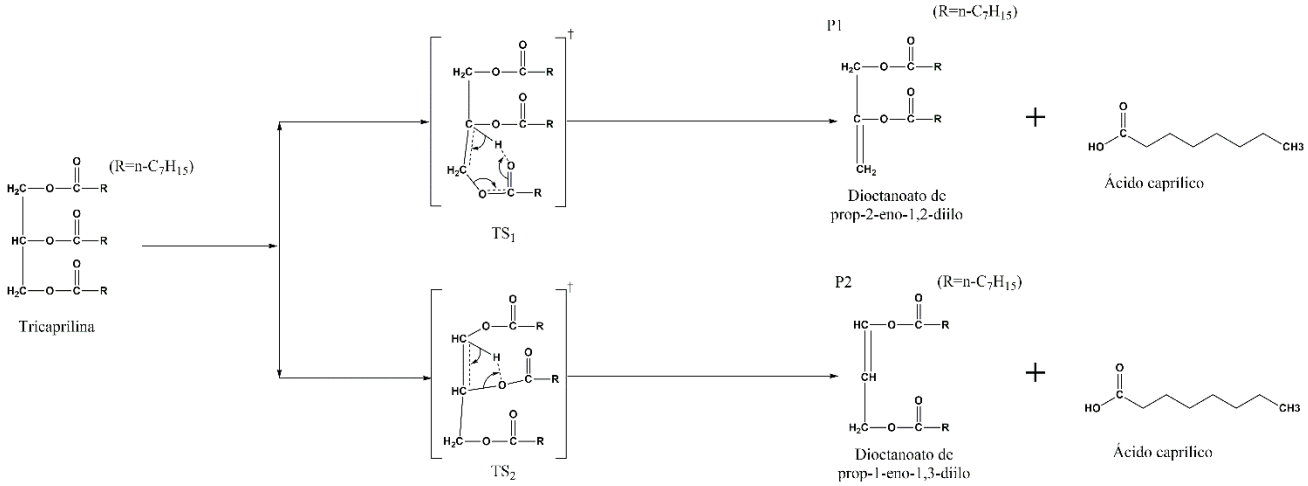


Figura 4. Formación de ácido caprílico a partir de la descomposición de Tricaprilina.

Reacciones de descarboxilación (P2 y P3)

Las reacciones P2 y P3 corresponden a descarboxilaciones, caracterizadas por la liberación de dióxido de carbono, lo que implica la pérdida del grupo éster y la formación de hidrocarburos.

En la reacción P2, que es una reacción de tres cuerpos, los productos formados son hidrógeno molecular, 1-hepteno y CO_2. Por otro lado, en la reacción P3, el contra fragmento del CO_2 es heptano, sugiriendo una ruta alternativa para la formación de alcanos saturados. Estas reacciones son particularmente relevantes, ya que la eliminación de CO_2 mejora la calidad del biocombustible al reducir la cantidad de compuestos oxigenados en el producto final.

Reaccion de descarbonilación

La reacción P4 representa otra vía importante para la formación de 1-hepteno, mediante un mecanismo de descarbonilación, donde se elimina monóxido de carbono en lugar de CO_2. Esta reacción también es de tres cuerpos, donde se desprende agua como subproducto adicional.

Reacciones con formación de agua

La formación de agua se observa en las reacciones P5 y P6. En la reacción P5, similar a P2 y P4, se trata de una reacción de tres cuerpos que genera etenona y 1-hexeno, lo que indica la fragmentación de la cadena alquílica del ácido caprílico. Por otro lado, la reacción P6 produce 1-heptanal, un compuesto oxigenado de gran relevancia en la industria de los perfumes y los saborizantes [16]. El 1-heptanal puede ser hidrogenado posteriormente para obtener hidrocarburos más estables [8], [9].

Reacciones de formación de ácidos grasos más cortos

Las reacciones P7 y P8 se caracterizan por la formación de ácidos grasos con cadenas alquílicas más cortas que la del ácido caprílico original.

En ambas reacciones, se generan tres productos: hidrógeno molecular, un ácido graso de menor longitud (ácido 5-hexenoico en P7 y ácido acrílico en P8), y un hidrocarburo insaturado (eteno en P7 y 1-penteno en P8). Estos productos son de gran interés, ya que permiten la producción de compuestos químicos de alto valor agregado en la industria de los biocombustibles y materiales poliméricos.

Valores de energía para los caminos de reacción de ácido caprílico

En la Tabla 1, se presentan los valores de energía de la energía de los productos, así como lo valores de energía del estado de transición correspondientes a los diferentes canales de reacción del ácido caprílico, evaluados a nivel de teoría semiempírico PM7.

Los valores más altos de energía de estado de transición indican reacciones que requieren más energía para su activación. Se observa que la reacción P3 tiene el estado de transición más alto (83.36 kcal/mol), lo que sugiere una menor viabilidad cinética bajo condiciones estándar. Por otro lado, la reacción P6 presenta el estado de transición más bajo (50.48 kcal/mol), lo que indica que es la ruta más favorable energéticamente.

Las reacciones P2 y P3 tienen valores negativos en su energía de los productos, lo que indica que son reacciones exotérmicas, liberando energía y favoreciendo la formación de productos estables. Estas reacciones al presentar energías de los productos negativas son procesos potencialmente espontáneos.

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

Tabla 1. Valores de energía de los caminos de reacción del ácido caprílico a nivel PM7.

Canal de reacción		Estado de transición (kcal/mol)	Energía de los productos (kcal/mol)
P2	$H_2 + CO_2 + CH_2{=}CHCH_2CH_2CH_2CH_2CH_3$	49.47	-7.01
P3	$CO_2 + CH_3CH_2CH_2CH_2CH_2CH_2CH_3$	83.36	-0.67
P4	$H_2O + CO + CH_2{=}CHCH_2CH_2CH_2CH_2CH_3$	72.04	30.56
P5	$H_2O + O{=}C{=}CH_2 + CH_2{=}CHCH_2CH_2CH_2CH_3$	69.33	32.42
P6	$H_2O + O{=}C{=}CHCH_2CH_2CH_2CH_3$	50.48	19.85
P7	$H_2 + HOOCCH_2CH_2CH_2{=}CH_2 + CH_2{=}CH_2$	66.58	11.54
P8	$H_2 + HOOCCH{=}CH_2 + CH_2{=}CHCH_2CH_2CH_3$	58.67	10.62

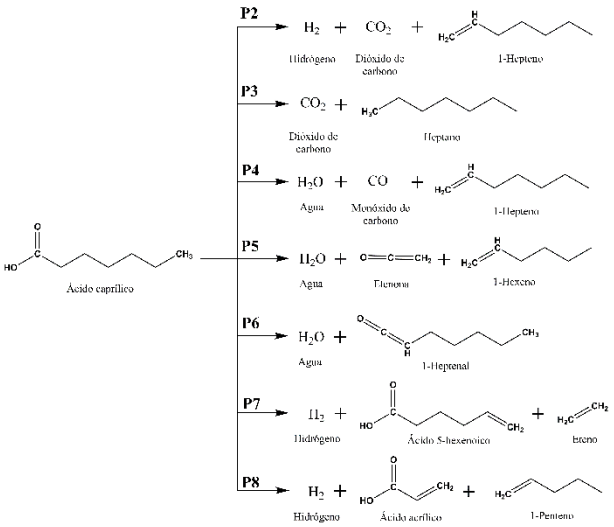


Figura 5. Rutas de reacción para la descomposición de ácido caprílico.

En este caso, la reacción P2 tiene la energía de los productos más baja (-7.01 kcal/mol), lo que sugiere que es la más favorable termodinámicamente.

Las reacciones P4 y P5 muestran valores positivos relativamente altos (30.56 kcal/mol y 32.42 kcal/mol, respectivamente), lo que indica que podrían ser procesos endotérmicos, requiriendo aporte de energía para la formación de los productos.

Las reacciones P3 y P4 presentan las barreras más altas (83.36 kcal/mol y 72.04 kcal/mol), lo que sugiere que requieren condiciones más severas de temperatura o la presencia de un catalizador más eficiente.

Las reacciones P2 y P6 son las más accesibles desde el punto de vista cinético, con valores más bajos de energía de activación.

Las reacciones P7 y P8, que producen compuestos oxigenados como el ácido acrílico y el ácido 5-hexenoico, podrían ser útiles en aplicaciones específicas, aunque su alto costo energético debe ser considerado.

La reacción P3, aunque presenta una barrera energética alta, produce heptano, un hidrocarburo saturado de alto valor energético, por lo que su optimización podría ser de interés.

CONCLUSIONES

En este trabajo se ha estudiado la descomposición unimolecular de la tricaprilina y el ácido caprílico mediante simulaciones de dinámica molecular y cálculos a nivel de teoría semiempírico PM7. Los resultados obtenidos permiten identificar los caminos de reacción más favorables para la producción de hidrocarburos de interés en la fabricación de diésel verde, proporcionando una visión detallada de los mecanismos de reacción involucrados.

El análisis de los estados de transición y la evaluación de las energías de los productos indican que la reacción P2, que involucra la formación de 1-hepteno y la liberación de CO_2 e H_2, es la ruta más favorable desde el punto de vista termodinámico y cinético, con la menor barrera de activación (49.47 kcal/mol) y una energía de los productos negativa (-7.01 kcal/mol), lo que sugiere su viabilidad para la optimización de procesos industriales. Por otro lado, la reacción P3, que produce heptano, presenta la barrera de energía más alta (83.36 kcal/mol), lo que podría requerir condiciones de reacción más severas o el uso de catalizadores específicos para su optimización.

Finalmente, los hallazgos de este estudio aportan información valiosa para el desarrollo de estrategias de optimización en la producción de biocombustibles a partir de fuentes renovables, contribuyendo al diseño de procesos más eficientes y sostenibles. Se recomienda la aplicación de modelos de mayor precisión, como la teoría del funcional de la densidad, para validar los resultados obtenidos y la experimentación a escala piloto para evaluar la viabilidad industrial del proceso.

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

AGRADECIMIENTOS
Los autores agradecen al Laboratorio Nacional de Supercómputo del sureste de México perteneciente a la red de laboratorios nacionales SECIHTI, por los recursos computacionales, el apoyo y la asistencia técnica.

BIBLIOGRAFÍA

[1] S. Lucantonio, A. Di Giuliano, L. Rossi, and K. Gallucci, "Green Diesel Production via Deoxygenation Process: A Review," *Energies (Basel)*, vol. 16, no. 2, p. 844, Jan. 2023, doi: 10.3390/en16020844.

[2] F. Long *et al.*, "State-of-the-art technologies for biofuel production from triglycerides: A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 148, p. 111269, Sep. 2021, doi: 10.1016/j.rser.2021.111269.

[3] N. Hongloi, P. Prapainainar, and C. Prapainainar, "Review of green diesel production from fatty acid deoxygenation over Ni-based catalysts," *Molecular Catalysis*, vol. 523, p. 111696, May 2022, doi: 10.1016/j.mcat.2021.111696.

[4] T. Laino, C. Tuma, P. Moor, E. Martin, S. Stolz, and A. Curioni, "Mechanisms of Propylene Glycol and Triacetin Pyrolysis," *J Phys Chem A*, vol. 116, no. 18, pp. 4602–4609, May 2012, doi: 10.1021/jp300997d.

[5] F. L. Simons, "THE CATALYTIC DECOMPOSITION OF SIMPLE GLYCERIDES," *J Am Chem Soc*, vol. 48, no. 7, pp. 1991–1994, Jul. 1926, doi: 10.1021/ja01418a030.

[6] C. T. Mukeba, B. K. Isamura, V. Mudogo, H. M. Katshiatshia, and J. T. Muya, "Bond dissociation energies of ethyl valerate and tripropionin," *J Mol Model*, vol. 29, no. 8, p. 261, Aug. 2023, doi: 10.1007/s00894-023-05666-6.

[7] Y. C. Lien and W. W. Nawar, "Thermal decomposition of tricaproin," *J Am Oil Chem Soc*, vol. 50, no. 3, pp. 76–78, Mar. 1973, doi: 10.1007/BF02671107.

[8] L. Boda, G. Onyestyák, H. Solt, F. Lónyi, J. Valyon, and A. Thernesz, "Catalytic hydroconversion of tricaprylin and caprylic acid as model reaction for biofuel production from triglycerides," *Appl Catal A Gen*, vol. 374, no. 1–2, pp. 158–169, Feb. 2010, doi: 10.1016/j.apcata.2009.12.005.

[9] A. Vikár *et al.*, "A study of the mechanism of triglyceride hydrodeoxygenation over alumina-supported and phosphatized-alumina-supported Pd catalysts," *J Catal*, vol. 404, pp. 67–79, Dec. 2021, doi: 10.1016/j.jcat.2021.08.052.

[10] E. Martínez-Núñez, "An automated transition state search using classical trajectories initialized at multiple minima," *Physical Chemistry Chemical Physics*, vol. 17, no. 22, pp. 14912–14921, 2015, doi: 10.1039/C5CP02175H.

[11] E. Martínez-Núñez, "An automated transition state search using classical trajectories initialized at multiple minima," *Physical Chemistry Chemical Physics*, vol. 17, no. 22, pp. 14912–14921, 2015, doi: 10.1039/C5CP02175H.

[12] E. Martínez-Núñez *et al.*, "<scp>AutoMeKin2021</scp> : An open-source program for automated reaction discovery," *J Comput Chem*, vol. 42, no. 28, pp. 2036–2048, Oct. 2021, doi: 10.1002/jcc.26734.

[13] J. J. P. Stewart, "Optimization of parameters for semiempirical methods VI: more modifications to the NDDO approximations and re-optimization of parameters," *J Mol Model*, vol. 19, no. 1, pp. 1–32, Jan. 2013, doi: 10.1007/s00894-012-1667-x.

[14] B. Ballotta, E. Martínez-Núñez, S. Rampino, and V. Barone, "Competition between Abstraction and Addition Channels for the Reaction between the OH Radical and Vinyl Alcohol in the Interstellar Medium," *ACS Earth Space Chem*, vol. 7, no. 7, pp. 1467–1477, Jul. 2023, doi: 10.1021/acsearthspacechem.3c00110.

[15] SENER. (2024). 6 Informe de Labores. https://base.energia.gob.mx/IL/6-Informe-de-laboresSENER.pdf [Fecha consultada: 25 de mayo del 2023].

[16] Stewart, "MOPAC2016," 2016; http://openmopac.net/MOPAC2016.html; 10th May 2024

AUTORIZACIÓN Y RENUNCIA.
Los autores del presente artículo autorizan al TecNM/Instituto Tecnológico de Zacatepec para publicar el escrito en el libro electrónico del CITID 2025. El TecNM/ITZ o los editores no son responsables ni por el contenido ni por las implicaciones de lo que está expresado en el escrito.

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

SÍNTESIS DEL 1,6-DIFENIL-1,3,5-HEXATRIENO CON PROPIEDADES FLUORESCENTES, POR MEDIO DE LA REACCIÓN DE McMURRY

Sebastián Lizardi Rivera[1], Edgar A. Aguilar Ortìz[2], Yoarhy A. Amador-Sánchez[3], Elena Klimova†[4], Jessica J. Sánchez Garcìa[5]

[1]Maestro en Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Química, Departamento de Química Orgánica, sebastianlir7@gmail.com, tel. 56223899 ext. 44448, CP. 04510.
[2]Doctor en Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México, Unidad de Radiofarmacia, División de Investigación, Facultad de Medicina, edgaraguilar08@gmail.com, tel. 56223899, ext. 44448, C.P. 04510.
[3]Doctor en Ciencias, Universidad Autónoma Metropolitana-Iztapalapa, Departamento de Química, yoarhy@gmail.com, tel. 58044913, C.P. 09310.
[4]Doctora en Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Química, Departamento de Química Orgánica, CP. 04510. † *en memoria de la Dra. Elena Klimova, por su amor a la ciencia.*
[4]Doctora en Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Química, Departamento de Química Analítica, heparina250ml@quimica.unam.mx, tel. 56223899 ext. 44448, CP. 04510.

Resumen – El 1,6-difenil-1,3,5-hexatrieno se ha estudiado como un nuevo material debido a sus propiedades ópticas como solvatocromismo y fluorescencia, uno de los métodos de síntesis para obtenerlo es por medio de una reacción de McMurry que consiste en una homocondensación del cinamaldehído con Znº como agente reductor y se probaron diferentes condiciones de reacciòn, con cuatro diferentes especies bajo-valentes ($TiCl_4$, $SnCl_4$, $AlCl_3$, $Ti(^iOPr)_4$) con la misma cantidad estequiometrica en mol, pero con la variación de tres tiempos de reacción a (2, 4 y 6 horas). Las mejores condiciones de reacción se establecen cuando se trabaja con el $TiCl_4$ a 4 horas de reacción, obteniendo un rendimiento del 20%. se realizan los estudios de espectroscopia convencional como Infrarrojo y RMN de ^1H y ^{13}C, para caracterizar el compuesto obteniendo las bandas características de los dobles enlaces C=C, en la región de 1185, 1492, 1582, 1724, 2954 cm^{-1} , las señales de los espectros de RMN de ^1H, se observa un desplazamiento químico en δ =6.51 que integra para dos hidrógenos olefinicos, en δ=6.590 y δ=6.616 ppm, que integra para un hidrógeno olefinico, en δ=6.886 con dos dobles dobletes para dos hidrógenos olefinicos y las señales en δ=7.24, 7.323 y 7.426 ppm que corresponden a los 5 hidrógenos de los anillos aromáticos, en el espectro de RMN de ^{13}C, se observan las señales de los carbonos aromáticos en δ=129.10 ppm y las señales de los carbonos olefinicos en δ=119.84, 126.68, 126.81, 138.23 y 141.26 ppm.

Palabras Clave: Fluorescencia, Reacción de McMurry, Cinamaldehído, Solvatocromismo, Espectroscopia.

Abstract -- 1,6-Diphenyl-1,3,5-hexatriene has been studied as a new material due to its optical properties such as solvatochromism and fluorescence, one of the synthesis methods to obtain it is by means of a McMurry reaction consisting of a homocondensation of cinnamaldehyde with Znº as a reducing agent and different reaction conditions were tested, with four different low-valent species ($TiCl_4$, $SnCl_4$, $AlCl_3$, $Ti(^iOPr)_4$) with the same stoichiometric amount in mol, but with the variation of three reaction times (2, 4 and 6 hours). The best reaction conditions are established when working with TiCl4 at 4 hours of reaction, obtaining a yield of 20%. Conventional spectroscopy studies such as infrared and ^1H and ^{13}C NMR are carried out to characterize the compound, obtaining the characteristic bands of the C = C double bonds in the region of 1185, 1492, 1582, 1724, 2954 cm-1, the signals of the ^1H NMR spectra, a chemical shift is observed at δ = 6.51 that integrates for two olefin hydrogen's, at δ = 6,590 and δ = 6,616 ppm, which integrates for an olefin hydrogen, at δ = 6,886 with two double doublets for two olefin hydrogen's and the signals at δ = 7.24, 7,323 and 7,426 ppm that correspond to the 5 hydrogen's of the aromatic rings, in the ^{13}C NMR spectrum, the signals of the carbons are observed aromatics at δ=129.10 ppm and the olefin carbon signals at δ=119.84, 126.68, 126.81, 138.23 and 141.26 ppm..

Key words – Fluorescence, McMurry reaction, Cinnamaldehyde, Solvatochromism, Spectroscopy.

INTRODUCCIÓN

Encontrar nuevos métodos de síntesis de monómeros con diversas aplicaciones, son de los problemas más importantes que nos encontramos en la actualidad, entre estos métodos hay un método muy poco explorado pero que se pueden obtener diferentes tipos de dienos y polienos con buenos rendimientos, que si bien estos productos pueden ser comerciales, su venta está restringida a diversos países, en especial en México, los limitantes de importación de los productos químicos, de forma que buscar los métodos de síntesis eficientes nos favorece para tener materiales accesibles.

Reacción de McMurry

En 1974 el científico John E. McMurry trabajaba en diversas áreas de síntesis orgánicas en donde descubrió y

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

publicó, lo que después se conoció como la reacción de McMurry [1], durante la síntesis de un producto natural, deseaba llevar a cabo la transformación de alto rendimiento de una cetona α,β-insaturada [2].

La reacción de McMurry es una reacción orgánica en la que dos cetonas o aldehídos se acoplan para obtener un alqueno. La reacción de McMurry es un modelo importante en síntesis orgánica ya que se pueden obtener diferentes tipos de productos de acuerdo con sus condiciones de reacción utilizadas [3].

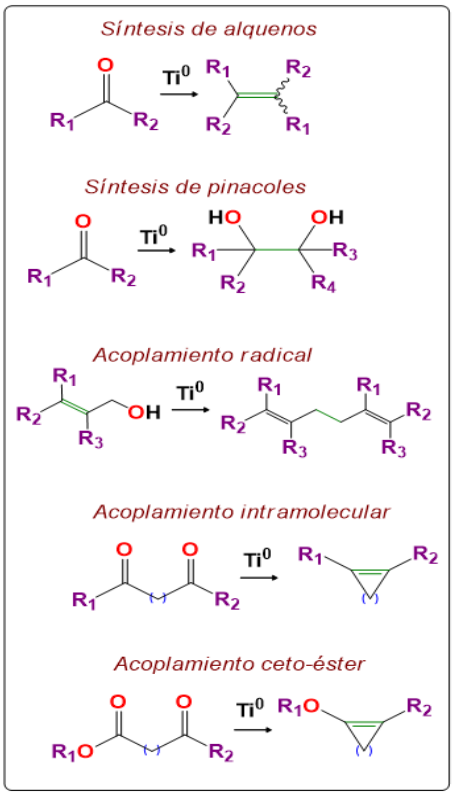


Figura 1. Versatilidad de la reacción de McMurry

Factores que involucran en la reacción de McMurry
Dentro de los principales factores que pueden interferir en la reacción de McMurry se encuentran los siguientes [4]:
Sustratos: deben contener uno o más grupos funcionales carbonilo, como aldehídos, cetonas, oxoamidas, acilsilanos, enonas conjugadas, aciloínas y cetoésteres, para generar alquenos.

Metales bajo-valentes: El acoplamiento del sustrato es inducido por una transferencia de un solo electrón del metal de baja valencia a los grupos carbonilo.

Disolventes: El tetrahidrofurano (THF) es el disolvente más utilizado debido a su capacidad para disolver complejos intermedios de pinacolato, facilitar el proceso de transferencia de electrones y mantener su forma sin reducirse en las condiciones de la reacción de McMurry.

Agentes reductores: El metal de zinc activado o zinc-cobre es un agente reductor común utilizado.

Aplicaciones de la reacción de McMurry
La reacción de McMurry se ha aplicado con éxito en la síntesis de productos naturales complejos, anillos, productos no naturales y en los últimos años, también se ha utilizado para el acoplamiento de cetoésteres [5]. En muchos casos, se han sintetizado moléculas para las cuales no existen otros métodos viables [6].

La reacción de acomplamiento de McMurry se ha utilizado para producir diversos materiales en campos como la óptica electrónica [7], fluorescencia [8], productos fotosensibles [9], nanocomponentes [10] y con propiedades electrocrómicas [11] (Figura 2).

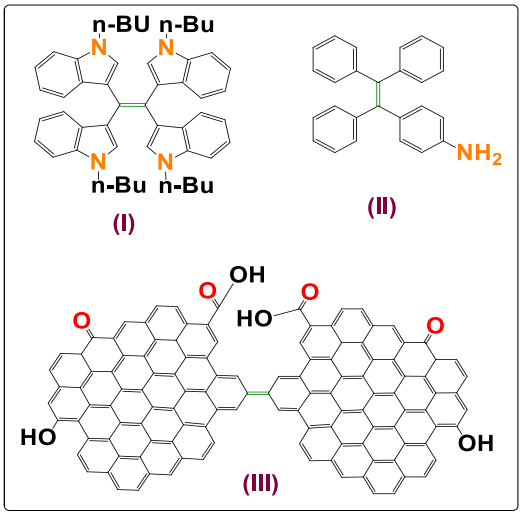


Figura 2. Aplicación de productos sintéticos obtenidos por medio de la reacción de McMurry

Se han sintetizado moléculas precursoras para la síntesis de macromoléculas y de una serie de derivados anticancerígenos [12] (Figura 3).

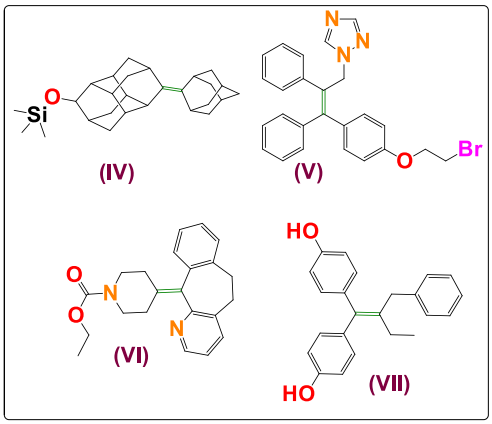


Figura 3. Aplicación de productos naturales obtenidos por medio de la reacción de McMurry

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

Aplicación de los compuestos polienos
Los compuestos poliénicos forman parte de diferentes cromóforos que intervienen en procesos bioquímicos, importantes entre los que encontramos la visión, la coloración de frutas y verduras, la generación de vitaminas y para diferentes mecanismos de protección frente a la luz solar.

Se ha estudiado al 1,6-difenil-1,3,5-hexatrieno (Figura 4) como un compuesto que muestra fluorescencia y se ha estudiado sus transiciones y comportamiento en diferentes disolventes a diferentes temperaturas con la finalidad de comprender sus propiedades fotofísicas [13].

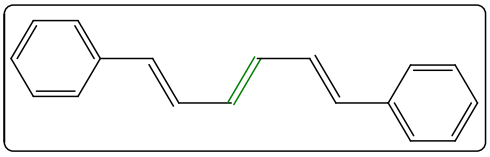


Figura 4. Estructura química del 1,6-difenil-1,3,5-hexatrieno

Se ha estudiado que un compuesto fluorescente que emite luz en configuraciones especificas en determinados medios lipídicos, ya que se ha utilizado como herramienta en el estudio de lípidos de membrana [14], además se ha utilizado para estudiar la cinética enzimática, lo que facilita el estudio de las velocidades de reacción catalizadas por enzimas, además de proporcionar información sobre los sistemas biológicos al proporcionar Información sobre la estructura y la función de las proteínas, las enzimas y otras moléculas biológicas [15].

Se ha estudiado al 1,6-difenil-1,3,5-hexatrieno con propiedades de solvatocromismo, este fenómeno se produce cuando el espectro de absorción de un soluto se modifica al cambiar el solvente. Ya que puede utilizarse para sus propiedades en diferentes tipos de materiales, con propiedades ópticas [16].

En la Figura 3 se muestra las áreas de absorción de UV/Vis del trieno disuelto el decalina/metilciclohexano (1:1 en volumen) DEMCHEM y medidos a concentraciones constantes entre las temperaturas de 93 y 363 K (Figura 5).

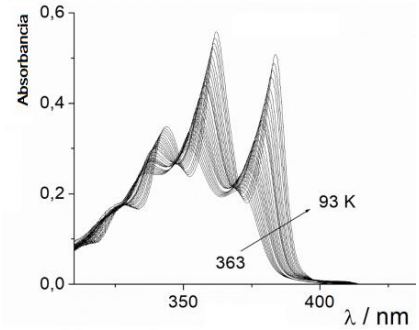


Figura 5. Primera banda de absorción del 1,6-difenil-1,3,5-hexatrieno

En la Figura 6 se observa las emisiones de fluorescencia obtenidas del 1,6-difenil-1,3,5-hexatrieno disuelto en *cis*-decalina medidos a 293K [17].

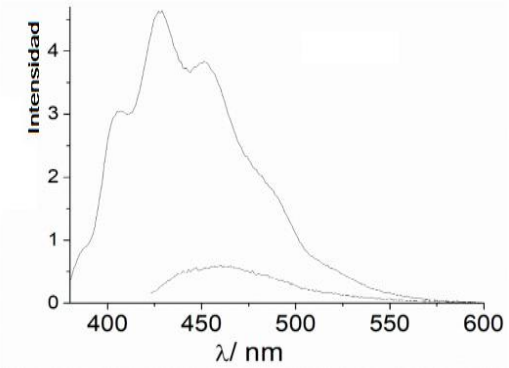


Figura 6. Espectro de emisión de fluorescencia del 1,6-difenil-1,3,5-hexatrieno

De forma que como se ha estudiado en la literatura el 1,6-difenil-1,3,5-hexatrieno es un compuesto que presenta propiedades de solvatocromismo con diferentes dependencias a la temperatura, además de presentar propiedades de fluorescencia, es importante tener métodos de síntesis accesibles y no tener la dependencia con los productos comerciales, ya que el Cinamaldehído es un producto que se puede adquirir con facilidad y es accesible en costos.

En el presente trabajo de investigación se describe un método de síntesis optimizado por medio de la reacción de McMurry a partir del cinamaldehído, estudiando cuatro diferentes especies bajo valentes a diferentes tiempos de reacción, para lograr determinar las mejores condiciones de reacción.

DESARROLLO

Síntesis de dienos a partir de la reacción de McMurry.
Todos los disolventes se secaron de acuerdo con los procedimientos estándar y se destilaron antes de su uso. La cromatografía en columna se llevó a cabo sobre alúmina (actividad III de Brockmann). Los espectros de RMN de ^{1}H y ^{13}C se realizaron en un espectrómetro Unity Inova Varian (400 MHz y 100 MHz) para soluciones en $CDCl_3$ usado como estándar Me_4Si. Se informaron cambios químicos (δ en ppm) con respecto a los picos de disolvente residual como estándar interno (^{1}H: $CDCl_3$, δ = 7.26 ppm, ^{13}C: $CDCl_3$, δ = 77.2 ppm), los valores de δ se midieron con precisión de 0,01 ppm. Los espectros de IR se midieron en un espectrofotómetro FT-IR (instrumentos Spectrum RXI Perkin Elmer 400) usando como referencia KBr.

Procedimiento General
En un matraz de 50 mL sea adicionó polvo de zinc (20 mmol) con 10 mL de THF (tetrahidrofurano) frio, se coloca en un baño de hielo con agitación constante y se

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

adiciona cuidadosamente la correspondiente especie bajo valente (10 mmol) en atmósfera inerte de argón, se retira del baño de hielo y se mantiene en agitación por un intervalo de 20 a 30 minutos en temperatura ambiente, posteriormente se incrementa lentamente la temperatura hasta los 66°C, durante 90 minutos. Posteriormente se adicionan 5 mL de THF con los sustratos correspondientes para realizar el homoacoplamiento de cinamaldehído 20 mmol. Esta mezcla de reacción permanece en reflujo por un periodo de dos horas. Una vez concluido este periodo, el crudo de la reacción se vierte sobre un baño de agua con hielo (0 a 4°C), se realizan 3 lavados con CH_2Cl_2 y se extrae la fase orgánica. A esta fase orgánica se le realizan dos lavados con una disolución de $NaHCO_3$ [0.5 M]. La fase orgánica se concentra en un rotavapor y el producto se purifica en columna de Al_2O_3 (Neutra, Actividad Brockmann III) y en placas preparativas de SiO_2.

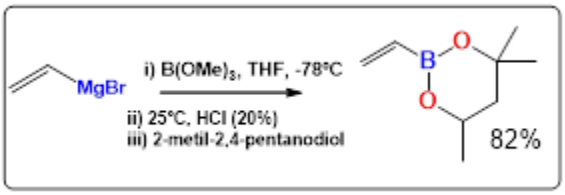
1,6-difenil-1,3,5-hexatrieno: Polvo blanco. p.f. 194-196°C. RMN de ^1H (400 MHz, $CDCl_3$): δ = 6.53, 6.61, 7.23 (dd, 1H, =CH; J=4.08 Hz), 6.86-6.91, 7.30-7.33, 7.41-7.42 (m, 1H, C_6H_5).

RMN de ^{13}C (100 MHz, $CDCl_3$): δ=119.84, 126.68, 126.81, 138.23, 141.26, 129.10 (Car). Fórmula mínima: $C_{20}H_{16}FeO$. Peso molecular: 328.19 g/mol. Análisis elemental. Teórico: C: 6.95%; H: 4.98%.

DISCUSIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

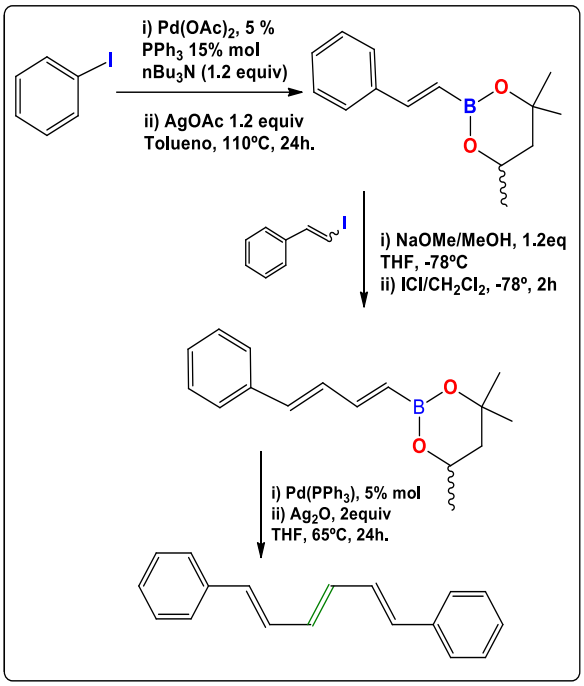
Se ha reportado la síntesis de 1,6-difenil-1,3,5-hexatrieno a partir de yodobenceno y 4,4-trimetil-2-vinil-1,3,2-dioxoborinano mediante una serie de pasos de reacciones de yododesboraciòn estereocontroladas de Heck, Suzuki-Miyaura [18].

Pero para ello primero es necesario realizar la síntesis del 4,4,+-trimetil-2-vinil-1,3,2-dioxoborinano, como se muestra en el Esquema 1.



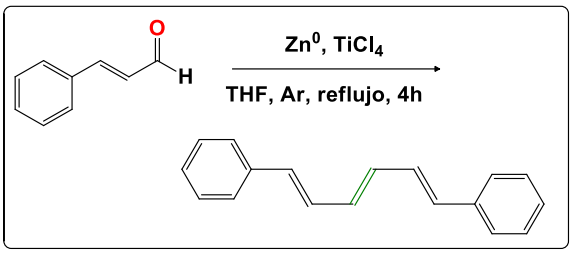
Esquema 1. Síntesis del 4,4,+-trimetil-2-vinil-1,3,2-dioxoborinano

Posteriormente se realiza la síntesis de 1,6-difenil-1,3,5-hexatrieno por medio del acoplamiento de Heck del yodobenceno con el ester del vinilboranato (Esquema 2), De los cuales se obtiene una mezcla de cuatro diferentes isómeros.



Esquema 2. Síntesis del 1,6-difenil-1,3,5-hexatrieno por medio de la reacción de acoplamiento de Heck.

En este trabajo de investigación se muestra un método de síntesis eficiente y en un solo paso del 1,6-difenil-1,3,5-hexatrieno por medio de la reacción de McMurry a partir de realizar el homoacoplamiento del cinamaldehído (Esquema 3).



Esquema 3. Síntesis de 1,6-difenil-1,3,5-hexatrieno por medio de la reacción de McMurry

Para ello se estudiaron diversos tiempos de reacción, con diferentes especies bajo-valentes para encontrar las mejores condiciones de reacción y el mejor rendimiento del producto (Tabla 1).

Con base en los resultados encontrados en la tabla 1, se puede observar que la mejor especie bajo-Valente es el $TiCl_4$, en un tiempo de 4 horas de reacción ya que cuando se aumenta el tiempo de reacción ya no aumenta el rendimiento, pero se ha observado que cuando se deja la reacción por tiempos prolongados de reacción no se logró identificar ningún producto, observándose que en 4 y 6 horas de reacción el rendimiento es del 20%.

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

Observándose que es el $TiCl_4$ es la mejor especie bajo-Valente estudiada. En el caso del $SnCl_4$ como especie bajo-valente, no se observa un rendimiento mayor al 10%, cuando se utiliza el $AlCl_3$ se observa que el producto se obtiene como trazas o en tiempos cortos de reacción no se obtiene, en el caso del $Ti(^iOPr)_4$ se observa que el máximo rendimiento es el del 4%, del producto.

Tabla 1. Diferentes especies bajo-valentes y tiempos para la reacción de McMurry

No.	Especie bajo-Valente	Tiempo de reacción (h)	Rendimiento (%)
1	$TiCl_4$	2	4
2		4	20
3		6	20
4	$SnCl_4$	2	5
5		4	10
6		6	10
7	$AlCl_3$	2	NE
8		4	Trazas
9		6	Trazas
10	$Ti(^iOPr)_4$	2	trazas
11		4	4
12		6	4

NE: No Encontrado. T: Trazas.
CONDICIONES DE REACCIÓN: cinamaldehído: (20 mmol); Agente reductor [Zn^0]: (20 mmol); Disolvente [THF]: (10 mL); Especie bajo-valente: (5 mmol).

También es importante mencionar que las reacciones ocurren de forma muy exotérmica cuando se utiliza el $TiCl_4$ como el agente reductor.

Se observó que cuando se dejan las reacciones por tiempos más prolongados superiores a 8 horas de reacciòn se presentaban la descomposición de los productos, lo que restringía la posibilidad de lograr aislar a estos productos.

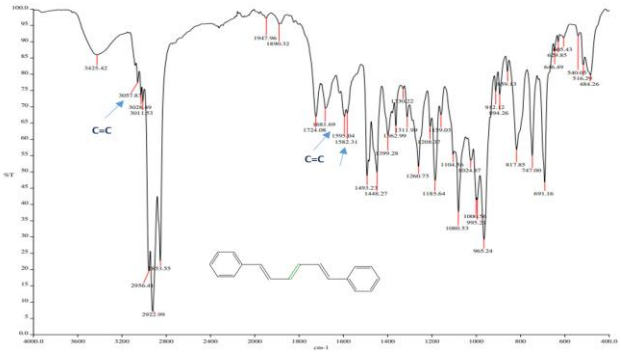


Figura 7. Espectro de infrarrojo de 1,6-difenil-1,3,5-hexatrieno

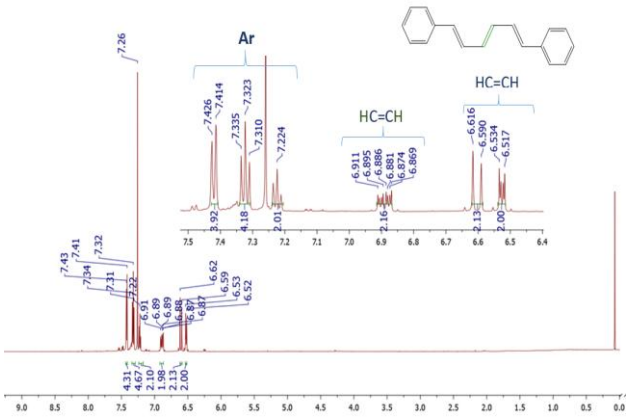


Figura 8. Espectro de RMN ^1H (400 MHz, $CDCl_3$, TMS) de 1,6-difenil-1,3,5-hexatrieno

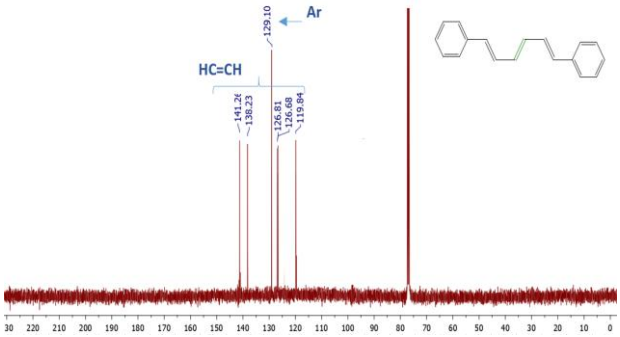


Figura 9. Espectro de RMN ^{13}C (100 MHz, $CDCl_3$, TMS) de 1,6-difenil-1,3,5-hexatrieno

Caracterización espectroscópica

Después de que el producto fue purificado por cromatografía en columna de Al_2O_3, se realizó su caracterización. El rendimiento se estableció mediante gravimetría.

El producto es un sólido blanco, estable en condiciones ambientales con un punto de fusión de 194-196ºC.
Se realizaron estudios de espectroscopia convencional de infrarrojo, de RMN de ^1H y de ^{13}C con la finalidad de caracterizar el producto.

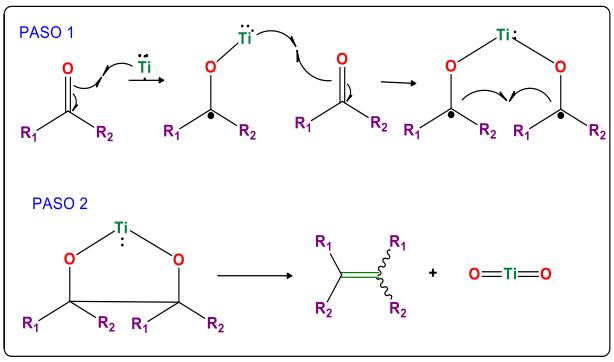
En el espectro de infrarrojo, que se muestra en la Figura 7, se muestran las bandas características de los dobles enlaces C=C en la región de 817, 1493, 1448, 1582, 1724, 2954, 3054 cm^{-1}, así como las bandas del anillo aromático.

En la Figura 8, se muestra el espectro de RMN de ^1H para el compuesto se observan el desplazamiento químico de δ= 6.51 ppm que integra para 2 hidrógenos olefínicos, en δ= 6.590 y δ= 6.616 ppm que integra para un hidrógeno olefínico, en δ= 6.886 ppm con dobles dobletes para dos hidrógenos olefínicos y las señales en δ = 7.240, 7.323 y 7.426 ppm que corresponden a 5 hidrógenos de los anillos aromáticos.

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

En la Figura 9 se el espectro de RMN de ^{13}C, en donde se observan las señales de los carbonos aromáticos en δ = 129.10 ppm y las señales de los carbonos olefínicos en δ = 119.84, 126.68, 126.81, 138.23 y 141.26 ppm.

Mecanismo de reacción:
La reacción de acoplamiento de McMurry se concreta en dos pasos (Esquema 4). En el *primer paso*, los sustratos carbonílicos se reducen mediante la transferencia de un solo electrón desde el titanio, lo que produce radicales cetilo. Estos radicales pueden dimerizarse para formar intermediarios de pinacoles, conocidos como metalopinacolatos. Al reducir la temperatura de la reacción desde el reflujo hasta 0 °C, los intermediarios de pinacoles pueden aislarse con un alto rendimiento. El *segundo paso* implica la desoxigenación del metalopinacolato para formar alquenos, mientras se mantiene la temperatura de reflujo [3].



Esquema 4. Mecanismo de reacción de la formación de alquenos en la reacción de McMurry para la formación de alquenos

CONCLUSIONES

Encontrar nuevos métodos eficientes de diferentes productos orgánicos con utilidad en el área de materiales en especial por sus propiedades ópticas como el 1,6-difenil-1,3,5-hexatrieno, ya que los métodos que se reportan en la literatura intervienen muchos pasos de reacción y condiciones de síntesis drásticas, así como una muy baja selectividad en la reacción.

Se investigaron condiciones de reacción con diferentes especies bajo-valentes y tiempos de reacción (2, 4, 6 horas) con la finalidad de optimizar el producto 1,6-difenil-1,3,5-hexatrieno, llegando a obtener un 20% de rendimiento, en cuatro horas de reacción, y se observa que este es el máximo rendimiento que se observa, ya que a 6 horas de reacción ya no hay un aumento en el rendimiento, esto es cuando se utiliza como agente reductor al Znº y a al $TiCl_4$ como especie bajo Valente.

AGRADECIMIENTOS

Los autores quieren agradecer a la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) por la beca otorgada para la realización de la estancia de posdoctorado.

BIBLIOGRAFÍA

[1] McMurry, J. E., (1974). Organic chemistry of low-valent titanium. Accounts of Chemical Research., 7, pp. 281-286, Doi: 10.1021/ar50081a001; (b) Corey E. J., (2009). Name Reactions for Homologation, Part 1., pp. 268-284.John Wiley & Sons.,

[2] McMurry, J. E., (1983). Titanium-induced dicarbonyl-coupling reactions. Accounts of Chemical Research, 16(11), pp. 405–411, Doi: 10.1021/ar00095a003

[3] Ephritikhine M., (1998). A new look at the McMurry reaction. Chemical Communications, 23, pp. 2549–2554, Doi: 10.1039/A8043941

[4] Bongso, A., Roswanda, R., & Syah, Y. M., (2022). Recent advances of carbonyl olefination via McMurry coupling reaction. 12, pp. 15885-15909, Doi: 10.1039/D2RA00724J

[5] McMurry, J.E., Miller D.D. (1983). Titanium-induced cyclization of keto esters: a new method of cycloalkanone synthesis. Journal of the American Chemical Society., 105, pp.1660-1661, Doi: 10.1021/ja00344a045

[6] Lectka, T. (1996). The McMurry Coupling and Related Reaction. Active Metals, pp. 85-131, Doi: 10.1002/0471264180.or082.01

[7] Zheng X., Su R., Wang Z., Wang T., Bin Z., She Z., Gao, G. You, J., (2019). Synthesis of a Double-Helical Naphthotetraindole Core via an Intramolecular Dehydrogenative Homocoupling Reaction., Organic Letters., 21(3), 797–801, Doi: 10.1021/acs.orglett.8b04059

[8] Hamada H., Tsuji H., Nakamura, E. (2018). Aggregation-responsive ON–OFF–ON fluorescence-switching behaviour of twisted tetrakis(benzo[b]furyl)ethene made by hafnium-mediated McMurry coupling. Materials Chemistry Frontiers. 2(2), pp. 296–299, Doi: 10.1039/C7QM00453B

[9] Shirahata, K., Takashika, M., Hirabayashi, K., Hasegawa, M., Otani, H., Yamamoto, K., Ie, Y., Shimizu, T., Aoyagi, Sh., Iyoda, M., (2020). Reduction of Ethynylenes to Vinylenes in a Macrocyclic π-Extended Thiophene Skeleton Under McMurry Coupling Conditions., The Journal of Organic Chemistry., 86, pp. 302-309, Doi: 10.1021/acs.joc.0c02080

[10] Chen, L., Hu, P., Lu, J.E., Chen, S., (2017). Covalent Crosslinking of Graphene Quantum Dots by McMurry Deoxygenation Coupling., Chemistry - An Asian Journal, 12(9), pp. 973–977, Doi: 10.1002/asia.201700225

[11] (a) Sun, N., Su, K., Zhou, Z., Yu, Y., Tian, X., Wang, D., Zhao, X., Zhou, H., Chen, C. (2018). AIE-Active Polyamide Containing Diphenylamine-TPE Moiety with Superior Electrofluorochromic

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

Performance., ACS Applied Materials & Interfaces., 10(18), pp. 16105–16112, Doi: 10.1021/acsami.8b01624; (b) Sun, N., Su, K., Zhou, Z., Wang, D., Fery, A., Lissel, F., Zhao, X. Chen, C., (2020). "Colorless-to-Black" Electrochromic and AIE-Active Polyamides: An Effective Strategy for the Highest-Contrast Electrofluorochromism. Macromolecules. 53(22), pp. 10117–10127, Doi: 10.1021/acs.macromol.0c01019

[12] (a) O'Regan, R. M., Cisneros, A., MacGregor, J. L., Muenzner, H. D., Assikis, V. J., Piette, M., Jordan, V. C., England, G. M., Bilimoria, M. M., Chatterton, R., Dragan, Y. P. & Pitot, H. C. (1998). Effects of the Antiestrogens Tamoxifen, Toremifene, and ICI 182,780 on Endometrial Cancer Growth. JNCI Journal of the National Cancer Institute. 90(20), pp. 1552-1558, Doi: 10.1093/jnci/90.20.1552; (b) Valavaara, R., Pyrhönen, S., Heikkinen, M., Rissanen, P., Blanco, G., Thölix, E., Nordman, E., Taskinen, P., Holsti, L. Hajba, A. (1988). Toremifene, a new antiestrogenic compound, for treatment of advanced breast cancer. Phase II study. European Journal of Cancer and Clinical Oncology. 24(4), pp. 785-790, Doi: 10.1016/0277-5379(88)90316-1

[13] Catalan, J., Hopf, H., (2024). The photophysics of Diphenyl Polyenes Analyzed by Their Sovatochromism, Liquids, 4, pp. 278-287, Doi: 10.3390/liquids4010013

[14] Caudron, E., Zhou, J. Y., England, P., Ollivon, M., Prognon, P., (2007). Some insights about 1,6-diphenyl-1,3,5-hexatriene lipid supramolecular assemblies by steady state fluorescence measurements, appl. Spectrosc., 61, (9), pp. 963-969, Doi: 10.1366/000370207781745937

[15] Makwana, P.K., Jethva, P. N., Roy, I., (2011). Coumarin 6 and 1,6-diphenyl-1,3,5-hexatriene (DPH) as fluorescent probes to monitor protein aggregation, Analyst, 21; 136(10), pp. 2161-2167, Doi: 10.1039/c0an00829j

[16] Cehelnik, E.D., Cundall, R.B., Locwood, J.R., Palmer, T.F., (1974), 1,6-Diphenyl-1,3,5-hexatriene as a fluorescence standard, 27 (4), pp. 586-589, Doi: 10.1016/0009-2614(74)80311-8

[17] Catalán, J., (2022). On the temperature—Dependent isomerization of all-trans-1,6-diphenyl-1,3,5-hexatriene in solution: A reappraisal. J. Phys. Org. Chem., 35, e4336, Doi: 10.1002/poc.4336

[18] Lightfoot, A.P., Twiddle, S. J.R., Whitting, A., (2005) A stereoselective synthesis of 1,6-diphenyl-1,3,5-hexatrienes utilising 4,4,6-trimethyl-2-vinyl-1,3,2-dioxoboranane as a twoo-carbom alkenyl building block, Org. Biomol. Chem., 3, pp. 3167-3172, Doi: 10.1039/B507900D

AUTORIZACIÓN Y RENUNCIA.

Los autores del presente artículo autorizan al TecNM/Instituto Tecnológico de Zacatepec para publicar el escrito en el libro electrónico del CITID 2025. El TecNM/ITZ o los editores no son responsables ni por el contenido ni por las implicaciones de lo que está expresado en el escrito.

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

EL USO DE LA INTELIGENCIA ARTIFICIAL Y REDES NEURONALES PARA LA DETECCIÓN DE DAÑOS EN LAS ESTRUCTURAS DE AERONAVES.

Reynaldo Ángel Serrano Cruz[1], Gloria Lilia Osorio Gordillo[2], Rodolfo Amalio Vargas Méndez[2].

[1]MC.Tecnológico Nacional de México/CENIDET. Departamento de Ciencias de la Ingeniería. Tecnológico Nacional de México/CENIDET, Departamento de Ciencias de la Ingeniería. Interior Internado Palmira S/N, Cuernavaca 62490, México. d22ce077@cenidet.tecnm.mx

[2]Dr. Tecnológico Nacional de México/CENIDET, Departamento de Ciencias de la Ingeniería. Interior Internado Palmira S/N, Cuernavaca 62490, México. gloria.og@cenidet.tecnm.mx (G.-L.O.-G.); rodolfo.vm@cenidet.tecnm.mx (R.-A.V.-M.)

Resumen -- Este documento aborda el uso de inteligencia artificial (IA) y redes neuronales para la detección de daños estructurales en aeronaves, destacando la importancia de inspecciones precisas mejora la seguridad, a través del análisis de las limitaciones de los métodos tradicionales, como la inspección visual y las pruebas no destructivas, resaltando su dependencia del factor humano. Se propone el uso de rendes neuronales convolucionales (CNN) para procesar imágenes y reconocer patrones de daño en aeronaves. Se describe un enfoque de cuatro fases: adquisición de datos (imágenes de bases como ASN y Airbus), preprocesamiento de datos (filtrado y normalización), desarrollo del modelo (uso de arquitecturas como ResNet-50 y U-Net) y entrenamiento/evaluación mediante métricas de precisión. Se destaca el potencial de la IA para reducir errores, automatizar inspecciones y mejorar la eficiencia en el mantenimiento aeronáutico. También se discuten desafíos como la necesidad de grandes volúmenes de datos y el costo de sensores avanzados. Se concluye que la IA es una herramienta prometedora para la detección de daños en integración con sistemas de monitoreo de estructuras aeronáuticas mediante el análisis de imágenes.

Palabras Clave: Redes neuronales, reconocimiento de patrones, daño en estructuras aeronáuticas.

Abstract -- This document addresses the use of artificial intelligence (AI) and neural networks for detecting structural damage in aircraft, highlighting the importance of precise inspections to enhance safety. It analyzes the limitations of traditional methods, such as visual inspection and non-destructive testing, emphasizing their dependence on human factors. The use of convolutional neural networks (CNN) is proposed to process images and recognize damage patterns in aircraft. A four-phase approach is described: data acquisition (images from databases such as ASN and Airbus), data preprocessing (filtering and normalization), model development (using architectures like ResNet-50 and U-Net), and training/evaluation through metrics such as accuracy. The potential of AI to reduce errors, automate inspections, and improve efficiency in aircraft maintenance is emphasized. Challenges such as the need for large volumes of data and the cost of advanced sensors are also discussed. The document concludes that AI is a promising tool for damage detection, integrating with aircraft structural monitoring systems through image analysis.

Keywords – Neural networks, pattern recognition, damage in aircraft structures.

INTRODUCCIÓN

En la actualidad, miles de aeronaves surcan los cielos, transportando pasajeros y mercancías con altos estándares de seguridad. Antes de cada ciclo de vuelo, se lleva a cabo un complejo proceso de inspección y mantenimiento que garantiza la integridad estructural de las aeronaves. La detección y clasificación temprana de daños es crucial para evitar fallas que puedan comprometer la seguridad de las aeronaves y aumentar los costos operativos [1].

Las inspecciones convencionales dependen en gran medida del personal técnico, quien a través de evaluaciones visuales y técnicas de inspección no destructiva (NDT, por sus siglas en inglés), buscan identificar posibles daños en la estructura del avión. Sin embargo, estos métodos presentan limitaciones, como la subjetividad en la evaluación y la dificultad para acceder a ciertas áreas de la aeronave. Además, la creciente incorporación de materiales compuestos en la industria aeronáutica introduce nuevos desafíos, ya que estos materiales pueden presentar microfisuras y delaminaciones difíciles de detectar mediante técnicas tradicionales [2], [3].

Los daños estructurales más comunes en aeronaves incluyen fisuras, corrosión, delaminaciones en materiales compuestos y deformaciones por impacto. Las fisuras pueden propagarse con el tiempo y comprometer la integridad estructural. La corrosión debilita los componentes metálicos, afectando su resistencia y durabilidad. Las delaminaciones en materiales compuestos pueden ser difíciles de detectar mediante inspección visual, y las deformaciones por impacto pueden generar inestabilidad estructural y afectar el rendimiento aerodinámico de la aeronave, lo que se traduce en costos operativos adicionales [4], [5].

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

En este contexto, la inteligencia artificial (IA) y el reconocimiento de patrones han emergido como alternativas prometedoras para mejorar la inspección estructural de aeronaves. La implementación de redes neuronales convolucionales (CNN) permite desarrollar sistemas automatizados capaces de identificar y clasificar daños con mayor precisión y rapidez que los métodos tradicionales (Azimi et al., 2020; Dabbous et al., 2024). Para el desarrollo de un sistema de reconocimiento de patrones en estructuras aeronáuticas, se han seleccionado arquitecturas avanzadas como ResNet-50 y U-Net, ampliamente utilizadas en aplicaciones de visión por computadora debido a su capacidad para extraer características complejas de imágenes y realizar segmentaciones precisas de regiones de interés [6], [7].

El monitoreo de integridad estructural (SHM, por sus siglas en inglés) a través de la integración de sensores avanzados con algoritmos de análisis de datos es una de las principales estrategias para mejorar las inspecciones. Sin embargo, la implementación de estos sistemas aún enfrenta obstáculos, como el alto costo de los sensores y la necesidad de procesar grandes cantidades de datos en tiempo real [8], [9].

Las Redes Neuronales Convolucionales (CNN, por sus siglas en inglés) han demostrado ser herramientas clave en la identificación de patrones en imágenes. Para el desarrollo del sistema de reconocimiento de patrones en estructuras aeronáuticas, se han seleccionado dos arquitecturas avanzadas de CNN: ResNet-50 y U-Net.

Estas arquitecturas han sido ampliamente utilizadas en aplicaciones de visión por computadora debido a su capacidad para extraer características complejas de imágenes de alta resolución y realizar segmentaciones precisas de regiones de interés.

Este artículo explora cómo la implementación de redes neuronales puede innovar la inspección aeronáutica, ofreciendo una herramienta auxiliar para la detección y clasificación de daños en estructuras aeronáuticas. Se plantea un modelo basado en el análisis de datos históricos, la adquisición de imágenes de bases como Aviation Safety Network (ASN) y Airbus, y la aplicación de modelos de aprendizaje profundo para mejorar la eficiencia y precisión en la detección de daños estructurales.

Factores de importancia en el monitoreo estructural en aeronaves

Un factor relevante durante el monitoreo estructural en aeronaves es que sus estructuras están diseñadas para soportar una amplia variedad de cargas mientras minimiza el peso y maximizan la eficiencia. Estos sistemas se construyen típicamente con materiales avanzados como aleaciones de aluminio, titanio y materiales compuestos, seleccionados por su resistencia y peso reducido

Las aeronaves modernas están diseñadas para resistir condiciones operativas extremas. Factores como variaciones de temperatura, presión atmosférica, turbulencias, aterrizajes de emergencia, impactos y desgaste pueden provocar diversos tipos de daño, incluyendo grietas, deformaciones y corrosión en partes esenciales [10], como se puede observar en la Figura 19, donde se muestran las principales áreas y causas de daño de la aeronave.

Figura 19. Principales áreas de daño en una aeronave.

Actualmente, la inspección estructural se realiza mediante métodos como la inspección visual y técnicas no destructivas (NDT, por sus siglas en inglés) como se muestra en la Figura 20. Incluyen pruebas ultrasónicas, rayos X y termografía, como se muestra en la Figura 21. Estas técnicas requieren personal altamente capacitado y pueden consumir tiempo y recursos. Las inspecciones visuales siguen siendo una de las prácticas más comunes, aunque estas dependan en gran medida de la experiencia del técnico en turno lo cual puede conllevar un margen de error considerable [11].

Otro aspecto relevante es el aumento en el uso de materiales compuestos en la aviación moderna. Aunque estos materiales son más ligeros y resistentes al desgaste, pueden sufrir daños que son complicados de clasificar con métodos tradicionales [3]. Por esta razón, desarrollar herramientas que permitan identificar estos daños de manera temprana y precisa se ha convertido en una prioridad para la industria aeronáutica.

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

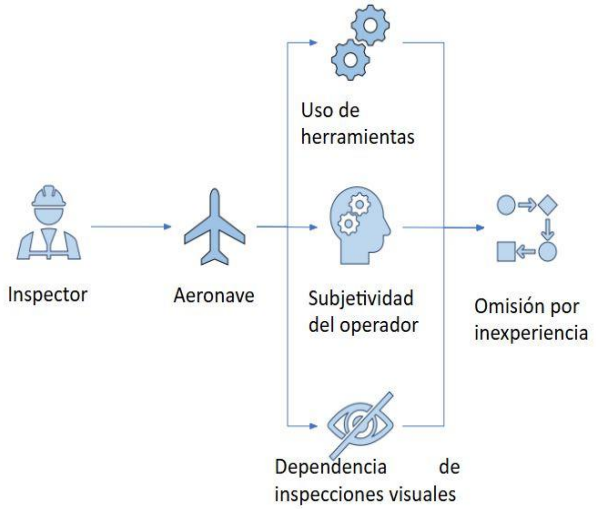


Figura 20. Representación de proceso de inspección.

(a) Imagen de rayos X de una estructura aeronáutica.

(b) Imagen termográfica de una estructura aeronáutica.

Figura 21. Ejemplo de técnicas de inspección estructural en aeronaves.

El monitoreo de integridad estructural (SHM, por sus siglas en inglés) a través de la integración de sensores avanzados con algoritmos de análisis de datos para evaluar de manera continua el estado de la aeronave es una de las principales formas de inspección [2]. No obstante, la implementación de estos sistemas aún enfrenta obstáculos, como el alto costo de los sensores y la necesidad de procesar grandes cantidades de datos en tiempo real.

En este contexto, la inteligencia artificial y el reconocimiento de patrones se presentan como alternativas prometedoras para mejorar la inspección y el mantenimiento de las aeronaves. Estas tecnologías tienen el potencial de automatizar la detección de daños, reducir la subjetividad en las inspecciones y aumentar la seguridad operativa en la aviación.

Limitaciones de las inspecciones tradicionales

Las inspecciones estructurales en aeronaves son fundamentales para garantizar la seguridad en la aviación, pero los métodos convencionales presentan desafíos importantes. Históricamente, la inspección visual ha sido la técnica más utilizada, donde personal técnico revisa manualmente cada sección de la aeronave en busca de fisuras, corrosión o deformaciones. Sin embargo, este método depende en gran medida de la experiencia y percepción del inspector, lo que introduce un margen de error considerable.

Los estudios indican que las inspecciones visuales pueden presentar omisiones en un 15-20 % de los casos, especialmente en zonas de difícil acceso como las uniones estructurales y los bordes de ataque de las alas [12]. Este problema se agrava en aeronaves modernas como el Airbus A320, que incorpora una mayor proporción de materiales compuestos. Estos materiales, si bien ofrecen ventajas en reducción de peso y resistencia a la corrosión, pueden desarrollar microfisuras internas que son prácticamente invisibles a simple vista.

Otro desafío de las inspecciones tradicionales es su alto costo, derivado de varios factores. En primer lugar, la capacitación del personal especializado requiere una inversión significativa, ya que los inspectores deben contar con certificaciones y experiencia en detección de daños estructurales. Además, el equipamiento necesario para métodos avanzados como ultrasonido, radiografía y emisión acústica es costoso y requiere calibración y mantenimiento periódico. También, en muchos casos, es necesario desensamblar ciertas partes de la aeronave para realizar inspecciones exhaustivas, lo que incrementa los costos de mano de obra y prolonga el tiempo de mantenimiento.

Si bien estos métodos pueden proporcionar información precisa sobre el estado de la estructura, su implementación también tiene impacto en la disponibilidad operativa de la aeronave, ya que pueden requerir que permanezca fuera de servicio durante largos periodos. Esta situación representa una desventaja para las aerolíneas, ya que la reducción en la disponibilidad de las aeronaves genera pérdidas económicas y afecta la planificación de vuelos.

Ante estas limitaciones, la automatización y el uso de inteligencia artificial surgen como una alternativa prometedora. Los sistemas basados en reconocimiento de patrones pueden agilizar las inspecciones, mejorar la precisión de detección de daños y reducir la dependencia de la experiencia del operador. Además, su implementación podría disminuir los costos operativos al minimizar la necesidad de procedimientos invasivos y reducir el tiempo de inspección sin comprometer la seguridad de la aeronave.

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

DESARROLLO

Metodología

El uso de inteligencia artificial (IA) y aprendizaje profundo permite mejorar la detección y clasificación de daños estructurales en aeronaves, una de las principales ventajas del enfoque basado en IA es la reducción de errores humanos asociados a la inspección visual tradicional. La combinación de ResNet-50 y U-Net permite abordar la detección y clasificación de daños desde dos perspectivas complementarias:

- ResNet-50 se utiliza para la clasificación y reconocimiento de patrones generales en las imágenes de las aeronaves.
- U-Net complementa este análisis proporcionando segmentación detallada de las regiones afectadas.

Esta estrategia permite mejorar la precisión del sistema de inspección automatizada, minimizando la subjetividad en la evaluación de daños estructurales.

Los modelos entrenados con grandes volúmenes de datos pueden identificar daños en zonas de difícil acceso con mayor consistencia, eliminando la subjetividad en la evaluación y optimizando los tiempos de diagnóstico. Además, la automatización del proceso de inspección puede disminuir costos operativos al reducir la necesidad de revisiones manuales prolongadas y minimizar la inmovilización de las aeronaves durante los procedimientos de mantenimiento.

Se emplean redes neuronales convolucionales (CNN) para procesar imágenes y reconocer patrones de daño en materiales compuestos. La implementación de sistemas de reconocimiento de patrones en estructuras aeronáuticas se basa en el uso de redes neuronales convolucionales (CNN) como la que se observa en la Figura 22 para la identificación y clasificación de daños estructurales. La metodología general de la mayoría de las redes sigue un enfoque basado en cuatro fases principales:

1. Adquisición de Datos.
2. Preprocesamiento de Datos
3. Desarrollo del Modelo de Redes Neuronales
4. Entrenamiento y Evaluación del Modelo

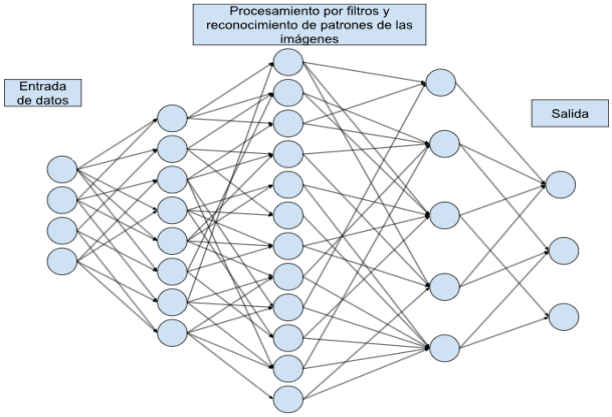


Figura 22. Representación de una red neuronal.

ResNet-50 es una de las arquitecturas más avanzadas en el reconocimiento de imágenes, diseñada para resolver problemas de aprendizaje profundo con un alto número de capas sin caer en el problema de la degradación del gradiente. Esta degradación ocurre cuando el entrenamiento de redes neuronales profundas se vuelve ineficaz debido a la pérdida de información en capas muy profundas.

Para evitar esto, ResNet introduce la arquitectura de bloques residuales, que permite el aprendizaje efectivo al agregar conexiones directas entre capas profundas y capas anteriores. La ecuación matemática que rige el bloque residual es:

$$y = f(Wx + b) \tag{1}$$

Según la ecuación (1):

- x es laentrada del bloque.
- f (x) es la transformación aprendida por la red
- y es la salida final del bloque residual.
- b es el sesgo de la red neuronal.

Algunas de las principales ventajas con las que cuenta ResNet-50 la cual permite una clasificación eficiente de diferentes tipos de daños en estructuras aeronáuticas incluyen:

- Extracción jerárquica de características: Al tener 50 capas, la red puede detectar detalles a distintos niveles, desde bordes simples hasta patrones de fisuras y corrosión.
- Reducción de errores en la inspección visual: ResNet-50 ha demostrado ser altamente precisa en la detección de patrones en imágenes de alta resolución.
- Capacidad de generalización: Se ha comprobado su eficacia en la detección de daños en aeronaves, como las del Airbus A320.

U-Net es una arquitectura diseñada originalmente para segmentación en imágenes biomédicas, pero su capacidad de localizar y diferenciar estructuras la hace ideal para la inspección de aeronaves.

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

Su diseño le permite a la red realizar diferentes actividades como:

- Extracción de características en la fase de compresión (encoder), reduciendo la dimensionalidad.
- Recuperación y reconstrucción de la imagen en la fase de expansión (decoder), permitiendo segmentar áreas afectadas con precisión.
- Detección precisa de zonas críticas: A diferencia de ResNet-50, que clasifica imágenes en categorías generales, U-Net permite una identificación pixel a pixel de los daños.
- Uso eficiente en inspecciones visuales: Facilita la identificación rápida de áreas que requieren inspección detallada.
- Combinación con datos sintéticos: Puede entrenarse con imágenes simuladas para mejorar su precisión en entornos reales.

La combinación de estas estrategias permite mejorar la precisión del sistema de inspección automatizada, minimizando la subjetividad en la evaluación de daños estructurales

1. Adquisición de Datos

Para entrenar el modelo, se utilizarán imágenes de estructuras aeronáuticas obtenidas de bases de datos públicas como la Aviation Safety Network (ASN), National Transportation Safety Board (NTSB), European Union Aviation Safety Agency (EASA), Bureau d'Enquêtes et d'Analyses (BEA) y registros de inspección de Airbus, las cuales son diversas bases de datos encargadas de la investigación y registro de accidentes e incidentes aéreos, como las que se observan en la Tabla 8 y la Figura 23. Estas imágenes incluyen casos documentados de fisuras, corrosión y deformaciones en aeronaves como el Airbus A320. Además, se complementará con datos sintéticos, mediante la aplicación de filtros, rotación de imágenes y diversas reestructuraciones de imágenes generados mediante simulaciones computacionales para mejorar la robustez del modelo ayudando al aumento de la precisión en la detección y clasificación de los patrones de daño.

Tabla 8. Registros de incidentes en aeronaves.

Fecha	Aeronave	Sección Impactada	País	Causa Principal
29/09/2021	Airbus A330-200	Fuselaje Inferior	Hong Kong, China	Fatiga en sistemas hidráulicos
18/07/2018	Airbus A330-300	Fuselaje Inferior	Australia	Impacto con objetos externos
04/03/2016	ATR 72-500	Alas	Reino Unido	Hielo acumulado
29/03/2015	Boeing 737-800	Fuselaje Inferior	Canadá	Daños en tren de aterrizaje
02/02/2015	Airbus A321-111	Fuselaje Inferior	Somalia	Explosión interna
15/01/2009	Airbus A320-200	Alas	EE.UU.	Impacto con aves
17/08/2007	Boeing 737-800	Fuselaje Inferior	Brasil	Sobrerrecorrido de pista
14/09/1993	Airbus A320-211	Alas	Alemania	Fuego post-colisión
14/04/1976	Hawker Siddeley 748	Alas	Argentina	Fatiga estructural

Figura 23. Recopilación de imágenes del modelo Airbus A320.

2. Preprocesamiento de Datos

Las imágenes recopiladas requieren ser sometidas a un proceso de normalización y filtrado para mejorar la calidad de los datos de entrada. Se pueden aplicar técnicas de aumento de datos (Data Augmentation) como rotaciones, escalado y ajustes de contraste para evitar problemas de sobreajuste y mejorar la generalización del modelo [13].

3. Desarrollo del Modelo de Redes Neuronales

Los modelos de CNN se basan en arquitecturas probadas como ResNet-50 y U-Net, seleccionadas por su capacidad para segmentar y clasificar áreas de daño en imágenes de alta resolución. La estructura básica del modelo incluye:

- Capas convolucionales para la extracción de características relevantes.
- Capas de pooling para reducir la dimensionalidad y mejorar la eficiencia del procesamiento.
- Capas completamente conectadas para la clasificación final del tipo de daño.

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

La ecuación (2) es la base que define la propagación de la información en la red neuronal es la siguiente:

$$y = F(x) + x \quad (2)$$

Donde:

- x es la entrada del bloque.
- F(x) es la transformación aprendida por la red
- y es la salida final del bloque residual

4. Entrenamiento y Evaluación del Modelo

El modelo se entrena utilizando la base de datos generada, optimizando los pesos a través del algoritmo de descenso de gradiente estocástico (SGD) con un criterio de pérdida basado en la entropía cruzada. La evaluación del modelo se puede realizar utilizando métricas como:

- Precisión: Porcentaje de predicciones correctas.
- Recall: Capacidad de detección de daños reales.
- F1_score: Equilibrio entre precisión y recall.
- Matriz de confusión: Para analizar falsos positivos y falsos negativos.

El uso de redes neuronales resulta en una opción versátil ya que estas pueden ser estructuradas con bases de datos complejas, que permitan identificar y clasificar patrones de daños estructurales en diversas áreas de las aeronaves con la ayuda de imágenes de alta resolución, lo cual ayuda a mejorar la precisión durante el proceso de inspección.

DISCUSIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Las redes neuronales son una herramienta novedosa utilizada en diversos campos, como la medicina para la detección de enfermedades, la agricultura para la identificación de plagas y la vigilancia para el reconocimiento facial. Su implementación en la detección de daño en estructuras es un campo emergente que aún se encuentra en fase de exploración. Particularmente, la detección y clasificación de daños en estructuras aeronáuticas representa una alternativa útil para optimizar los procesos de inspección y mantenimiento, reduciendo costos y mejorando la seguridad operacional [14], [15].

El desarrollo de un sistema basado en redes neuronales convolucionales (CNN), complementado con sensores avanzados y técnicas de inteligencia en el borde, podría mejorar significativamente la precisión y eficiencia en la detección y clasificación de daños estructurales en aeronaves. Al integrar datos históricos con simulaciones estructurales y aprendizaje automático, se pueden identificar patrones de daño recurrentes y establecer modelos predictivos más robustos. Esto no solo reduce los errores humanos, sino que también facilita el análisis en tiempo real, adaptándose a diversas condiciones operativas [16].

Adicionalmente, la descentralización del procesamiento de datos mediante inteligencia en el borde permite una detección rápida y efectiva, reduciendo la latencia en el análisis de imágenes capturadas por sensores o drones. Estos avances pueden ser fundamentales para la integración de sistemas de monitoreo en tiempo real en aeronaves comerciales, permitiendo una optimización del mantenimiento basado en el estado real de la estructura y no en ciclos predefinidos [17].

Finalmente, el uso de IA y redes neuronales en la inspección de aeronaves representa un enfoque innovador con el potencial de transformar los procedimientos de mantenimiento en la industria aeronáutica, mejorando la seguridad y eficiencia de los procesos de detección de daños estructurales.

CONCLUSIONES

El uso de inteligencia artificial (IA) para la inspección estructural de aeronaves demuestra ser una herramienta prometedora para asistir a los técnicos en la identificación y clasificación de daños. Las redes neuronales convolucionales (CNN) han demostrado ser particularmente efectivas en la detección de patrones en imágenes, permitiendo identificar fisuras, corrosión, delaminaciones en materiales compuestos y deformaciones estructurales con alta precisión.

La implementación de estos sistemas no solo facilita la detección temprana de fallas estructurales antes de que se conviertan en problemas críticos, sino que también optimiza la planificación del mantenimiento y reduce los costos operativos. Su aplicación en aeronaves modernas, como el Airbus A320, es clave para mejorar la eficiencia de los procedimientos de inspección.

En futuros trabajos, se puede explorar la integración de modelos de IA con sistemas de monitoreo en tiempo real a través de sensores inteligentes y análisis de datos en el borde (Edge Intelligence). Esto permitirá la detección de daños en tiempo real y su correlación con datos históricos, mejorando la capacidad predictiva de los modelos posicionándose como una tecnología clave para el mantenimiento predictivo y la automatización en la aviación moderna.

BIBLIOGRAFÍA

[1] Z. G. Peixin, Y. Tao, Z. Yuanlin y W. Jiao, «Vibration analysis and control technologies of hydraulic pipeline system in aircraft: A review,» *Chinese Journal of Aeronautics,* vol. 34, nº 4, pp. 83-114, 2021.

[2] Broer, Agnes AR, Benedictus, Rinze, Zarouchas, Dimitrios, «The need for multi-sensor data fusion in structural health monitoring of composite

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

aircraft structures,» *Aerospace,* vol. 9, nº 4, p. 183, 2022.

[3] J. Zhao, W. Xie, D. Yu, Q. Yang, S. Meng y Q. Lyu, «Deep Transfer Learning Approach for Localization of Damage Area in Composite Laminates Using Acoustic Emission Signal,» *Polymers,* vol. 15, nº 6, p. 1520, 2023.

[4] Bishop y C. M, «Pattern recognition and machine learning,» *Springer,* vol. 2, 2006.

[5] Y. Liu, J. Dong, Y. Li y X. Gong, «A UAV-Based Aircraft Surface Defect Inspection System via External Constraints and Deep Learning,» *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement,* vol. 71, pp. 1-15, 2022.

[6] Z. Q. Zhao, P. Zheng, S.-t. Xu y X. Wu, «Object detection with deep learning: A review,» *IEEE transactions on neural networks and learning systems,* vol. 30, nº 11, pp. 3212-3232, 2019.

[7] M. E. Torbali, A. Zolotas y N. P. Avdelidis, «A state-of-the-art review of non-destructive testing image fusion and critical insights on the inspection of aerospace composites towards sustainable maintenance repair operations,» *Applied Sciences,* vol. 13, nº 4, p. 2732, 2023.

[8] H. E. Boukabache, M. Matmat, C. Escriba y J. Y. Fournoils, Sensors/actuators network development for aeronautics structure health monitoring, Limerick, Ireland: SENSORS, 2011 IEEE, 2011.

[9] P. Li, S. Xu, D. Xu y C. Xu, «Structural Health Monitoring of an Aircraft Wing Using a Portable Wireless Electromechanical Impedance Analyzer,» *IEEE Sensors Journal,* vol. 24, nº 14, pp. 2285-22866, 2024.

[10] S. Haykin, «Neural Networks and Learning Machines,» *Pearson Education India,* vol. 3rd Edition, nº 1, 2009.

[11] M. E. Torbali, A. Zolotas y N. P. Avdelidis, «A state-of-the-art review of non-destructive testing image fusion and critical insights on the inspection of aerospace composites towards sustainable maintenance repair operations,» *Applied Sciences,* vol. 13, nº 4, p. 2732, 2023.

[12] Eurocopter, «Airbus.com,» EUROCOPTER y EADS COMPANY, 2013. [En línea]. Available: https://www.airbus.com/sites/g/files/jlcbta136/files/2021-10/IN2255-I-00-Rev1-ES.pdf. [Último acceso: 7 Octubre 2024].

[13] S. Yang, W. Xiao, M. Zhang, S. Guo, J. Zhao y F. Shen, «Image Data Augmentation for Deep Learning: A Survey,» *arXiv,* 2023.

[14] Y. LeCun, Y. Bengio y G. Hinton, «Deep learning,» *Nature,* pp. 436-444, 2015.

[15] A. Upadhyay, J. Li, S. King y S. Addepalli, «A deep-learning-based approach for aircraft engine defect detection,» *Machines,* vol. 11, nº 2, p. 192, 2023.

[16] D. Milanoski, G. Galanopoulos y T. Loutas, Digital-Twins of composite aerostructures towards Structural Health Monitoring, IEEE 8th International Workshop on Metrology for AeroSpace (MetroAeroSpace), 2021.

[17] A. Dabbous, R. Berta, M. Fresta y H. Ballout, «Bringing Intelligence to the Edge for Structural Health Monitoring: The Case Study of the Z24 Bridge,» *IEEE Open Journal of the Industrial Electronics Society,* vol. 5, pp. 781-794, 2024.

[18] M. Azimi, A. D. Eslamlou y G. Pekca, «Data-driven structural health monitoring and damage detection through deep learning: State-of-the-art review,» *Sensors,* vol. 20, nº 20, p. 2778, 2020.

AUTORIZACIÓN Y RENUNCIA.

Los autores del presente artículo autorizan al TecNM/Instituto Tecnológico de Zacatepec para publicar el escrito en el libro electrónico del CITID 2025. El TecNM/ITZ o los editores no son responsables ni por el contenido ni por las implicaciones de lo que está expresado en el escrito.

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

OPTIMIZACIÓN DE LA CAPA VENTANA BÚFER EN CELDAS SOLARES DE PELÍCULA DELGADA CON CIGS: SUSTITUCIÓN DE CdS POR MATERIALES ALTERNATIVOS

A. Ledesma-Juárez [1], JF. Quintero-Guerrero [2], M. Chávez-Castillo[3], AM Fernández[4]

[1]Doctorado en Ingeniería y Ciencias Aplicadas con opción terminal en Tecnología de Materiales. Instituto de Energías Renovables, Universidad Nacional Autónoma de México, Av. Xochicalco S/N, Temixco, Morelos, 62580, México. arelis@ier.unam.mx, 7772147173.
[2]Licenciatura en Nanotecnología. Universidad Tecnológica Emiliano Zapata del Estado de Morelos, Av. Universidad Tecnológica 1 Palo escrito, Emiliano Zapata, 62765, México. jose.quinteroge@uaem.edu.mx. 7773675925.
[3]Doctorado en Ingeniería y Ciencias Aplicadas con opción terminal en Tecnología de Materiales. Universidad Tecnológica Emiliano Zapata del Estado de Morelos, Av. Universidad Tecnológica 1 Palo escrito, Emiliano Zapata, 62765, México. mariluchavez@utez.edu.mx. 7771751370.
[4]Doctorado en Ciencias (Ciencia de Materiales). Instituto de Energías Renovables, Universidad Nacional Autónoma de México, Av. Xochicalco S/N, Temixco, Morelos, 62580, México. afm@ier.unam.mx. 7771792281.

Resumen -- Este trabajo se centra en la optimización de la capa ventana-búfer en películas delgadas utilizando CIGS como material absorbente. Para lograr esta optimización, se sustituyó el CdS convencional, conocido por su alta toxicidad tanto para el ser humano como para el medio ambiente, por materiales alternativos como In_2S_3, ZnS y CdZnS. Además de esta modificación, se fabricaron las capas restantes de la celda solar: Mo mediante pulverización catódica de corriente directa, CIGS a través de co-electrodeposición, y ZnO junto con ZnO:Al mediante pulverización catódica de radiofrecuencia. Durante el desarrollo de la investigación, todas las capas fueron caracterizadas utilizando técnicas como SEM, EDS, XRD, UV-Vis, perfilometría, el método de 4 puntas para medir resistividad y la caracterización eléctrica del dispositivo fotovoltaico. Estos análisis permitieron obtener una comprensión detallada de las propiedades y características de cada capa. En consecuencia, se fabricaron celdas solares de película delgada empleando CIGS como absorbedor y CdZnS como capa ventana-búfer no optimizada, obteniendo resultados con una eficiencia de $\eta = 0.67\%$, Voc = 0.025 V, Jsc = 39.37 mA/cm² y FF = 0.68. Un avance significativo de esta investigación fue la mejora en la adhesión y homogeneidad de los materiales de la capa ventana-búfer. Los resultados obtenidos en relación con la banda prohibida y el espesor fueron consistentes con los valores reportados en la literatura, lo que valida la efectividad de los materiales alternativos propuestos y los posiciona como posibles candidatos para desempeñar el rol de capa búfer en una celda solar de película delgada con CIGS como material absorbente. Asimismo, la exitosa recristalización de la capa absorbente de CIGS mediante el proceso de selenización representó otro logro relevante en este estudio.

Palabras Clave: Capa búfer, celdas solares, CIGS, electrodepósito, película delgada.

Abstract -- His research focuses on optimizing the buffer layer in thin-film solar cells with CIGS as the absorber material. To enhance this optimization, traditional CdS—known for its high toxicity to both humans and the environment—was substituted with alternative materials such as In_2S_3, ZnS, and CdZnS. Along with this substitution, the remaining layers of the solar cell were fabricated: Mo via direct current sputtering, CIGS through co-electrodeposition, and ZnO and ZnO:Al using radiofrequency sputtering. Throughout the research, all layers were thoroughly characterized using various techniques, including SEM, EDS, XRD, UV-Vis, profilometry, the 4-point method for resistivity measurements, and electrical characterization of the photovoltaic device. These analyses provided a comprehensive understanding of the properties and characteristics of each layer.Thin-film solar cells were fabricated with CIGS as the absorber and CdZnS as a non-optimized window-buffer layer. The resulting devices achieved an efficiency of $\eta = 0.67\%$, Voc = 0.025 V, Jsc = 39.37 mA/cm², and FF = 0.68. A key advancement of this research was the improvement in the adhesion and homogeneity of the window-buffer layer materials. The measured band gap and layer thickness were consistent with reported values in the literature, confirming the effectiveness of the proposed alternative materials and positioning them as promising candidates for use as a buffer layer in thin-film solar cells with CIGS absorbers. Additionally, the successful recrystallization of the CIGS absorber layer through the selenization process marked another significant achievement in this study

Key words – Buffer layer, solar cells, CIGS, electrodeposition, thin film.

INTRODUCCIÓN

A nivel mundial, la creciente preocupación por los problemas ambientales y el cambio climático ha impulsado el desarrollo de fuentes de energía alternativas, siendo las energías renovables como la solar, eólica e hidroeléctrica las más relevantes. Entre ellas, la energía solar ha ganado protagonismo debido a su disponibilidad

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

ilimitada, bajo mantenimiento y versatilidad. Este avance en la adopción de energías limpias se ha visto facilitado por la mejora en su rentabilidad, políticas favorables, mayor acceso al financiamiento y sus beneficios medioambientales [1].

Dentro de las tecnologías solares, se encuentran las celdas solares de segunda generación: de película delgada, las cuales se destacan por su eficiencia, bajo costo de producción y estabilidad [2]. Estas celdas requieren menos material semiconductor para captar la misma cantidad de luz solar, lo que reduce considerablemente los costos de producción. Los avances en las celdas solares de película delgada, como las que utilizan CIGS (diseleniuro de indio, galio y cobre) como absorbedor, han alcanzado eficiencias de hasta el 23.4%. [3] Sin embargo, el CdS (sulfuro de cadmio), utilizado en estas celdas como capa ventana-buffer, es un material tóxico, lo que ha llevado a investigar alternativas más seguras y sostenibles. [4]

Con el objetivo de optimizar las celdas solares de película delgada y hacerlas más seguras y sostenibles, se propone sustituir el CdS por materiales menos tóxicos como ZnS, In_2S_3 y ZnCdS, además de reducir los riesgos ambientales y de salud. La investigación se centra en comprender la formación y morfología de la capa búfer utilizando estos materiales, aplicando las condiciones adecuadas de depósito durante la formación de la capa ventana. [5]

El proceso de fabricación de las celdas solares de área pequeña seguirá la estructura: vidrio/Mo/CIGS/ZnS, In_2S_3 o ZnCdS/i-ZnO/ZnO:Al, empleando la capa ventana más eficiente en la estructura fotovoltaica. Esta investigación permitirá avanzar en la creación de celdas solares más seguras y amigables con el medio ambiente.
El avance de las tecnologías solares, especialmente las celdas solares de película delgada, ha permitido mejorar la eficiencia y reducir los costos de producción, lo que hace que la energía solar sea una opción viable y sostenible. [6] Con el desarrollo de materiales más seguros y eficientes, como ZnS, In_2S_3 y ZnCdS, se espera que las celdas solares continúen evolucionando, contribuyendo a un futuro más limpio y accesible en términos de energía renovable.

DESARROLLO

Experimental

Fabricación de las películas Molibdeno (Mo)
El sustrato utilizado fue vidrio sódico-cálcico (SLD) recubierto con molibdeno (Mo). El Mo se preparó mediante pulverización catódica de corriente continua, utilizando un equipo Balzer BAE 250 y un target de Mo de 5.08 cm.

Fabricación de las películas CIGS
La composición química del baño electrolítico empleado para el depósito de las películas delgadas de CIGS consistió en 2.6 mM de cloruro de $CuCl_2$, 4.5 mM de $InCl_3$, 10 mM de $GaCl_3$, 8 mM de H_2SeO_3 y 1 mM de LiCl, los cuales fueron adquiridos de Sigma Aldrich. Los reactivos se disolvieron en una solución tampón con pH 3, ajustándose dicho valor mediante la adición de HCl (37.4 % vol).

Las películas de CIGS se fabricaron por co-electrodeposición [7]. La deposición se llevó a cabo con un potenciostato/galvanostato modelo 263A, utilizando el software CorrWare y la técnica de cronoamperometría. El proceso de deposición duró una hora, aplicándose un voltaje de 1,0 V, con perturbaciones mecánicas cada 15 minutos. Estas perturbaciones consistieron en mover el electrodo de trabajo a intervalos regulares para promover el crecimiento de la película delgada de CIGS. Este movimiento favoreció la formación de núcleos de CIGS en diferentes áreas del sustrato, asegurando un recubrimiento homogéneo. [8]

Selenización de las películas CIGS
El proceso de selenización se empleó como un tratamiento post-deposición para recristalizar las películas de CIGS. Su objetivo principal es reorganizar la estructura amorfa y defectuosa de la película inicial, transformándola en cristales bien definidos y de mayor tamaño. Esta mejora en la estructura cristalina contribuye de manera significativa a la eficiencia y al rendimiento global de las celdas solares basadas en CIGS [9].

El equipo utilizado para la selenización consta de una cámara de vacío y un horno, que actúa como fuente de calor, asegurando un calentamiento uniforme sobre la superficie de la película. Se utilizó 30 mg de selenio (99.99 %) adquirido de Sigma Aldrich, junto con una atmósfera de nitrógeno para prevenir la oxidación de las películas durante el proceso. Las condiciones de operación fueron las siguientes: presión inicial de 1.9 x 10^{-5} hPa, presión durante el proceso de 2.2 x 10^{-2} hPa y temperatura de 570°C durante una hora. El proceso de enfriamiento se realizó de manera controlada, extendiéndose por aproximadamente 3 horas [8].

Fabricación de las capas búfer
El depósito de cada capa de búfer se llevó a cabo mediante la técnica de baño químico. Todos los reactivos, adquiridos de Sigma Aldrich, fueron mezclados y agitados a temperatura ambiente durante 5 minutos antes de ser transferidos a un recirculador marca PolyScience.

Sulfuro de Indio (In_2S_3)
La solución de In_2S_3 se preparó con 0.1 M de $InCl_3$, 0.5 M de $C_2H_4O_2$, 0.5 M de H_2SO_4 y 1 M de C_2H_5NS. El depósito se realizó a 80°C durante 35 minutos, con

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

enjuagues periódicos de la película con agua desionizada cada 5 minutos.

Sulfuro de Zinc (ZnS)
La solución de ZnS se preparó con 0.1 M de $ZnSO_4$, 0.82 M de $Na_3C_6H_5O_7$, 0.75 M de CH_4N_2S, y 0.7 M de NH_3. Las condiciones de depósito fueron a 70 °C durante 120 minutos, realizando enjuagues periódicos con agua desionizada cada 10 minutos.

Sulfuro de Zinc con Cadmio (CdZnS)
La preparación de la solución de CdZnS constó de 0.02 M de $ZnSO_4$, 0.002 M de $CdSO_4$, 0.025 M de C_2H_5NS y 0.58 M de NH_3, bajo las condiciones de 80°C durante 40 minutos.

Fabricación de las capas ventana ZnO y ZnO:Al
Las películas fueron depositadas por la técnica de pulverización catódica de radiofrecuencia, utilizando un equipo Intercovamex TE12 y un target de ZnO y de ZnO:Al de 5.08 cm.

ZnO
Se utilizó una presión de 5 $X10^{-5}$ Torr, voltaje de 290 V, potencia de 260 W y un tiempo de 14 min.

ZnO:Al
Las condiciones a utilizar fueron, presión de 5 $X10^{-5}$ Torr, voltaje de 290 V, potencia = 280 W y tiempo de 18 min.

Caracterización
Cada una de las capas que conforma la celda solar fueron caracterizadas por XRD, SEM, EDS, reflectancia, Perfilometría y resistividad para el caso de las películas de Mo, ZnO y ZnO:Al.

Los patrones de difracción de las películas fueron obtenidos utilizando un equipo de difracción de rayos X DMAX-2200 con radiación Kα de cobre (λCu = 1.5406 Å), y el haz de rayos X incidió de manera rasante a 0.5° (técnica GIXRD).

La morfología y composición atómica de las películas se analizaron mediante espectroscopía de dispersión de energía de rayos X (EDS), utilizando un Microscopio Electrónico de Barrido (SEM) Hitachi modelo S-5500 con detector de electrones secundarios y un detector de rayos X de energía dispersiva modelo INCA-x-act. Para la cuantificación de la composición atómica, se aplicó un voltaje de aceleración de electrones de 20 kV y se utilizaron niveles de emisión de energía Kα para el cobre, selenio, galio y Lα para el indio.

El espesor de las películas se determinó mediante un perfilómetro Alpha-step 100.

La resistividad de las películas se obtuvo mediante un equipo de cuatro puntas marca Jandel.

Los espectros de reflectancia especular, difusa y transmitancia de las películas se obtuvieron con un espectrofotómetro UV-visible Jasco V-670, que cubre un rango de longitudes de onda de 2500 a 250 nm. Para determinar el band gap de las películas, se empleó la ecuación de Kubelka-Munk o Tauc.

La ecuación de Kubelka-Munk [10] en cualquier longitud de onda se puede expresar como en la ecuación 1:

$$\frac{K}{S} = \frac{(1-R_\infty)^2}{2R_\infty} = F(R_\infty) \qquad \text{Ec. (1)}$$

donde $R\infty$ es la reflectancia difusa y F(R∞) se denomina la función de Kubelka-Munk. En una estructura de bandas parabólicas, el band gap (Eg) y el coeficiente de absorción están relacionados a través de la conocida ecuación de Tauc, que para un material de banda prohibida directa se expresa en la Ec. 2:

$$\alpha h\nu = A\left(h\nu - E_g\right)^n \qquad \text{Ec. (2)}$$

donde α es el coeficiente de absorción lineal, ν es la frecuencia de la luz y A es una constante de proporcionalidad. El exponente n se toma igual a 1/2 para materiales de banda prohibida directa. Cuando la radiación incidente se dispersa de manera perfectamente difusa, el coeficiente de absorción K se iguala a 2α. En este contexto, la función de Kubelka-Munk es proporcional al coeficiente de absorción α, lo que da lugar a la siguiente relación (Ec. 3):

$$[F(R_\infty)h\nu]^2 = (ah\nu)^2 \qquad \text{Ec. (3)}$$

DISCUSIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Película de Mo

En la Figura 1 se puede observar la micrografía de la película de molibdeno a 1 µm. La imagen revela una excelente homogeneidad en el depósito, sin signos de impurezas. El análisis elemental por EDS indicó que la muestra está compuesta en su totalidad por molibdeno, con una presencia del 100%, como se observa en la Tabla 1.

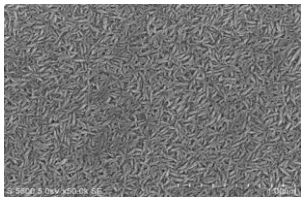


Figura 1. Micrografía de la película de Mo

El difractograma de la Figura 2 presenta picos bien definidos correspondientes al molibdeno, ubicados en los planos 110 y 221, según lo indicado por la tarjeta 42-

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

1120. La Tabla 1 muestra el espesor y resistividad del material. El espesor y resistividad obtenidos son valores adecuados para que el Mo funja como cátodo en un dispositivo fotovoltaico.

Tabla 1. Tabla de los valores de % atómicos, espesor y resistividad del Mo.

Muestra	% atómico (% At.)	Espesor (µm)	Resistividad (Ω/cm)
Mo	100	2	1.2

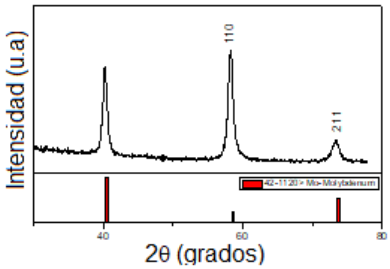


Figura 2. Difractograma de la película de Mo

Película de CIGS

En la Figura 3 se presenta una imagen SEM a 1 µm de la película de CIGS, donde se aprecia una estructura con cristales formados y definidos, resultado del proceso de selenización.

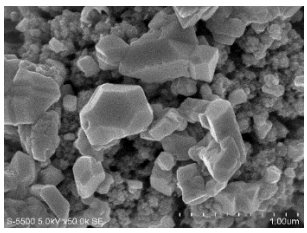


Figura 3. Micrografía de la película de CIGS

La Figura 4 presenta el difractograma de la película de CIGS, el cual exhibe un pico de crecimiento bien definido en el plano, lo que indica que el material es cristalino y se orienta según el plano 112, conforme a la tarjeta 35-1102.

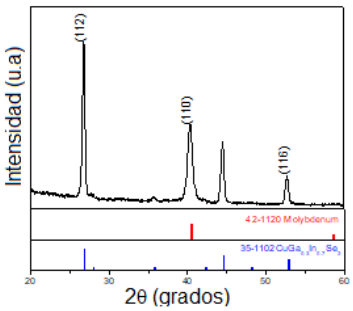


Figura 4. Difractograma de la película de CIGS

La Tabla 2 muestra los porcentajes de la composición atómica de la muestra de CIGS. En ella, se observa un notable aumento en el contenido de selenio, mientras que el indio es el elemento con menor abundancia en la muestra. Considerando que las proporciones atómicas ideales de Cu/(In+Ga) y Ga/(In+Ga) son 0.9 y 0.3 [11], respectivamente, se puede observar que para la muestra CIGS, estos valores se aproximan estrechamente a los ideales. La película CIGS presentó un espesor de 1.5 µm y un band gap de 1.4eV, estos valores se encuentran dentro del rango de lo reportado [12]. Esto está directamente relacionado con la fabricación de celdas solares eficientes.

Tabla 2. Valores de %atómico de la película CIGS

Muestra	% Atómico			
	Cu	In	Ga	Se
MC1-S1	23.24	15.70	6.28	54.80
Cu/(In+Ga)	*1.06*			
Ga/(In+Ga)	*0.29*			

Películas de las capas búfer

Película de Sulfuro de Indio (In_2S_3)

En la Figura 5 se muestra la micrografía SEM a 1 µm de la película de In_2S_3, donde se observa una película homogénea, con presencia de huecos.

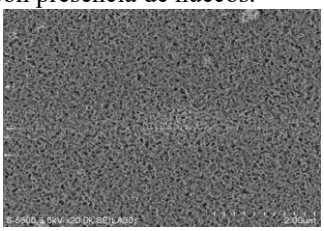


Figura 5. Micrografía de la película de In_2S_3

El difractograma de la película de In_2S_3 se presenta en la Figura 6, donde se pueden apreciar picos nítidos y marcados, lo que sugiere la existencia de una estructura cristalina correspondiente al material, de acuerdo a la tarjeta 25-0390.

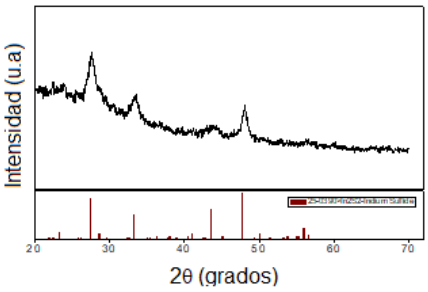


Figura 6. Difractograma de la película de In_2S_3

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

La Tabla 3 muestra l porcentaje atómico de In y S en la muestra es casi del 50% para cada uno, lo que no coincide con la estequiometría del compuesto In_2S_3. El espesor es consistente con lo reportado, mientras que el band gap se encuentra fuera del rango indicado en la literatura (2.1 a 2.3 eV) [13].

Tabla 3. Valores de %atómico, espesor y band gap de la película In_2S_3

Muestra	% atómico (% At.)		Espesor (nm)	Band gap (eV)
	Zn	S		
ZnS	*80.95*	*19.09*	45	*3.5*

Película de Sulfuro de Zinc (ZnS)

En la Figura 7 se muestra la micrografía SEM a 1 µm de la película de ZnS, donde se observa una película con formación de dominios y poco uniforme.

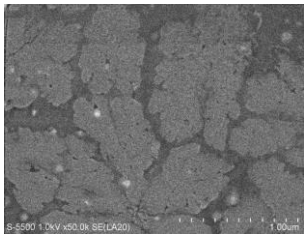


Figura 7. Micrografía de la película de ZnS

El difractograma mostrado en la Figura 8 para la película de ZnS no exhibe los picos característicos del material, lo cual probablemente se debe al bajo espesor de la película (0.045 µm) y a la baja cristalinidad de la muestra.

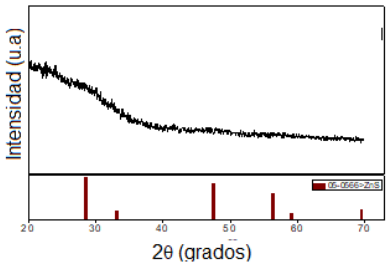


Figura 8. Difractograma de la película de ZnS

De acuerdo con los resultados obtenidos mediante EDS (Tabla 4), la película de ZnS mostró un alto contenido de zinc y una cantidad muy baja de azufre. Para aplicaciones fotovoltaicas, se espera que ambos elementos estén presentes en un 50% cada uno. El valor del band gap se encuentra dentro del rango reportado (3.5 – 3.7 eV) [14].

Tabla 4. Valores de %atómico, espesor y band gap de la película ZnS

Muestra	% atómico (% At.)		Espesor (µm)	Band gap (eV)
	In	S		
In_2S_3	49.48	50.52	0.05	4.5

Película de Sulfuro de Zinc con Cadmio (CdZnS)

LA Figura 9 muestra la micrografía de la película CdZnS 1 µm, se puede apreciar los granos bien definidos de manera homogénea característicos del material CdS predominan por toda la muestra.

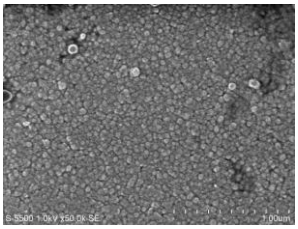


Figura 9. Micrografía de la película de CdZnS

Su difractograma mostrado en la Figura 10 exhibe un pico característico del material CdZnS, de acuerdo a la tarjeta 49-1302, se tiene un material con poca cristalinidad.

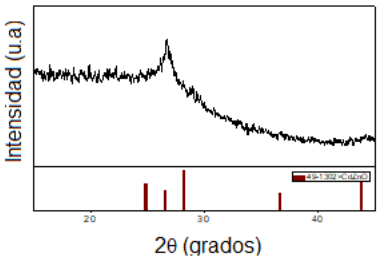


Figura 10. Difractograma de la película de CdZnS

La composición atómica, espesor y band gap se muestran en la Tabla 5.

El porcentaje atómico de cadmio, azufre y zinc son proporcionales a lo requerido para aplicaciones fotovoltaicas.

La banda prohibida del material CdZnS se encuentra en el rango de 3.4-3.8 eV, según lo reportado por Bhattacharya en 2008 [15]. El band gap de la muestra de CdZnS se ubica 3.5 eV, valor que se ajusta dentro del intervalo mencionado.

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

Tabla 5. Valores de %atómico, espesor y band gap de la película CdZnS

Muestra	% atómico (% At.)			Espesor (µm)	Band gap (eV)
	Zn	S	Cd		
CdZnS	21.24	27.59	42.7	0.057	3.5

Película de ZnO y ZnO:Al

La imagen SEM de ZnO y ZnO:Al a 2 y 5 µm, respectivamente, presentadas en la Figura 11, muestran una deposición uniforme, típica del proceso de pulverización catódica.

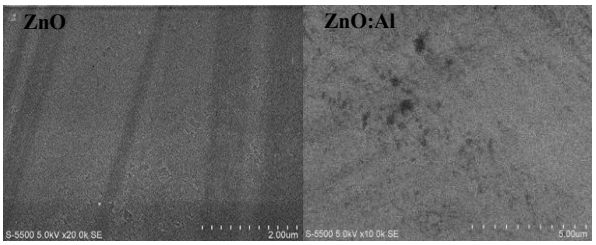


Figura 11. Micrografía de la película de ZnO y ZnO:Al

En ambas muestras se aprecia en el difractograma de la Figura 12 un pico distintivo del ZnO en el plano 002, según la tarjeta 36-1451; no obstante, este pico es más pronunciado en el material.

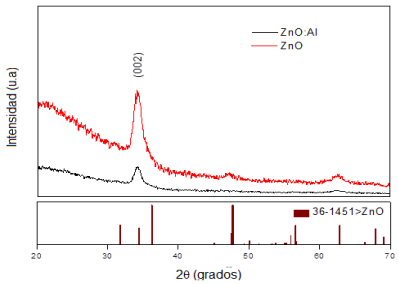


Figura 12. Difractogramas de las películas de ZnO y ZnO:Al

En la tabla 6 se muestran los valores porcentuales de la composición atómica de las películas de ZnO y ZnO:Al. Se observa una diferencia significativa en el porcentaje de zinc, ya que en la película de ZnO representa casi la mitad del total, mientras que en la película ZnO:Al es inferior al 4%, destacando principalmente el oxígeno. El espesor de las películas se encuentra acorde con lo reportado. La película de ZnO tiene una resistividad insuficiente para aplicaciones fotovoltaicas, mientras que la película ZnO:Al presenta una resistividad excesiva para este tipo de aplicaciones.

Tabla 6. Valores de %atómico, espesor y resistividad de las películas de ZnO y ZnO:Al

Muestra	% atómico (% At.)			Espesor (µm)	Resistividad (Ω cm)
	Zn	O	Al		
ZnO	54.8	45.1	0	0.072	1×10^{4}
ZnO:Al	3.5	93.4	3.0	0.565	1×10^{-4}

CONCLUSIONES

Se fabricó una película de Mo cristalina con una resistividad inferior a 5 Ω/cm. La recristalización de la capa absorbente CIGS se logró de manera adecuada mediante el proceso de selenización, obteniendo una película semicristalina.

Las películas de In_2S_3 y CdZnS, propuestas como capas buffer, mostraron buena adherencia y homogeneidad, mientras que la película ZnS fue poco uniforme. Los valores de band gap de las películas de ZnS y CdZnS coinciden con los reportados en la literatura, lo que las convierte en posibles candidatos para la capa buffer en una celda solar de película delgada con CIGS como material absorbente.

Por otro lado, las películas de ZnO y ZnO:Al no presentaron valores adecuados de resistividad. Con base a los resultados de la caracterización de las capas búfer, se fabricó una celda solar utilizando CdZnS como capa buffer con la siguiente arquitectura: Vidrio/Mo/CIGS/CdZnS/ZnO/ZnO:Al, obteniendo los siguientes parámetros eléctricos: Voc = 0.2V, Jsc = 39.37mA/cm², FF = 0.68, y PCE = 0.67%.

La eficiencia de la celda fabricada se debe a la falta de optimización de las capas de ZnO y ZnO:Al. Se requiere que la película de ZnO tenga una mayor resistividad, con valores superiores a 10^5 Ω.cm, mientras que la película de ZnO:Al debe ser menos resistiva, con valores inferiores a 1×10^{-3} Ω.cm.

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan su agradecimiento SECIHTI por el apoyo brindado en el marco del proyecto CF-23-I1068. Arelis Ledesma-Juárez agradece a SECIHTI por la beca postdoctoral. Asimismo, agradecemos a Rogelio Morán Elvira por las mediciones SEM y EDS y por la ayuda técnica, y a María Luisa Ramón García por las mediciones XRD.

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

BIBLIOGRAFÍA

[1] Kumar, P. (2016). Organic solar cells: device physics, processing, degradation, and prevention. CRC press.

[2] Mufti, N., Amrillah, T., Taufiq, A., Diantoro, M., & Nur, H. (2020). Review of CIGS-based solar cells manufacturing by structural engineering. Solar energy, 207, 1146-1157.

[3] Wada, T., Hashimoto, Y., Nishiwaki, S., Satoh, T., Hayashi, S., Negami, T., & Miyake, H. J. S. E. M. (2001). High-efficiency CIGS solar cells with modified CIGS surface. Solar Energy Materials and Solar Cells, 67(1-4), 305-310.

[4] Buitrago, E., Novello, A. M., & Meyer, T. (2020). Third-generation solar cells: toxicity and risk of exposure. Helvetica Chimica Acta, 103(9), e2000074.

[5] Ledesma-Juárez, A., & Fernández, A. M. (2023). Preparation and characterization of Cu-In-Ga-Se thin films by the electrodeposition technique using different metal salts and substrates. Journal of Materials Science: Materials in Electronics, 34(19), 1461.

[6] Quintero, F. (2023) Optimización de la capa ventana de películas basadas en CIGS, elaboradas por electrodepósito, para la fabricación de celdas solares de película delgada. [Tesis de licenciatura] Universidad Tecnológica Emiliano Eapata del Estado de Morelos División académica de mecánica industrial.

[7] Kaelin, M., Rudmann, D., & Tiwari, A. N. (2004). Low cost processing of CIGS thin film solar cells. Solar Energy, 77(6), 749-756.

[8] Ledesma-Juárez, A., Quintero-Guerrero, J. F., & Fernández, A. M. (2025). Fabrication and characterization of Cu (In, Ga) Se2 thin films by electrodeposition: optimization of the thermal treatment with selenium and mechanical disturbance technique. Chalcogenide Letters, 22(2), 97-108.

[9] Poudel, D. (2022). Recrystallization of Cu (In, Ga) Se2 Semiconductor Thin Films via Metal Halides Treatment (Doctoral dissertation, Old Dominion University).

[10] Landi Jr, S., Segundo, I. R., Freitas, E., Vasilevskiy, M., Carneiro, J., & Tavares, C. J. (2022). Use and misuse of the Kubelka-Munk function to obtain the band gap energy from diffuse reflectance measurements. Solid state communications, 341, 114573.

[11] Lee, H., Yoon, H., Ji, C., Lee, D., Lee, J. H., Yun, J. H., & Kim, Y. (2012). Fabrication of CIGS films by electrodeposition method for photovoltaic cells. Journal of electronic materials, 41, 3375-3381.

[12] Jang, Y. J., Lee, J., Lee, K. B., Kim, D., & Lee, Y. (2018). Quantitative analysis and band gap determination for CIGS absorber layers using surface techniques. Journal of Analytical Methods in Chemistry, 2018(1), 6751964.

[13] Mughal, M. A., Engelken, R., & Sharma, R. (2015). Progress in indium (III) sulfide (In2S3) buffer layer deposition techniques for CIS, CIGS, and CdTe-based thin film solar cells. Solar Energy, 120, 131-146.

[14] Wei, A., Liu, J., Zhuang, M., & Zhao, Y. (2013). Preparation and characterization of ZnS thin films prepared by chemical bath deposition. Materials Science in Semiconductor Processing, 16(6), 1478-1484.

[15] Bhattacharya, R. N. (2008). 19.52%-Efficient CIGS photovoltaic cells using a Cd-Zn-S buffer layer. Ecs Transactions, 13(17), 173.

AUTORIZACIÓN Y RENUNCIA.

Los autores del presente artículo autorizan al TecNM/Instituto Tecnológico de Zacatepec para publicar el escrito en el libro electrónico del CITID 2025. El TecNM/ITZ o los editores no son responsables ni por el contenido ni por las implicaciones de lo que está expresado en el escrito.

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

CAPACIDAD ANTIOXIDANTE DE EXTRACTOS DE HOJAS DE *CITRUS X SINENSIS*

Vicencio Reyes Juan Carlos[1], Pérez González Mariana Zuleima[2], Ceja Gordillo Edson Javier[3], Vázquez Ramo Mayra Beatriz[4], Sánchez Ortiz William[5]

[1]Maestro en Ciencias. Tecnológico Nacional de México, TES de Ecatepec, División de ingeniería Química y Bioquímica, Av. Tecnológico S/N, Valle de Anáhuac, C.P 55210, Ecatepec de Morelos, Edo. Méx., México.
[2]Doctora. Tecnológico Nacional de México, TES de Ecatepec, División de ingeniería Química y Bioquímica, Av. Tecnológico S/N, Valle de Anáhuac, C.P 55210, Ecatepec de Morelos, Edo. Méx., México.
[3]Ingeniero Químico. Tecnológico Nacional de México, TES de Ecatepec, División de ingeniería Química y Bioquímica, Av. Tecnológico S/N, Valle de Anáhuac, C.P 55210, Ecatepec de Morelos, Edo. Méx., México.
[4]Ingeniera Química. Tecnológico Nacional de México, TES de Ecatepec, División de ingeniería Química y Bioquímica, Av. Tecnológico S/N, Valle de Anáhuac, C.P 55210, Ecatepec de Morelos, Edo. Méx., México.
[5]Doctor. Tecnológico Nacional de México, TES de Ecatepec, División de ingeniería Química y Bioquímica, Av. Tecnológico S/N, Valle de Anáhuac, C.P 55210, Ecatepec de Morelos, Edo. Méx., México.
Correos: 202422043@tese.edu.mx , mzperezgonzalez@tese.edu.mx, 202422304@tese.edu.mx, 202322413@tese.edu.mx, williamso@tese.edu.mx
Cel. 7295157719, 5534840538, 5564617858, 5618181821, 5518934478

Resumen.- Los cítricos son una fuente abundante de vitamina C y compuestos fenólicos con propiedades antioxidantes que ofrecen múltiples beneficios para la salud [1]. En este estudio, se realizó la extracción de hojas de *Citrus × sinensis* (*C. sinensis*) colectadas temporadas de verano y otoño del año 2024. En la extracción, se emplearon solventes no convencionales, como disolventes eutécticos profundos (DES), entre ellos Ethaline (Et), Reline (Re) y Glyceline (Gly), así como disolventes donadores de puentes de hidrógeno (HBD), incluyendo glicerol (G) y etilenglicol (EG). Además, se utilizó metanol (MeOH) como solvente convencional. El efecto de los diferentes solventes en las extracciones se evaluó mediante la determinación de la concentración inhibitoria media (CI_{50}) a partir de la capacidad antioxidante (radical DPPH). En la primera colecta (verano), los valores de CI_{50}, presentaron 6.32 mg/ml (MeOH), 24.259 mg/ml (Et), 24.096 mg/ml (Re), 26.142 mg/ml (Gly), 23.518 mg/ml (EG) y 24.740 mg/ml (G). En la segunda colecta (otoño), los valores de CI_{50} fueron de 5.059 mg/ml (MeOH), 12.752 mg/ml (Et), 12.608 mg/ml (Re), 25.342 mg/ml (Gly), 18.904 mg/ml (EG) y 12.534 mg/ml (G). De manera general, los extractos obtenidos en la segunda colecta mostraron una mayor capacidad antioxidante en comparación con los de la primera colecta. Esto sugiere que factores como la época de recolección pueden influir en la composición y la actividad de los compuestos fenólicos extraído.

Palabras Clave: CI_{50}, DES, DPPH

Abstract.- Citrus fruits are an abundant source of vitamin C and phenolic compounds with antioxidant properties that offer multiple health benefits [1]. In this study, extraction of Citrus × sinensis (C. sinensis) leaves collected in the summer and autumn seasons of 2024 was performed. In the extraction, unconventional solvents, such as deep eutectic solvents (DES), including Ethaline (Et), Reline (Re), and Glyceline (Gly), as well as hydrogen bond donor (HBD) solvents, including glycerol (G) and ethylene glycol (EG), were used. In addition, methanol (MeOH) was used as a conventional solvent. The effect of the different solvents on the extractions was evaluated by determining the mean inhibitory concentration (CI_{50}) from the antioxidant capacity (DPPH radical). In the first collection (summer), the values of CI_{50}, presented 6.32 mg/ml (MeOH), 24.259 mg/ml (Et), 24.096 mg/ml (Re), 26.142 mg/ml (Gly), 23.518 mg/ml (EG) and 24.740 mg/ml (G). In the second collection (autumn), the CI_{50} values were 5.059 mg/ml (MeOH), 12.752 mg/ml (Et), 12.608 mg/ml (Re), 25.342 mg/ml (Gly), 18.904 mg/ml (EG) and 12.534 mg/ml (G). Generally, the extracts obtained in the second collection showed higher antioxidant capacity compared to those of the first collection. This suggests that factors such as time of collection may influence the composition and activity of the extracted phenolic compounds.

Key words: IC_{50}, DES, DPPH

INTRODUCCIÓN

La naranja (*Citrus sinensis L)* es uno de los cítricos más producidos en el mundo, datos de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) del 2021, presenta los principales productores a nivel mundial como Brasil, China, India, Estados Unidos y México [1].

En México, reporto el Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP) en el mismo año, que la superficie para cultivos de cítricos fue de 625 mil hectáreas. De estas, el 55.1% corresponde a naranja, el

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

33.4% de limón y el restantes 10.5% son otros cultivos cítricos; por ello, el cultivo de naranja presento alrededor de 354 mil hectáreas [2]. En particular la producción *Citrus sinensis* se destinó el 56% se destino a consumo directo, el 34% a la extracción industrial de jugo, y el 10% restante se considera desecho que pertenece a las cáscaras, semillas, corteza y pulpa [1].

Más allá de su importancia económica, las plantas de Cítricos a despertado un gran interés debido a su propiedades nutritivas, medicinales y biológicas [3]. Presentando compuestos bioactivos, como las vitaminas, carotenoides y diversos compuestos fenólicos (flavanonas, antocianinas y ácidos hidroxicinámicos) [3-4]. Los *C. sinensis* ha tenido diversos estudios sobre actividad antimutagénica [5], miocardiopatía diabética [6], actividades antimicrobianas [7], antioxidante en vitro [8], etc.

Debido a su importancia, la búsqueda de fenoles con capacidad antioxidante se ha tenido una prioridad, impulsando a la exploración de métodos de extracción más eficientes, económicos y ecológicos en comparación con los métodos convencionales, como los mecánicos, la destilación, la extracción con solventes convenciones (metanol, etanol, agua, cloroformo, acetona, etc.) y la extracción con fluidos supercríticos (Etano, CO_2, xenón). Aunque estos últimos métodos son aplicados a la industria química y a la farmacéutica, pero presentan limitaciones como la polaridad de los analitos, la complejidad metodológica (presión, temperatura, etc.) y el impacto ambiental [9].

Las nuevas técnicas de extracción, como la extracción asistida por ultrasonido [9], ofrecen ventajas significativas, incluyendo mayor rendimiento del extracto, reducción de tiempo y costos, y menor impacto ambiental.

La elección de un método de extracción adecuado es fundamental para aislar los compuestos bioactivos de manera eficiente, como en la preparación de extracto, es el primer paso para él análisis de plantas medicinales, influye significativamente en los resultados finales [9].

En la última décadas, la aplicación de los Disolventes Eutécticos profundos (DES) son sistemas para formar mezclas eutécticos, entre ácidos de Lewis o de Bronsted y bases que contiene especies aniónicas y catiónicas para formar enlaces tipo puente de hidrogeno, donde está conformado por un aceptador de puente de hidrogeno llamado HBA (por lo general son sales de amonio cuaternarias) y HBD (donantes de puente de hidrogeno HBD) que generalmente son alcoholes, ácidos carboxílicos, aminas, amidas y aminoácidos [10]. A diferencias de los disolventes convencionales, son de bajo costo, fácil de preparar y no son tóxicos a la salud y al medio ambiente [11]. Los DES han sido estudiados ampliamente como en electroquímica, nanotecnología, biosensores, polímeros, proceso de los metales, extractos naturales, etc. [11].

En la actualidad, se han realizado diversas investigaciones sobre la extracción de extractos de compuestos bioactivos de la cáscara de naranja con distintos DES [12-14]. Asimismo, se han llevado a cabo extracciones con DES en otras fuentes naturales como la piña, la cúrcuma, *Morus alba L.*, *Pinus insignis*, *Ribes nigrum L.*, entre otras [9]. En este trabajo se presenta la capacidad antioxidante de los extractos de hojas de *C. sinensis* con distintos solventes (Metanol, DES-Reline, DES-Ethaline, DES- Glyceline, Etinglicol, Glicerol) por el método DPPH.

DESARROLLO

Preparación de hojas

Las hojas de naranja fueron colectadas de un surco de 10 árboles en el municipio Chicontepec, Veracruz, con coordenadas [20° 56’ 10.6” N y 97° 56´ 60.0” W], durante los meses de septiembre(verano) y noviembre(otoño) del año 2024. Tras cada colecta, las hojas se secaron a temperatura ambiente durante 14 días. Posteriormente, fueron trituradas y tamizadas hasta alcanzar un tamaño de partícula de 0.5 mm.

Disolventes Eutécticos Profundos (DES)

Se elaboraron diversos DES utilizando cloruro de colina (ChCl) con etilenglicol (EG), ChCl con urea (U) y ChCl con glicerol(G) en una relación molar 1:2, agitando continuamente a 200 rpm y a 50 °C durante 20 horas, hasta obtener un líquido transparente y homogéneo [11].

Obtención de Extractos de hojas de naranja con Solvente Convencional (Metanol) por método Ultrasónico

La obtención de extractos metanolico (MeOH), se pesó 40 g de hojas de naranja sumergidas en metanol en una proporción de 1:10 g/ml. Los extractos se llevaron a un baño ultrasónico durante 15 minutos a temperatura ambiente. Después, se realizó una filtración por bomba de vacío, y los residuos fueron lavados cuatro veces nuevamente con el solvente metanol.

Finalmente, los extractos se dejaron reposar para permitir la evaporación del exceso de solvente, por último, se calculó el porcentaje de rendimiento de los extractos de MeOH por la Ec. 1[15].

$$\textbf{\% Rendimiento} = \frac{\textbf{Masa del extracto}}{\textbf{Masa de la muestra}} * \mathbf{100} \qquad \text{Ec. (1)}$$

Obtención de Extractos de hojas de naranja con disolventes no convencionales DES por método Ultrasónico

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

Para la extracción con distintos disolventes eutécticos profundos (DES), se mezcló 1 g de hojas de naranja con Ethaline, Reline, Glyceline en una proporción 1:10, así como con etilenglicol y glicerol de forma individual. Luego, los extractos se llevaron en un baño ultrasónico durante 1 hora a temperatura ambiente.

Evaluación de la capacidad antioxidante

Para determinar la capacidad antioxidante de los extractos se evaluó por el método del radical 2,2-difenil-1-picrilhidrazilo (DPPH). La solución del DPPH se preparó en metanol a una concentración (9×10^{-6} M) [16]. Se utilizó quercetina como antioxidante de referencia a distintas concentraciones (250, 125, 63, 31, 16 y 8 µg/mL), mientras que para los extractos se evaluaron las concentraciones de 5000, 2000, 1000, 500, 250 y 125 µg/mL. Después se usaron 100 µL de los extractos y se adiciona con 2.9 mL de la solución (DPPH). Las mezclas se dejaron incubar por 30 minutos en total oscuridad y se midió la absorbancia a 517 nm utilizando un espectrofotómetro UV-Vis de la marca Velab [16]. Finalmente, el porcentaje (%) de inhibición del radical DPPH se determina con la siguiente Ec. 2 [15]:

$$\textbf{\% Inhibición} = \frac{\textbf{Abs. Control} - \textbf{Abs. Muestra}}{\textbf{Abs. Control}} * \mathbf{100} \qquad \text{Ec. (2)}$$

Donde:
Abs Control: Absorbancia del control (DPPH).
Abs Muestra: Absorbancia de los extractos.

Se calculó la Concentración Inhibitoria Media (CI_{50}) [16]. Este valor se obtuvo a partir de la ecuación de la regresión lineal entre las concentraciones y los % de inhibición del DPPH para cada extracto y se determinó por la Ec. 3.

$$CI = \frac{50 - b}{m} \qquad Ec. (3)$$

Donde:
m: Es la pendiente de la recta de la gráfica de la concentración vs % inhibición.
b: Es la ordenada al origen de la gráfica de la concentración vs % inhibición.

DISCUSIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

A partir de la ecuación 1 se determinó % de rendimiento para los extractos obtenidos con el solvente de metanol, para la colecta 1(verano) y 2(otoño). Los extractos MeOH de ambas colectas presentaron un rendimiento del 19.042 % y 14.300 % respectivamente. Muhammad Adnan et. al.,[17] reporto 4 rendimientos de diferentes extracciones por agitación durante 4 horas a 100 rpm; la primera con metanol al 100%, metanol al 80%, metanol al 50% y agua destilada a una temperatura 50 °C. Mostrando rendimientos del 7, 11, 13 y 15% respectivamente; Comparando con los rendimientos obtenidos del extracto metanolico de la colecta 2 es muy similar al extracto metanolico al 50% y agua destilada. En la literatura se ha reportado diferentes factores que pueden alterar la cantidad de compuesto activos presentes en plantas, como la temperatura, condiciones climáticas, calidad de suelo, entre otros [18].

Se sabe la producción de compuestos fenólicos son afectados por los factores antes mencionados, pero principalmente por la temperatura [18] debido que la colecta 1 se realizó en mes de septiembre la temperatura reportada fue 33± 1 °C y la colecta 2 en mes de noviembre reportando una temperatura de 28 ± 1°C. Con lo anterior colaboramos que los compuestos fenólicos se producen a mayor temperatura debido que la colecta 1 muestra mayor rendimiento en comparación con la colecta 2.

Evaluación de la Capacidad Antioxidante

En cuanto la evaluación de los distintos extractos para determinar la capacidad antioxidante por el método DPPH se reportan el % de inhibición y la CI_{50} de la coleta 1(verano) (Tabla 1), así mismo, en la Tabla 2 se presenta los valores de la colecta 2(otoño).

Para la colecta 1 a la concentración 5000 ug/ml el extracto que mostró mayor % de inhibición fue metanolico con un valor de 39.754 ± 0.214. Demostrando que la polaridad del solvente ayuda arrastre de compuestos polares como los fenólicos. En comparación con el porcentaje inhibición de los extractos con los DES, se muestra que son indistintos, con valores de 14.800 ± 0.283% (DES-Reline), 13.600 ± 0.141% (DES-Ethaline), 13.048 ± 0.302% (DES-Glyceline), 13.600 ± 0.282% (etilenglicol) y 14.139 ± 0.380% (glicerol).

En la $CI_{50\ del}$ extracto con metanol se presentó con mayor capacidad antioxidante para estabilizar el radical DPPH de 6.321 mg/ml. En comparación con los demás extractos que mostraron una CI_{50} de alrededor de 25± 1.5 mg/ml.

En la colecta 2, el extracto con metanol presentó el mayor porcentaje de inhibición, con un valor de 48.608 ± 0.073% a la concentración de 5000 µg/ml. En comparación con los demás extractos, los DES (Reline y Ethaline) y el glicerol mostraron menores porcentajes de inhibición, con valores de 22.521 ± 0.074%, 22.524 ± 0.210% y 2.550 ± 0.494%, respectivamente. Por último, el DES-Glyceline y etilenglicol presentaron los porcentajes de inhibición más bajos, con valores de 13.600 ± 0.424% y 17.500 ± 0.147%, respectivamente.

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

Tabla1. Representa la actividad antioxidante de los distintos extractos para colecta 1(verano) y la quercetina

Colecta 1			
Extractos de Citrus X Sinensis	Concentración (µg/ml)	% Inhibición DPPH	CI50 (mg/ml)
Quercetina	250	83.838± 0.357^{cdef}	0.038
	125	82.407 ± 0.119^{def}	
	63	81.397± 0.119^{def}	
	31	46.717± 0.357^{ef}	
	16	23.232± 0.476^{f}	
	8	1.936 ± 0.595	
Metanol	5000	39.754 ± 0.214 ^{bcdef}	6.321
	2000	21.768 ± 0.500^{cdef}	
	1000	12.323 ± 0.428^{def}	
	500	7.828 ± 0.071^{ef}	
	250	6.061 ± 0.285^{f}	
	125	3.283 ± 0.071	
DES – Reline	5000	14.800± 0.283 ^{bcdef}	24.096
	2000	10.700± 0.283 ^{cdef}	
	1000	8.950± 0.212 ^{def}	
	500	7.500± 0.283 ^{ef}	
	250	6.100± 0.141^{f}	
	125	4.350± 0.354	
DES – Ethaline	5000	13.600± 0.141 ^{bcdef}	24.259
	2000	10.000± 0.141 ^{cdef}	
	1000	6.150± 0.212 ^{ef}	
	500	5.650± 0.071 ^{ef}	
	250	4.550± 0.071 ^{f}	
	125	3.850± 0.212	
DES -Glyceline	5000	13.048± 0.302 ^{bcdef}	26.142
	2000	9.465± 0.226^{cdef}	
	1000	8.288± 0.37^{def}	
	500	6.042± 0.226^{f}	
	250	5.294± 0.378^{f}	
	125	3.636± 0.151	
Etinglicol	5000	13.600± 0.282 ^{bcdef}	23.518
	2000	9.650± 0.070 ^{cdef}	
	1000	6.000± 0.141^{ef}	
	500	5.500± 0.070 ^{ef}	
	250	4.050± 0.212	
	125	3.500± 0.141	
Glicerol	5000	14.139± 0.380 ^{bcdef}	24.740
	2000	9.193± 0.228 ^{def}	
	1000	8.333± 0.380^{def}	
	500	6.66± 0.152 ^{ef}	
	250	5.107± 0.076	
	125	5.000± 0.228	

Para la CI_{50} de extracto con metanol es de 5.059 mg/m es el que presento con mayor capacidad antioxidante. En comparación con los extractos obtenidos con DES-Reline, DES-Ethaline y glicerol presentan una CI_{50} de aproximadamente 12.5 ± 0.5 mg/ml, mientras que los extractos con DES-Glyceline y etilenglicol exhiben valores superiores de 18 mg/ml.

Tabla 2. Representa la actividad antioxidante de los distintos extractos para la colecta 2 (otoño).

Colecta 2			
Extractos de Citrus X Sinensis	Concentración (µg/ml)	% Inhibición DPPH	CI50 (mg/ml)
Metanol	5000	48.608± 0.073 ^{bcdef}	5.059
	2000	24.742 ± 0.292 ^{cdef}	
	1000	14.484 ± 0.219 ^{def}	
	500	9.432 ± 0.510 ^{ef}	
	250	6.030 ± 0.073	
	125	5.257 ± 0.146	
DES - Reline	5000	22.521± 0.074 ^{bcdef}	12.608
	2000	13.238± 0.074 ^{cdef}	
	1000	10.232± 0.298 ^{def}	
	500	8.438± 0.447 ^{ef}	
	250	6.012± 0.298^{f}	
	125	4.483± 0.372	
DES -Ethaline	5000	22.524± 0.210 ^{bcdef}	12.752
	2000	12.871± 0.140 ^{cdef}	
	1000	9.455± 0.070^{def}	
	500	6.980± 0.070^{ef}	
	250	5.841± 0.140	
	125	5495± 0.210	
DES-Glyceline	5000	13.600± 0.424 ^{bcdef}	25.342
	2000	9.850± 0.070 ^{cdef}	
	1000	7.750± 0.070 ^{def}	
	500	5.550± 0.212 ^{f}	
	250	4.950± 0.353 ^{f}	
	125	3.600± 0.141	
Etinglicol	5000	17.500± 0.147 ^{bcdef}	18.904
	2000	11.510± 0.368 ^{cdef}	
	1000	9.792± 0.441 ^{def}	
	500	7.396± 0.147 ^{ef}	
	250	5.677± 0.515	
	125	4.948± 0.368	
Glicerol	5000	22.550± 0.494 ^{bcdef}	12.534
	2000	10.250± 0.212 ^{cdef}	
	1000	7.650± 0.494 ^{ef}	
	500	6.350± 0.494 ^{f}	
	250	5.750± 0.212 ^{f}	
	125	3.300± 0.141	

En comparación de la colecta 1 y 2 se presentó mayor capacidad antioxidante en los extractos de la colecta 2, por lo que, el rendimiento obtenido con menor porcentaje no influye para él % inhibición y la CI_{50}.

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

En un estudio realizado por Bachera Khettal et al. [19], sobre la extracción de compuestos bioactivos de hojas de cítricos de la variedad Hamlin, utilizando metanol y agua como solventes. Los valores de CI_{50} obtenidos fueron de 74,99 ± 1,50 µg/ml para el extracto MeOH y para el extracto acuoso de 95,78 ± 0,82 µg/ml. Por otro lado, Lan Chi et al. [20] realizaron la extracción de aceite esencial de hojas de *Citrus sinensis* de la variedad Osbeck mediante el método de hidrodestilación, obteniendo un valor de CI_{50} de 1,49 mg/ml. Finalmente, Muhammad Adnan et al. [17] llevaron a cabo diferentes extracciones por agitación durante 4 horas a 100 rpm, utilizando metanol al 100%, metanol al 80%, metanol al 50% y agua destilada a una temperatura de 50 °C. Los valores de CI_{50} obtenidos fueron de 113 ± 2.2, 126.7 ± 1.99, 108.3 ± 1.96 y 90 ± 2 µg/ml, respectivamente. Al comparar los valores de CI_{50}, la extracción con metanol en la colecta 2 mostró valores similares a los obtenidos en la extracción del aceite esencial de hojas de *Citrus sinensis* Osbeck mediante hidrodestilación.

Para saber si existen diferencias significativas entre los distintos extractos de hojas de *C. sinensis* a la concentración de 5000 µg/ml con respecto al % de inhibición del DPPH, se realizó un análisis estadístico de comparación de medias con Tukey y entre grupos de ANOVA de una vía ($p < 0.05$), los resultados se muestran en la Figura 1 (Colecta 1) y Figura 2 (Colecta 2). Las comparaciones se establecieron de la siguiente manera: a vs. Metanol, b vs. DES-Reline, c vs. DES-Ethaline, d vs. DES-Glyceline, e vs. Glicerol, f vs. Etilenglicol.

En la colecta 1, el extracto con metanol mostró una diferencia significativa en comparación con los demás extractos. Para el caso del extracto DES-Reline, se observó una diferencia significativa respecto. A los extractos con DES-Ethaline, DES-Glyceline y etilenglicol lo que indica una variabilidad en la capacidad de inhibición entre los distintos solventes utilizados.

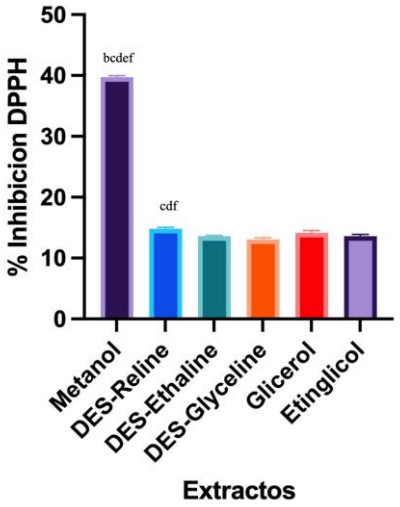


Figura 1: Porcentaje de inhibición del DPPH en la colecta 1(verano) a una concentración de 5000 µg/ml. Los valores representan la media (±) desviación estándar (d.e). Se realizó un análisis estadístico ANOVA de una vía ($p < 0.05$), donde: a vs. Metanol, b vs. DES-Reline, c vs. DES-Ethaline, d vs. DES-Glyceline, e vs. Glicerol, f vs. Etilenglicol.

El extracto con metanol (colecta 2) presentó una diferencia significativa con todos los demás. Los extractos con DES-Reline y DES-Ethaline mostraron diferencias significativas frente a los extractos DES-Glyceline y etilenglicol. Asimismo, el extracto DES-Glyceline se distinguió significativamente de los extractos de glicerol y etilenglicol. Finalmente, el extracto glicerol también fue diferente del extracto etilenglicol.

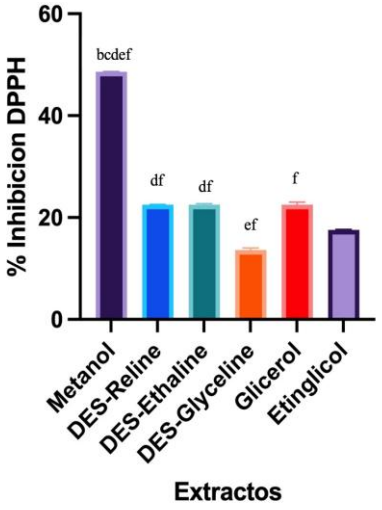


Figura 2. Porcentaje de inhibición del DPPH en la colecta 2(otoño) a una concentración de 5000 µg/ml. Los valores representan la media (±) desviación estándar (d.e). Se realizó un análisis estadístico ANOVA de una vía ($p < 0.05$), donde: a vs. metanol, b vs. DES-Reline, c vs. DES-Ethaline, d vs. DES-Glyceline, e vs. Glicerol, f vs. Etilenglicol.

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

Los resultados indican que en la Colecta 2 se observaron mayores diferencias significativas entre los distintos extractos en comparación con la Colecta 1, donde las diferencias fueron menores. Esto sugiere que factores como las épocas de la colecta, y condiciones climáticas influyen en producción de metabolitos bioactivos y por ende en la capacidad antioxidante de los extractos. Además, es importante resaltar que el tipo de extracción con los distintos solventes son un factor que determina el rendimiento y tipo de metabolitos.

CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos indican que la temperatura de las colectas influye en el rendimiento de los extractos metanólicos de *C. sinensis*, lo que coincide con estudios previos que destacan el impacto de factores ambientales en la producción de compuestos fenólicos. A pesar de que la Colecta otoño presentó un menor rendimiento, los extractos obtenidos mostraron una mayor capacidad antioxidante, evidenciada por un mayor % de inhibición del DPPH y una menor CI_{50}.

El solvente metanol es el más eficiente para la extracción de compuestos bioactivos con actividad antioxidante, superando a los DES, glicerol y etinglicol. Esto debido a la polaridad del solvente con la obtención de fenoles y otros metabolitos con propiedades antioxidantes.

La diferencia observada en la actividad antioxidante de los extractos sugiere la necesidad de optimizar las condiciones de extracción, considerando no solo al rendimiento, sino también la estabilidad de los compuestos bioactivos obtenidos. En este sentido, los DES continúan siendo una alternativa prometedora para la sostenibilidad de los métodos de extracción en plantas.

Estos hallazgos permiten la base de futuras investigaciones orientadas a la estabilidad antioxidante de los extractos, su potencial de estos extractos podría reducir enfermedades y la optimización de técnicas de extracción mediante diversas tecnologías. Además, los extractos naturales obtenidos podrían tener aplicaciones industriales, como en la formulación de inhibidores de corrosión, un campo de creciente interés debido a la demanda de alternativas naturales a los productos sintéticos.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Tecnológico de Estudios Superiores de Ecatepec (TESE) por estar inscritos en Doctorado en Ciencias en Ingeniería Bioquímica. Asimismo, expresan su gratitud a la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) por la beca otorgada (CVU 1195806) para la realización de este trabajo.

BIBLIOGRAFÍA

[1] Galindo-Segura, L. A., Pérez-Vázquez, A., Ramírez Martínez, A., López-Romero, G., & Gómez-Merino, F. C. (2023). Managing Orange Bagasse in the Central Area of Veracruz State. *Revista Terra Latinoamericana*, *41*. https://doi.org/10.28940/terra.v41i0.1673

[2] SIAP (Servicio De Información Agroalimentaria Y Pesquera). (2024). La ruta de la transformación agroalimentaria. Consultado el 3 marzo de 2025 desde: https://online.pubhtml5.com/rsarc/ywrn/

[3] Ordoñez-Gómez, E. S., Reátegui-Díaz, D., & Villanueva-Tiburcio, J. E. (2018). Polifenoles totales y capacidad antioxidante en cáscara y hojas de doce cítricos. *Scientia Agropecuaria*, *9*(1), 113-12.

[4] Siddhartha, A., Kaur, H., Bains, K., & Kaur, S. (2025). Comparative Analysis of Bioactive Compounds and Antioxidant Potential Among Various Citrus Varieties and Their Juices. *Applied Fruit Science*, *67*(1), 31.

[5] Toscano-Garibay, J. D., Arriaga-Alba, M., Sánchez - Navarrete, J., Mendoza-García, M., Flores-Estrada, J. J., Moreno-Eutimio, M. A., ... & Ruiz-Pérez, N. J. (2017). Antimutagenic and antioxidant activity of the essential oils of Citrus sinensis and Citrus latifolia. *Scientific reports*, *7*(1), 11479.

[6] Akinyelu, J., Adeoye, A. O., Aladetuyi, A., Ibraheem, O., Onodugo, A. C., Akinlolu, O. S., ... & Fatoki, T. H. (2025). Phenolic-rich extract from Citrus sinensis leaves attenuates diabetic cardiomyopathy in male wistar rats by modulating oxidative stress, hyperlipidemia, and pyroptosis-related gene expression. *Food Chemistry Advances*, *6*, 100877.

[7] Kifle, D., Bacha, K., & Gonfa, G. (2025). Antimicrobial activities of biosynthesized nanosilver using Musa paradisiaca and Citrus sinensis peel extracts against major human and plant pathogens. *Scientific Reports*, *15*(1), 6600.

[8] Al Hawat, L., & Alallan, L. (2025). Estimation of antioxidant and hypolipidemic activities of extracts of Citrus x aurantium leaves in vitro. *Phytomedicine Plus*, *5*(1), 100723.

[9] Fu, M., Zhang, H., Bai, J., Cui, M., Liu, Z., Kong, X., ... & Kong, L. (2025). Application of Deep Eutectic Solvents with Modern Extraction Techniques for the Recovery of Natural Products: A Review. *ACS Food Science & Technology*.

[10] Torres Palacio, P. C. (2021). Síntesis, propiedades, caracterización y aplicaciones químicas de novedosos disolventes eutécticos profundos: DES (Deep Eutectic Solvents) (Doctoral dissertation, Universitat de Lleida).

[11] Smith, E. L., Abbott, A. P., & Ryder, K. S. (2014). Deep eutectic solvents (DESs) and their applications. *Chemical reviews*, *114*(21), 11060-11082.

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

[12] Viñas-Ospino, A., Panić, M., Bagović, M., Radošević, K., Esteve, M. J., & Redovniković, I. R. (2023). Green approach to extract bioactive compounds from orange peel employing hydrophilic and hydrophobic deep eutectic solvents. *Sustainable chemistry and pharmacy*, *31*, 100942.

[13] Vinas-Ospino, A., Sá-Nogueira, I., Duarte, A. R., López-Malo, D., Esteve, M. J., Frígola, A., ... & Paiva, A. (2024). Exploring the biological properties and bioaccessibility of orange peel extracts using deep eutectic systems. *Food Bioscience*, *61*, 104684.

[14] Ozturk, B., Parkinson, C., & Gonzalez-Miquel, M. (2018). Extraction of polyphenolic antioxidants from orange peel waste using deep eutectic solvents. *Separation and Purification Technology*, *206*, 1-13.

[15] Rana, G. M., Uddin, M. J., Barmon, J., Ghos, B. C., Chowdhury, T. A., Dey, A. K., ... & Yeasmin, M. S. (2025). Assessment of the essential oil extracted from Citrus aurantifolia leaves using solvent-free microwave extraction technique. *Food Chemistry Advances*, 100913.

[16] Pérez-González, M. Z., Nieto-Trujillo, A., GutiérrezRebolledo, G. A., García-Martínez, I., Estrada-Zúñiga, M. E., Bernabé-Antonio, A., ... & Cruz-Sosa, F. (2019). Lupeol acetate production and antioxidant activity of a cell suspension culture from Cnidoscolus chayamansa leaves. *South African journal of botany*, *125*, 30-38.

[17] Adnan, M., Umer, A., Ahmad, I., Hayat, K., & Shakeel, S. N. (2014). In vitro evaluation of biological activities of Citrus leaf extracts. *Sains Malaysiana*, *43*(2), 185-194.

[18] Silva, N. C. C., & Fernandes Júnior, A. J. J. O. V. A. (2010). Biological properties of medicinal plants: a review of their antimicrobial activity. *Journal of venomous animals and toxins including tropical diseases*, *16*, 402-413.

[19] Chi, P. T. L., Van Hung, P., Le Thanh, H., & Phi, N. T. L. (2020). Valorization of citrus leaves: Chemical composition, antioxidant and antibacterial activities of essential oils. *Waste and Biomass Valorization*, *11*, 48494857.

[20] Khettal, B., Kadri, N., Tighilet, K., Adjebli, A., Dahmoune, F., & Maiza-Benabdeslam, F. (2017). Phenolic compounds from Citrus leaves: Antioxidant activity and enzymatic browning inhibition. *Journal of Complementary and Integrative Medicine*, *14*(1), 20160030.

AUTORIZACIÓN Y RENUNCIA.

Los autores del presente artículo autorizan al TecNM/Instituto Tecnológico de Zacatepec para publicar el escrito en el libro electrónico del CITID 2025. El TecNM/ITZ o los editores no son responsables ni por el contenido ni por las implicaciones de lo que está expresado en el escrito.

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

OBTENCIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE UN MATERIAL COMPUESTO BIODEGRADABLE A PARTIR DE QUITOSANO/PVA/ CELULOSA MICROBIANA.

Bahena Iturbe Vania Yael [1], Arrieta González Cinthya Dinorah [2], Granados Baeza Manuel Jesús [2]

[1] División de Estudios de Posgrado e Investigación. Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico de Zacatepec, Calzada Tecnológico No. 27, Col. Centro, Zacatepec, Morelos, México
mg14091212@zacatepec.tecnm.mx, 7773386517, C.P. 62640;
[2] Departamento de Ingeniería Química y Bioquímica. Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico de Zacatepec, Calzada Tecnológico No. 27, Col. Centro, Zacatepec, Morelos, México
cinthya.ag@zacatepec.tecnm.mx, 7772676757, C.P. 62640.
[2] Departamento de Ingeniería Química y Bioquímica. Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico de Zacatepec, Calzada Tecnológico No. 27, Col. Centro, Zacatepec, Morelos, México
manuel.gb@zacatepec.tecnm.mx, 7772676757, C.P. 62640.

Resumen -- Los materiales poliméricos biodegradables son una alternativa sostenible a los plásticos convencionales, ya que se degradan en el ambiente mediante la acción de microorganismos, reduciendo el impacto ambiental. Su uso se ha expandido en diversas industrias, incluyendo envases y embalajes, medicina, agricultura y productos de un solo uso [3]. Una fuente de este tipo de polímeros biodegradables es la celulosa bacteriana, la cual, se usa en productos innovadores que aprovechan las propiedades de la celulosa producida por microorganismos [16] mediante la fermentación bacteriana [1], debido a lo anterior, este trabajo habla acerca de la obtención de un material compuesto a base de Quitosano, PVA y Celulosa Microbiana [5][11][15] mediante el método de Casting para su posible uso como polímero biodegradable [8][9][10]. Se realizó la caracterización por medio de los siguientes análisis: Espectroscopia Infrarroja por Transformada de Fourier (FTIR), Microscopia Electrónica de Barrido (SEM), además de la determinación del espesor, el ángulo de contacto [4] y el porcentaje de degradabilidad de las biopelículas obtenidas [7]. Con los resultados obtenidos de las pruebas realizadas se comprueba que los componentes elegidos para la elaboración de este material tienen una buena sinergia y brindan resultados favorables para la aplicación deseada como polímero biodegradable [11][13].

Palabras Clave: Polímero Biodegradable, Celulosa microbiana, Kombucha, PVA, Quitosano, SCOBY.

Abstract -- Biodegradable polymeric materials are a sustainable alternative to conventional plastics, as they degrade in the environment through the action of microorganisms, reducing the environmental impact. Their use has expanded in various industries, including packaging, medicine, agriculture and single-use products [3]. One source of this type of biodegradable polymers is bacterial cellulose, which is used in innovative products that take advantage of the properties of cellulose produced by microorganisms [16] through bacterial fermentation [1]. Due to the above, this work talks about obtaining a composite material based on Chitosan, PVA and Microbial Cellulose [5][11][15] through the Casting method for its possible use as a biodegradable polymer [8][9][10]. The characterization was carried out by means of the following analyses: Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR), Scanning Electron Microscopy (SEM), in addition to the determination of the thickness, the contact angle [4] and the percentage of degradability of the biofilms obtained [7]. With the results obtained from the tests carried out, it is proven that the components chosen for the preparation of this material have a good synergy and provide favorable results for the desired application as a biodegradable polymer [11][13].

Key words – Biodegradable polymer Microbial cellulose, Kombucha, PVA, Chitosan SCOBY.

INTRODUCCIÓN

La mayoría de los materiales que se encuentran en la naturaleza tienen diferentes propiedades gracias a que son una mezcla de dos o más componentes, por esa razón a lo largo de la historia se ha buscado obtener nuevos materiales [12] compuestos a base de diferentes combinaciones y concentraciones para el nacimiento de una amplia gama de propiedades específicas o combinadas para cada requerimiento. De ahí que el desarrollo y uso de biomateriales es el resultado de una evolución continua a lo largo del tiempo, impulsada por avances en la ciencia, la medicina y la ingeniería [10].

Por este motivo, se elaboró un material compuesto a base de Quitosano, PVA y Celulosa Microbiana obtenida de la Colonia Simbiótica de Baterías y Levaduras (SCOBY)[15], procedente de la bebida kombucha, para su posible uso como alternativa a los materiales utilizados en la actualidad que deben someterse a un proceso de reciclaje como disposición final, su producción es sustentable debido a estar elaborado con una combinación de dos polímeros muy abundantes en el planeta y ayuda a la reducción de residuos desde su elaboración, por ser un material compuesto a base de quitosano, que es un desecho de la industria pesquera, y celulosa microbiana, que es un residuo procedente de la industria alimentaria ya que es un subproducto que se

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

obtiene en el proceso de elaboración de una bebida llamada kombucha[15].

DESARROLLO

Metodología.

Obtención de la celulosa microbiana a partir de la colonia simbiótica de bacterias y levaduras SCOBY

Las biopelículas de celulosa microbiana se retiran de la Kombucha catorce días después del cultivo estático para ser conservadas en un congelador a -18 °C y posteriormente, ser tratadas con una solución de NaOH al 0.5 M a 90 °C durante una hora para purificación de las membranas.
Después se realizó el lavado de las membranas con agua destilada para proceder con el secado de la celulosa microbiana a 105 °C durante seis horas, para finalmente pulverizar el material con ayuda de una licuadora y tamizarlo con número de malla 70, 100 y 200.

Preparación de la solución formadora de los materiales compuestos.

Para la obtención de los materiales compuestos, se disolvió quitosano (Ch) de medio peso molecular en una solución de ácido acético 0.5 M hasta su homogenización a 70 °C durante 2 horas en agitación magnética y después se colocó a 80 °C durante una hora en agitación ultrasónica, posteriormente se preparará una solución acuosa de 5 % de alcohol poli vinílico (PVA) hidrolizado al 99% disolviendo en agitación magnética constante durante 2 horas a 70°C, para posteriormente continuar la agitación en baño ultrasónico a 80 °C durante una hora.
Para la preparación de las muestras de Quitosano y PVA, se colocaron los mililitros correspondientes para obtener las tres diferentes proporciones de 30/70, 50/50 y 70/30 v/v Ch/PVA respectivamente, a cada 10 mL se le agregaron 0.4 mL de glicerol y se continuó con agitación magnética durante 20 minutos.

Se continúa con la adición de los gramos correspondientes de celulosa microbiana usando concentraciones de 0% y 1% a cada una de las tres diferentes proporciones manteniéndose en agitación magnética durante 20 minutos y posteriormente cada solución fue sometida a baño ultrasónico a 50 °C durante 90 minutos para una mayor dispersión de la celulosa.

Pasado el tiempo de agitación, cada mezcla se vació en placas Petri de 100 x 20 mm a una temperatura de 25°C. Se dejará secar y solidificar por método de casting durante tres días, para desprender las biopelículas y almacenarlas en bolsas con cierre hermético para su caracterización.

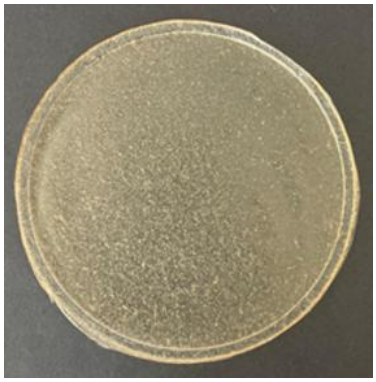


Figura 1. Biopelícula elaborada con PVA, Quitosano y Celulosa Microbiana.

Medición del espesor de los materiales compuestos.

Una vez obtenidos los materiales compuestos, se medió el espesor de cada uno de ellos con ayuda de un Micrómetro Digimatic IP65 MITUTOYO, modelo MDC-1" MJ, con un error permisible de ± 0.00005" y se registraron 5 mediciones aleatorias para cada biopelícula, verificando que el espesor promedio no superara 1mm, como lo marca la Norma ASTM D 882-02. Así se realizó con cuatro diferentes biopelículas para obtener el promedio del espesor.

Tabla 1. Espesor promedio de las cuatro réplicas de biopelículas.

Biopelícula	Promedio 1	Promedio 2	Promedio 3	Promedio 4	Espesor (mm)
PVA	0.090	0.078	0.082	0.080	0.0825
PVA/Glicerol	0.100	0.136	0.096	0.090	0.1055
Quitosano	0.040	0.046	0.040	0.044	0.0425
Quitosano/Glicerol	0.096	0.088	0.092	0.094	0.0925
30Q/70P/SIN	0.094	0.084	0.098	0.096	0.0930
50Q/50P/SIN	0.084	0.094	0.078	0.106	0.0905
70Q/30P/SIN	0.092	0.088	0.082	0.092	0.0885
30Q/70P/#70	0.230	0.220	0.242	0.268	0.2400
50Q/50P/#70	0.222	0.240	0.220	0.236	0.2295
70Q/30P/#70	0.252	0.192	0.250	0.230	0.2310
30Q/70P/#100	0.206	0.212	0.200	0.176	0.1985
50Q/50P/#100	0.186	0.236	0.168	0.166	0.1890
70Q/30P/#100	0.182	0.184	0.168	0.166	0.1750
30Q/70P/#200	0.136	0.170	0.140	0.142	0.1470
50Q/50P/#200	0.122	0.160	0.126	0.134	0.1355
70Q/30P/#200	0.124	0.158	0.142	0.136	0.1400

Espectroscopia de infrarrojo con transformada de Fourier (FTIR).

Las pruebas de FTIR a la celulosa microbiana y a los materiales compuestos obtenidos, se realizaron en un espectrofotómetro de FTIR-ATR marca PerkinElmer Spectrum Two con software Spectrum®, las muestras se analizaron en el modo de transmitancia con un intervalo de 650 a 4000 cm^{-1}, con una resolución de 4 cm^{-1} y 16 barridos.

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

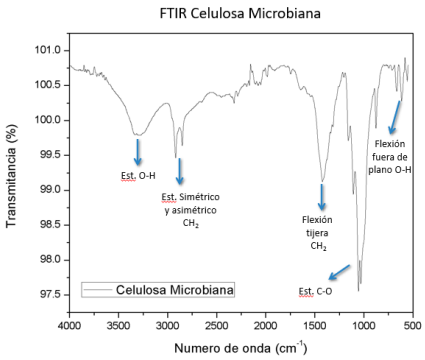


Figura 2. Espectro de FTIR de Celulosa Microbiana

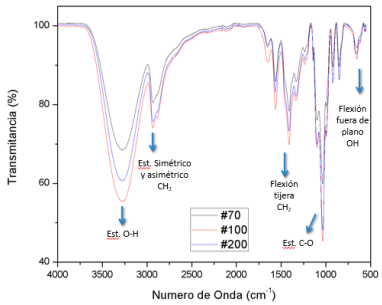


Figura 3. Espectro de FTIR de Biopelículas 30 Quitosano / 70 PVA a diferentes numeros de malla.

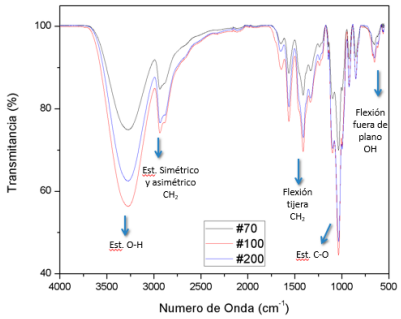


Figura 4. Espectro de FTIR de Biopelículas 50 Quitosano / 50 PVA a diferentes números de malla.

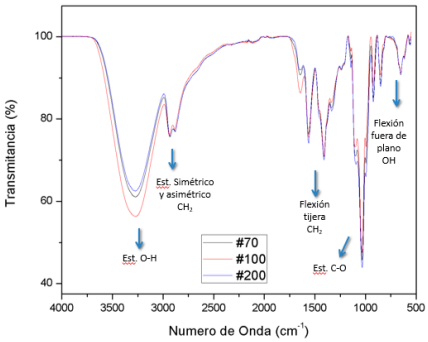


Figura 5. Espectro de FTIR de Biopelículas 70 Quitosano / 30 PVA a diferentes números de malla.

Microscopía electrónica de barrido (SEM).

Las Microscopías Electrónicas de Barrido de los MC, se realizó en un Microscopio Electrónico de Barrido marca JEOL Modelo JSM-6010A, utilizando 3 Kv y magnificaciones de 50X, 100X, 500X y 1000X.

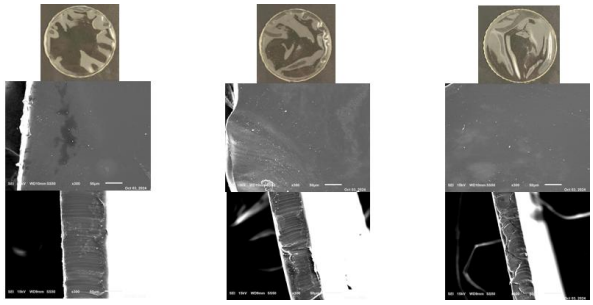


Figura 6. Micrografías 300X de Biopelículas de Quitosano y PVA Sin Celulosa.

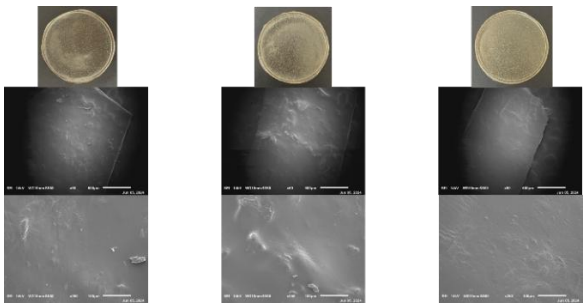


Figura 7. Micrografías 50X y 250X de Biopelículas de Quitosano y PVA con malla #70

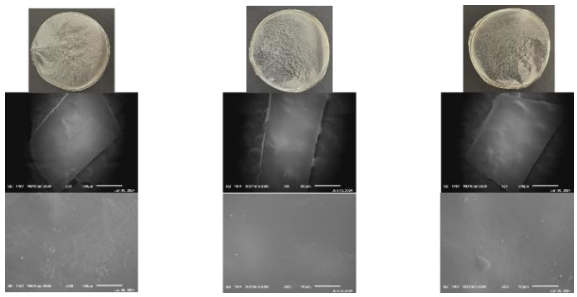


Figura 8. Micrografías 50X y 250X de Biopelículas de Quitosano y PVA con malla #100

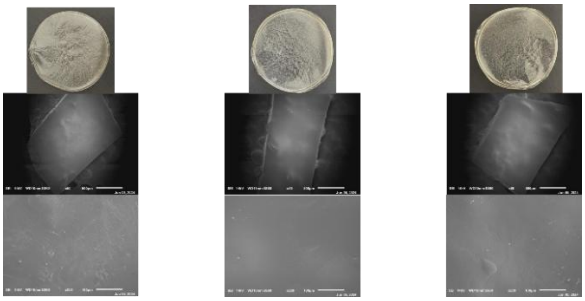


Figura 9. Micrografías 50X y 250X de Biopelículas de Quitosano y PVA con malla #200

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

Prueba de degradabilidad

Siguiendo la metodología de (DALEV. & al, 2000) con algunas modificaciones. Para el proceso de degradación se usó tierra negra (1,200 gramos por recipiente aproximadamente) de uso comercial, en seguida se vertió en un contenedor de plástico (medidas del recipiente 5 x 17.7 x 12.5 cm) hasta un espesor de aproximadamente 4 cm. Las muestras (3 x 3 cm) fueron pesadas y luego enterradas por triplicado en el suelo a una profundidad de 1 cm. Se roció agua de grifo cada segundo día, así durante periodos de 15, 30, 45 y 60 días, se retiraron cuidadosamente las muestras al cumplir el tiempo de cada tratamiento, se lavaron con agua destilada y se secaron a 35 °C en un horno de convección durante 24 horas y luego se pesaron para determinar el porcentaje de peso perdido mediante la siguiente fórmula.

$$Porcentaje\ de\ degradación = \left(\frac{\text{Peso inicial} - \text{Peso final}}{\text{Peso inicial}}\right) \text{ x } 100 \quad \text{Ec. (1)}$$

Una vez obtenidos los pesos de las películas, habiendo pasado el tiempo de prueba, se realizaron las siguientes gráficas.

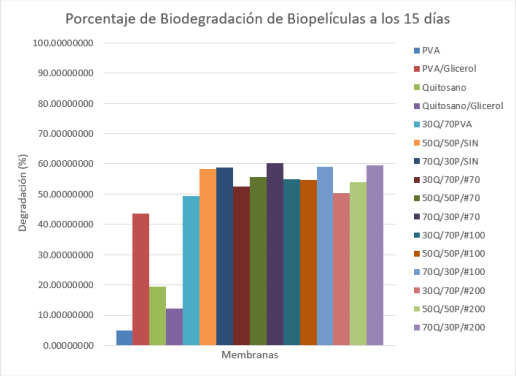


Figura 10. Porcentaje de Biodegradación de Biopelículas a los 15 días.

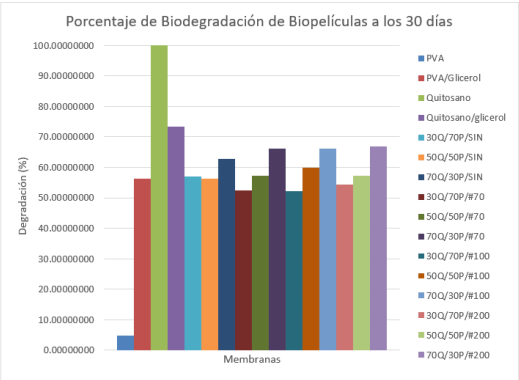


Figura 11. Porcentaje de biodegradación de Biopelículas a los 30 días.

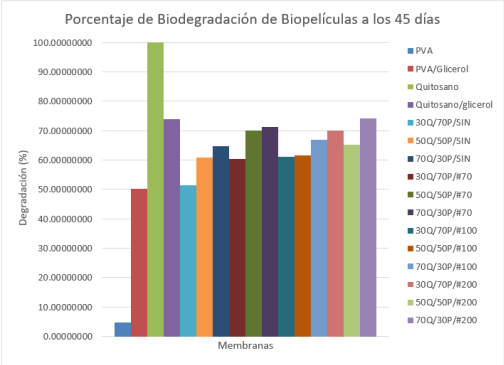


Figura 12. Porcentaje de biodegradación de Biopelículas a los 45 días.

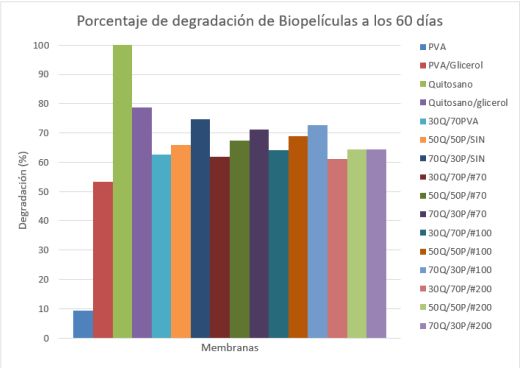


Figura 13. Porcentaje de degradación de Biopelículas a los 60 días.

Prueba de ángulo de contacto

El ángulo de contacto mide el ángulo que forma un líquido al entrar en contacto con un sólido [9]. Cuando las fuerzas de adherencia son muy altas el ángulo es menor de 90º ya que el líquido se ve 'atraído' por el sólido y se extiende, en este caso se denomina superficie hidrofílica. En el caso de que las fuerzas de atracción sean muy bajas, la superficie tenderá a 'repeler' el líquido y el ángulo será mayor de 90º, en este caso se le llama superficie hidrofóbica.

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

Figura 14. Prueba de ángulo de contacto a biopelículas de PVA y Quitosano a las diferentes concentraciones sin celulosa.

Todas las biopelículas de las diferentes concentraciones evaluadas de Quitosano y PVA sin celulosa microbiana presentan un grado de hidrofilicidad.

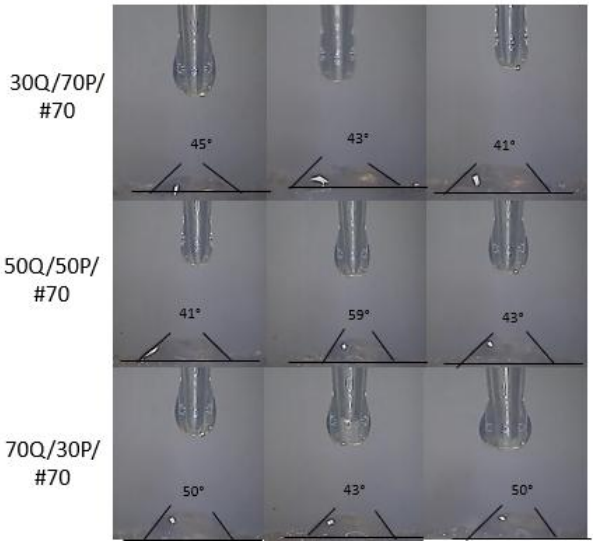


Figura 15. Prueba de ángulo de contacto a biopelículas de PVA y Quitosano a las diferentes concentraciones con malla #70.

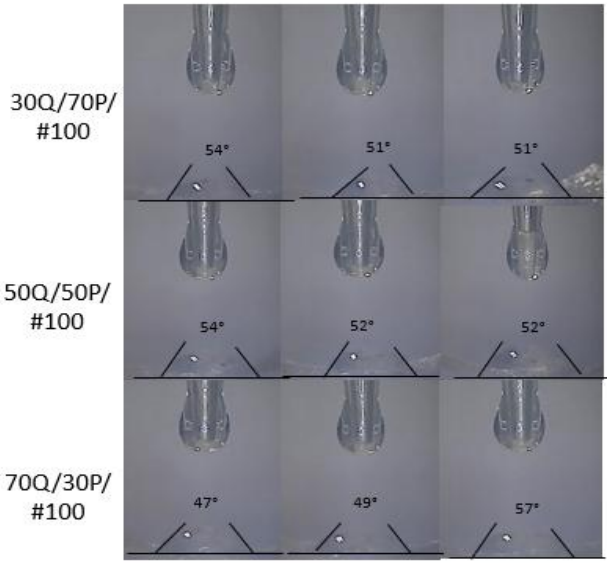


Figura 16. Prueba de ángulo de contacto a biopelículas de PVA y Quitosano a las diferentes concentraciones con malla #100.

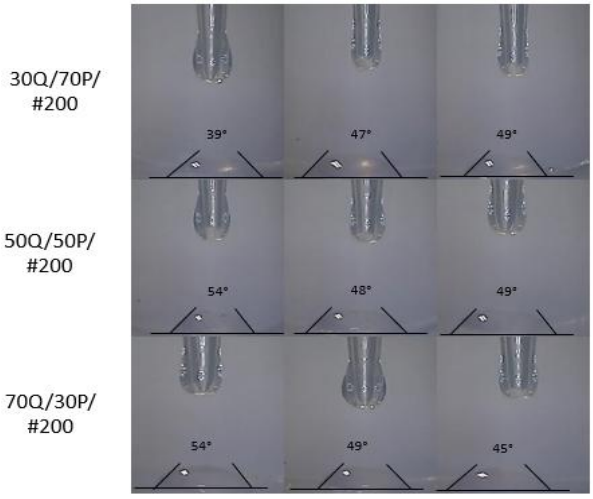


Figura 17. Prueba de ángulo de contacto a biopelículas de PVA y Quitosano a las diferentes concentraciones con malla #200.

Las biopelículas de las diferentes concentraciones evaluadas de Quitosano y PVA con celulosa microbiana número de malla 70, 100 y 200 también presentan un grado de hidrofilicidad, ya que los ángulos obtenidos son menores a 90°.

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

Tabla 6. Promedio de ángulos de contacto.

	1	2	3	Promedio
PVA	11	16	20	15.6666667
PVA/Glicerol	25	20	20	21.6666667
Quitosano	65	63	68	65.3333333
Quitosano/glicerol	74	69	58	67
30Q/70P/SIN	55	73	60	62.6666667
50Q/50P/SIN	55	77	67	66.3333333
70Q/30P/SIN	58	80	71	69.6666667
30Q/70P/#70	45	43	41	43
50Q/50P/#70	41	59	43	47.6666667
70Q/30P/#70	50	43	50	47.6666667
30Q/70P/#100	54	51	51	52
50Q/50P/#100	54	52	52	52.6666667
70Q/30P/#100	47	49	57	51
30Q/70P/#200	39	47	49	45
50Q/50P/#200	54	48	49	50.3333333
70Q/30P/#200	54	49	45	49.3333333

En la tabla 6 se muestran los resultados de los promedios de los ángulos de contacto obtenidos por triplicado.

DISCUSIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

En la tabla 1 se observa la estandarización del espesor de las películas obteniendo promedios que no rebasan 1 mm de acuerdo con lo que marca la norma ASTM D 882-02 que habla sobre las condiciones de películas plásticas y láminas delgadas para su análisis.

En las figuras 2, 3, 4 y 5 pueden observar en los espectros de FTIR de las materias primas las señales de los grupos funcionales característicos, en la región de 3300-3500 se observa banda ancha debido a los grupos hidroxilo (-OH) de los enlaces por puentes de hidrógeno y amino (NH), en la región de 2900 los estiramientos de los enlaces C-H de los anillos glucosídicos de la celulosa y quitosano, en 1050 la vibración de estiramiento del enlace C-O en los enlaces éter de la celulosa y grupos hidroxilo de los tres compuestos.

Se pueden observar en los espectros de FTIR de los materiales compuestos las señales de los grupos funcionales característicos de las materias primas, lo que quiere decir que no se está llevando a cabo una interacción química si no una interacción física.
En las figuras 6, 7, 8 y 9 se muestran los aspectos morfológicos de las biopelículas con y sin la incorporación de la celulosa con diferentes tamaños de malla. Se puede observar que la celulosa quedó completamente incorporada dentro de la matriz polimérica, ya que los aspectos morfológicos son similares a los observados en las biopelículas en ausencia de la celulosa.

Para las pruebas de biodegradabilidad, en las figuras 10, 11, 12 y 13 se pueden observar las gráficas de barras de la tendencia que tienen las biopelículas a degradarse más fácil cuando se tiene una mayor cantidad de Quitosano que PVA en la composición (70/30), además de que si aumenta la degradabilidad conforme aumenta el tiempo, también se nota la degradación total de las biopelículas de quitosano a partir del periodo de 30 días teniendo un resultado similar a Ávila en el 2014 siendo un 85% de biodegradación en suelo a biopelículas de Quitosano puro y teniendo una disminución de biodegradación de 45% al momento de realizar una mezcla con otro Biopolímero en este caso con el Poli(Hema).

Las biopelículas que tuvieron menor porcentaje de biodegradación fueron las de PVA con solo 2.74%, las de PVA con glicerol tuvieron un mayor porcentaje de degradación a los 15 días con 43.64%, pero en los demás periodos se mantuvieron cerca del mismo porcentaje, las biopelículas de quitosano con glicerol tuvieron una biodegradación de 12.27% en los primeros 15 días, pero a partir de los 30 días mostraron un aumento considerable de 73.38% y las de puro quitosano se degradaron completamente a partir de los 30 días. Las biopelículas sin celulosa con 70% de quitosano mostraron mayor porcentaje de biodegradación que el resto de las combinaciones terminando con un 74.71% a los 60 días. Se obtuvo el mismo comportamiento de las biopelículas con 70% de Quitosano siendo estas las que obtuvieron mayor porcentaje de biodegradación terminando en 71.24 a los 60 días.

En la Figura 14 se observa que todas las membranas presentan un ángulo menor a 90 grados, indicando que todas tienen un grado de hidrofilicidad, pero resaltando más afinidad al agua por parte de las biopelículas de PVA. Las biopelículas de las diferentes concentraciones evaluadas de Quitosano y PVA con celulosa microbiana número de malla 70, 100 y 200 también presentan un grado de hidrofilicidad. El PVA presenta mayor afinidad al agua que el Quitosano, incluso mezclado con glicerol. Todas las demás biopelículas con las diferentes proporciones de Quitosano y PVA también son hidrofílicas pero las que muestran menor afinidad al agua son las que no contienen celulosa microbiana, específicamente la que tiene mayor cantidad de quitosano teniendo un resultado similar a lo reportado por Bolaina en 2016 la cual tuvo ángulos de contacto promedio de 39° en películas electrohiladas de quitosano mostrando que el quitosano tiene una propiedad hidrofílica. Y las que presentan mayor afinidad al agua son las que contienen celulosa número de malla 70, para ser más específicos, la que tiene mayor cantidad de PVA.

CONCLUSIONES

En conclusión, los resultados obtenidos en este estudio son relevantes para el desarrollo de membranas destinadas a apósitos médicos. La confirmación de que la interacción entre los componentes es física y no química indica que la estructura y propiedades individuales de los materiales se mantienen, lo que es crucial para asegurar la biocompatibilidad. Además, la incorporación

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

homogénea de la celulosa en la matriz polimérica nos sugiere que puede mejorar la resistencia mecánica y la estabilidad de la membrana.

En términos de biodegradabilidad, las biopelículas con mayor proporción de quitosano demostraron una degradación más rápida y eficiente, lo cual es beneficio para apósitos médicos reabsorbibles o biodegradables, reduciendo la necesidad de remoción y minimizando el impacto ambiental. Asimismo, la hidrofilicidad observada en todas las biopelículas es una característica esencial para los apósitos, ya que facilita la absorción de exudados y favorece un ambiente húmedo, ideal para la cicatrización de heridas. En particular, las membranas con mayor cantidad de PVA y celulosa de malla 70 podrían ofrecer un equilibrio óptimo entre absorción y estabilidad, proporcionando una opción viable para aplicaciones médicas en el tratamiento de heridas y regeneración.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo financiero otorgado por parte de la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) CVU 1298638, Así como al Tecnológico Nacional de México/ Instituto Tecnológico de Zacatepec y a la División de Estudios de Posgrado e Investigación de dicho Instituto por el apoyo brindado para la realización de este trabajo.

BIBLIOGRAFÍA

[1] Arbeláez Mejía Juan Pablo, Sánchez Gallego Aura María. (2023). Producción de celulosa microbiana a partir de kombucha para uso potencial en la fabricación de apósitos con liberación de extractos fitoquímicos de café para la cicatrización de heridas. Universidad Autónoma de Occidente. Santiago de Cali, Colombia

[2] A.J. Avila (2014). Biodegradación En Suelo De Películas De Quitosano Injertadas Con Poli(Hema). Facultad de ingeniería, Universidad Nacional de la Patagonia San Juan Bosco (U.N.P.S.J.B), 9000 Comodoro Rivadavia, Argentina.

[3] Billmeyer, Jr. Fred W. (1975). Ciencia de los polímeros. Bercelona, España. Editorial Reverté.

[4] Cañas Mendoza Luz Adriana. (2007). Procedimiento para medir ángulos de contacto en sólidos particulados finos. Universidad Tecnológica de Pereira, Colombia.

[5] Carreño Luz (2012). Técnicas de fermentación y aplicaciones de la celulosa bacteriana: una revisión. Grupo de Investigación en Procesos Químicos y Bioquímicos,Departamento de Ingeniería Química y Ambiental, Universidad Nacional de Colombia.

[6] Conejo-Mir Julián, Moreno José Carlos, Camacho Francisco M. (2018). Manual de Dermatología, 2.ª edición. pp. 2-27. ISBN Volumen I: 978-84-7885-628-2. ISBN Obra completa: 978-84-7885-627-5. ISBN Volumen II: 978-84-7885-629-9. Editorial Aula Médica. [7] DALEV. & al. (2000). Biodegradation of Chemically Modified Gelatin Films in Soil. Department of Biology, University of Sofia, 1421 Sofia, Bulgaria.

[8] Dekerle, L., Depoortere C., Martinot-Duquennoy V., (2022). Prescripción de apósitos. EMC - Cirugía Plástica Reparadora y Estética. Volumen 30, Tema 1. Pages 1-13. ISSN 1634-2143. https://doi.org/10.1016/S1634-2143(22)46484-3

[9] Ena Bolaina-Lorenzo (2016). Andamios electrohilados de policaprolactona/quitosano para ingeniería de tejidos nerviosos: caracterización fisicoquímica y biocompatibilidad de células de Schwann. *Biomed. Madre.* 12 015008. DOI 10.1088/1748-605X/12/1/015008.

[10] Fernández Salomón Irene. (2021). Clasificación y funciones de los diferentes apósitos existentes para el cuidado de las úlceras por presión. NPunto Vol. IV Número 38. Mayo 2021: 70-92.

[11] González Arranz Salvador. (2021). Diseño de un nuevo material sostenible a partir de celulosa bacteriana de residuos orgánicos de producción local en un marco de economía circular. Universidad Politécnica De Madrid. España.

[12] González-Viñas, W., & Mancini, H. L. (2003). Ciencia de los materiales (p. 240). Editorial Ariel

[13] Hernández Rodríguez Juan Pablo. (2022). Producción y caracterización de películas bioactivas de celulosa microbiana en un sustrato de moringa (moringa oleífera) y recubrimientas de mucílago de linaza (linum usitatissimum). Facultad De Agronomía, Universidad Autónoma De Nuevo León. México.

[14] Montes Ramírez Ashanti. (2023). Diseño de apósitos a base de quitosano/gelatina para el tratamiento de quemaduras. Facultad de Ciencias Químicas, Universidad Autónoma de San Luis Potosí. México.

[15] Ramírez Tapias Yuly Andrea. (2020). Celulosa bacteriana de kombucha: producción, caracterización y obtención de películas naturales y procesadas. IV Workshop de Polímeros Biodegradables y Biocompuestos -BIOPOLI. Mar del Plata, Argentina. [16] W Sutherland. (1997). Biopolímeros microbianos a partir de productos agrícolas: producción y potencial., 39(1), 84–85. doi:10.1016/s0964-8305(97)88743-4

AUTORIZACIÓN Y RENUNCIA.

Los autores del presente artículo autorizan al TecNM/Instituto Tecnológico de Zacatepec para publicar el escrito en el libro electrónico del CITID 2025. El TecNM/ITZ o los editores no son responsables ni por el contenido ni por las implicaciones de lo que está expresado en el escrito.

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

CITID 2025 ISSN: 2992-8516

VIRTUALIZACIÓN DE SISTEMAS LINEALES E INVARIANTES EN EL TIEMPO PARA LA CO-SIMULACION DE SISTEMAS DE CONTROL ACADÉMICOS

Alejandro Carlos Pérez Flores [1], Jesús Darío Mina Antonio [2]

[1] Doctor en Ciencias de Ingeniería Electrónica. Universidad Veracruzana, Facultad de Instrumentación Electrónica, Ingeniería en Instrumentación Electrónica. alejandperez@uv.mx, 228-842-1746, Cto. Aguirre Beltrán S/N, Zona Universitaria, 91090 Xalapa-Enríquez, Ver., México.
[2] Doctor en Ciencias de Ingeniería Electrónica. Tecnológico Nacional de México/ Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico. Departamento de Ingeniería Electrónica. jesus.ma@cenidet.tecnm.mx, 777-362-7770, Interior Internado Palmira S/N, Col. Palmira, C.P. 62490, Cuernavaca, Morelos, México.

Resumen -- Los tópicos de Control Retroalimentado de Sistemas Lineales, tanto en tiempo continuo como en tiempo discreto, forman parte fundamental de los planes de estudio de licenciatura en ingeniería. Típicamente, los programas de las experiencias educativas de estos planes estudian plantas o procesos de características básicas para inducir a cada generación estudiante a las técnicas, métodos y procedimientos aplicables en la teoría y la práctica de sistemas de control. En la actualidad existen varias herramientas de simulación por computadora, de gran difusión y aplicación institucional, que proporcionan un entendimiento de los conceptos planteados en los programas. Además, varias instituciones han realizado esfuerzos por la puesta en marcha de plantas y procesos piloto en sus unidades de laboratorio para proporcionar un entorno físico, real y seguro para que cada generación estudiante pueda aplicar realistamente lo aprendido. En este contexto, existe una oportunidad para desarrollar herramientas de impacto académico en la enseñanza de tópicos de control retroalimentado complementarias a la simulación por computadora y a la operación sobre una planta física.

Este artículo propone una metodología para implementar la virtualización de una planta o proceso lineal, invariante en el tiempo y parametrizable, dentro de un dispositivo basado en un microcontrolador programable de propósito general. Conceptualmente, se busca proporcionar una planta o proceso con la cual se pueda interactuar en tiempo real en entornos de co-simulación por computadora. Frente a otras metodologías de co-simulación, basadas en equipo especializado para la virtualización de sistemas complejos, el enfoque propuesto proporciona ventaja en entornos académicos debido a que refiere al empleo de dispositivos de propósito general virtualizando sistemas lineales básicos. El artículo propone lineamientos para la virtualización y desarrolla un modelo de parámetros agrupado como ejemplo de aplicación. Las pruebas realizadas al modelo virtualizado muestran la factibilidad y el potencial académico de la propuesta.

Palabras Clave: co-simulación, sistema de control, virtualización.

Abstract -- The topics of Feedback Control of Linear Systems, both in continuous time and in discrete time, are a fundamental part of the engineering degree curricula. Typically, the educational experience programs of these plans study plants or processes with basic characteristics to introduce each student generation to the techniques, methods and procedures applicable in the theory and practice of control systems. Currently, there are several widely used computer simulation tools for institutional use that provide an understanding of the concepts presented in the programs. In addition, several institutions have made efforts to implement pilot plants and processes in their laboratory units to provide a physical, real and safe environment for each student generation to realistically apply what they have learned. In this context, there is an opportunity to develop tools of academic impact in the teaching of feedback control topics complementary to computer simulation and operation on a physical plant.

This paper proposes a methodology to implement the virtualization of a linear, time-invariant and parameterizable plant or process within a device based on a general-purpose programmable microcontroller. Conceptually, the aim is to provide a plant or process with which one can interact in real time in computer co-simulation environments. Compared to other co-simulation methodologies, based on specialized equipment for the virtualization of complex systems, the proposed approach provides an advantage in academic environments because it refers to the use of general-purpose devices virtualizing basic linear systems. The article proposes guidelines for virtualization and develops a lumped parameter model as an example of application. Tests performed on the virtualized model show the feasibility and academic potential of the proposal.

Key words – control system, co-simulation, virtualization.

INTRODUCCIÓN

Cada año, miles de estudiantes de distintas carreras de ingeniería estudian, como parte de sus planes y programas de estudio, experiencias educativas de Ingeniería de Control Clásico. En ellas, la carga teórica por lo normal es intensiva y académicamente se busca apoyar al

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

estudiantado con estrategias educativas que le provean de una visión práctica y aplicativa de los conceptos tratados. Así, el desarrollo de prácticas de laboratorio sobre plantas o procesos simples forma también parte del currículo estudiantil [1]. Sin embargo, en ocasiones el número de prácticas sobre esas plantas pueden volverse limitado y repetitivo, lo que puede reducir el impacto de la actividad de laboratorio.

Por otro lado, la aplicación de herramientas de modelado y simulación por computadora han permitido que los modelos de los sistemas estudiados se parametricen y se modifiquen con facilidad, logrando ampliar el entendimiento de los conceptos del control clásico a partir de pruebas que, de otra forma, no podrían practicarse de manera seguro en entornos reales de laboratorio [2]. Sin embargo, ante la amplia difusión de estas herramientas tecnológicas, las simulaciones han llegado a ser poco desafiantes pues el estudiantado no identifica modelos ni relaciona los cambios en los parámetros con cambios en el comportamiento de los sistemas.

Ante este contexto, desde hace varios años los avances tecnológicos han ofrecido la oportunidad de virtualización de sistemas. En este enfoque, una planta o proceso puede modelarse e implementarse programáticamente para ofrecer una “caja negra” que tiene el comportamiento de la planta o proceso. Para propósitos académicos, este enfoque ofrece una alternativa que permite al estudiantado contar con un sistema real que pueda ser analizado y diseñado con sus herramientas conocidas de simulación [3-5]. Asimismo, el cuerpo docente puede, como lo haría con una planta de laboratorio recién instalada, recurrir a actividades de caracterización e identificación de sistemas en un entorno real y seguro para sus prácticas.

Aunque existen una variedad de plataformas orientadas a la virtualización de sistemas, varias de esas plataformas consisten en equipo altamente especializado, diseñado y construido para modelar sistemas complejos [6]. Varios de estos modelos tienen una complejidad más allá de lo aplicado en las experiencias educativas de nivel licenciatura.

El presente artículo aprovecha el nicho que el enfoque de virtualización de sistemas tiene para soportar el estudio de la Ingeniería de Control a nivel licenciatura. Se propone una metodología para implementar la virtualización de una planta o proceso parametrizable, causal, lineal e invariante en el tiempo en un dispositivo microcontrolador programable de propósito general. El aporte de esta propuesta reside en el potencial de ofrecer conocimiento práctico al estudiantado mientras ofrece flexibilidad en los casos de sistemas de control al cuerpo docente que imparte estas experiencias educativas [7-9].

En este sentido, la Tabla 1 resume las características del enfoque propuesto respecto a las opciones comentadas.

Tabla 1. Enfoques de análisis y diseño y sus características.

Enfoque de análisis y diseño	Características
Laboratorio	- Enfoque de manos a la obra. - Permite caracterización e identificación. - Poco versátil, en ocasiones costoso.
Simulación	- Enfoque de modelado matemático o comportamiento. - Muy versátil. - Usualmente se conocen parámetros de sistemas y solo se reproduce el comportamiento.
Virtualización especializada	- Orientado al modelado matemático o de comportamiento altamente especializado. - Muy versátil. - Simulación en tiempo real. - Se dificulta su justificación económica.
Virtualización de propósito general	- Enfoque de modelado matemático o comportamiento y enfoque de manos a la obra. - Versátil en entornos académicos. - Simulación en tiempo real de procesos simples. - Cuenta con una curva de aprendizaje y depende de otras herramientas para co-simulación.

El presente reporte cuenta con la siguiente estructura: en la primera sección se describe la discretización de sistemas lineales e invariantes en el tiempo, las consideraciones acerca de los periféricos de conversión analógico-digital y digital-analógico, el flujo de programa propuesto para la virtualización del sistema discretizado y se presenta un caso de estudio para ejemplificar la metodología. La segunda sección presenta una breve discusión de los resultados y las conclusiones del trabajo.

DESARROLLO

Metodología.

Modelado

La virtualización de un sistema Lineal e Invariable en el Tiempo (LIT) aplica la técnica de discretización comúnmente empleada en la implementación de filtros digitales [10,11]. Se busca inicialmente contar con una representación de función de transferencia en tiempo discreto de la planta o proceso a modelar (Fig. 1).

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

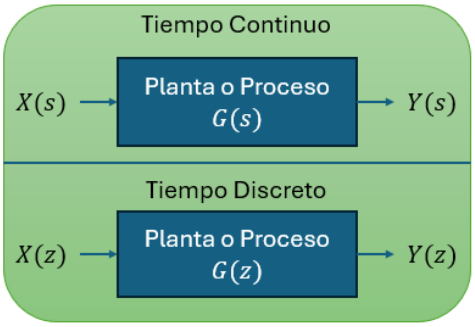


Figura 1. Generalización de una planta o proceso.

Considerando un sistema lineal, $G(s)$, expresado como una función de transferencia en el dominio de la frecuencia s:

$$G(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{\prod_{i=0}^{\infty}(b_{2i}s + b_{2i+1})}{\prod_{i=0}^{\infty}(a_{2i}s + a_{2i+1})}, \qquad (1)$$

se aplica uno de los métodos de transformación (método de Euler, transformación bilineal, invariancia al impulso, entre otros) [11] para discretizar $G(s)$ y obtener una función de transferencia discreta, $G(z)$:

$$G(z) = \frac{Y(z)}{X(z)} = \frac{\prod_{i=0}^{\infty}(d_{2i} + d_{2i+1}z^{-1})}{\prod_{i=0}^{\infty}(c_{2i} + c_{2i+1}z^{-1})}. \qquad (2)$$

Esta función de transferencia discreta lleva a cabo el mismo rol en el análisis y diseño de sistemas de tiempo discreto que (1) lo hace para sistemas de tiempo continuo. Para los propósitos de este artículo, es relevante que (2) define la ecuación en diferencias computacionales empleada para implementar un sistema LTI:

$$y[n] = \sum_{i=1}^{N_1} R_i x[n-i] - \sum_{i=0}^{N_2} S_i y[n-i]. \qquad (3)$$

En (3) se establece que la salida del sistema en tiempo discreto, $y[n]$, es una función de la suma recursiva de los valores ponderados, R_i y S_i de los tiempos presentes y pasados de la entrada, $x[n]$, como de la propia salida. Esta ecuación en diferencias permite la implementación de un sistema, siempre que este sistema sea capaz de realizar las sumas y ponderaciones.

Conversión Analógico – Digital

Como se ha descrito anteriormente, en este trabajo se propone la implementación de un sistema LIT en un microcontrolador programable de bajo costo. Así que, en el fondo, lo que se hará es implementar la ecuación en diferencias (3) en un microcontrolador. Inicialmente, entre las características para la selección del microcontrolador [12,13], se propone considerar las siguientes características: 1) contar con al menos un canal de conversión analógico a digital (ADC), 2) contar con al menos un canal de conversión digital a analógico (DAC). La Tabla 2 proporciona información relevante para los canales de conversión:

Tabla 2. Parámetros de Conversión Analógico-Digital.

Parámetro	Resolución ($2^{n\,bit}$)	Voltaje Mínimo (V)	Voltaje Máximo (V)
ADC	ADCRES	ADCVMIN	ADCVMAX
DAC	DACRES	DACVMIN	DACVMAX

Es necesario considerar un rango de valores de entrada, $[XMIN, XMAX]$, que se asocie con el rango de voltajes mínimo y máximo del ADC de la Tabla 1, así como considerar un rango de valores de salida, $[YMIN, YMAX]$, que se asocie con el rango de valores del DAC. Para un instante de tiempo dado, tanto $x[n], y[n]$ deben permanecer dentro de sus respectivos rangos (ver Fig. 2).

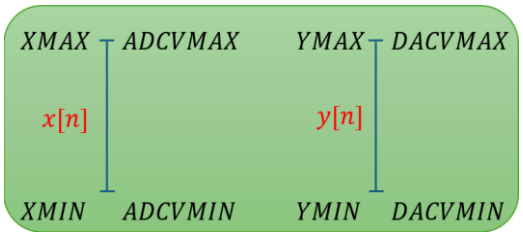


Figura 2. Generalización de una planta o proceso.

Sea ADCREG el registro de almacenamiento digital del ADC, la relación entre este registro y el valor de entrada al sistema está dado por la expresión:

$$x[n] = (ADCREG - X_{of})X_{rn} + XMIN, \qquad (4)$$

donde

$$X_{of} = DACVMIN \times ADC_k, \qquad (5)$$

$$X_{rn} = \frac{XRANGE}{ADC_k \times DACVRANGE}, \qquad (6)$$

$$XRANGE = XMAX - XMIN, \qquad (7)$$

$$DACVRANGE = DACVMAX - DACVMIN, \qquad (8)$$

$$ADC_k = \frac{ADCRES}{ADCVMAX - ADCVMIN}. \qquad (9)$$

Por otro lado, sea DACREG el registro de almacenamiento digital del DAC, la relación entre este registro y el valor de entrada al sistema está dado por la expresión:

$$DACREG = \frac{(y[n] + YMIN)}{YRANGE}(DACRES - 1), \qquad (10)$$

donde

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

$$YRANGE = YMAX - YMIN. \quad (11)$$

Las ecuaciones (4) a (11) proporcionan un cálculo de los valores de entrada y salida para la virtualización del sistema LIT en un microcontrolador de propósito general. Estas complementan a (3) en la especificación del sistema virtualizado y deben ser incluidas en el proceso de co-simulación por computadora.

Flujo de Programa

Habiendo descrito las expresiones para la implementación del sistema LIT virtualizado, corresponde en este apartado expresar el flujo básico del programa para el microcontrolador de propósito general. En ese sentido, se propone una estructura de dos etapas: inicialización y procesamiento. Para la inicialización del sistema se propone el seudo programa siguiente:

1. Definir los valores de los parámetros del sistema.
2. Definir los valores de los parámetros útiles en la discretización (periodo de muestreo y otros).
3. Definir y calcular las constantes de ponderación R_i y S_i.
4. Configurar los ADC y DAC periféricos del microcontrolador.
5. Configurar la base de tiempo periódica para la implementación.

Los pasos incluidos en el listado anterior deben emplear las expresiones e información descritas en los apartados anteriores, al igual que los pasos del seudo programa a continuación, que se propone para implementar la etapa de procesamiento.

1. Leer entrada analógica, $ADCREG$.
2. Interpretar el valor $x[n]$.
3. Calcular el valor $y[n]$ correspondiente.
4. Escribir la(s) salida(s) para el DAC.

Caso de Estudio

Para ilustrar la aplicación de la metodología descrita se realizará la virtualización y co-simulación del sistema LIT de la Fig. 5. El sistema representa un modelo de primer orden de parámetros agrupados, $Y_1(s)$, sensado por un sensor modelado simultáneamente como un segundo sistema de primer orden,$Y_2(s)$.

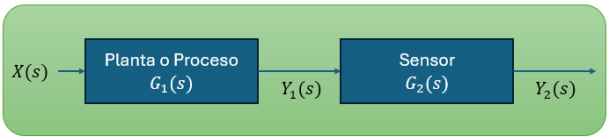


Figura 5. Sistema LIT para el caso de estudio.

Así, en este caso de estudio se están modelando en realidad dos sistemas LIT. Las funciones de transferencia para estos sistemas están dadas, respectivamente, por:

$$P(s) = \frac{Y_1(s)}{X(s)} = \frac{1}{\tau_1 s + 1} \quad (12)$$

$$S(s) = \frac{Y_2(s)}{X(s)} = \frac{1}{(\tau_1 s + 1)(\tau_2 s + 1)} \quad (13)$$

A las funciones de transferencia (12) y (13) se les aplica la transformación bilineal, la cual requiere la sustitución:

$$s \leftarrow K_T \left(\frac{1 - z^{-1}}{1 + z^{-1}} \right) \quad (14)$$

donde K_T es una función del periodo de muestreo para la transformación bilineal, típicamente el inverso de la mitad del periodo de muestreo, T_s. Así, las respectivas funciones discretizadas para los modelos del caso de estudio están dadas por:

$$P(z) = \frac{C_1[C_a + C_a z^{-1}]}{1 + C_1 C_2 z^{-1}} \quad (15)$$

y

$$S(z) = \frac{C_3[\, C_b + 2C_b z^{-1} + C_b z^{-2}]}{1 + C_3 C_4 z^{-1} + C_3 C_5 z^{-2}} \quad (16)$$

donde

$$C_a = \frac{1}{\tau_1}, \qquad C_b = \frac{1}{\tau_1 \tau_2}, \quad (17)$$

$$C_1 = \frac{1}{K_T + C_a}, \quad (18)$$

$$C_2 = C_a - K_T, \quad (19)$$

$$C_3 = \frac{1}{K_T^2 + K_T \left(\frac{1}{\tau_1} + \frac{1}{\tau_2} \right) + C_b}, \quad (20)$$

$$C_4 = 2C_b - 2K_T^2, \quad (21)$$

$$C_5 = K_T^2 - K_T \left(\frac{1}{\tau_1} + \frac{1}{\tau_2} \right) + C_b, \quad (22)$$

De (15) y (16) se derivan las funciones en el dominio de tiempo discreto para las salidas del sistema, respectivamente, estas salidas están dadas por:

$$y_1[n] = R_0 x[n] + R_1 x[n-1] - S_0 y_1[n-1] \quad (23)$$

$$y_2[n] = T_0 x[n] + T_1 x[n-1] + T_2 x[n-2] - U_0 y_2[n-1] - U_1 y_2[n-2], \quad (24)$$

donde

$$R_0 = R_1 = C_a C_1, S_0 = C_1 C_2 \quad (25)$$

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

y

$$T_0 = T_2 = C_b C_3, T_1 = 2C_b C_3,$$

$$U_0 = C_3 C_4, U_1 = C_3 C_5 \qquad (26)$$

Para implementar (23) y (24), se emplearon dos tarjetas de desarrollo de Arduino Due. Estas tarjetas están basadas en un microcontrolador de propósito general de 32 bit operando a 84 MHz. El microcontrolador ofrece doce canales de ADC de 12 bit y dos canales de DAC de 12 bit. La Tabla 3 resume la información acerca de los periféricos de conversión analógico a digital.

Tabla 3. Parámetros de Conversión Arduino Due.

Parámetro	Resolución ($2^{n\ bit}$)	Voltaje Mínimo (V)	Voltaje Máximo (V)
ADC	4096	0	3.3
DAC	4096	0.55	2.75

Ambas tarjetas forman el conjunto de hardware utilizado para ejecutar una co-simulación por computadora en la arquitectura mostrada en la Fig. 6. Como se observa en la Figura, se incluye un mecanismo de reset o reinicialización para el sistema virtualizado.

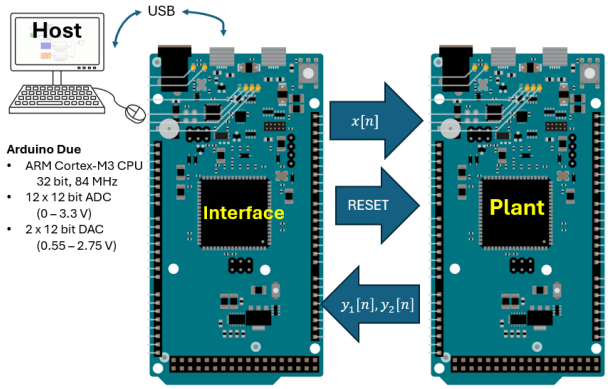


Figura 6. Arquitectura para la co-simulación del caso.

Co-simulación

Se realizó una co-simulación aplicando Matlab-Simulink [15] en una computadora. Se empleó una de las tarjetas Arduino Due como interfaz analógica de entrada y salida para la computadora. Esta interfaz se interconecta con la segunda tarjeta Arduino Due, la cual implementa el modelo del sistema (ver Fig. 6).

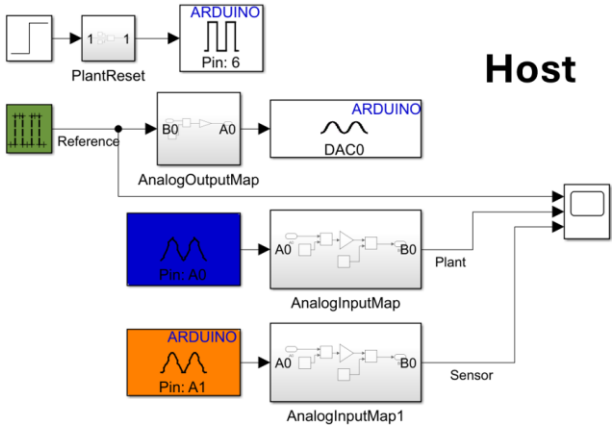


Figura 7. Modelo para la obtención de la respuesta al escalón.

Primeramente, a modo de comprobación, se implementó el sistema Simulink de la Fig. 7. En la Figura se observa que únicamente se trata de estudiar la respuesta al escalón unitario del sistema virtualizado. Se observan los bloques de cálculo de entradas y salidas descritos en (4) a (11).

Para la virtualización del sistema en la tarjeta de desarrollo, se consideraron los parámetros $\tau_1 = 4.1\ s$ y $\tau_2 = 2.4\ s$ para el sistema y los rangos $[XMIN, XMAX] = [YMIN, YMAX = [-0.4, 1.4]$ como valores válidos en la simulación. Se empleó un periodo de muestreo $T_s = 0.05\ s$. En el sistema host en la computadora, se utilizó un resolvedor discreto con un periodo de muestreo de 100 ms. El resultado de esta simulación se muestra en la Fig. 8.

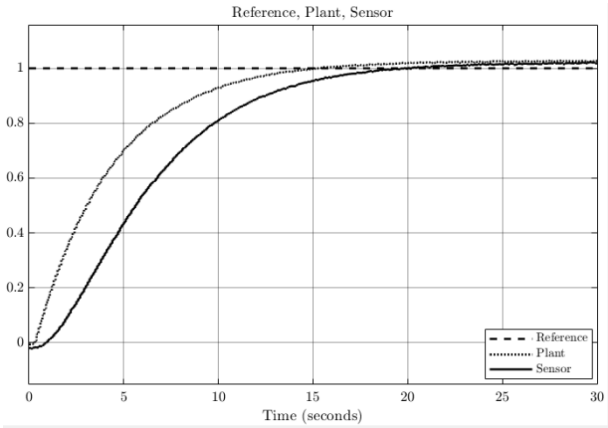


Figura 8. Respuesta al escalón del sistema virtualizado.

Resulta pertinente enfatizar que en la co-simulación, el desarrollo de la respuesta temporal que se obtuvo fue cercano al tiempo real, en el sentido de que los segundos transcurridos en la simulación corresponden a los segundos de respuesta real del sistema. Dado que se emplearon los dos canales DAC de la tarjeta de desarrollo, las respuestas al escalón de la planta, $y_1(t)$, y de la planta sensada, $y_2(t)$, se obtienen simultáneamente.

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

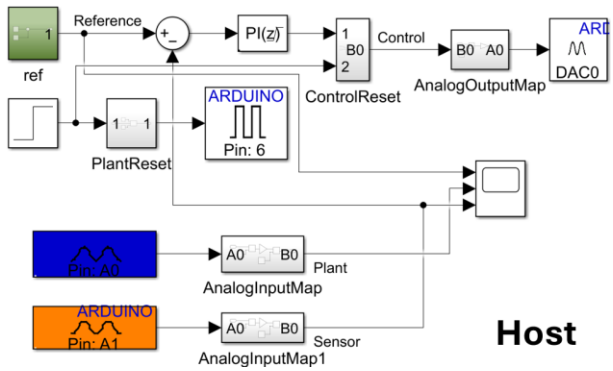


Figura 9. Control retroalimentado del sistema virtualizado.

El sistema Simulink de la Fig. 9 se utilizó como para simular un sistema de control retroalimentado proporcional-integral discreto. Al igual que en la primera simulación, es necesario incluir el ajuste de rango de datos de (4) a (11). Se observa en la Figura que la señal empleada para sintonizar el control es la señal proveniente del sensor de la Planta.

Como se observa en el resultado de la Fig. 10, aunque el controlador se ha sintonizado adecuadamente, la existencia de retraso en la respuesta de la planta sensada respecto a la planta real hace que el sistema no se comporte precisamente como se esperaría. Para esta simulación se mantiene el desarrollo de respuesta en tiempo real, lo que sugiere que la virtualización implementada cumple en el propósito de emular a un sistema real.

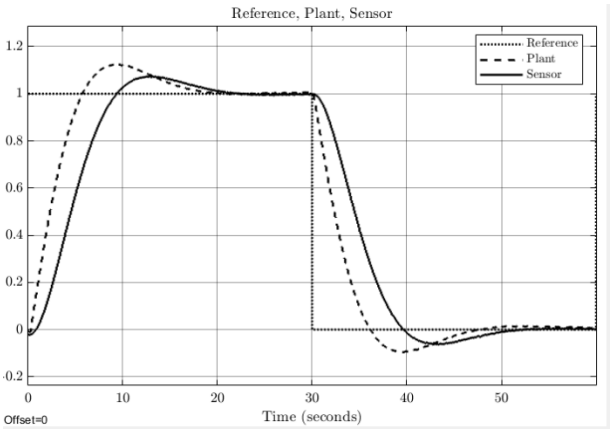


Figura 10. Respuesta del sistema con controlador discreto.

DISCUSIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

El desarrollo presentado presenta varios resultados relevantes. La virtualización de propósito general ofrece una alternativa viable para ampliar la versatilidad de ofertas de sistemas de control prácticos en entornos académicos. Por ejemplo, un docente puede parametrizar varias copias de un sistema LIT de manera que solicite al estudiantado la caracterización y la identificación de esos parámetros con instrumentos de laboratorio. En otro posible escenario, el análisis y diseño de los controladores para los sistemas, dado que las entradas y salidas de la virtualización son señales de voltaje analógico, puede llevarse a cabo desde el enfoque analógico (p.e. aplicando amplificadores operacionales), o bien desde el enfoque digital (p.e. aplicando microcontroladores y procesadores digitales de señales), o bien desde el enfoque de co-simulación (p.e. como aquí se ha descrito).

Los resultados presentados indican que la virtualización en dispositivos como los aplicados si permite la ejecución de sistemas en tiempo real. Resulta interesante, como trabajo posterior, elaborar una metodología para determinar los límites de cierta plataforma de cómputo en relación con la complejidad de los modelos y los recursos de cómputo. Incluso, puede resultar de interés, lograr incluir estrategias de interacción usuario- planta a modo de aprovechar las capacidades de ejecución en tiempo real de la metodología propuesta.

Finalmente, se debe resaltar que la propuesta en ningún momento sugiere que los otros enfoques aplicables a las experiencias educativas de Ingeniería de Control no sean pertinentes ni adecuados para la enseñanza. Debe quedar claro que la propuesta busca ofrecer una herramienta alternativa para tales experiencias que ante ciertos contextos y circunstancias resulte útil en los propósitos de los planes y programas de estudio.

CONCLUSIONES

Se presentó una metodología de virtualización de sistemas LIT en una tarjeta de desarrollo basada en microcontrolador programable de propósito general. Para la virtualización se consideró la discretización de una función de transferencia expresada por la transformada de Laplace de la función de transferencia en tiempo continuo del sistema. Consecuentemente, se consideraron las características de los periféricos de conversión analógico a digital y digital a analógico del microcontrolador a emplear como parte del proceso de virtualización. Finalmente, se propuso un flujo de programa básico para la implementación final del modelo discretizado del sistema LIT.

A través de la revisión de un caso de estudio y la presentación de dos escenarios de co-simulación, se validó la propuesta de virtualización de propósito general y se determinó factibilidad de la aplicación de este enfoque en contextos académicos de enseñanza de análisis y diseño de sistemas de control retroalimentado.

BIBLIOGRAFÍA

[1] Caner, C. (2024). Setting Up a Control Laboratory: Equipments and the System. Acrome Education. Retrieved from: https://acrome.net/post/setting-up-a-control-laboratory-equipments-and-the-system.

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

[2] Hernández, R. (2010). Introducción a los sistemas de control: conceptos, aplicaciones y simulación con MATLAB. Pearson Educación.
[3] Menghal, P. M. and Laxmi, A. J., (2011) Real time simulation: A novel approach in engineering education, 2011 3rd International Conference on Electronics Computer Technology, Kanyakumari, India, pp. 215-219, doi: 10.1109/ICECTECH.2011.5941592.
[4] Zhang, Wang and Manandhar, (2021) "Digital Twin Real-time Hybrid Simulation Platform for Engineering Education in Renewable Energy," 2021 31st Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC), Perth, Australia, pp. 1-6, doi: 10.1109/AUPEC52110.2021.9597748
[5] Oliveira, La-Gatta, Ferreira and Rodrigues, (2019) "Development of a FPGA-Based Real-Time Simulation System," 2019 IEEE 15th Brazilian Power Electronics Conference and 5th IEEE Southern Power Electronics Conference (COBEP/SPEC), Santos, Brazil, pp. 1-6, doi: 10.1109/COBEP/SPEC44138.2019.9065363.
[6] Speedgoat GmbH. (2024). Speedgoat Target Machines, Liebefeld, Switzerland. Recuperado de: https://www.speedgoat.com
[7] Bélanger, J., Venne, P., & Paquin, J. N. (2010). The what, where and why of real-time simulation. Planet Rt, 1(1), 25-29
[8] Menghal, P. M., & Laxmi, A. J. (2012, January). Real time simulation: Recent progress & challenges. In 2012 International Conference on Power, Signals, Controls and Computation (pp. 1-6). IEEE.
[9] Rozinat, A., Mans, R. S., Song, M., & van der Aalst, W. M. (2009). Discovering simulation models. Information systems, 34(3), 305-327.
[10] Golnaraghi, F., & Kuo, B. C. (2010). Automatic control systems. Complex Variables, 2, 1-1.
[11] Ogata, K. (2009). Modern control engineering (pp. 642-643). India: Prentice Hall.
[12] Dyer, S. A., & Dyer, J. S. (2000). The bilinear transformation. IEEE Instrumentation & Measurement Magazine, 3(1), 30-34.
[13] Rafiquzzaman, M. (2025). Microcontroller Theory and Applications with the PIC18F. John Wiley & Sons.
[14] Arduino. (2025). Arduino. Recuperado de: https://www.arduino.cc
[15] The MathWorks Inc. (2024). MATLAB version: 24.1.0.2603908 (R2024a) Update 3, Natick, Massachusetts: The MathWorks Inc. https://www.mathworks.com

AUTORIZACIÓN Y RENUNCIA.

Los autores del presente artículo autorizan al TecNM/Instituto Tecnológico de Zacatepec para publicar el escrito en el libro electrónico del CITID 2025. El TecNM/ITZ o los editores no son responsables ni por el contenido ni por las implicaciones de lo que está expresado en el escrito.

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO CORROSIVO DEL ALUMINIO 1050A Y EL 7005 EXPUESTOS A LOS GASES ATMOSFÉRICOS GENERADOS EN LA UNIDAD 9 Y 10 DE LA CENTRAL GEO-TERMOELÉCTRICA DE "LOS HUMEROS"

Adrián Cristóbal Neri [1], Rosa Edith Parcero Gómez [2] Nestor Belisario Gómez Guzmán [3], Adrián Méndez Ochoa [4], Jesús Alberto López Najera [5]

[1] Maestría en Ciencias Aplicadas. Asesoría Industrial Sea, Investigación y Desarrollo. adrian.neri@asesoriaindustrialsea.com.mx, +52 55 4143 6784, Av. Taxqueña 1594-106, Col. Quetzalcóatl, CP 04270, CDMX.

[2]Ingeniería Bioquímica. Asesoría Industrial Sea, Investigación y Desarrollo. edith.parcero@asesoriaindustrialsea.com.mx, +52 967 104-62-64, Av. Taxqueña 1594-106, Col. Quetzalcóatl, CP 04270, CDMX.

[3]Doctorado en Ingeniería y Ciencias Aplicadas. Asesoría Industrial Sea, Investigación y Desarrollo. nestor.gomez@asesoriaindustrialsea.com.mx, +52 777-420-99-49, Av. Taxqueña 1594-106, Col. Quetzalcóatl, CP 04270, CDMX.

[4]Doctorado en Ciencias. Asesoría Industrial Sea, Investigación y Desarrollo. adrian.mendez@asesoriaindustrialsea.com.mx, +52 777- 175-42-47, Av. Taxqueña 1594-106, Col. Quetzalcóatl, CP 04270, CDMX.

[5]Maestria en Ingeniería Aplicada. Comisión Federal de Electricidad (CFE). Jefe de Departamento Regional Eléctrico E. F., maxem7@hotmail.com, +52 282-148-85-36, Km 7.5 carretera Veracruz-Medellín, Dos Bocas, Veracruz, C.P. 94271.

Resumen – En el presente documento se muestran los resultados obtenidos de la exposición del aluminio 1050A y 7005 en la Central Geo- termoeléctrica de los Humeros durante un periodo de 30 días. Evaluado mediante técnicas electroquímicas, de manera específica espectroscopia de impedancia electroquímica (EIS). Posterior a los 30 días de exposición se realizaron análisis complementarios de microscopia electrónica de barrido y fluorescencia de rayos X, para el caso del Aluminio 1050A se observó la presencia de una delgada costra superficial rica en óxidos, y en Aluminio 7005 se detectó la presencia de diferentes productos de corrosión sobre la superficie. Con los cuales se demostró la presencia de H_2S en el ambiente y resultando el aluminio 1050A como el más apto para este tipo de ambiente.

Palabras Clave: aluminio, corrosión, gases atmosféricos, geo-termoeléctrica.

Abstract -- This document shows the results obtained from the exposure of aluminum 1050A and 7005 in the Geothermoelectric Power Plant of Los Humeros for a period of 30 days. Evaluated by electrochemical techniques, specifically electrochemical impedance spectroscopy (EIS). After 30 days of exposure, complementary analyses of scanning electron microscopy and X-ray fluorescence were carried out. In the case of Aluminum 1050A, the presence of a thin superficial crust rich in oxides was observed, and in Aluminum 7005 the presence of different corrosion products on the surface was detected. With these, the presence of H_2S in the environment was demonstrated and aluminum 1050A was found to be the most suitable for this type of environment.

Key words – aluminum, corrosion, atmospheric gases, geothermoelectric.

INTRODUCCIÓN

La energía geotérmica es una fuente de energía renovable que aprovecha el calor que existe en el subsuelo de la tierra. Los recursos geotérmicos de alta temperatura (más de 100-150° C) se utilizan para generar energía eléctrica, mientras que aquellos con temperaturas menores son óptimos para los sectores industriales, servicios y residencial. Este fenómeno natural es utilizado en muchos países del mundo para distintas actividades productivas y económicas.[1]

El proceso de generación de energía se inicia con la extracción de una mezcla de vapor y agua geotérmica (fluido bifásico) desde el reservorio geotérmico a través de los pozos productores. Ya en la superficie se separan el vapor del agua geotérmica utilizando un separador ciclónico (separador centrifugo vertical).

Una vez separados, el agua se reinyecta nuevamente al subsuelo, mientras que el vapor ya seco es conducido hasta la central generadora. En la central geotérmica, la fuerza o energía del vapor activa la turbina cuyo rotor gira a unas 3 mil 600 revoluciones por minuto, que a su vez activa el generador, donde el roce con el campo electromagnético transforma la energía mecánica en energía eléctrica.[2]

Los Humeros es uno de los cuatro campos geotérmicos que operan actualmente en México. Tiene una capacidad instalada de 40 MW con ocho unidades de contrapresión de 5 MW cada una, las cuales son alimentadas por un promedio de 20 pozos de producción que producen alrededor de 500 toneladas de vapor por hora. También hay tres pozos de inyección en operación. Las unidades generadoras, pozos e instalaciones son operadas por la Comisión Federal de Electricidad (CFE).[3]

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

Los fluidos geotérmicos de Los Humeros presentan aguas de baja salinidad con características geoquímicas diversas. Con un pH, entre de 5.8 a 9.0 y el promedio tiende a ser alcalino (pH=7.7). El contenido de cloruros es bajo y varia de 1.4 a 982 ppm. En cambio, las concentraciones de boro son altas y oscilan de 67 a 3168 ppm. La composición de los gases producidos por los pozos es representada por CO_2 arriba del 90% del volumen de los gases totales presentes y el 5.73% de volumen es H_2S [4]. La mezcla de vapor y salmuera rica en sales, alta temperatura, presencia de ácido sulfhídrico y bióxido de carbono hacen del fluido geotérmico una solución muy corrosiva [5]. En la central de los Humeros el principal afectado por la presencia de H_2S son las barras conductoras localizadas en el bus-ducto provocando daños y fallas en el funcionamiento. Por lo cual, se busca un material alterno que pueda ser resistente ante la presencia de sulfuros y sea buen conductor.

DESARROLLO

Metodología

El estudio del comportamiento de los diferentes aluminios se realizó por medio de gráficos de impedancia en un electrolito recolectado de la condensación del vapor presente en la central geo- termoeléctrica.

Análisis microestructural

El revelado de la microestructura de los aluminios 7005 y 1050A fueron realizados de acuerdo con la norma ASTM-E407.[4] Se desbastaron probetas de los aluminios con papel de carburo de silicio (SiC) desde grado 120 hasta 1200, posteriormente fueron pulidas con pasta de diamante (0.5 µm). Las probetas fueron sumergidas en la solución de ataque (solución saturada de NaOH) durante 5 min.

Probetas electroquímicas

Se cortaron diferentes piezas de aluminio 1050A y 7005 con medidas de 1 x 0.5 x 0.5 cm. Una vez obtenidas las piezas, se prepararon un total de 6 probetas electroquímicas, 3 de aluminio 1005A y 3 de 7005, se desbastaron con papel carburo de silicio (lijas) desde grano 120 hasta 600. Las probetas se colocaron en una salida de vapor directa. La composición química de los aluminios se muestra en las siguientes tablas:

Tabla 1. Composición química del aluminio 1050A de acuerdo con la norma ISO 209-1 [6]

Designación ISO	Al 99.5
Registro internacional	1050A
Si (máx)	0.25
Fe (máx)	0.40
Cu (máx)	0.05
Mn (máx)	0.05
Mg (máx)	0.05
Zn (máx)	0.07
Ti (máx)	0.05
Aluminio (máx)	99.5

Tabla 2. Composición química del Aluminio 7005 obtenidas de la norma ISO 209-1. [6]

Designación ISO	Al Zn4,5Mg1,5Mn
Registro internacional	7005
Si (máx)	0.35
Fe (máx)	0.40
Cu (min-máx)	0.10
Mn (min-máx)	0.20-0.7
Mg (min-máx)	1.0 –1.8
Cr (min-máx)	0.06-0.20
Zn (min-máx)	4.0 - 5.0
Ti (máx)	0.01 –0.06
Zr (min-máx)	0.08-0.20
Aluminio	Base

Montaje experimental en campo

En una celda electroquímica de 400 ml se colocó 350 ml de vapor condensado, el arreglo utilizado para realizar la prueba de espectroscopia de impedancia electroquímica (EIS) consistió en un arreglo de tres electrodos, electrodo de trabajo (aluminio), electrodo de referencia (platino) y contra electrodo (grafito). Para realizar el EIS, las mediciones se realizaron desde 100,000 hasta 0.04 Hz con una amplitud sinusoidal de ± 10 mV. Dicha medición se realizó con ayuda de un potenciostato- galvanostato Admiral Squidstat Plus.

Análisis complementarios

Se realizaron análisis en sección transversal de las muestras corroídas con un microscopio electrónico de barrido (SEM, JEOL JSM-IT 500) equipado con un espectrómetro dispersivo de energía de rayos X (EDS). Los datos experimentales de las muestras posterior a su exposición, se obtuvieron por Espectrometría de Fluorescencia de rayos X (XRF) utilizando el espectrómetro Elvatech Prospector 3.

DISCUSIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Análisis microestructural

En la Figura 1 se muestra las imágenes de la microestructura del aluminio 1050A y el aluminio 7005.

a) b)

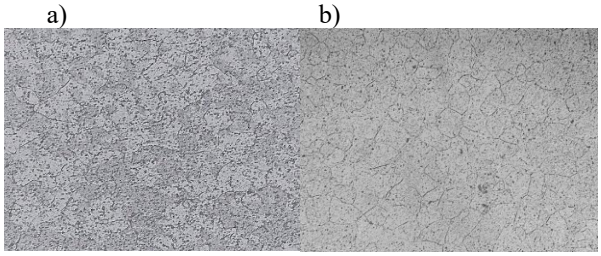


Figura 1. Imágenes de la microestructura a 200x, a) Aluminio 1050A y b) Aluminio 7005

Las imágenes muestran una microestructura típica del aluminio con bajo porcentaje de elementos aleantes. El

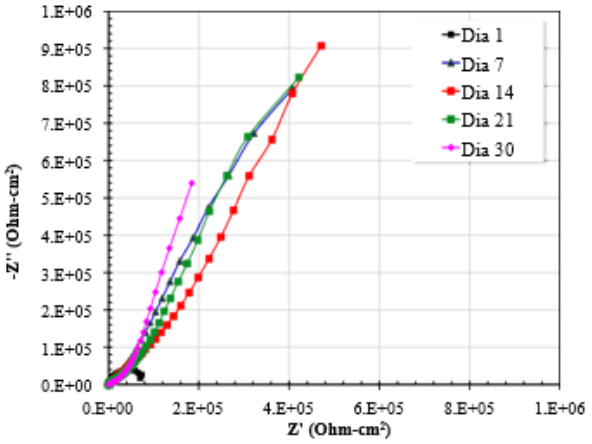
Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

aluminio 1050A presenta un tamaño de grano promedio de 41 micras, los diferentes tonos indican diferentes orientaciones cristalográficas definidas en la Figura 1a. Los límites de ángulo alto o límites de grano están delineados por un tono negro grueso. Los límites de ángulos bajos o límites de subgrano se observa mediante tonalidades grisáceas delgadas este comportamiento se atribuye a la fuerte viscosidad del aluminio 1050A, mientras que el aluminio 7005 un tamaño promedio de 78 micras Figura 1b, los tamaños de los granos alargados, los granos equiaxiales aumentan en comparación con los del aluminio 1050A. Esto se atribuye al crecimiento del grano causado por la temperatura elevada durante el tratamiento de solución. Además, se puede observar que el límite de grano, la apariencia se vuelve borrosa en comparación con el aluminio 1050A. Esto se debe a la difusión de elementos de aleación en el límite de grano.[8][9]

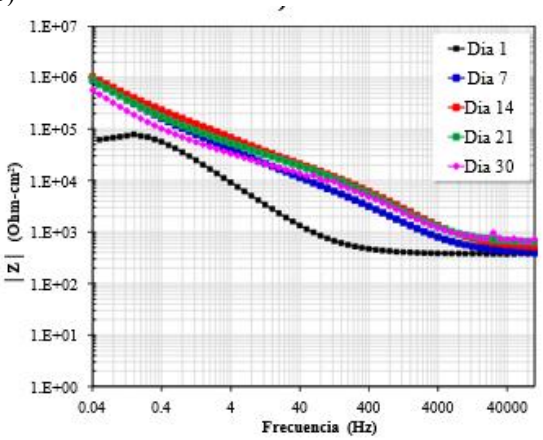
Espectroscopía de Impedancia Electroquímica (EIS) Aluminio 1050A

En la Figura 2 se muestran los diferentes espectros de impedancia del aluminio 1050A obtenidos en los diferentes días de exposición.

a)



b)



c)

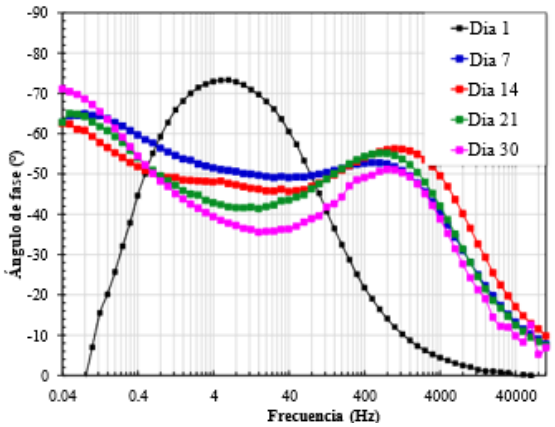


Figura 2. *Espectros de Impedancia del aluminio 1050A obtenidos en los cuartos eléctricos U9 y U10, a) Nyquist, b) Bode-Modulo de Impedancia y c) Bode-ángulo de fase.*

En el diagrama de Nyquist se puede apreciar un pequeño semicírculo (Dia 1) que tiende a incrementar su diámetro conforme aumenta el tiempo de exposición, indicando un incremento a la resistencia y corrosión. En los diagramas de bode- modulo y bode-fase, en la medición de 1 Día se aprecia la respuesta característica de un material que aún no ha sido expuesto de manera prolongada a un ambiente corrosivo. Con el aumento del tiempo de exposición se observa la presencia de dos constantes de tiempo, en el diagrama de bode-modulo en la formación de dos pendientes y en el diagrama de bode-ángulo la presencia de dos campanas de gauss. El incremento de los valores del ángulo de fase es asociado a una mejora en la respuesta capacitiva, esto es provocado por la formación de productos de corrosión más compactos sobre la superficie, lo que puede ser observado en la Figura 2c en la región de alta frecuencia (400-40000 Hz) y en la región de baja frecuencia (0.04-4 Hz) se observa la respuesta del material, el incremento del valor del ángulo de fase en esta región sugiere una mejora de la resistencia del metal ante la corrosión.

Para el aluminio 1050A (Figura 2), no se observó ningún cambio significativo en los diagramas de impedancia durante los 30 días de inmersión. Se puede notar que, para este sistema, el comportamiento capacitivo es más marcado y el ángulo de fase medido en el diagrama es mayor que el aluminio 7005. Esta diferencia puede estar relacionada con las propiedades de barrera de la película anódica introducida por la microestructura de estos dos materiales. Brown et al. [12] han demostrado mediante microscopía electrónica de transmisión que los productos de corrosión sobre aluminio de pureza muy alta son relativamente uniformes en comparación con los observados en muestras de menor pureza. Por lo tanto, confirmaron que el crecimiento de los productos de corrosión sobre aluminio de pureza muy alta es

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

considerablemente diferente debido a la reducción significativa, o ausencia, de sitios catódicos preferenciales asociados con la segregación de impurezas dentro del sustrato metálico.

Espectroscopía de Impedancia Electroquímica (EIS) Aluminio 7005

En la Figura 3 se presentan los espectros de impedancia obtenidos del aluminio 7005 en los diferentes días de exposición.

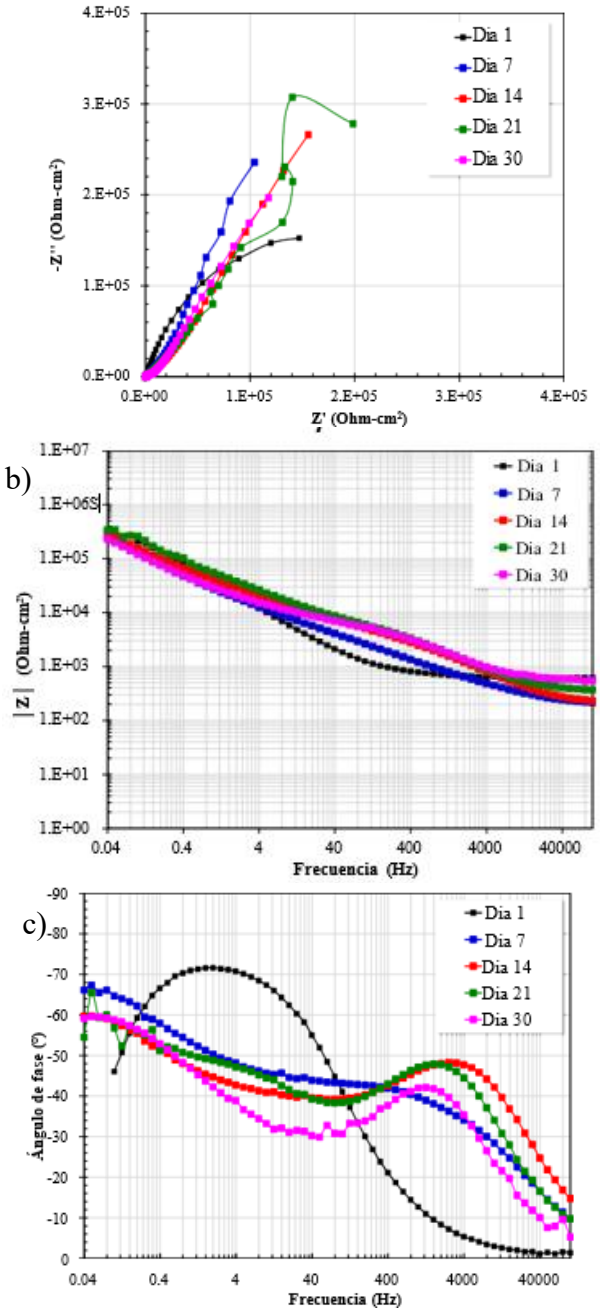


Figura 3. Espectros de Impedancia del aluminio 7005 obtenidos en los cuartos eléctricos U9 y U10, a) Nyquist, b) Bode-Modulo de Impedancia y c) Bode-ángulo de fase.

En el diagrama de Nyquist se observa la presencia de un semicírculo capacitivo. En los diagramas de bode se puede apreciar de manera más clara la presencia de dos constantes de tiempo. La respuesta obtenida a alta frecuencia corresponde a la respuesta de la interfaz, productos de corrosión electrolito y a baja frecuencia la respuesta a la interfaz aluminio- productos de corrosión. El incremento de los valores del ángulo de fase a altas frecuencias (400-40000 Hz) indica una mayor presencia de productos de corrosión sobre la superficie, sin embargo, estos valores no son muy altos lo que indica que estos productos de corrosión forman una capa poco compacta y adherente.

La solución agresiva alcanza el sustrato metálico y, cómo se puede ver en la Figura 3, los diagramas se modifican después de 30 días de inmersión en comparación con el diagrama inicial: se supone que la parte de alta frecuencia (HF) representa la resistencia electrolítica dentro de los poros de los productos de corrosión y la parte de baja frecuencia (LF) representa las reacciones que ocurren en la interfase de los productos de corrosión y metal base. [10], [11]

Microscopía Electrónica de Barrido (MEB)

En la Figura 4 se muestran las imágenes de la sección transversal obtenidas por Microscopia Electrónica de Barrido de los diferentes aluminios expuestos a la atmósfera de la Central Geo- termoeléctrica "Los Humeros" durante 30 días.

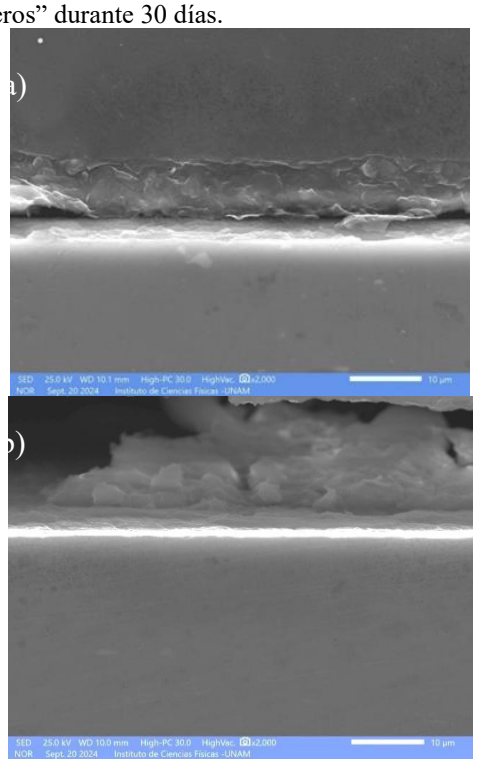


Figura 4. Imágenes por Microscopía Electrónica de Barrido (MEB) a 2000x de la sección transversal, a) Al 1050A, y b) Al 7005.

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

De acuerdo con las diferentes imágenes MEB no se logra apreciar una costra de productos de corrosión sobre los aluminios. Cabe mencionar que la capa pasiva presente en aluminio de manera natural es de apenas unos nanómetros de espesor, por lo cual no es posible diferenciarla de manera visual.

En la Figura 5 se muestra el mapeo de elementos correspondiente a la sección transversal del aluminio 1050A expuesto a la atmósfera de la Central Geo-termoeléctrica "Los Humeros" durante 30 días.

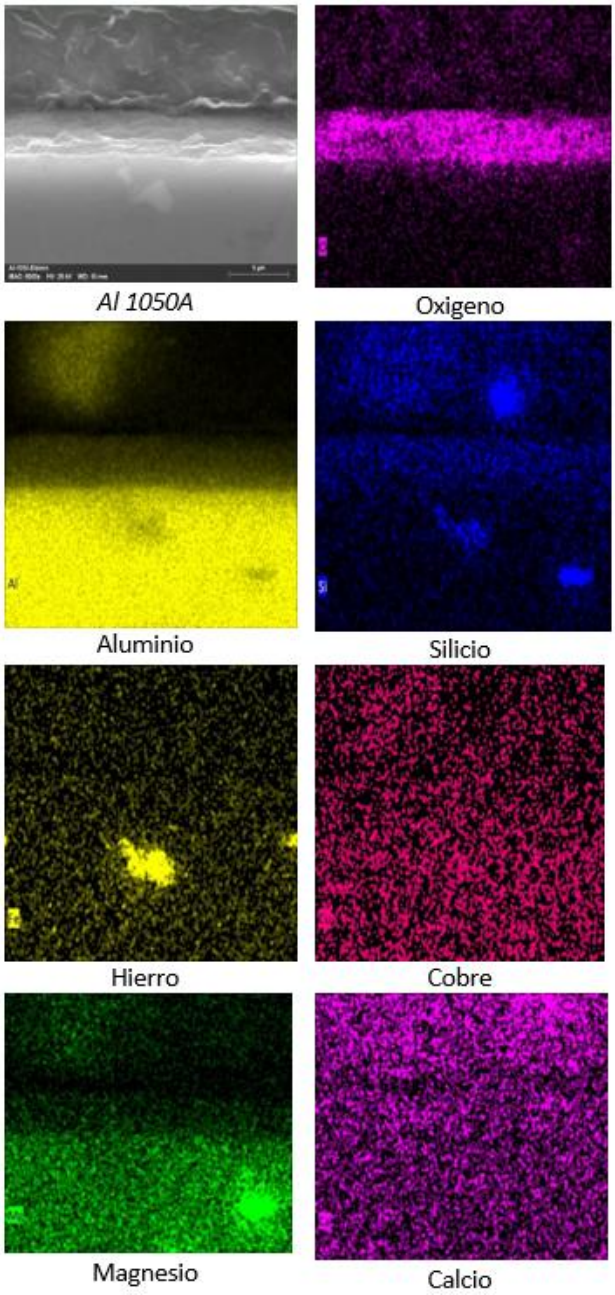
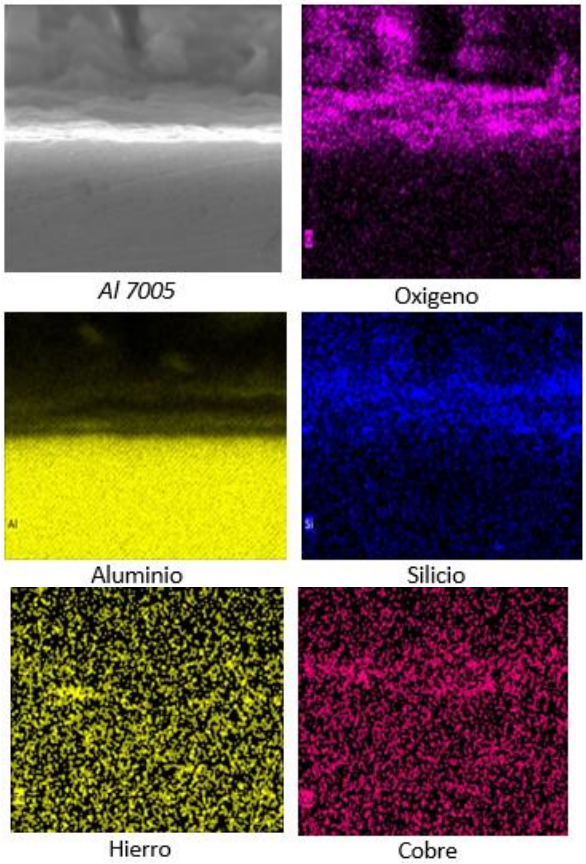


Figura 5. Mapeo de elementos a 5000x de la sección transversal del Aluminio 1050A expuesto durante 30 días en la Central "Los Humeros".

El mapeo revela la presencia de oxígeno sobre la superficie, el cual se encuentra asociado al aluminio y silicio, esto sugiere la presencia de óxidos asociados a estos elementos. Además, es posible observar sitios puntuales de elementos sobre el sustrato (Si, Mg, Fe, Cu) los cuales son elementos representativos de esta aleación. En general, los resultados presentados en este estudio revelan claramente que la superficie de aluminio se ha oxidado después del tiempo de exposición. Tanto el aluminio como los productos de corrosión formados en la superficie se han visto afectados por el ambiente de exposición, lo que dio como resultado una formación gradual de una capa de óxido hasta un nivel significativo. La capa de óxido formada es coherente y compacta.
En otros estudios también se ha encontrado oxidación selectiva en áreas localizadas, especialmente alrededor de partículas intermetálicas, lo que conduce al crecimiento preferencial de estructuras de óxido, posiblemente óxidos mixtos. También se encontraron que la capa de óxido formada influye en el comportamiento electroquímico al reducir la actividad anódica, mientras que la actividad catódica es más una función del tiempo de exposición. [13], [14]

En la Figura 6 se muestra el mapeo de elementos correspondiente a la sección transversal del aluminio 7005 sin recubrimiento expuesto a la atmósfera de la Central Geo-termoeléctrica "Los Humeros" durante 30 días.



Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

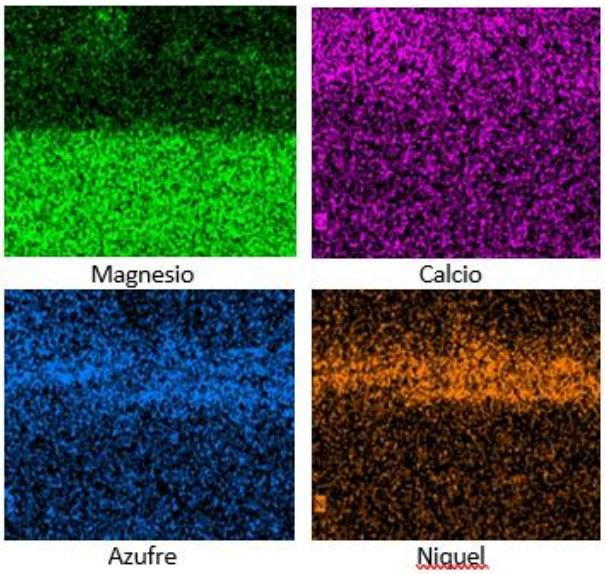


Figura 6. Mapeo de elementos a 5000x de la sección transversal del Aluminio 7005 expuesto durante 30 días en la Central "Los Humeros"

De acuerdo con el mapeo es posible observar la presencia de oxígeno, aluminio, silicio, níquel y azufre sobre la superficie, lo que sugiere la formación de una capa de óxidos formados por estos compuestos en diferentes proporciones.

Swamy et al. [15] Relaciona el análisis de la morfología y la composición del producto de corrosión reveló que se produjo una ligera corrosión en las superficies de las muestras sumergidas en la solución con presencia de azufre, corrosión por picaduras en las superficies de las muestras analizadas en presencia de cloruros y corrosión por exfoliación en las superficies de las muestras analizadas en la mezcla de soluciones en presencia de azufre y cloruros.

Análisis por Fluorescencia de Rayos X

De la Tabla 3 y 4 se presenta el análisis elemental por fluorescencia de rayos X de la superficie de los aluminios 1050A y 7005 durante 30 Días de exposición.

Tabla 3. Resultados del análisis elemental del aluminio 1050A a 30 días de exposición en la Geo-termoeléctrica "Los Humeros" por medio de fluorescencia de rayos X.

Elemento	Composición (%)	Error (%)
Al	51.58	±0.04
O	46.97	±0.05
Mg	0.83	±0.09
Si	0.37	±0.01
Cu	0.07	±0.00
Fe	0.06	±0.00
S	0.04	±0.02
Cr	0.02	±0.00
Mn	0.01	±0.00
Ca	0.01	±0.01

Tabla 4. Resultados del análisis elemental del aluminio 7005 a 30 días de exposición en la Geo-termoeléctrica "Los Humeros" por medio de fluorescencia de rayos X

Elemento	Composición (%)	Error (%)
Al	50.5	±0.30
O	46.2	±0.60
Ca	1.82	±0.24
Fe	0.79	±0.05
K	0.10	±0.40
Cu	0.13	±0.01
Mn	0.10	±0.01
Zn	0.09	±0.01
Ga	0.04	±0.00
Cr	0.03	±0.01
V	0.03	±0.03
Sb	0.02	±0.05
Ni	0.02	±0.01
Nb	0.02	±0.01

En los aluminios se detectó la presencia de trazas de azufre sobre la superficie, siendo mayor en el aluminio 7005. De acuerdo a los resultados obtenidos por el mapeo y el análisis de fluorescencia es posible la formación de una capa compacta de Al_2O_3 en la superficie del aluminio 1050A, a diferencia del aluminio 7005 que sugiere una capa de óxidos formados en diferentes proporciones Al_2O_3, NiO, $Al_2(SO_4)_3$.

En comparación con muchos metales, el aluminio se corroe con bastante lentitud al exponerse a la atmósfera. Sin embargo, su tasa de corrosión aumenta principalmente por los niveles elevados de iones de cloruro y aumenta aún más por los niveles elevados de iones de sulfato. La capa superficial inicial del aluminio antes de la interacción con los corrosivos atmosféricos es un óxido/hidróxido; es porosa y absorbe libremente el agua (y, por lo tanto, también cualquier ion presente en el agua). La corrosión posterior ocurre preferentemente en fallas o límites de grano. Los procesos que se han evaluado en relación con las reacciones químicas en la capa húmeda sobre la superficie expuesta del aluminio pueden resumirse de la siguiente manera: se ha demostrado que en un ambiente ácido son comunes en corrosión atmosférica; proporciona un suministro de iones de aluminio a las capas de agua superficial como consecuencia de la disolución del producto de corrosión formado Al2O3; la formación de sulfato de aluminio Al2(SO4)3 amorfo insoluble se ve favorecida sobre la formación de hidroxisulfato de aluminio cristalino debido a la complejidad química de los compuestos cristalinos formados naturalmente y la congelación de los componentes de la solución mediante ciclos repetidos de húmedo-seco. [16]

CONCLUSIONES

De acuerdo con los análisis electroquímicos el aluminio 1050A y el aluminio 7005 expuestos a la atmósfera de la central Geo-termoeléctrica "Los Humeros" tienden a

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

formar una capa de productos de corrosión protectores y a presentar un comportamiento pseudo pasivo lo que los hace susceptible a picaduras. El Aluminio 1050A presento un mejor desempeño ante la corrosión y una menor susceptibilidad a las picaduras con respecto al aluminio 7005. Los análisis por microscopía electrónica de barrido indicaron que el azufre no difunde hacia la matriz de los aluminios y no presentan daño interno.

BIBLIOGRAFÍA

[1] Twenergy. (2016). Twenergy. Recuperado de: https://twenergy.com/energia/energia-geotermica

[2] Joya, G., Hernández Montenegro, J. M., & Menjívar Benítez, C. E. (2017). Estudio del potencial de corrosión de fluidos geotérmicos en instalaciones superficiales.

[3] Gutiérrez-Negrín, L. C., Izquierdo-Montalvo, G., & Aragón-Aguilar, A. (2010, April). Review and update of the main features of the Los Humeros geothermal field, Mexico. In World Geothermal Congress, Bali, Indonesia, 25–29 April 2010 (Vol. 10).

[4] Tello, E. (2005). Estado de equilibrio soluto- mineral y saturación de minerales de alteración en fluidos geotérmicos de alta temperatura de México. [Tesis doctoral]. Universidad Autónoma de México, Facultad de ingeniería, México.

[5] Valdéz Salas B, Schorr Wiener M, Carrillo Beltran M, Zlatev R, Montero Alpirez G, Campbell Ramírez H et al. Corrosión en la Industria geotermoeléctrica. En Valdéz Salas B, & Schorr Wiener M (Eds.). Corrosión y preservación de la infraestructura industrial. Barcelona, España: OmniaScience; 2013. pp. 49-68.

[6] Organización Internacional de Normalización (ISO). (1989). Wrought aluminium and aluminium alloys-Chemical composition and forms of products-Part 1: Chemical composition (209-1). Recuperado de: https://cdn.standards.iteh.ai/samples/4076/20729d5780d54661b6cf2790c6f6c65e/ISO-209-1-1989.pdf

[7] ASTM E 407-99, "E407-07: Standard Practice for Microetching Metals and Alloys," ASTM Int. West Conshohocken, PA, vol. 11, no. November, pp. 1–21, 1999.

[8] Liu, L., Nakayama, H., Fukumoto, S., Yamamoto, A., & Tsubakino, H. (2004). Microstructural evolution in friction stir welded 1050 aluminum and 6061 aluminum alloy. *Materials transactions*, *45*(8), 2665- 2668.

[9] Jiang, J. F., Ying, W. A. N. G., Liu, Y. Z., Xiao, G. F., & Hua, L. I. (2021). Microstructure and mechanical properties of 7005 aluminum alloy processed by one-pass equal channel reciprocating extrusion. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 31(3), 609-625.

[10] Mansfeld, F. (1995). Use of electrochemical impedance spectroscopy for the study of corrosion protection by polymer coatings. Journal of applied electrochemistry, 25(3), 187-202.

[11] Bonnel, K., Le Pen, C., & Pebere, N. E. I. S. (1999). EIS characterization of protective coatings on aluminium alloys. Electrochimica Acta, 44(24), 4259-4267.

[12] Brown, G. M., Shimizu, K., Kobayashi, K., Thompson, G. E., & Wood, G. C. (1993). The growth of chromate conversion coatings on high purity aluminium. Corrosion Science, 34(7), 1045-1054.

[13] C. Vargel, Corrosión del aluminio, Elsevier, Oxford, 2004, ISBN 008044495 4.

[14] Minzari, D., Møller, P., Kingshott, P., Christensen, L. H., & Ambat, R. (2008). Surface oxide formation during corona discharge treatment of AA 1050 aluminium surfaces. Corrosion Science, 50(5), 1321-1330.

[15] Swamy, P. K., Mylaraiah, S., Gowdru Chandrashekarappa, M. P., Lakshmikanthan, A., Pimenov, D. Y., Giasin, K., & Krishna, M. (2021). Corrosion behaviour of high-strength Al 7005 alloy and its composites reinforced with industrial waste-based fly ash and glass fibre: comparison of stir cast and extrusion conditions. Materials, 14(14), 3929.

[16] Graedel, T. E. (1989). Corrosion mechanisms for aluminum exposed to the atmosphere. Journal of the Electrochemical Society, 136(4), 204C.

AUTORIZACIÓN Y RENUNCIA.

Los autores del presente artículo autorizan al TecNM/Instituto Tecnológico de Zacatepec para publicar el escrito en el libro electrónico del CITID 2025. El TecNM/ITZ o los editores no son responsables ni por el contenido ni por las implicaciones de lo que está expresado en el escrito.

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

DISEÑO DE UNA ESTRATEGIA DE CONTROL PARA UN MOTOR RECIPROCANTE MAGNÉTICO

Raúl Alegría-Gómez[1], Arturo D. Espinosa Pedroza[2], Jarniel García-Morales[3], Gerardo Vicente Guerrero-Ramírez[4], Manuel Adam-Medina[5]

[1] Ing. Electrónico Tecnológico Nacional de México/CENIDET, Interior Internado Palmira S/N, Col. Palmira, Cuernavaca, Mor. México. E-mail: m24ce018@cenidet.tecnm.mx, 62490.
[2] MC. en Ciencias Tecnológico Nacional de México/CENIDET, Interior Internado Palmira S/N, Col. Palmira, Cuernavaca, Mor. México. E-mail: d22ce059@cenidet.tecnm.mx, 62490.
[3] Dr. en Ciencias Tecnológico Nacional de México/CENIDET, Interior Internado Palmira S/N, Col. Palmira, Cuernavaca, Mor. México. E-mail: jarniel.gm@cenidet.tecnm.mx, 62490.
[4] Dr. en Ciencias Tecnológico Nacional de México/CENIDET, Interior Internado Palmira S/N, Col. Palmira, Cuernavaca, Mor. México. E-mail: gerardo.gr@cenidet.tecnm.mx, 62490.
[5] Dr. en Ciencias Tecnológico Nacional de México/CENIDET, Interior Internado Palmira S/N, Col. Palmira, Cuernavaca, Mor. México. E-mail: manuel.am@cenidet.tecnm.mx, 62490.

Resumen– Este artículo destaca la importancia de la regulación de la velocidad en los motores alternativos magnéticos (MRM), que se están convirtiendo en una alternativa viable a los motores convencionales de combustión interna para reducir las emisiones contaminantes. El estudio compara dos estrategias de control diferentes para lograr una regulación eficiente de la velocidad. El primer método emplea un controlador neuronal que ajusta dinámicamente los ángulos de energización manteniendo una tensión de alimentación constante, lo que permite un rendimiento adaptativo. El segundo método utiliza un controlador PID que regula la tensión de alimentación manteniendo fijos los ángulos de energización, basándose en técnicas de control clásicas. Analizando el comportamiento de cada método, esta investigación pretende determinar la estrategia de control más adecuada para las aplicaciones prácticas. Los resultados contribuyen al avance de los MRM como solución respetuosa con el medio ambiente y energéticamente eficiente para diversas aplicaciones industriales y tecnológicas.

Palabras Clave:Control PID, Control Neuronal, MRM, Euler-lagrange.

Abstract--This paper highlights the importance of speed control in magnetic reciprocating engines (MRM), which are becoming a viable alternative to conventional internal combustion engines for reducing pollutant emissions. The study compares two different control strategies to achieve efficient speed regulation. The first method employs a neural controller that dynamically adjusts energization angles while maintaining a constant supply voltage, enabling adaptive performance. The second approach uses a PID controller that regulates the supply voltage while keeping the energization angles fixed, based on classical control techniques. By analyzing the behavior of each method, this research aims to determine the most suitable control strategy for practical applications. The findings contribute to the advancement of MRMs as an environmentally friendly and energy efficient solution for various industrial and technological applications.

Key words – PID Control,Neural Control,MRM,Euler-Lagrange.

INTRODUCCIÓN

A lo largo de la historia, los motores de combustión interna (MCI) han desempeñado un papel vital en el desarrollo de la humanidad, satisfaciendo necesidades esenciales en el transporte, la agricultura y la industria. Desde su invención en el siglo XIX hasta la actualidad, el parque vehicular mundial ha crecido exponencialmente. En México, se estima que existen 40.59 millones de vehículos en circulación, de los cuales el 99.5% corresponde a modelos con MCI y el resto a vehículos eléctricos y/o híbridos. Es evidente que los MCI dominan el mercado actual, y su principio de funcionamiento se basa en la combustión de hidrocarburos como la gasolina y el diésel. Sin embargo, esta combustión es una de las principales fuentes de emisiones contaminantes, ya que produce subproductos como el dióxido de carbono (CO_2), óxidos de nitrógeno (NO_x) [1] e hidrocarburos no quemados (HC), los cuales afectan la calidad del aire, causan problemas respiratorios y contribuyen al cambio climático.

En respuesta a la creciente preocupación ambiental y a la necesidad de reducir las emisiones contaminantes, se han desarrollado diversas alternativas tecnológicas. Entre ellas, destacan los vehículos eléctricos e híbridos, que utilizan motores eléctricos alimentados por baterías, así como motores térmicos en el caso de los híbridos para lograr una simbiosis tecnológica. Otras estrategias incluyen el uso de combustibles alternativos como el hidrógeno [2], el etanol [3] y el biodiésel. Adicionalmente, estudios recientes han explorado la posibilidad de mejorar la eficiencia de los MCI mediante la adición de ciclos térmicos adicionales, como el aprovechamiento del calor residual y los gases de escape para generar energía mediante un ciclo de vapor [4].

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

Una propuesta innovadora dentro de este contexto es el desarrollo de los motores reciprocantes magnéticos (MRMs), los cuales emplean componentes de los motores tradicionales, promoviendo así la reutilización de materiales. Estos motores reemplazan el uso de hidrocarburos con actuadores magnéticos para generar la fuerza necesaria para el movimiento lineal del cilindro, el cual se transforma en un movimiento rotatorio mediante el mecanismo de biela-manivela-corredera. Investigaciones previas han explorado el potencial de los motores reciprocantes magnéticos (MRMs) como alternativa a los motores de combustión interna (MCI). Ríos et al. [5] se enfocaron en la formulación del modelo matemático y validación experimental de un MRE, destacando la importancia de los ángulos de energización para optimizar la velocidad del motor, mientras que ONF [6] investigó el uso de la repulsión magnética para generar potencia mecánica en un motor de pistón, subrayando el potencial de esta tecnología para reemplazar los motores tradicionales y reducir las emisiones contaminantes.

El control de los MRMs representa un desafío técnico fundamental, ya que su dinámica electromagnética introduce comportamientos no lineales y variaciones en la fuerza generada por los actuadores magnéticos. A diferencia de los motores de combustión interna, donde la combustión sigue ciclos térmicos bien definidos [7], en los MRMs la interacción de los campos magnéticos con los elementos mecánicos exige una regulación precisa para garantizar un desempeño eficiente. La selección del controlador influye no solo en la estabilidad del sistema, sino también en su eficiencia energética, lo que puede determinar la viabilidad de los MRMs como una alternativa real a los motores convencionales.

Para mejorar el desempeño de los MRMs, es crucial el desarrollo de estrategias avanzadas de control. Entre las metodologías más prometedoras se encuentran los controladores PID (Proporcional-Integral-Derivativo) y los controladores neuronales. Los controladores PID han sido ampliamente utilizados en sistemas industriales [8] debido a su simplicidad y efectividad en la regulación de variables como velocidad y posición. No obstante, en sistemas complejos y no lineales como los MRMs, los controladores neuronales ofrecen una alternativa más flexible y adaptativa [9], permitiendo la optimización del desempeño en tiempo real mediante técnicas de aprendizaje automático. En este trabajo, se comparará el desempeño de dos estrategias de control aplicadas a los MRMs: el controlador PID y el controlador neuronal. Se analizarán sus ventajas y limitaciones en la regulación del sistema, evaluando aspectos como estabilidad, precisión y capacidad de adaptación a perturbaciones. Dado que la eficiencia del control influye directamente en el aprovechamiento de la energía en los MRMs, su optimización permitirá minimizar pérdidas y mejorar su desempeño en aplicaciones industriales y de movilidad sustentable [10].

- *Análisis y Modelado del MRM:*

El motor reciprocante magnético es utilizado en este trabajo aprovechando la estructura fabricada para los motores de combustión Interna. Para su representación matemática se llevará a cabo el desarrollo de la parte mecánica que empieza desarrollándose desde el mecanismo manivela-biela-corredera y su geometría de diseño.

Para desarrollar el modelo dinámico del mecanismo, se utiliza el método de Euler-Lagrange. Sea:

$$T - U = L \qquad \text{Ec. (1)}$$

Donde T y U son la energía cinética y potencial del sistema, respectivamente, y L es el lagrangiano [5].

-Ecuación Euler-Lagrange:

El método de Euler--Lagrange está basado en el intercambio de energía dentro de un sistema.

El método se basa en el Lagrangiano , que es la diferencia de la energía cinética menos la energía potencial.

$$L(q,\dot{q}) \triangleq K(q,\dot{q}) - P(q) \qquad \text{Ec. (2)}$$

Donde: $K(q,\dot{q})$es la energía cinética, $q \in \mathbb{R}^{n}$ son las llamadas coordenadas generalizadas del sistema. Una vez expresado el Lagrangiano en términos de las coordenadas generalizadas y sus derivadas con respecto al tiempo, se aplican las ecuaciones de Euler--Lagrange.

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{q}}\right) - \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial q} = \tau - \tau_f \qquad \text{Ec. (3)}$$

Donde τ son las fuerzas generalizadas y τ_f son las fuerzas disipativas (e.g., fricción) [11].

-Control PID

La combinación de una acción de control proporcional, una acción de control integral y una acción de control derivativa se denomina acción de control proporcional-integral-derivativa (PID). Esta acción combinada tiene las ventajas de cada una de las tres acciones de control individuales. La ecuación de un controlador con esta acción combinada se obtiene mediante:

$$u(t) = K_p e(t) + \frac{K_p}{T_i}\int_0^t e(t)dt + K_p T_d \frac{de(t)}{dt} \qquad \text{Ec. (4)}$$

La función de transferencia es:

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p\left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s\right) \qquad \text{Ec. (5)}$$

Donde: K_p es la ganancia proporcional, T_i es el tiempo integral y T_d es el tiempo derivativo [12].

-*Neurona Artificial.*
Una neurona es una función no lineal acotada:

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_n;\ w_1, w_2, \dots, w_n) \qquad \text{Ec. (6)}$$

Donde: $\{x_i\}$ son las variables y $\{w_n\}$ son los parámetros o pesos de la neurona.

Las variables de la neurona son usualmente conocidas como entradas. Una neurona artificial está compuesta por un vector de entrada, pesos sinápticos, un valor de umbral, un operador matemático de suma y una función de activación.
El primer modelo matemático de una neurona biológica fue desarrollado por McCulloch y Pitt [13], el cual es el siguiente:

$$y_j = \phi(v_j + \theta_j) \qquad \text{Ec. (7)}$$

$$v_j = \sum_{i=1}^{m} w_{ji} x_i \qquad \text{Ec. (8)}$$

DESARROLLO

En este trabajo se aborda el problema de determinar cuál es el mejor método para controlar la velocidad en el MRM. Comparando la manipulación de ángulos de energización utilizando un controlador neuronal con la manipulación de corriente con un controlador PID.

A) Modelo en Euler LaGrange

La formulación Euler-Lagrange del sistema es la siguiente:

$$\frac{d}{dt}\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{\theta}} - \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \theta} + \frac{\partial \mathrm{G}}{\partial \dot{\theta}} = \tau_m \qquad \text{Ec. (9)}$$

- Energía cinética del sistema

$$\begin{aligned} T = {} & \left(\frac{1}{2}\right)(I_C + I_V)\dot{\theta}^2 + \frac{1}{2} m_c h^2 R^2 \dot{\theta}^2 \\ & + \left(\frac{1}{2}\right) I_B \left(\frac{R^2 \cos^{2(\theta)}}{\ell^2 \cos^2(\beta)}\right) \dot{\theta}^2 \left(\frac{1}{2}\right) m_b R^2 \dot{\theta}^2 \\ & \left(k^2 \cos^2(\theta) \sin^2(\theta) + \frac{jR \sin(\theta) \sin(2\theta)}{\ell \cos(\beta)} \right. \\ & \left. + \left(\frac{jR}{2\ell}\right)^2 \frac{\sin^2(2\theta)}{\cos^2(\beta)}\right) \\ & + \frac{1}{2} m_p R^2 \dot{\theta}^2 \left(\sin^2(\theta) + \frac{R \sin(\theta) \sin(2\theta)}{\ell \cos(\beta)} \right. \\ & \left. + \left(\frac{R}{2\ell}\right)^2 \frac{\sin^2(2\theta)}{\cos^2(\beta)}\right). \end{aligned} \qquad \text{Ec. (10)}$$

- *Energía potencial del sistema*

$$\begin{aligned} U = {} & -m_c g\, h\, R \cos(\theta) \\ & + m_b g\left(R \cos(\theta) + j\ell \cos(\beta)\right) \\ & + m_p g\left(R \cos(\theta) + \ell \cos(\beta)\right). \end{aligned} \qquad \text{Ec. (11)}$$

- Disipación Lagrangiana.

$$\mathcal{G} = \left(\frac{1}{2}\right)\dot{\theta}^2\left(\mu_1 + \mu_2 R \frac{\cos(\theta)}{\ell \cos(\beta)}\right). \qquad \text{Ec. (12)}$$

Ahora, utilizando las ecuaciones (10), (11), (12) y resolviendo las derivadas lagrangianas y de fricción de la ecuación (9), se obtiene la ecuación dinámica de la parte mecánica del MRM y se expresa mediante la ecuación (13): [5]

$$\begin{aligned} & \tau_m \\ & = \ddot{\theta}\left[(I_C + I_V + m_c h^2 R^2) + I_B\left(\frac{R^2 \cos^2(\theta)}{l^2 \cos^2(\beta)}\right)\right. \\ & + m_b R^2\left(k^2 \cos^2(\theta) + \sin^2(\theta) + \frac{jR \sin(\theta) \sin(2\theta)}{l \cos(\beta)}\right. \\ & \left. + \left(\frac{jR}{2l}\right)^2 \frac{\sin^2(2\theta)}{\cos^2(\beta)}\right) \\ & + m_p R^2\left(\sin^2(\theta) + \frac{R \sin(\theta) \sin(2\theta)}{l \cos(\beta)}\right. \\ & \left.\left. + \left(\frac{R}{2l}\right)^2 \frac{\sin^2(2\theta)}{\cos^2(\beta)}\right)\right] \\ & + \dot{\theta}^2\left\{\frac{1}{2} I_B \frac{R^2}{l^2}\left(-\frac{\sin(2\theta)}{\cos^2(\beta)} + \frac{\cos^2(\beta)}{\cos^4(\beta)}\frac{R^2}{l^2}\sin(2\theta)\right)\right. \\ & + \frac{1}{2} R^2 m_b\left[\frac{jR}{l}\left(\frac{2\sin(\theta)\cos(2\theta) + \sin(2\theta)\cos(\theta)}{\cos(\beta)}\right.\right. \\ & \left. + \frac{\sin(\theta)\sin^2(2\theta)}{\cos^3(\beta)}\frac{R^2}{2l^2}\right) \\ & + \left(\frac{jR}{2l}\right)^2\left(\frac{4\sin(\theta)\cos(2\theta)}{\cos^2(\beta)} + \frac{\sin^3(2\theta) R^2}{\cos^4(\beta) l^2}\right) \\ & \left. - k^2 \sin(2\theta) + \sin(2\theta)\right] \\ & + \frac{1}{2} R^2 m_p\left[\sin(2\theta)\right. \\ & + \frac{R}{l}\left(\frac{2\ \sin(\theta)\ \cos(2\theta) + \sin(2\theta)\ \cos(\theta)}{\cos(\beta)}\right. \\ & \left. + \frac{\sin(\theta)\ \sin^2(2\theta)}{\cos\ ^\wedge 3(\beta)}\frac{R^2}{2l^2}\right) \\ & \left.\left. + \left(\frac{R}{2l}\right)^2\left(\frac{4\sin(2\theta)\cos(2\theta)}{\cos^2(\beta)} + \frac{\sin^3(2\theta)}{\cos^4(\beta)}\frac{R^2}{l^2}\right)\right]\right\} \\ & + \dot{\theta}\left(\mu_1 + \mu_2 \frac{R \cos(\theta)}{l \cos(\beta)}\right) - m_c g h R \sin(\theta) \\ & + m_b g\left(R \sin(\theta) + \frac{jR^2}{2}\frac{\sin(2\theta)}{\cos(\beta)}\right) \\ & + m_p g\left(R \sin(\theta) + \frac{R^2}{2l}\frac{\sin(2\theta)}{\cos(\beta)}\right). \end{aligned} \qquad \text{Ec. (13)}$$

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

En la Tabla 1 se encuentran los parámetros para poder resolver la ecuación con valores numéricos específicos, es decir para el caso particular del MRM con el que se cuenta en el laboratorio [14].

Tabla 1. Parámetros de la parte mecánica del MRM.

Parámetro	Descripción	Valor
L	Longitud de la biela	$0.06272\ m$
R	Longitud del cigüeñal	$0.012\ m$
J	Proporción entre la longitud de la biela entre BG y BA $(0 < j < 1)$	$0.5\ uds$
H	Proporción entre la longitud del cigüeñal entre OG a OB $(0 < h < 1)$	$0.1\ uds$
m_p	Masa del pistón	$0.025\ kg$
m_b	Masa de la biela	$0.023\ kg$
m_c	Masa del cigüeñal	$0.015\ kg$
I_B	Momento de inercia de la biela	$3.0159x10^{-5}\ kg \cdot m^2$
I_C	Momento de inercia del cigüeñal	$6.6707x10^{-6}\ kg \cdot m^2$
I_V	Momento de inercia del volante	$3.0782x10^{-4}\ kg \cdot m^2$
μ_2	Fricción viscosa generalizada de la biela	$0.009\ N \cdot m \cdot s/rad$
G	Gravedad	$9.81\ m/s^2$

B) Control Neuronal de Ángulos de energización

Se utilizó una estructura de RNA tipo 3-2-1 como controlador que utiliza una función de activación sigmoide y su representación matemática es la siguiente:

$$\begin{aligned} u_{ne}(k) &= \tanh\,(Z_1 \tanh\,(w_{b1} \tanh\,(\ldots \\ &ref(k)w_{a1} + \theta) + w_{b2}\tanh\,(y(k \\ &- 1)w_{a2} + \theta)) \ldots \\ &+w_{b3} \tanh\,(u_{ne}(k-1)w_{a3} + \theta_a) \\ &+ \theta) \ldots \\ &+Z_2 \tanh(w_{c1} \tanh(ref(k)\, w_{a1} \\ &+ \theta) \ldots \\ &+w_{c2} \tanh(y(k-1)w_{a2} + \theta)) \ldots \\ &+w_{c3} \tanh(u_{ne}(k-1)w_{a3} + \theta_a) \\ &+ \theta). \end{aligned} \qquad \text{Ec. (14)}$$

El algoritmo de aprendizaje, para el controlador neuronal recurrente de la ecuación (14) se rige por la siguiente función de costo:

$$E(Z_1, Z_2, w_{a1}, w_{a2}, w_{a3}, w_{b1}, w_{b2}, w_{b3}, w_{c1}, w_{c2}, w_{c3}) = \left(\frac{1}{2}\right) e^2(k), \qquad \text{Ec.(15)}$$

Donde:

$$e(k) = ref(k) - y(k) \qquad \text{Ec.(16)}$$

Del cual, la minimización del algoritmo del gradiente descendente discreto para los pesos sinápticos queda representado de la siguiente forma:

$$Z_m(k+1) = Z_m(k) - \eta \left(\frac{\partial E}{\partial Z_m}\right), \qquad \text{Ec.(17)}$$

$$w_{ai}(k+1) = w_{ai}(k) - \eta \left(\frac{\partial E}{\partial w_{ai}}\right), \qquad \text{Ec.(18)}$$

$$w_{bi}(k+1) = w_{bi}(k) - \eta \left(\frac{\partial E}{\partial w_{bi}}\right), \qquad \text{Ec.(19)}$$

$$w_{ci}(k+1) = w_{ci}(k) - \eta \left(\frac{\partial E}{\partial w_{ci}}\right), \qquad \text{Ec.(20)}$$

Donde:

$$k = 0, 1, 2, \ldots, \quad m = 1, 2, \quad i = 1, 2, 3. \qquad \text{Ec.(21)}$$

El esquema general de la implementación de este controlador se muestra en la Figura 1:

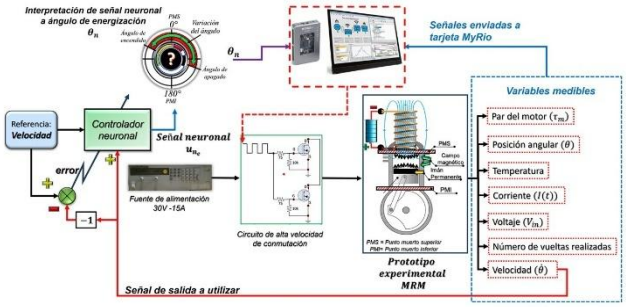


Figura 1. Esquema para el control del MRM manipulando ángulos de energización.

El problema principal es la incertidumbre de cuál tipo de control es mejor, dicha incertidumbre surge debido a la etapa temprana en la que se encuentra el área de investigación de los MRM. Ya que, al manipular los ángulos y tener la fuente de voltaje constante y a máxima capacidad se considera que ocurre un desperdicio de energía que influye directamente en el porcentaje de eficiencia del MRM.

C) Alternativa de solución (Control de corriente)

A diferencia de las pruebas realizadas con el controlador neuronal donde la fuente de voltaje y el electroimán se

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

encuentran conectadas de forma directa y se manipulan los ángulos de energización. Lo que se plantea ahora es lo opuesto, es decir primeramente que los ángulos sean fijos y seguidamente manipular el voltaje que entra a el electroimán para indirectamente manipular la corriente, ya que la velocidad en el MRM depende del ángulo de energización y de la corriente en el electroimán.

El propósito de manipular el voltaje es prevenir que el sistema funcione constantemente a su máxima potencia, asegurando que se logren las mismas velocidades que con el control de ángulos. Esto conlleva la optimización del voltaje para alcanzar un balance entre el rendimiento y la eficiencia energética. Al no requerir que el sistema opere continuamente a su máxima capacidad, surge la oportunidad de incrementar un poco la eficiencia energética sin afectar el rendimiento. Para realizar una comparativa es necesario implementar ambos esquemas de control en el prototipo experimental.

Al simplificar el circuito Resistor-Electroimán como un circuito RL de primer orden y de la consideración de que el valor de Resistencia total del circuito es la suma de la resistencia del resistor y
la resistencia interna del solenoide, la corriente $i(t)$ en el electroimán para la fase de carga es:

$$i(t) = \left(\frac{V_{in}}{R}\right)\left(1 - e^{-\frac{R}{L}t}\right); \qquad \text{Ec.(22)}$$
$$R = R_{resistor} + R_{solenoide}.$$

Donde:

- $i(t)$: Corriente en funcion del tiempo
- V_{in}: Voltaje de entrada
- R: Resistencia total (2.5Ω)
- $R_{resistor}$:Resistencia del resistor (1.2Ω 300W)
- $R_{solenoide}$: Resistencia del solenoide (1.3Ω)
- L: Inductancia (31mH)
- t: Tiempo

Al modificar el voltaje que entra en el electroimán estamos indirectamente modificando la corriente que circula por él. Y esta variación en el valor de corriente influye a su vez en el valor de la Fuerza del campo magnético generado. Esta relación podemos observarla en la siguiente ecuación [15]:

$$\vec{B} = \frac{(\mu_0 N_t I)}{\ell_E}\vec{a}_z \qquad \text{Ec.(23)}$$

Donde:

- $\vec{B}$: Campo magnético
- μ_0: Permeabilidad magnética en el vacío ($4\pi * 10^{-7} H/m$)
- N_t: Numero de vueltas (714)
- I: Corriente eléctrica
- ℓ_E: Longitud del solenoide (0.09m)
- $\vec{a}_z$: Vector unitario en la dirección z

Por esta razón se propone el uso de un convertidor Buck el cual permitirá tener un voltaje variable y continuo en la entrada del circuito de conmutación, el esquema de control propuesto se muestra de forma detallada en la Figura 2, en la cual observamos $V_o(1)$ el cual será el V_{in} de la ecuación (22).

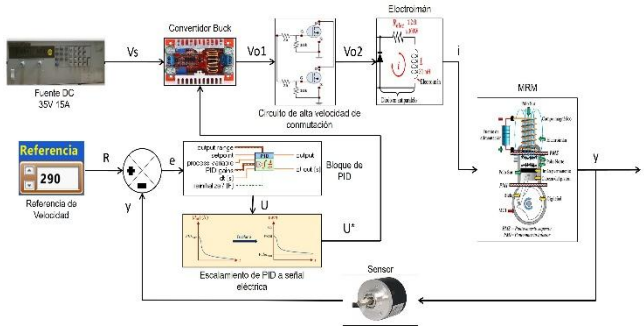


Figura 2. Propuesta de solución para el control del MRM manipulando la corriente.

Debido a que el sistema completo es altamente no lineal se realizó una sintonización de ganancias de forma heurística, y como se observa en la sección de resultados se encontraron ganancias las cuales permiten un buen control de la velocidad el MRM en un rango de operación aceptable.

D) Pruebas del controlador neuronal en el prototipo

Condiciones de inicio de pruebas para el controlador:

- Encendido de actuador:45° (315°) antes del PMS.
- Apagado de actuador:120° después del PMS
- Pesos sinápticos iniciales: Aleatorios en un rango de [-1,1].
- Umbrales:$\theta_a = 0.5$ y $\theta = 0$.
- Velocidad de convergencia: $\eta = 0.0028962$.
- Media de muestreo (Tarjeta myRIO):0.56628ms

-Control neuronal con entrada tipo rampa

En esta prueba se arranca el motor en lazo abierto y al llegar a una velocidad de 350 RPM se activa el controlador neuronal y se activa la rampa para llegar a las 620 RPM. Se observa en la Figura 3 que de 300 a 400 segundos no logra seguir la referencia debido a que el controlador tarda en poder salir del cálculo del ángulo cero, esto se observa en la Figura 4, y debido a ese retraso en el cálculo ocurre ese efecto de desfasamiento del segundo 300 a 400.

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

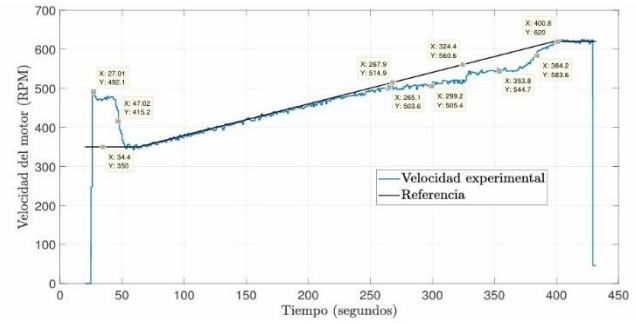


Figura 3. Comportamiento de velocidad con entrada rampa.

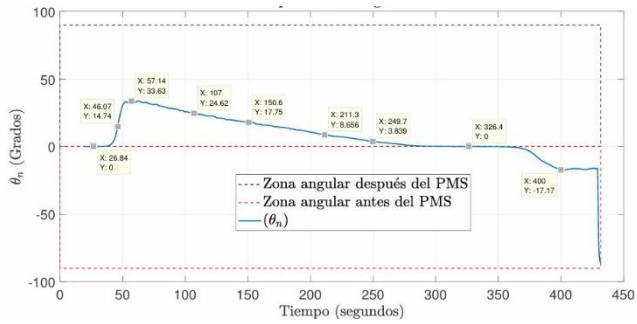


Figura 4. Comportamiento de la ley de control (Ángulos) con entrada rampa.

-Control neuronal con entradas tipo escalón

En la Figura 5 se observa que se arranca el motor en lazo cerrado con una referencia inicial de 600 RPM. Después se realiza un cambio a 400 RPM y en la en la Figura 6 se observa que nuevamente al controlador le toma un poco más de tiempo salir del cálculo del ángulo cero, sin embargo, en los siguientes cambios el controlador es veloz.

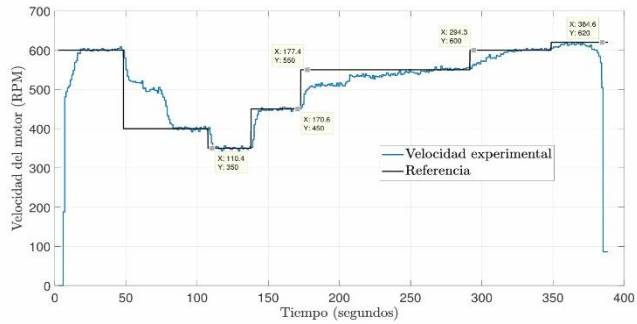


Figura 5. Comportamiento de velocidad con entrada escalón.

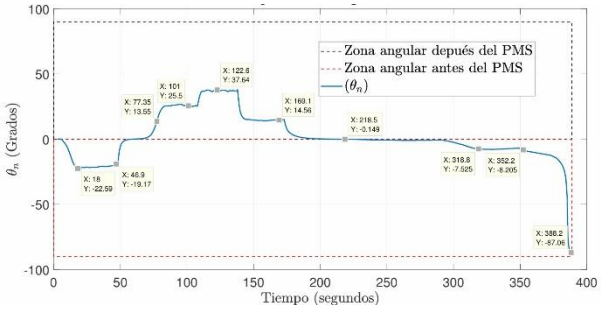


Figura 6. Comportamiento de la ley de control (Ángulos) con entrada escalón.

E) Pruebas del controlador PID en el modelo

Condiciones de inicio de pruebas para el controlador:

- Encendido de actuador: PMS_{on}= 324.95°.
- Apagado de actuador: PMS_{off}= 90°.
- Angulo de energización: 5°.
- Umbrales:$\theta_a = 0.5$ y $\theta = 0$.
- Ganancias del controlador PID:
- - P= 0.06.
- - I= 0.1.
- - D= 0.0001.
- Filtro derivativo: N=100.
- Voltaje de salida del Buck: 0 a 30V.
- Frecuencia de operación del Buck: 50kHz.
- Fixed-step size en Simulink: $1 * 10^{-6}$.

-Control PID con entrada tipo escalón

En la Figura 7 se observa que se arranca el motor en lazo cerrado con una referencia de 500 RPM y se observa que el tiempo de establecimiento es bastante rápido.

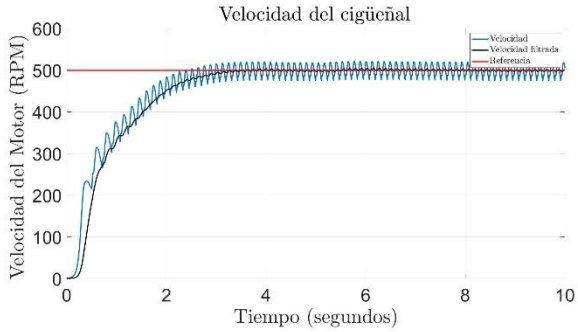


Figura 7. Comportamiento de velocidad con entrada escalón.

En la Figura 8 se observa el voltaje de salida en el Buck, se aprecia así por el Fixed-step size ya que se requeriría un valor aún más pequeño para apreciar de mejor forma la señal, sin embargo, esto no es posible por el límite del equipo computacional con el que se cuenta.

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

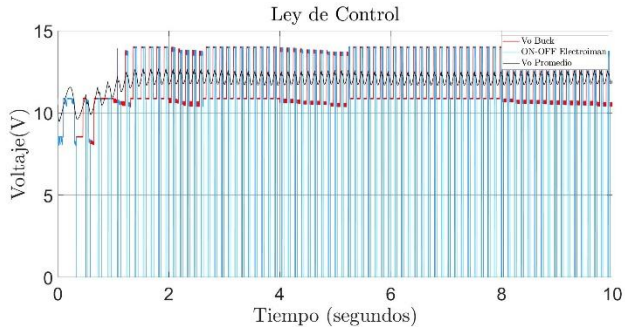


Figura 8. Comportamiento de la ley de control (Voltaje) con entrada escalón.

-Control PID con entrada tipo rampa

En la Figura 9 se observa que se arranca el motor en lazo abierto dejando pasar directo 30V al electroimán para llegar a las 820 RPM, posteriormente se activa la rampa para llegar a una referencia de 500 RPM. De forma simultánea en la Figura 10 se observa que al iniciar la rampa ahora el voltaje que pasa al electroimán va cambiando su valor.
Para esta prueba las ganancias del controlador PID cambiaron por las siguientes:

- P= 0.2.
- I= 0.15.
- D= 0.0001.

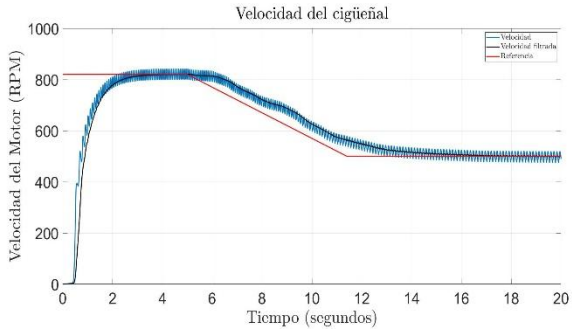


Figura 9. Comportamiento de velocidad con entrada rampa.

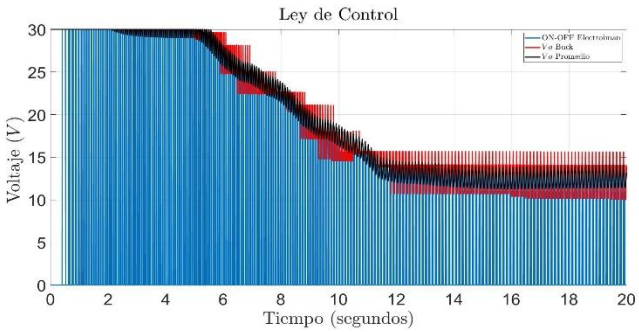


Figura 10. Comportamiento de la ley de control (Voltaje) con entrada rampa.

DISCUSIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Ambos tipos de control demostraron la capacidad de llevar al motor reciprocante magnético (MRM) a la velocidad deseada. Sin embargo, el control neuronal basado en ángulos de energización presentó desventajas significativas. Una de ellas es la baja eficiencia energética (3.58%) observada al relacionar la potencia mecánica con la potencia eléctrica, debido a que la fuente de voltaje se mantiene siempre a su máxima capacidad (30V), lo cual incrementa la potencia eléctrica. Adicionalmente, el controlador neuronal muestra dificultades al pasar por el ángulo 0°, lo que se traduce en un período en el que la velocidad del MRM tiene problemas para seguir la referencia. Esto se evidencia en las Figuras 3 y 5, que coinciden con el cruce por el ángulo 0° mostrado en las Figuras 4 y 6.

Por otro lado, el controlador PID, implementado en el modelo, pero no en el prototipo, no permite realizar una comparación directa de eficiencia energética. No obstante, es razonable suponer que, al alcanzar las mismas velocidades con un voltaje de entrada menor al electroimán, podría lograrse un mayor porcentaje de eficiencia. En las Figuras 8 y 10 se aprecia que el voltaje de entrada al electroimán puede ser menor a 30V y, aun así, se alcanzan las mismas velocidades, como se muestra en las Figuras 7 y 9. A pesar de esto, el PID muestra limitaciones fuera de la región de operación para la cual fueron optimizadas las ganancias, lo que afecta su comportamiento general.

Es importante señalar que, para el PID, fue necesario utilizar diferentes ganancias dependiendo de la entrada (escalón o rampa). Las ganancias ajustadas para una respuesta escalón no se comportaron adecuadamente ante una entrada tipo rampa, lo que obligó a determinar nuevos valores heurísticamente. En este aspecto, el controlador neuronal basado en ángulos tiene una ventaja, ya que puede manejar ambos tipos de entrada, aunque con algunas dificultades en su comportamiento.

Finalmente, al comparar los controladores, se observa que el PID de corriente presenta una mejor respuesta ante entradas tipo escalón, mientras que el controlador neuronal basado en ángulos muestra un mejor desempeño con entradas tipo rampa.

CONCLUSIONES

Ante un sistema no lineal y complejo como el motor reciprocante magnético (MRM), el control neuronal basado en los ángulos de energización ha demostrado ser efectivo para regular la velocidad. Sin embargo, presenta dificultades en el cálculo cuando los ángulos se acercan a los 0°, lo que limita su desempeño en ciertos puntos de operación.

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

Por otro lado, el control PID aplicado a la corriente muestra un buen desempeño en la regulación de la velocidad. Sin embargo, al tratarse de un controlador lineal aplicado a un sistema inherentemente no lineal, su rango de operación se ve más restringido en comparación con el control neuronal basado en ángulos de energización. A partir de estas observaciones, se plantea que un controlador más robusto, como un controlador neuronal de corriente o un PID neuronal, podría superar las limitaciones del PID lineal y ofrecer un rendimiento superior frente al control neuronal de ángulos de energización.

Finalmente, es importante destacar que el control de corriente podría ofrecer beneficios adicionales, como una mejora en la eficiencia energética del sistema, en comparación con los porcentajes obtenidos mediante el control de ángulos de energización. Este aspecto resulta especialmente relevante en el contexto de la optimización de recursos y el desarrollo de tecnologías más sostenibles.

BIBLIOGRAFÍA

[1] N. Khoa and O. Lim, "A review of the external and internal residual exhaust gas in the internal combustion engine," Energies, 2022.

[2] J. G. Morales, M. C. Bobadilla, R. F. Escobar-Jiménez, J. F. Gómez-Aguilar, C. D. García-Beltrán, and V. H. Olivares-Peregrino, "Control scheme formulation for the production of hydrogen on demand to feed an internal combustion engine," Sustainability, vol. 9, no. 1, 2017. [Online]. Available: https://www.mdpi.com/2071-1050/9/1/7.

[3] M. Assad, I. Kucharchuk, O. Penyazkov, A. Rusetskii, and A. Chornyi, "Influence of ethanol on the operating parameters of an internal-combustion engine," Journal of Engineering Physics and Thermophysics, vol. 84, pp. 1311–1317, 2011.

[4] . Conklin and J. Szybist, "A highly efficient six-stroke internal combustion engine cycle with water injection for in-cylinder exhaust heat recovery," Energy, vol. 35, pp. 1658–1664, 2010.

[5] C. Rios-Enriquez, M. Adam-Medina, J. García-Morales,G. V. Guerrero-Ramírez, and M. Cervantes-Bobadilla, "Modeling and simulation of a magnetic reciprocating engine," IEEE Access, 2024.

[6] P. Hota, M. Rathore, and D. Shaikh, "Magnetic repulsion piston engine," International Journal of Science and Research, vol. 4, no. 12, pp. 338–344, 2015.

[7] T. Quazi, C. Mhatre, S. Khanolkar, P. Patil, and S. Pawar, "A review on internal combustion engines," 2018.

[8] R. Rajamani, R. Rajamani, R. Rajamani, and R. Rajamani, "Pid control," 2014. [Online]. Available: https://api.semanticscholar.org/CorpusID:28010986

[9] M. Hagan, H. Demuth, and O. Jesus, "An introduction to the use of neural networks in control systems," International Journal of Robust and Nonlinear Control, vol. 12, 2002.

[10] S. Jin and X. Wang, "Rotating electromagnetic actuator with magnetic fluid," Journal of Physics: Conference Series, vol. 2183, 2022.

[11] A. Gutiérrez-Giles, "Dinámica parte i: Método de euler-lagrange," Notas de curso, Robótica Industrial, Departamento de Control, Facultad de Ingeniería-UNAM, 2020.

[12] K. Ogata, Ingeniería de control moderna, 3rd ed. México: Prentice Hall, 1997.

[13] J. R. Moreno Cruz, "Control neuronal con término integral para sistemas no lineales con oscilaciones," Master's thesis, Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del IPN, Departamento de Control Automático, 2012, tesis (MC).

[14] Ríos Enríquez, C. (2024). Modelado y control de un motor reciprocante magnético [Tesis doctoral, Tecnológico Nacional de México - Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico].

[15] Yang, Z., Song, J., Cai, W., Lu, G., & Zhang, Z. (2021). Analysis of the influence of a solenoid magnetic field in the azimuth transmission system. *Scientific Reports*, *11*(1), 16242.

AUTORIZACIÓN Y RENUNCIA.

Los autores del presente artículo autorizan al TecNM/Instituto Tecnológico de Zacatepec para publicar el escrito en el libro electrónico del CITID 2025. El TecNM/ITZ o los editores no son responsables ni por el contenido ni por las implicaciones de lo que está expresado en el escrito.

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

CITID 2025 ISSN: 2992-8516

CARACTERIZACIÓN FISICOQUÍMICA, TÉRMICA, FUNCIONAL Y ESTRUCTURAL DE ALMIDÓN AMARANTO (*Amaranthus hypochondriacus)* AISLADO POR DIFERENTES MÉTODOS DE EXTRACCIÓN

Ramírez Meneses Maribel [1], Hernández Uribe Juan Pablo [2], Vargas Torres Apolonio [3], Palma-Rodríguez Heidi María. [4], Navarro Cortez Ricardo Omar [5].

[1]Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Instituto de Ciencias Agropecuarias, Área Académica de Ingeniería Agroindustrial e Ingeniería en Alimentos, Av. Universidad No. 133 Col. San Miguel Huatengo CP43775, Santiago Tulantepec Hidalgo México ra124830@uaeh.edu.mx, juan_hernandez8391@uaeh.edu.mx, apolonio@uaeh.edu.mx, heidi_palma9528@uaeh.edu.mx, ricardo_navarro@uaeh.edu.mx.

Resumen.- El almidón es un polisacárido de relevancia dentro de la industria por su alta disponibilidad y versatilidad en diversas aplicaciones tecnológicas, especialmente en la industria alimentaria, donde se emplea como agente emulsionante, espesante, y estabilizante. El objetivo del presente trabajo de investigación fue caracterizar almidón aislado de granos de amaranto mediante un método acuoso y dos procedimientos alternativos utilizando NaOH. El aislamiento de almidón se realizó mediante molienda húmeda utilizando una relación 1:5 p/v. A los almidones de amaranto obtenidos por diferentes métodos se les determinó su composición química, fisicoquímica, térmica, morfológica y estructural. Los resultados mostraron variaciones en el análisis proximal entre los aislamientos realizados con agua y las soluciones de NaOH. Los resultados obtenidos mostraron que el uso de NaOH favorece una mayor pureza en el almidón. Los almidones aislados no mostraron cambios en su estructura, mostrando patrones de difracción tipo A y temperaturas de gelatinización entre 70.4°C y 75.7°C.

Palabras Clave: Amaranto, Almidón, Difracción de Rayos X, Calorimetría Diferencial de Barrido, Análisis Rápido de Viscosidad.

Abstract.- Starch is a polysaccharide of relevance within the industry due to its high availability and versatility in various technological applications, especially in the food industry, where it is used as an emulsifying, thickening, and stabilizing agent. The objective of this research work was to characterize starch isolated from amaranth grains using an aqueous method and two alternative procedures using sodium hydroxide. Starch isolation was performed by wet milling using a 1:5 w/v ratio. The chemical, physicochemical, thermal, morphological, and structural composition of amaranth starches obtained by different methods was determined. The results showed variations in the proximate analysis between the isolations performed with water and NaOH solutions. The results obtained showed that the use of NaOH favors greater purity in starch. The isolated starches did not show changes in their structure, showing type A diffraction patterns and gelatinization temperatures between 70.4°C and 75.7°C.

Key words: Amaranth, Starch, X-Ray Diffraction, Differential Scanning Calorimetry, Rapid Viscosity Analysis.

INTRODUCCIÓN

El almidón es el polisacárido de reserva más abundante en las plantas, libre de propiedades alergénicas. Su alta versatilidad lo convierte en un aditivo de gran utilidad en la industria alimentaria, donde se clasifica como seguro (GRAS). Además, su bajo costo de producción y su disponibilidad en fuentes vegetales lo hacen una opción eficiente y funcional en diversas aplicaciones tecnológicas dentro de la formulación de productos alimentarios [1]. Es esencial subrayar que el almidón demuestra una considerable resistencia frente a enzimas y ácidos generados por el sistema digestivo humano. Este biopolímero presenta uniformidad en su forma y tamaño, baja percepción de sabor y color; posee una excelente capacidad emulsionante y es un material biodegradable. Además, destaca por su baja higroscopicidad y un costo relativamente bajo en comparación con otros materiales. El almidón se puede obtener de diversas fuentes vegetales y su proceso de aislamiento resulta ser económicamente accesible [2].

Existen fuentes convencionales de almidón, como el maíz y la papa, pero otras fuentes con propiedades mejoradas están ganando relevancia, debido a su capacidad para optimizar los procesos tecnológicos y operativos en la industria. La incorporación de almidones de fuentes no convencionales podría resultar en una significativa disminución de los costos asociados a las materias primas en los procesos industriales [3]. Sin embargo, la información sobre características funcionales y aplicaciones específicas de fuentes no convencionales de almidón es escasa. Por tanto, es necesario realizar trabajos de investigación que permitan obtener datos sobre parámetros estructurales, físicos y reológicos para incrementar la competitividad y viabilidad de estas fuentes alternativas en el mercado global. El amaranto se caracteriza por poseer un almidón particular, con un bajo contenido de amilosa, lo que contribuye a sus propiedades funcionales, además de poseer un notable perfil nutricional [4].

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

DESARROLLO

Aislamiento de Almidón.

Para la obtención de almidón se emplearon tres tratamientos con diferentes soluciones: agua; NaOH en dos concentraciones distintas; el primer método se elaboró de acuerdo con la metodología de Lindeboom *et al* [5], con algunas modificaciones; se lavaron las semillas de amaranto, luego fueron sumergidas durante una hora 200 g de amaranto en un volumen de 1 litro de agua destilada después se molió la mezcla durante 2 min en una licuadora (Oster modelo bpst02-b, México). A continuación, se dejó en refrigeración (3ºC) durante 24 h. En el segundo tratamiento se empleó el método de Kong [6] con algunas modificaciones de Zuo *et al* [7]; El grano de amaranto fue secado en un horno a 40 °C durante 48 h y se molió hasta convertirse en harina utilizando una licuadora. Posteriormente esta harina se sumergió en una solución acuosa de NaOH 0.1 M y se mantuvo a 4 °C durante 24 h. En el tercer tratamiento se usó una solución NaOH 0.25 M se realizó de acuerdo con el método descrito por Choi *et al*. con algunas modificaciones. El grano de amaranto se sumergió en una solución acuosa de NaOH al 0.25 M durante 24 h a temperatura ambiente. Se agitó tres veces el grano de amaranto con NaOH y se licuó durante 2 min.

En los tres tratamientos los homogenizados fueron tamizados consecutivamente en una malla 100 U.S MESH, 200 U.S MESH y 325 U.S MESH hasta que el agua del lavado fue clara. por último, fueron centrifugados a 3500 rpm por 20 min, además en todos se descartó el sobrenadante y se eliminó la capa superior de proteína amarilla. La capa inferior de almidón se resuspendio en agua destilada y se centrifugó como se indicó anteriormente, y este procedimiento se repitió. Finalmente fueron deshidratados en un horno a 40 °C durante 24 horas y se molieron. Posteriormente, se filtraron a través de una malla 100 U.S. MESH y se almacenaron a temperatura ambiente en un recipiente de plástico hermético para su posterior uso.

Para efectos de este resumen se usará la siguiente nomenclatura para especificar los tratamientos: T1 para el almidón aislado con agua, T2 y T3 aislado con una solución de NaOH 0.1 M y 0.25 M respectivamente.

Contenido de almidón total

La determinación de almidón total se realizó de acuerdo al método AOAC (996.11) y método AACC (76.13.01) mediante un kit enzimático (número de catalogo K-TSTA-100 A, marca Megazyme International Ireland). Se colocaron en tubos de vidrio con tapa 100 mg de almidón (peso seco), posteriormente se adicionaron 0.2 mL de etanol al 80%y 2 mL de KOH 2 M, la suspensión se mantuvo en agitación durante 20 minutos, después se añadieron 8 mL de acetato de sodio (pH 3.8), 0.1 mL de alfa amilasa y 0.1 mL de aminoglucosidasa, la mezcla se colocó en baño María a 50 º C durante 30 minutos. La mezcla se transfirió a un matraz aforado de 100 mL, el aforó se realizó con agua destilada, se tomó una alícuota de 10 mL y posteriormente se centrifugó a 1800 *g* por 10 minutos. Se transfirió 0.1 mL del sobrenadante en un tubo de ensayo y se agregó 3 mL de reactivo de glucosa oxidasa/peroxidasa (GOPOD) a cada tubo (incluyendo controles de glucosa y blanco) y se incubó durante 20 min a 50ºC.

Para control de glucosa 0.1 mL de D-glucosa 3 mL GOPOD y para el blanco se añadió 0.1 mL de agua destilada y 3 mL de GOPOD, y se incubó a 50 ºC por 20 minutos respectivamente. Las absorbancias se leyeron a una longitud de onda de 510 nm.

Contenido de amilosa aparente.

Se cuantificó mediante el método de Hoover y Ratnayake, donde se disolvieron 20 mg de almidón en 8 mL de dimetilsulfóxido al 90%, la suspensión se agitó por 20 minutos, transcurrido el tiempo de agitación los tubos se calentaron a 85 ºC por 15 minutos con agitación intermitente, los tubos se dejaron enfriar a temperatura ambiente. Se tomaron 0.5 mL de la solución anterior y se transfirió a un matraz aforado de 25 mL, donde se adicionó 20 mL de agua destilada y 2.5 mL de una solución de yodo, se aforó y se dejó en reposo 15 min a temperatura ambiente antes de leer la absorbancia a 600 nm en un espectrofotómetro [8].

Análisis Químico Proximal.

El análisis químico proximal se llevó a cabo de acuerdo con lo establecido en manual de la Asociación Americana de Químicos de Cereales (AACC 1999-2000).

Humedad (método 44.40.01)

Se determinó de acuerdo con la metodología de AACC 2000, donde se colocó 1 g de muestra en un crisol de porcelana previamente llevado a peso constante, posteriormente la muestra se colocó en una estufa de secado a 100 °C por un tiempo de 24 horas, por triplicado. El porcentaje de humedad se determinó utilizando la siguiente ecuación.

$$Humedad\ (\%) = \frac{Cm - Cms}{m} x100 \qquad \text{(Ec. 1)}$$

Donde:
Cm = masa de la capsula con la muestra húmeda (g)
Cms = masa de la capsula con muestra seca (g)
M = masa de la muestra (g)

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

Cenizas (método 44.40.01)

Se realizó de acuerdo con la metodología de AACC 2000, donde se colocó 1 g de muestra, en crisoles de porcelana a peso constante y se calcinaron en una mufla a una temperatura de 500 °C durante 12 horas, al final el material se dejó enfriar a temperatura ambiente.
La determinación del contenido de cenizas se determinó utilizando la siguiente ecuación:

$$Cenizas\ (\%) = \frac{Cc-C}{m} x100 \qquad \text{(Ec. 2)}$$

Donde:
Cc = masa del crisol con cenizas (g)
C = masa del crisol seco (g)
m = masa de la muestra (g)

Proteína (método 46.12)

La determinación se realizó mediante el método de la AOAC 2000, el cual está basado en la combustión húmeda de la muestra, calentándola con ácido sulfúrico en presencia de catalizadores metálicos para efectuar la reducción de nitrógeno orgánico de la muestra a amoniaco, el cual fue retenido en solución como sulfato de amonio.
El porcentaje total de nitrógeno se calculó convirtiendo nitrógeno total a contenido de proteína. Se realizó por triplicado.

$$N\ (\%) = \frac{(V1-V2)(N)(0.014)}{PM} x100 \text{ (Ec. 3)}$$

Donde:
V1: mL H_2SO_4 gastados en la titulación.
V2: mL blanco de H_2SO_4 gastado.
N: Normalidad del H_2SO_4
PM: Peso en la muestra en g

Para determinar el contenido proteico de la muestra se utilizó como factor de corrección 6.25 en la siguiente ecuación:

$$Proteína(\%) = (\%N)(6.25) \text{ (Ec. 4)}$$

Caracterización Fisicoquímica.
Índice de solubilidad y poder de hinchamiento

En un tubo de ensaye se colocaron 100 mg almidón y se suspendieron en 10 mL de agua destilada. La suspensión se colocó en un agitador de vórtice durante 10s y posteriormente durante 30 minutos a baño de agua a 55ºC, 65ºC, 75ºC, 85ºC, 95ºC, mezclando en agitador de vórtice cada 2 min. Los tubos se enfriaron a temperatura ambiente, posteriormente se colocaron en un baño de agua helada y centrifugaron a 2000 *g* durante 30 minutos, el sobrenadante se elimina. La capa sólida turbia se consideró como sobrenadante y el material adherido a la pared del tubo se consideró sedimento [9].

El sobrenadante se colocó en una cápsula de aluminio previamente llevada a peso constante y se colocó en un horno a 100 ºC hasta sequedad. Para el cálculo de solubilidad y poder de hinchamiento se utilizaron las siguientes ecuaciones.

$$Solubilidad = \frac{Peso\ sobrenadante}{Peso\ seco\ almidón}\ x\ 100 \qquad \text{(Ec.5)}$$

$$Hinchamiento = \frac{Peso\ sedimento}{Peso\ seco\ almidón} \qquad \text{(Ec. 6)}$$

Análisis Rápido de Viscosidad.

El perfil de viscosidad de los almidones aislados se analizó mediante la metodología propuesta por Hernández-Uribe, utilizando un Analizador Rápido de Viscosidad, donde se colocó la muestra (3 g de almidón) previamente deshidratada en un bote de aluminio, se le adicionaron 25 mL de agua destilada, se agitó por 20 s a 960 rpm con una propela. La rampa de calentamiento-enfriamiento utilizada fue la siguiente, las muestras se mantuvieron a 50 ºC por 2 min, posteriormente se incrementó la temperatura de 50 ºC a 95 ºC a una velocidad de calentamiento de 5.6 º C/min, la muestra se mantuvo a 95°C por 3 min, posteriormente se enfrió de 95 a 50°C y se mantuvo a 50°C por 3 min., la velocidad de agitación de la muestra durante la prueba se conservó constante a 160 rpm [10].

Caracterización Morfológica.
Microscopia electrónica de barrido

Las micrografías se obtuvieron en microscopio electrónico de barrido (LEO Electron Microscopy, Oberkochen, Germany). La muestra de almidón se colocó sobre una cinta conductora de cobre de doble cara, la cual se fijó previamente en un porta-muestra de aluminio. La muestra se cubrió con una capa de carbón de 30 nm, posteriormente se colocó en un ionizador de metales para recubrirse con una capa de oro [11]. Las muestras se observaron a 3000X.

Tamaño de partícula

El tamaño de partícula del almidón de amaranto se realizó por análisis de difracción de rayos láser (Mastersizer 2000. Malvern Instruments Ltd., UK). Las mediciones se realizaron por triplicado a temperatura ambiente. La determinación de tamaño de partícula se expresó como diámetro mediano D [V, 0.5]

Caracterización Térmica.
Calorimetría Diferencial de Barrido

Para determinar la temperatura de gelatinización de los almidones se utilizó un Calorímetro Diferencial de

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

Barrido (Q2000, Waters TA instrument). Se pesaron 2 mg de almidón en un capsula de aluminio y se añadieron 6 µl de agua destilada. La cápsula con la muestra y el agua se sellaron herméticamente y se dejaron equilibrar a temperatura ambiente durante 1 h, posteriormente la muestra se calentó de 30 a 120 ºC a una velocidad de calentamiento de 10 ºC/min, se utilizó una capsula vacía como referencia [12].

Caracterización Estructural.
Difracción de rayos x

Los patrones de difracción de rayos X de los almidones nativos de amaranto fueron obtenidos en un difractómetro Bruker (modelo D2 PHASER, Alemania.)[13]. Las condiciones de operación fueron 27 mV y 50 KV. El barrido de la muestra se realizó de 5º a 32 º en un ángulo 2θ.

El porcentaje de cristalinidad se calculó utilizando la siguiente ecuación:

$$C\ (\%) = \frac{Ac}{Ac+Aa} x100 \qquad \text{(Ec. 7)}$$

C: Grado de cristalinidad
Ac: Área cristalina
Aa: Área amorfa

Para calcular el área bajo la curva de la zona cristalina y amorfa se utilizó el software *Origin Pro 2024b*.

DISCUSIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Almidón total

El aislamiento de almidón amaranto presenta varios inconvenientes, por un lado, la sedimentación conjunta de proteínas y fibras muy finas junto con el almidón; y, por otro lado, el tamaño pequeño de sus gránulos provocando pérdidas importantes [14]. Después de aislar y deshidratar el almidón, se obtuvieron polvos con una pureza menor al 100%, como se muestra en la tabla 1; la pureza de un almidón está relacionada con la eficiencia en el proceso de purificación; los almidones obtenidos con hidróxido de sodio presentaron mayor pureza en comparación con el que se obtuvo con agua. Se ha reportado que, las soluciones alcalinas modifican la estructura química y la solubilidad de las proteínas, lípidos y fibras que acompañan al almidón por lo tanto es mayor la pureza.[15].

Tabla 1. Contenido de almidón.

Tratamiento	Almidón total (%)
T1	~69.7± 9.8 [b]
T2	88.5 ± 1.9 [a]
T3	90.4 ± 1.1 [a]

Las pruebas se realizaron por triplicado.
Valores en la fila y con diferente letra son significativamente diferentes (p <0.05)

Contenido de amilosa.

El contenido de amilosa nos permite clasificar los almidones como cerosos (<15% de amilosa) normales (20-35% de amilosa) y altos en amilosa (>40% de amilosa) [16]. El almidón de amaranto posee un contenido de amilosa proporcional al de otros pseudocereales, pero menor contenido de amilosa en comparación con los cereales verdaderos [17].

Los distintos procedimientos de aislamiento, los métodos analíticos que determinan la amilosa y la actividad de las enzimas involucradas en la biosíntesis del almidón pueden ser responsable de la variación [18]. En la tabla 2, se observa que el almidón conseguido con agua presenta un menor contenido de amilosa esto puede estar relacionado a que el agua permite que la amilosa quede contenida dentro de la estructura del gránulo, por eso el almidón en su forma nativa no solubiliza suficiente amilosa y en el caso de la solución de alcalina provoca cambios en las interacciones dentro de la estructura cristalina del gránulo, lo que permite que la amilosa se libere más fácilmente [19], [20].

Tabla 2. Contenido de amilosa.

Tratamiento	Amilosa (%)
T1	8.6 ± 0.4 [b]
T2	12.0 ± 0.6 [a]
T3	13.4 ± 1.1 [a]

Las pruebas se realizaron por triplicado.
Valores en la fila y con diferente letra son significativamente diferentes (p <0.05)

Análisis Proximal

Los resultados del contenido de cenizas, humedad y proteínas se presentan en la tabla 3, donde se encuentran diferencias significativas en el contenido de proteína, siendo el almidón obtenido con agua el que presenta más proteína. Las proteínas que se encuentran en la superficie de la granulo de almidón son difíciles de remover [21], sin embargo, el NaOH es un álcali que altera la estructura de las proteínas cambiando su solubilidad y su carga, favoreciendo la extracción de estas; por lo tanto, al dispersarse se ve afectado el contenido proteico [22]

Tabla 3. Análisis proximal.

Tratamiento	Cenizas	Humedad	Proteínas
T1	1.4 ± 0.029 [c]	9.2 ± 0.185 [a]	6.8 ± 0.238 [a]
T2	2.1 ± 0.001 [a]	8.8 ± 0.244 [ab]	0.2 ± 0.035 [c]
T3	1.5 ± 0.029 [b]	8.5 ± 0.235 [b]	0.8 ± 0.091 [b]

Las pruebas se realizaron por triplicado. Valores en la columna y con diferente letra son significativamente diferentes (p <0.05)

Caracterización Fisicoquímica.

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

Índice de solubilidad y poder de hinchamiento

En la figura 1 se muestra el poder de hinchamiento se observa que los gránulos de almidón de amaranto aislado por los diferentes métodos absorben agua y se expanden a partir de los 75º C.

En la figura 2. Se muestra que el granulo empieza a dispersarse a partir de los 85 ºC muy similar a lo reportado con algunos autores [12].

El almidón aislado con NaOH al 0.25 M presenta una mayor solubilidad, esto puede estar asociado con la pureza de este almidón.

Cuando las moléculas de almidón se exponen a temperaturas elevadas en presencia de agua, la estructura cristalina se modifica, lo que permite que las moléculas de agua se unan mediante puentes de hidrógeno a los grupos hidroxilo de la amilosa y la amilopectina. Este proceso resulta en un aumento en el tamaño y solubilidad de los gránulos de almidón. [18].

La forma y la estructura del almidón de amaranto es importante para el hinchamiento y la solubilidad [23]. El aumento de la solubilidad a temperaturas más altas está asociado con la lixiviación de las cadenas de amilosa.

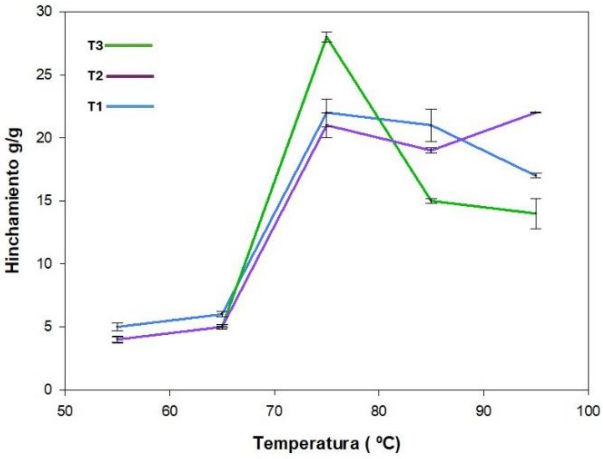


Figura 1. Poder de hinchamiento del almidón de amaranto a diferentes temperaturas

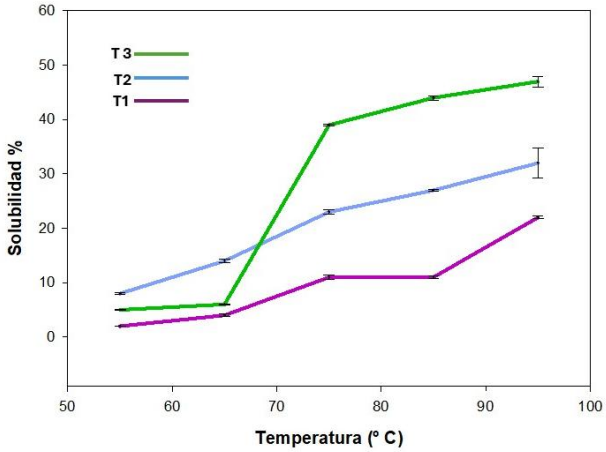


Figura 2. Índice de solubilidad del almidón de amaranto a diferentes temperaturas

Análisis Rápido de Viscosidad

En la figura 3 se muestra los valores de viscosidad para los almidones aislados con NaOH fueron 3.42 y 3.37 pascales en la concentración de 0.25 y 0.1 M respectivamente, en comparación con el almidón que se aisló con agua fue de 1.5 pascal; una disminución en los valores de viscosidad, sugiere que el alto contenido proteico en el almidón aislado con agua disminuye la viscosidad debido a que las proteínas restringen la disponibilidad de agua para los gránulos de almidón y el proceso de gelatinización se ve obstaculizado, mientras que la interacción almidón-proteína refuerza la retrogradación del almidón [24], [25].

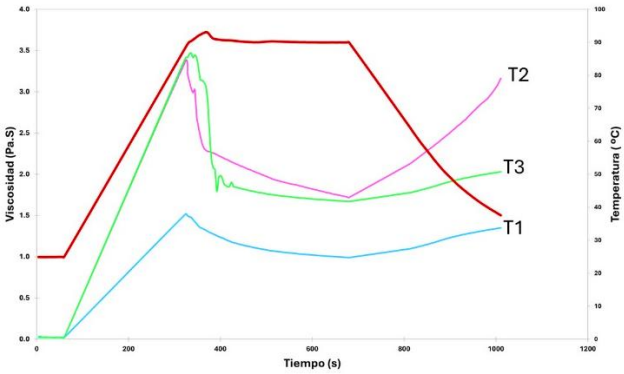


Figura 3. Viscoamilograma de almidón nativo de amaranto.

Caracterización Morfológica.
Microscopia electrónica de barrido

Las micrografías obtenidas de los diferentes almidones se muestran en la figura 9, en estas se pueden observar que los gránulos de almidón de amaranto presentan una forma poligonal muy similar a un racimo de uvas, como lo

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

reportado con diversos autores [4], [7], [14], [17], [26], [27], [28], [29].

El procedimiento de aislamiento no modificó la estructura de los gránulos, ya que no se evidencian poros o alguna alteración. Además, se distingue que el aislamiento realizado con agua da lugar a la formación de aglomerados, en contraste con las realizadas con NaOH, que muestran una distribución más homogénea y dispersa de las partículas.

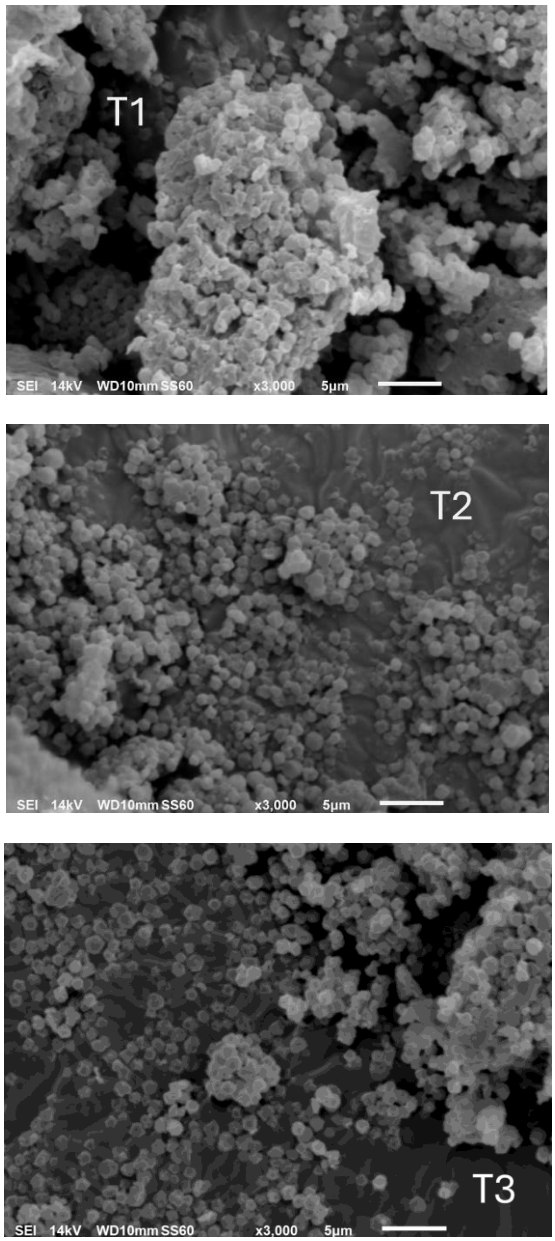


Figura 4. Micrografías de los gránulos de almidón nativo de amaranto.

Tamaño de partícula

En términos de distribución del tamaño de partícula en la figura 5 se muestra que los almidones aislados con diferentes métodos de aislamiento presentaron un D [v,0.5] de 2.567, 1.012 y 1.049µm respectivamente; estos dos últimos son similares a lo reportado en la literatura [12], [30].

Los diámetros volumétricos medios presentaron diferencias significativas entre los obtenidos con distintas concentraciones de NaOH ya que muestran una distribución unimodal el almidón y almidón aislado con agua presenta una distribución multimodal, lo que indica la coexistencia de partículas de diversos rangos de tamaño.

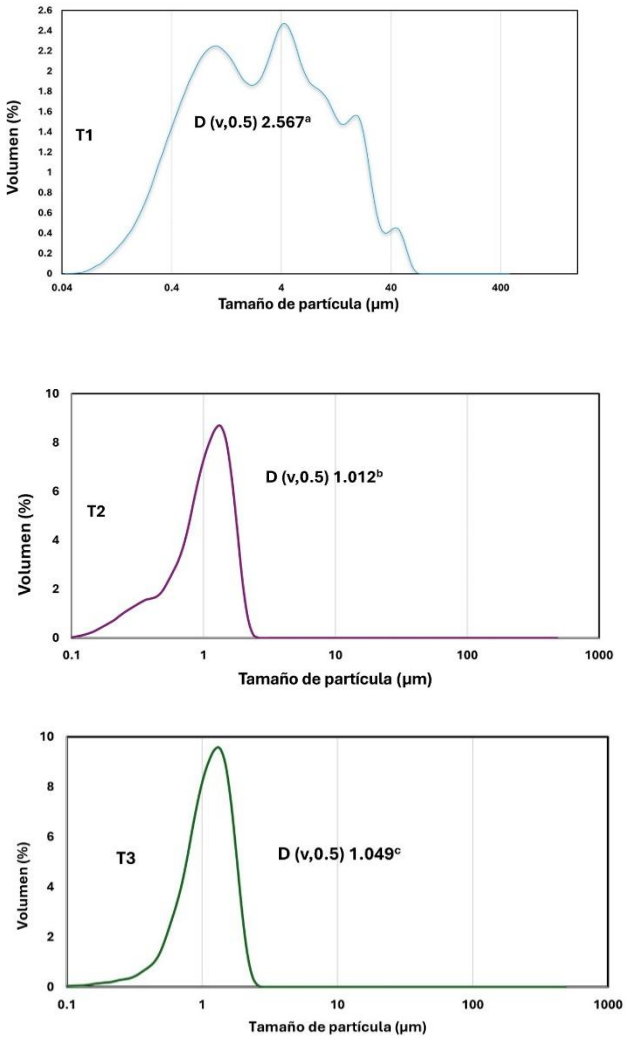


Figura 5. Distribución de tamaño de almidón nativo amaranto.

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

Caracterización Térmica

Calorimetría Diferencial de Barrido

Se investigaron los fenómenos de gelatinización del almidón de amaranto utilizando calorimetría diferencial de barrido. Los almidones de amaranto aislados por diferentes métodos presentaron diferencias significativas en cuanto a la temperatura máxima de gelatinización (Tp). El almidón aislado con NaOH al 0.25 M presentó la Tp más alta (75.7°C), seguido del aislado con NaOH 0.1 M (73.8°C) y la más baja fue el almidón aislado con agua (70.4 °C), igualmente la cantidad de energía necesaria para que los almidones pasen a su estado gelatinizado conocida como entalpía depende de varios factores, como el porcentaje de almidón total, la forma de sus gránulos, contenido de amilosa, la distribución de los gránulos y la capacidad del almidón para absorber agua [31]. Tanto la temperatura pico y los valores de ΔH se muestran en la figura 5 donde el almidón aislado con agua tiene una menor entalpía y temperatura pico más baja en comparación con los almidones aislados con NaOH; esto se asocia a la pureza y a la presencia de una distribución amplia de tamaños de granulo ya que se ha reportado que la variación del tamaño de disminuye el intervalo de gelatinización [32].

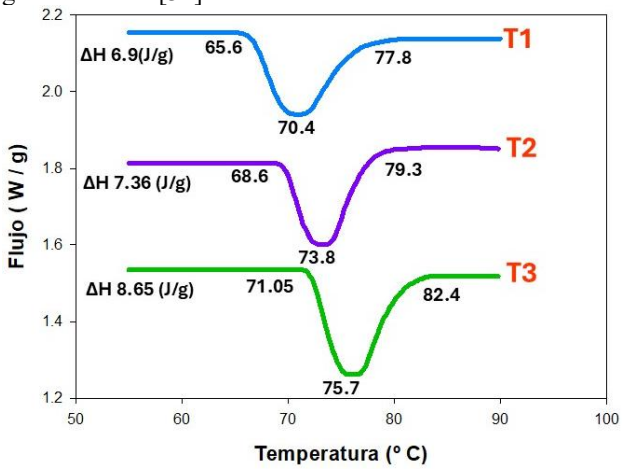


Figura 5. Termograma de los almidones nativos de amaranto obtenidos con diferentes métodos de aislamiento.

Caracterización Estructural
Difracción de rayos x

En la figura 6 se muestra un cambio de la cristalinidad, esto sugiere que durante el aislamiento de almidón mediante diferentes de métodos de aislamiento provoca un cambio interno en la amilosa y la amilopectina de los gránulos de almidón. Los patrones de difracción de rayos X del almidón obtenido con diferentes técnicas de aislamiento, mostró difractogramas similares con un patrón de tipo "A", el cual es representativo de los almidones de cereales, este se caracteriza por la presencia de picos de mayor intensidad de difracción para los ángulos 2 θ = 15, 17, 18 y 23°.

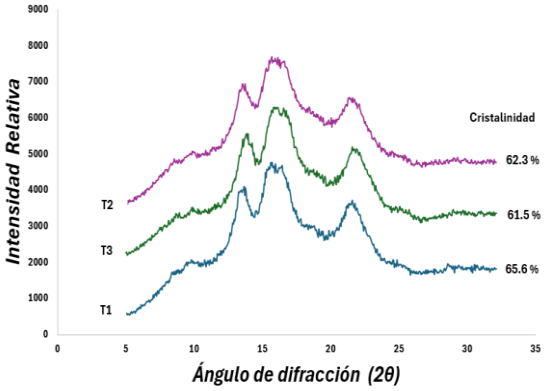


Figura 6. Patrones de difracción de rayos X de almidón nativo de amaranto con aislamientos.

CONCLUSIONES

Este estudio demostró que las diferentes técnicas de aislamiento no alteran la estructura del gránulo de almidón; sin embargo, el contenido de proteínas y la pureza se ven afectadas por el tipo de método.
Los resultados sugieren que el método de aislamiento más apropiado para un almidón de mayor pureza es utilizando NaOH.

AGRADECIMIENTOS

A la beca otorgada por la Secretaría de Ciencias, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI)

BIBLIOGRAFÍA

[1] Zhu, F. (2017) Encapsulation and delivery of food ingredients using starch-based systems, Food Chemistry, vol. 229, pp. 542-552. https:// doi: 10.1016/j.foodchem.2017.02.101

[2] Hoyos-Leyva J. D., Bello-Pérez L. A., Alvarez-Ramirez J., y Garcia H. S., (2018) Microencapsulation using starch as wall material: A review, Food Reviews International, vol. 34, n.º 2, pp. 148-161. https:// doi: 10.1080/87559129.2016.1261298.

[3] Makroo H. A., Naqash, Saxena S. J., Sharma S., Majid D., Dar y B. N. (2021) Recovery and characteristics of starches from unconventional sources and their potential applications: A review, Applied Food Research, vol. 1, n.º 1, p. 100001. https://doi: 10.1016/j.afres.2021.100001.

[4] Chandla N. K., Saxena D. C., y Singh S. (2017) Amaranth (Amaranthus spp.) starch isolation, characterization, and utilization in development of clear edible films, J Food Process Preserv, vol. 41, n.º 6, p. e13217. https://doi: 10.1111/jfpp.13217.

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

[5] Lindeboom,N. Chang P. R., Falk K. C., y Tyler R. T. (2005) Characteristics of Starch from Eight Quinoa Lines, Cereal Chemistry, vol. 82, n.º 2, pp. 216-222. https://doi: 10.1094/CC-82-0216.

[6] Kong X., Bertoft E., Bao J., y Corke H. (2008) Molecular structure of amylopectin from amaranth starch and its effect on physicochemical properties, International Journal of Biological Macromolecules, vol. 43, n.º 4, pp. 377-382. https://doi: 10.1016/j.ijbiomac.2008.07.018.

[7] Zuo R. et al. (2024) Isolation and characterization of natural nano starch from amaranth starch, International Journal of Biological Macromolecules, vol. 260, p. 129525. https:// doi: 10.1016/j.ijbiomac.2024.129525.

[8] Hoover R. y Ratnayake W. s. (2001) Determination of Total Amylose Content of Starch, Current Protocols in Food Analytical Chemistry, vol. 00, n.º 1, p. E2.3.1-E2.3.5. https://doi: 10.1002/0471142913.fae0203s00.

[9] Li J.-Y. y Yeh A.-I. (2001) Relationships between thermal, rheological characteristics and swelling power for various starches», Journal of Food Engineering, vol. 50, n.º 3, pp. 141-148. https://doi: 10.1016/S0260-8774(00)00236-3.

[10] Hernandez-Uribe J. P., Agama-Acevedo E., Gonzalez-Soto R. A., Bello-Pérez L. A., y Vargas-Torres A. (2011) Isolation and characterization of Mexican chayote tuber (Sechium edule Sw.) starch, Starch Stärke, vol. 63, n.º 1, pp. 32-41, https:// doi: 10.1002/star.201000078.

[11] De La Rosa A. P. B., Paredes-López O., Cárabez-Trejo A., y Ordorica-Falomir C. (1989) Enzymatic Hydrolysis of Amaranth Flour — Differential Scanning Calorimetry and Scanning Electron Microscopy Studies, Starch - Stärke, vol. 41, n.º 11, pp. 424-428, https://doi: 10.1002/star.19890411106.

[12] Kong X., Bao J., y Corke H. (2009) Physical properties of Amaranthus starch, Food Chemistry, vol. 113, n.º 2, pp. 371-376. https://doi: 10.1016/j.foodchem.2008.06.028.

[13] Gutiérrez-Cortez E., Hernadez-Becerra E., Londoño-Restrepo S. M., y Rodriguez-García M. E. (2021) Physicochemical characterization of Amaranth starch insulated by mechanical separations, International Journal of Biological Macromolecules, vol. 177, pp. 430-436. https://doi: 10.1016/j.ijbiomac.2021.02.138.

[14] Villarreal M. E., Ribotta P. D., y Iturriaga L. B. (2013) Comparing methods for extracting amaranthus starch and the properties of the isolated starches. LWT - Food Science and Technology, vol. 51, n.º 2, pp. 441-447. https://doi: 10.1016/j.lwt.2012.11.009.

[15] Palacios-Fonseca A. J. et al. (2013) Effect of the alkaline and acid treatments on the physicochemical properties of corn starch, CyTA - Journal of Food, vol. 11, n.º sup1, pp. 67-74. https://doi: 10.1080/19476337.2012.761651.

[16] Tester, R. F., & Morrison, W. R. (1990). Swelling and gelatinization of cereal starches. II. Waxy rice starches. Cereal Chem, 67(6), 558-563.

[17] Olagunju A. I. y Omoba O. S. (2024) Chapter 10 - Amaranth starch: physicochemical, functional, and nutritional properties, en Non-Conventional Starch Sources, J. M. Lorenzo y S. P. Bangar, Eds., Academic Press, 2024, pp. 281-313. https://doi: 10.1016/B978-0-443-18981-4.00010-0.

[18] Singh N., Singh J., Kaur L., Singh Sodhi N., y Singh Gill B. (2003) Morphological, thermal and rheological properties of starches from different botanical sources, Food Chemistry, vol. 81, n.º 2, pp. 219-231. https://doi: 10.1016/S0308-8146(02)00416-8.

[19] Cardoso M. B., Samios D., y Silveira N. P. (2006) Study of Protein Detection and Ultrastructure of Brazilian Rice Starch during Alkaline Extraction, Starch - Stärke, vol. 58, n.º 7, pp. 345-352, 2006, https://doi: 10.1002/star.200600495.

[20] Calzetta Resio, A. N. (1999). Almidón de amaranto: Obtención y evalución de sus características fisicoquímicas [PhD Thesis, Universidad de Buenos Aires. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales]

[21] Baldwin P. M. (2001) Starch Granule-Associated Proteins and Polypeptides: A Review, Starch/Stärke, vol. 53, n.º 10, p. 475.

[22] Fan T. Y. y Sosulski, F. W. (1974) Dispersibility and Isolation of Proteins from Legume Flours, Canadian Institute of Food Science and Technology Journal, vol. 7, n.º 4, pp. 256-259. https://doi: 10.1016/S0315-5463(74)73923-2.

[23] Zhu,F. (2017) Structures, physicochemical properties, and applications of amaranth starch, Critical Reviews in Food Science and Nutrition, vol. 57, n.º 2, pp. 313-325. https://doi: 10.1080/10408398.2013.862784.

[24] Donmez D., Pinho L., Patel B., Desam P., y Campanella O. H. (2021) Characterization of starch–water interactions and their effects on two key functional properties: starch gelatinization and retrogradation, Current Opinion in Food Science, vol. 39, pp. 103-109.

[25] Yang C., Zhong F., Douglas Goff H., y Li Y. (2019) Study on starch-protein interactions and their effects on physicochemical and digestible properties of the blends», Food Chemistry, vol. 280, pp. 51-58. https://doi: 10.1016/j.foodchem.2018.12.028.

[26] Kumar N., Saxena D., y Singh S (2016) Physico-Chemical, Pasting and Morphological Characterization of Grain Amaranth Starch», Asian Journal of Chemistry, vol. 28, pp. 2457-2460 https://doi: 10.14233/ajchem.2016.20012.

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

[27] Paredes-López O., Schevenin M. L., Hernández-López D., y Cárabez-Trejo A. (1989). Amaranth Starch - Isolation and Partial Characterization. Starch Stärke, vol. 41, n.º 6, pp. 205-207.
[28] Sindhu Ritu, Bhupendar Khatkar Singh, y GJUS. (2016) Characterization of Amaranth (Amaranthus Hypocondriacus) Starch, IJERT, vol. V5, n.º 06.
[29] Xia, X. Li G., Liao F., Zhang F., Zheng J., y Kan J. (2015) Granular Structure and Physicochemical Properties of Starches from Amaranth Grain», International Journal of Food Properties, vol. 18, n.º 5, pp. 1029-1037. https://doi: 10.1080/10942912.2013.860168.
[30] Radosavljevic M., Jane J.-L., y Johnson L. (1998) Isolation of Amaranth Starch by Diluted Alkaline-Protease Treatment 1, Cereal Chemistry - CEREAL CHEM, vol. 75. https://doi: 10.1094/CCHEM.1998.75.2.212.
[31] Jiang QianJ. Q. et al. (2012) Characterizations of starches isolated from five different Dioscorea L. species.Recuperado de: https://www.cabidigitallibrary.org/doi/full/10.5555/20123166333
[32] Jennings, S. D. Myers, D. Johnson J. L. A., y Pollak L. M. (2002) Effects of Maturity on Corn Starch Properties, Cereal Chemistry, vol. 79, n.º 5, pp. 703-706. https:// doi: 10.1094/CCHEM.2002.79.5.703.

AUTORIZACIÓN Y RENUNCIA.

Los autores del presente artículo autorizan al TecNM/Instituto Tecnológico de Zacatepec para publicar el escrito en el libro electrónico del CITID 2025. El TecNM/ITZ o los editores no son responsables ni por el contenido ni por las implicaciones de lo que está expresado en el escrito.

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

POTENCIAL ELECTROSTÁTICO PROYECTADO A LA DENSIDAD ELECTRÓNICA PARA EVALUAR REACTIVIDAD QUÍMICA Y ACIDEZ- BASICIDAD

O. Castro-Ocampo [1], G. Santos-Raga [2], F. Guerrero [3], E. Santoyo [4], J. Muñiz [5]

[1]Doctorado. Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Energías Renovables, Química computacional. orcaoc@ier.unam.mx, 7331277253, Avenida xochicalco SN, Temixco; Morelos.
[2]Doctorado. Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Energías Renovables, departamento de geotermia. gusara@ier.unam.mx, Avenida xochicalco SN, Temixco; Morelos.
[3]Doctorado. Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Energías Renovables, departamento de geotermia. fguerrero@ier.unam.mx, Avenida xochicalco SN, Temixco; Morelos.
[4]Doctorado. Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Energías Renovables, departamento de geotermia. esg@ier.unam.mx, Avenida xochicalco SN, Temixco; Morelos.
[5]Doctorado. Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Energías Renovables, Química computacional. orcaoc@ier.unam.mx, (52) 777 362 0090 (ext. 29744), Avenida xochicalco SN, Temixco; Morelos.

Resumen – Un cálculo de potencial molecular electrostático (MEP o MESP, por sus siglas en inglés) mediante la Teoría del Funcional de la Densidad (DFT) permite visualizar la distribución de la carga electrostática alrededor de una molécula. En este estudio, se utilizó esta metodología para inferir la acidez y basicidad de complejos con lantano (La) y lutecio (Lu) y los iones $[Cl]^{-1}$, $[F]^{-1}$, $[SO_4]^{-2}$ y $[HCO_3]^{-1}$. Los cálculos de MEP sugieren un comportamiento ácido para los complejos $LaCl_3$, $LuCl_3$, $La_2(SO_4)_3$ y $Lu_2(SO_4)_3$. De manera similar, los complejos fluorurados (LaF_3 y LuF_3) también exhibieron acidez, aunque en menor grado que sus contrapartes con cloruro y sulfato. Por otro lado, el complejo $Lu(HCO_3)_3$ presentó una distribución de carga electrostática más negativa, indicando un probable carácter más básico. El caso de $La(HCO_3)_3$ resultó particularmente interesante, ya que su distribución electrostática es mixta: por un lado, muestra regiones más negativas y, por otro, más positivas, lo que sugiere que este complejo podría exhibir tanto comportamiento básico como una acidez débil. Estos resultados concuerdan con la evidencia de campo recopilada por Santos-Raga, quien analizó 37 muestras geotermales.

Palabras Clave: DFT, potencial molecular electrostático, tierras raras, basicidad, acidez.

Abstract -- A molecular electrostatic potential (MEP or MESP) calculation using Density Functional Theory (DFT) allows visualization of the electrostatic charge distribution around a molecule. In this study, this methodology was used to infer the acidity and basicity of complexes containing lanthanum (La) and lutetium (Lu), as well as the ions $[Cl]^{-1}$, $[F]^{-1}$, $[SO_4]^{-2}$, and $[HCO_3]^{-1}$. MEP calculations suggest an acidic behavior for $LaCl_3$, $LuCl_3$, $La_2(SO_4)_3$, and $Lu_2(SO_4)_3$. Similarly, fluoride complexes (LaF_3 and LuF_3) also exhibit acidity, though to a lesser extent than their chloride and sulfate counterparts. Conversely, $Lu(HCO_3)_3$ displays a more negative electrostatic charge distribution, indicating a likely basic nature. $La(HCO_3)_3$ presents a particularly interesting case, as its electrostatic distribution is mixed, showing both more negative and more positive regions. This suggests that the complex could exhibit both basic behavior and weak acidity. These results align with field evidence collected by Santos-Raga, who analyzed 37 geothermal samples.

Key words – DFT, molecular electrostatic potential, rare earths, basicity, acidic

INTRODUCCIÓN

Actualmente, los elementos de tierras raras (REE) están considerados en los grupos del 3 al 12 de la tabla periódica, incluyendo el escandio y el itrio [1, 2]. Estos elementos son muy deseados en varias áreas debido a sus magníficas propiedades electrónicas, magnéticas y ópticas, las cuales los hacen aptos para aplicaciones en catálisis, magnetos y baterías [3, 4, 5, 6], además que se están investigando las implicaciones del enriquecimiento de medios ambientales con tierras raras en los procesos de desarrollo de biodiversidad [7, 8] y remediación ambiental [9, 10]. Sin embargo, el estudio de estos elementos en campo esta limitado principalmente por la dificultad en las mediciones para detectar y separar estos elementos en sistemas hidrotermales [11, 12, 13] y hasta nuestro conocimiento, hay pocos estudios teóricos que buscan una comprensión de la complejación de tierras raras en sistemas hidrotermales y su implicación en los fenómenos de movilidad de REE en estos sistemas.

Por otro lado, el estudio del potencial electrostático molecular (MEP) es una herramienta que nos permite analizar la distribución de carga en moléculas y su impacto en la reactividad química [14]. En este trabajo, se implementa el cálculo de MEP mediante la Teoría del Funcional de la Densidad (DFT) para investigar complejos de tierras raras, específicamente con lantano (La) y lutecio (Lu).

Este análisis permite evaluar su posible carácter electrofílico o nucleofílico, proporcionando una tendencia sobre su acidez o basicidad para predecir el pH del medio donde estos complejos podrían ser más

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

estables, así como posibles interacciones con otras especies químicas.

Este estudio examina la influencia de distintos ligandos (Cl^-, F^-, SO_4^{2-} y HCO_3^-) en la distribución electrostática de los complejos de La y Lu, estableciendo comparaciones entre ellos. Los resultados obtenidos pueden contribuir al diseño y optimización de nuevos materiales basados en tierras raras y a una mejor comprensión de su comportamiento en medios geotermales y ambientales.

DESARROLLO

Métodos computacionales.

Mediante cálculos DFT [15, 16] con un funcional híbrido B3LYP [17] y el conjunto de bases tipo TZVP (Triple-Z Valence Polarized) se encontró la geometría en el estado basal y la estructura electrónica de los complejos con La y Lu y los aniones $[Cl]^{-1}$, $[F]^{-1}$, $[SO_4]^{-2}$ y $[HCO_3]^{-1}$. Debido a que las tierras raras son elementos pesados (alto número Z) se contemplaron efectos relativistas mediante la implementación de la aproximación ZORA (Zeroth-Order Regular Approximation) [18, 19].

En DFT, el problema fundamental es resolver las ecuaciones de Kohn-Sham [16], que bajo la implementación relativista con la aproximación ZORA adoptan la forma:

$$H_{ZORA}\psi_i(r) = \epsilon_i\psi_i(r) \qquad Ec.(1)$$

donde $\psi_i(r)$ son los orbitales de Kohn-Sham, y H_{ZORA} es el Hamiltoniano relativista de la aproximación ZORA, que bajo un potencial efectivo $V_{KS}(r)$, queda como:

$$H_{ZORA} = V_{KS}(r) + \frac{\rho^2}{2m_{eff}} \qquad Ec.(2)$$

con la masa efectiva del electrón dependiente del potencial dada por:

$$m_{eff} = \frac{m}{1-\frac{V_{KS}(r)}{2mc^2}} \qquad Ec.(3)$$

Aquí, el potencial de Kohn-Sham (o potencial efectivo) se define como:

$$V_{KS}(r) = V(r) + V_J + V_{xc} \qquad Ec.(4)$$

donde V(r) es el potencial externo, V_J es el término Coulómbico de la repulsión electrónica clásica y V_{xc} es el potencial de intercambio y correlación.

De esta manera, las ecuaciones de Kohn-Sham relativistas a resolver toman la forma:

$$\left[V_{KS} + \frac{\rho^2}{2m_{eff}}\right]\psi_i(r) = \epsilon_i\psi_i(r) \qquad Ec.(5)$$

con los orbitales $\psi_i(r)$ expandidos en el conjunto de bases elegidas.

Un MEP es el potencial electrostático en una región cercana producido por las cargas nucleares y electrónicas. Los MEP fueron obtenidos en una región alrededor de la molécula mediante el cálculo punto por punto del valor de la siguiente ecuación [14]:

$$W(r_i) = \sum_{\alpha}\frac{Z_\alpha}{r_{\alpha i}} - \int\frac{\rho(1)}{r_{1i}}d\tau_1 \qquad Ec.(6)$$

Donde $\rho(1)$ es la función de densidad monoelectrónica y Z_α es la carga del núcleo α. Las distancias del elemento de carga electrónica $\rho(1)\ d\tau_1$ y del núcleo α al punto i considerado donde el potencial W es calculado son, r_{1i} y $r_{\alpha i}$, respectivamente.

Los MEP pueden visualizarse como isosuperficies en el programa Chimera, resaltando las regiones de potencial negativo y positivo en rojo y azul, respectivamente. Esto se logra superponiendo el potencial W calculado, en un conjunto de puntos alrededor de la molécula sobre la densidad electrónica.

DISCUSIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Geometrías optimizadas

Las geometrías óptimas en el estado basal obtenidas se muestran en la Fig. 1, donde se observa una alta simetría tanto en los complejos con La, como en los complejos con Lu. Se observa que tanto los complejos con La cómo sus análogos con Lu adoptan geometrías muy similares.

Por otra parte, debido a la carga de los iones de los complejos, y del estado de oxidación del lantano y del lutecio (3+), los aniones con carga de -1 ($[Cl]^{-1}$, $[F]^{-1}$ y $[HCO_3]^{-1}$) forman complejos tipo LnX_3, mientras que los aniones con carga -2 forman complejos de tipo Ln_2Y_3, con Ln= La, Lu; X=$[Cl]^{-1}$, $[F]^{-1}$, $[HCO_3]^{-1}$, Y= $[SO_4]^{-2}$; para equilibrar las cargas debido a que el carácter de los enlaces en este tipo de complejos es principalmente tipo iónica.

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

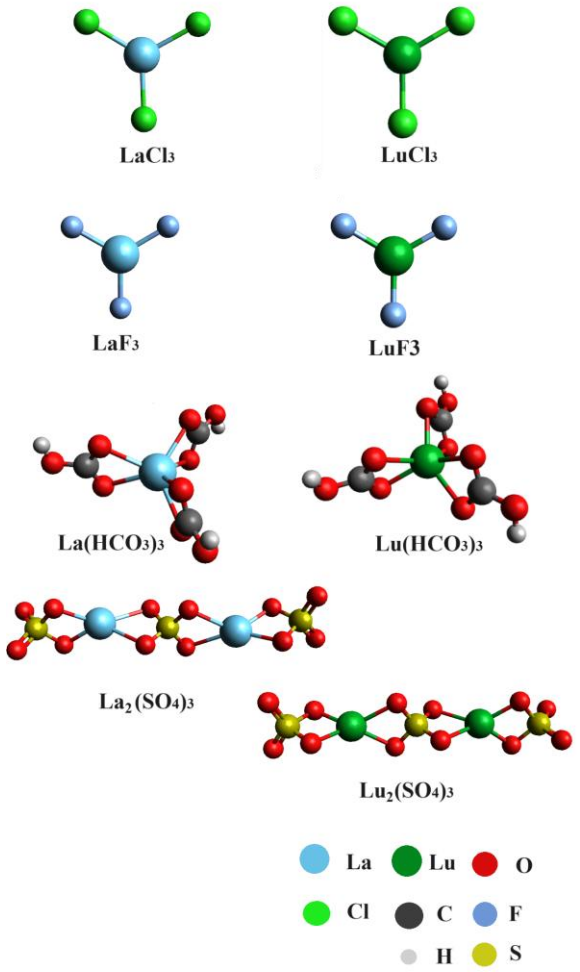


Figura 1. Geometrías optimizadas de los distintos complejos con tierras raras estudiados.

Molecular electrostatic potentials.
Se calcularon las superficies de potencial electrostático molecular (MEP) para analizar el comportamiento ácido-base de los complejos estudiados y establecer correlaciones con mediciones geoquímicas. Las superficies de MEP, presentadas en la Fig. 2, indican un comportamiento predominantemente ácido en los complejos $LaCl_3$ (b), $LuCl_3$ (e), $La_2(SO_4)_3$ (c) y $Lu_2(SO_4)_3$ (f), como lo evidencia su distribución de carga mayormente positiva. Es importante observar que los extremos de los complejos mencionados presentan una distribución de carga negativa, sin embargo, este comportamiento se puede atribuir al tipo de interacción entre los ligandos con la tierra rara, ya que los ligandos quedan con mayor densidad electrónica debido al enlace iónico.

Así mismo, los complejos LaF_3 y LuF_3 [Fig. 2 (a), (d), respectivamente] también presentan un carácter ácido, aunque en menor medida en comparación con los complejos mencionados anteriormente. Esta diferencia se debe a su menor potencial electrostático positivo relativo que muestran.

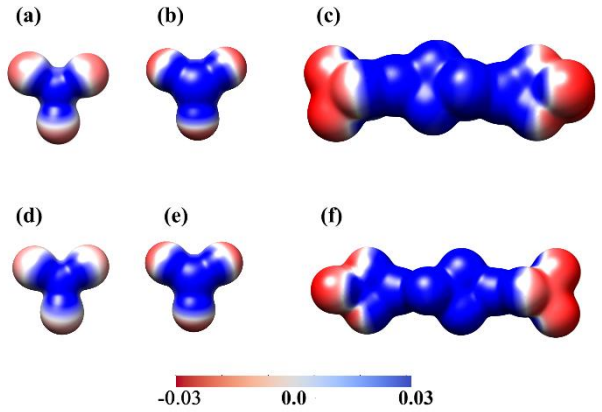


Figura 2. MEPs de los complejos (a) LaF_3, (b) $LaCl_3$, (c) $La_2(SO_4)_3$, (d) LuF_3, (e) $LuCl_3$ y (f) $Lu_2(SO_4)_3$.

En contraste, el complejo $Lu(HCO_3)_3$ [Fig. 3 (d), (e), (f)] exhibe un carácter ligeramente más básico, reflejado en su distribución de carga electrostática que muestra con mayor región negativa. Este comportamiento se visualiza con mayor claridad en las Figs. 3(d) y (e), que muestran las vistas superior e inferior del complejo. Además, este resultado es coherente con un estudio donde el $Lu(HCO_3)_3$ presenta una alta correlación en muestras de carácter básico [20, 21].

El complejo $La(HCO_3)_3$ exhibe una distribución electrostática particular. La Fig. 3(a), (b) y (c) presentan este complejo desde diferentes vistas (superior, inferior y lateral), revelando un comportamiento mixto. En la vista inferior [Fig.3 (b)], la distribución del potencial electrostático es mayormente negativa, mientras que en la vista superior es relativamente más positiva [Fig. 3 (a)]. Aunque predomina la distribución negativa, la presencia de regiones con carga positiva sugiere que $La(HCO_3)_3$ puede exhibir tanto un carácter básico como una ligera acidez. Esta dualidad se respalda con un estudio donde se encontró una correlación negativa en muestras básicas, lo que sugiere la posible presencia de $La(HCO_3)_3$ en condiciones ácidas.

Estas isosuperficies que representan el potencial electrostático molecular dan información importante sobre las zonas de reactividad de las moléculas. Siendo las regiones azules las zonas electrofílicas, es decir, las zonas más susceptibles a ser atacadas por electrones. Lo cual también indica la alta probabilidad de estas moléculas a ser activadas por reducción. En contraste, las regiones rojas indican zonas nucleofílicas, o regiones más susceptibles a donar electrones. Las moléculas con mayor

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

región de color rojo sugieren una alta probabilidad a ser activadas mediante oxidación.

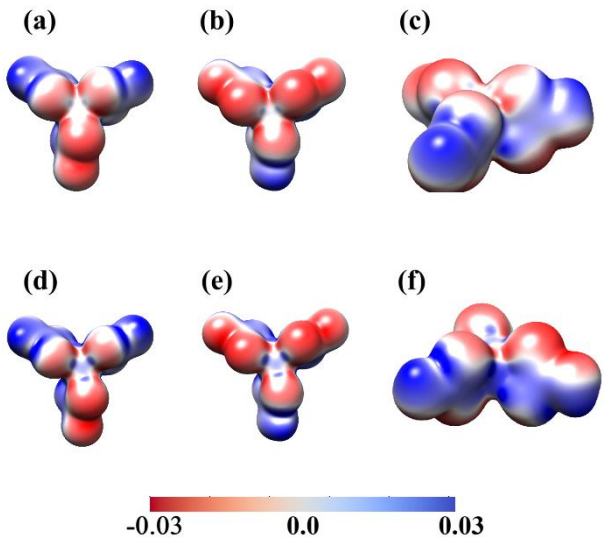


Figura 3. MEPS de los complejos $La(HCO_3)_3$ [(a), (b), (c) que corresponden a la vista superior, inferior y lateral, respectivamente] y $Lu(HCO_3)_3$ [(d), (e), (f) que corresponden a las vistas superior, inferior y lateral, respectivamente].

Este análisis del MEP también revela las principales interacciones iónicas en los complejos, explicando la distribución de carga electrostática positiva alrededor de los átomos de La y Lu en su estado de valencia 3+.

CONCLUSIONES

El análisis de las superficies de potencial electrostático molecular (MEP) permitió identificar el comportamiento ácido-base de los complejos estudiados y su relación con mediciones geoquímicas. Se observó que los complejos $LaCl_3$, $LuCl_3$, $La_2(SO_4)_3$ y $Lu_2(SO_4)_3$ presentan un carácter ácido predominante, mientras que $Lu(HCO_3)_3$ exhibe una tendencia más básica y $La(HCO_3)_3$ muestra un comportamiento mixto. Además, la distribución de carga electrostática evidenció la influencia de las interacciones iónicas en la estabilidad y reactividad de estos sistemas.
Estos resultados son clave para comprender la reactividad de complejos de tierras raras en medios geoquímicos y pueden contribuir al diseño de nuevos materiales con aplicaciones en catálisis, separación selectiva y almacenamiento de elementos críticos. Trabajos futuros pueden enfocarse en la evaluación experimental de estas tendencias, así como en el estudio de su impacto en procesos ambientales y tecnológicos, como la recuperación de tierras raras y el desarrollo de nuevos agentes quelantes.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo financiero de la DGAPA-UNAM (Dirección General de Asuntos del Personal Académico) a través de los proyectos No. PAPIIT-IN106122 y PAPIIT-IN108322. También agradecemos al Departamento de Supercómputo de la Universidad Nacional Autónoma de México por proporcionar recursos computacionales a través de los proyectos No. LANCAD-UNAM-DGTIC-370, LANCAD-UNAM-DGTIC-112 y LANCAD-UNAM-DGTIC-310, y reconocemos el apoyo adicional del Fondo Sectorial de Ciencia Básica y de Frontera-CONAHCYT a través de los proyectos No. CBF2023-2024-336 y CF-2023-490. O.C.O agradece a la SECIHTI-México por la beca posdoctoral. Los autores extienden su agradecimiento a Esther O. García Mandujano por su asistencia técnica y a Kevin Alquicira Hernández y Héctor Cortés González por su apoyo con el cómputo de alto rendimiento.

BIBLIOGRAFÍA

[1] Golloch. (2022). *Handbook of rare earth elements: Analytics*. Walter de Gruyter GmbH & Co KG.
[2] Wall, F. (2014). Rare earth elements. In *Critical metals handbook* (pp. 312–339).
[3] Bouadjemi, B., Bentata, S., Abbad, A., Benstaali, W., & Bouhafs, B. (2013). Half-metallic ferromagnetism in $PrMnO_3$ perovskite from first principles calculations. *Solid State Communications, 168*, 6–10.
[4] Lin, H., Shi, X. X., & Chen, X. M. (2017). $LaRnIMnO_6$ (R = Pr, Nd, Sm) double perovskites with magnetodielectric effects. *Journal of Alloys and Compounds, 709*, 772–778.
[5] Wang, X., Reischauer, S., Xie, H., Han, G.-H., Wellman, H., Kirlikovali, K. O., Idrees, K., Son, F. A., Notestein, J. M., & Farha, O. K. (n.d.). Advancements in cerium/titanium metal-organic frameworks: Unparalleled stability in CO oxidation. *Matter*.
[6] Chen, J., Hu, H., Meng, F., Yajima, T., Yang, L., Ge, B., Ke, X., Wang, J., Jiang, Y., & Chen, N. (2020). Overlooked transportation anisotropies in d-band correlated rare-earth perovskite nickelates. *Matter, 2*(5), 1296–1306.
[7] Galhardi, J. A., Leles, B. P., de Mello, J. W., & Wilkinson, K. J. (2020). Bioavailability of trace metals and rare earth elements (REE) from the tropical soils of a coal mining area. *Science of the Total Environment, 717*, 134484.
[8] Tao, Y., Shen, L., Feng, C., Yang, R., Qu, J., Ju, H., & Zhang, Y. (2022). Distribution of rare earth elements (REEs) and their roles in plant growth: A review. *Environmental Pollution, 298*, 118540.
[9] Ferreira, N., Ferreira, A., Viana, T., Lopes, C. B., Costa, M., Pinto, J., Soares, J., Pinheiro-Torres, J., Henriques, B., & Pereira, E. (2020). Assessment of marine macroalgae potential for gadolinium

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

removal from contaminated aquatic systems. *Science of the Total Environment, 749*, 141488.

[10] Ju, T., Meng, Y., Han, S., Meng, F., Lin, L., Li, J., & Jiang, J. (2023). Analysis of enrichment, correlation, and leaching patterns of rare earth elements in coal fly ash assisted by statistical measures. *Science of the Total Environment, 902*, 166070.

[11] Migdisov, A., Williams-Jones, A., Brugger, J., & Caporuscio, F. (2016). Hydrothermal transport, deposition, and fractionation of the REE: Experimental data and thermodynamic calculations. *Chemical Geology, 439*, 13–42.

[12] Yadav, K., Sircar, A., & Shah, M. (2024). Base metal (BM) and rare earth elements (REE) extraction using geothermal water. In *Geothermal Fields of India* (pp. 115–133). Springer.

[13] Balaram, V. (2023). Potential future alternative resources for rare earth elements: Opportunities and challenges. *Minerals, 13*(3), 425.

[14] Shin, D., & Jung, Y. (2022). Molecular electrostatic potential as a general and versatile indicator for electronic substituent effects: Statistical analysis and applications. *Physical Chemistry Chemical Physics, 24*(42), 25740–25752.

[15] Hohenberg, P., & Kohn, W. (1964). Inhomogeneous electron gas. *Physical review*, *136*(3B), B864.

[16] Kohn, W., & Sham, L. J. (1965). Self-consistent equations including exchange and correlation effects. *Physical review*, *140*(4A), A1133.

[17] Becke, A. D. (1993). Density-functional thermochemistry. III. The role of exact exchange. *The Journal of chemical physics*, *98*(7), 5648-5652.

[18] van Lenthe, E., Baerends, E.-J., & Snijders, J. G. (1993). Relativistic regular two-component Hamiltonians. *The Journal of Chemical Physics, 99*(6), 4597–4610.

[19] van Lenthe, E., Baerends, E.-J., & Snijders, J. G. (1994). Relativistic total energy using regular approximations. *The Journal of Chemical Physics, 101*(11), 9783–9792.

[20] Santos-Raga, G., Santoyo, E., Guevara, M., Almirudis E., Pérez-Zárate, D., & Yáñez-Dávila, D. (2021). Tracking geochemical signatures of rare earth and trace elements in spring waters and outcropping rocks from the hidden geothermal system of Acoculco, Puebla (Mexico). *Journal of Geochemical Exploration*, *227*, 106798.

[21] Yáñez-Dávila, D., Santoyo, E., González-Partida, E., Pandarinath, K., Santos-Raga, G., Mishra, S., & Gómez-Salgado, Z. G. (2024). Hydrothermal Signatures Discovered in Outcropping Rocks of the Los Humeros Geothermal Field (Mexico): A Geochemometric Exploration Case Study. *Geofluids*, *2024*(1), 2316078.

AUTORIZACIÓN Y RENUNCIA.

Los autores del presente artículo autorizan al TecNM/Instituto Tecnológico de Zacatepec para publicar el escrito en el libro electrónico del CITID 2025. El TecNM/ITZ o los editores no son responsables ni por el contenido ni por las implicaciones de lo que está expresado en el escrito.

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

CITID 2025 ISSN: 2992-8516

UN ENFOQUE DE LOS DISEÑOS DE EXPERIMENTOS EN LA ELABORACIÓN DE MATERIALES COMPUESTOS

Hernández Solís Iris Lizeth[1], Vargas Galarza Zully [2], García Hernández Edgar [3], Alvarado Flores Miguel [4]

[1]Maestra en Ciencias de la Ingeniería. Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Zacatepec. Departamento de Ingeniería Industrial. Correo electrónico: iris.hs@zacatepec.tecnm.mx, teléfono: 7341262779; Calzada Tecnológico No.27, Col. Centro, Zacatepec de Hidalgo Morelos, México.
[2]Doctora en Ciencias en Química. Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Zacatepec. Departamento de Ingeniería Química y Bioquímica. Correo electrónico: zully.vg@zacatepec.tecn.mx, Calzada Tecnológico No.27, Col. Centro, Zacatepec de Hidalgo Morelos, México.
[3]Doctor en Ciencias en Química Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Zacatepec. Departamento de Ingeniería Química y Bioquímica. Correo electrónico: edgar.gh@zacatepec.tecn.mx, Calzada Tecnológico No.27, Col. Centro, Zacatepec de Hidalgo Morelos, México.
[4]Maestro en Ingeniería Química. Benemérita Universidad de Puebla. Facultad de Ingeniería Química. Correo: miguelalvarado@correo.buap.mx, teléfono: 221 691 77 12; San Claudio S/N , esquina con Avenida San Manuel, C.P. 72570, Puebla, Puebla

Resumen – En este trabajo se realiza un análisis de lo que son los diseños de experimentos, y como se han utilizado en relación a los materiales compuestos, dado que existe una tendencia en la investigación de dichos materiales en explorar el uso de fibras naturales como reemplazo de fibras sintéticas y lograr el aprovechamiento de residuos agroindustriales, así mismo, evaluar el comportamiento del material a esfuerzos mecánicos y comparar con materiales existentes, evaluar las fibras como refuerzo dentro de la matriz dado que las fibras naturales requieren de pretratamientos químicos para mejorar la interfaz con la matriz y principalmente buscar la optimización de realizar el material compuesto considerando ciertas condiciones como la relación esfuerzo/matriz. Por lo que los diseños de experimentos es una herramienta que permite al investigador ser más productivo al tomar decisiones, porque contribuye a la disminución de gastos por recursos materiales, costos, tiempo de investigación, aspecto importante al tener plazos menores en la obtención de resultados.

Palabras Clave: Diseño de experimentos, Materiales compuestos, Propiedades mecánicas, Variables de entrada y salida.

Abstract – In this work, an analysis of what experimental designs are, and how they have been used in relation to composite materials, given that there is a trend in the research of such materials to explore the use of natural fibers as a replacement for synthetic fibers and achieve the use of agro-industrial waste, likewise, evaluate the behavior of the material to mechanical stresses and compare with existing materials, evaluate the fibers as reinforcement within the matrix since natural fibers require chemical pretreatments to improve the interface with the matrix and mainly seek the optimization of making the composite material considering certain conditions such as the stress / matrix ratio. Therefore, experimental designs are a tool that allows the researcher to be more productive when making decisions, because it contributes to the reduction of expenses for material resources, costs, research time, an important aspect when having shorter deadlines in obtaining results.

Key words – Design of experiments, Composite materials, Mechanical properties, Input and output variables.

INTRODUCCIÓN

Cuidar el medio ambiente se ha vuelto una preocupación social, dado el alto crecimiento de los niveles de contaminación durante los últimos años. Conceptos como economía circular y desarrollo sostenible han tomado gran importancia, por lo que los desechos generados deben ser aprovechados en una segunda cadena de valor (Taverna et al., 2023). Tal es el caso, de los residuos agroindustriales, que, al ser considerados desechos, ya no tienen un valor agregado, y la tendencia es usarlos como material de refuerzo en materiales compuestos, en reemplazo total o parcial por las fibras sintéticas. Sin embargo, se han utilizado diversas fibras naturales para comparar sus propiedades, y de acuerdo con estas, en su mayoría se requiere de realizar pretratamientos químicos a las fibras y así mejorar la relación interfacial con la matriz. Se ha reportado varios tratamientos químicos como: silicato de sodio (Na_2SiO_3), hidróxido de calcio ($Ca(OH)_2$), hipoclorito de calcio ($Ca(ClO)_2$) y bicarbonato de calcio ($NaHCO_3$) (Quinchía y Valencia, 2023), destacando el uso de la aplicación con hidróxido de sodio (NaOH) (Hernández *et al.,* 2021) así como la radicación gamma (Gutiérrez, 2022).

La elaboración de materiales compuestos influye en sus elementos principales: la matriz, el refuerzo y la interfase. Sin embargo, los investigadores han utilizado como herramienta estadística-matemática el diseño de experimentos, lo que les permite elegir las variables de interés y los niveles en los que se requiere analizar, como la relación fibra/matriz y la variable de respuesta, como las propiedades mecánicas, conductividad térmica, entre otras. No obstante, también han empleado los diseños de

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

experimentos para evaluar las fibras naturales y asegurarse de que estas desempeñen una buena interfase en la matriz.

Este trabajo tiene la finalidad de presentar las etapas para desarrollar un diseño de experimentos y, asimismo, plasmar lo que los investigadores han aportado en el uso de esta herramienta: cómo fijan sus variables de interés, los niveles de los factores y la variable de respuesta a evaluar, con enfoque a los materiales compuestos, en la formulación, en procesos de curado y corte de los materiales compuestos, en el análisis de las fibras naturales como refuerzo en materiales compuestos, entre otros.

DESARROLLO

Diseños de Experimentos

Los investigadores en sus diferentes campos de investigación desarrollan experimentos para realizar el descubrimiento de algo. Un experimento es una prueba y desde la perspectiva más formal, un experimento se define como una prueba o serie de pruebas en la cual se realizan cambios en las variables de entrada de un proceso o sistema a analizar y determinar los cambios que se presentan en la variable de respuesta (Montgomery, 2004). Sin embargo, también existe la vertiente de que varios experimentos se realizan a prueba y error, con base a la experiencia o intuición a diferencia de seguir un plan estructurado planteando todas las interrogantes que respalde una respuesta (Gutiérrez y De La Vara, 2008). En la Figura 1 se observa el modelo que plantea Montgomery en el cual se visualizan las variables de entrada y salida, cabe mencionar que dentro de este modelo se pueden encontrar algunas variables que son controlables y otras no.

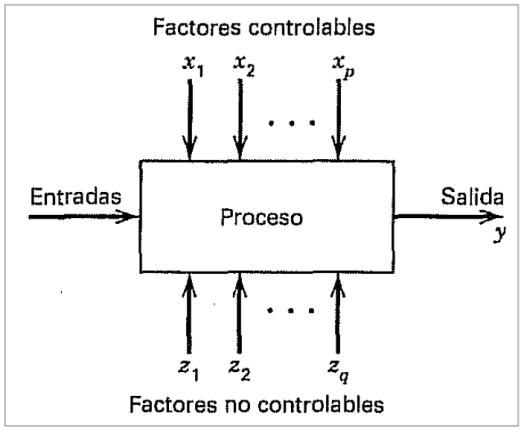


Figura 1. Representación de variables entrada y salida

Muchas de las investigaciones inician con el planteamiento a preguntas como: ¿Qué variables afectan la repuesta? o ¿De qué forma las variables afectan la respuesta? Por lo que, el diseño estadístico de experimentos es la forma más efectiva de realizar pruebas dado que consiste en determinar que pruebas y de qué manera deben ser realizadas, para obtener la cantidad de datos necesarios que al ser analizados estadísticamente otorguen evidencia suficiente para responder a las interrogantes y así clarificar los inciertos (Gutiérrez y De La Vara, 2008)

De acuerdo con Crespo y Franco, (2022) la necesidad de realizar un experimento deriva principalmente de una serie de puntos, como:

- ✓ Diagnosticar las causas principales de la variación a la variable de respuesta *y*
- ✓ Encontrar las condiciones ideales de las variables de entrada *x* con las que se consigue un valor deseado en la variable de respuesta *y*
- ✓ Comparar las respuestas en diferentes niveles de una variable de interés
- ✓ Elaborar un modelo estadístico-matemático del experimento para realizar evaluaciones futuras bajo escenarios similares.

El diseño de experimentos permite tener una productividad a los investigadores, así como la confiabilidad de los resultados obtenidos, dado que por su naturaleza aplicable en varios campos de la investigación permite lograr una optimización en la experimentación logrando así minimizar el número de experimentos a realizar (Concepción *et al.,* 2021). Además, es una herramienta que contribuye a la disminución de los gastos por concepto de recursos, materiales y una reducción de tiempo en la investigación, punto importante para la obtención de resultados.

La aplicación del diseño experimental se da en la mayoría de las áreas del conocimiento, sin embargo, se debe considerar cumplir con las siguientes fases de acuerdo a Melo, O. O., López, L. A., y Melo, S. E. (2007):

Fase 1. Caracterización de un proceso: se determinan los rangos de los factores o variables controlables sobre la variable de respuesta que minimice el efecto de los factores o variables no controlables.

Fase 2. Depuración y optimización de un proceso ya caracterizado: determinar los niveles o tratamientos de los factores o variables afectado que proporciona la variable de respuesta y se espera que sea óptima.

Conceptos básicos de los Diseños de Experimentos

De acuerdo con Gutiérrez & De La Vara (2008), algunos conceptos básicos en el diseño de experimentos son:

- *Unidad experimental*: piezas o muestras utilizadas para generar un valor representativo resultado del experimento.
- *Variable de respuesta:* permite conocer el efecto o los resultados de cada prueba experimental.
- *Factores controlables:* variables que se fijan en un nivel dado lo que permite experimentarlos.
- *Factores no controlables:* variables que no pueden controlarse durante el experimento.

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

- *Niveles:* son los diferentes valores asignados a cada factor estudiado en el diseño de experimentos.
- *Tratamiento:* es la combinación de niveles de todos los factores estudiados en el diseño de experimentos.
- *Error aleatorio:* causas comunes o aleatorias generadas por la variabilidad observada en la variable de respuesta.

Selección de los Diseños de Experimentos
En la Figura 2 se observan los cinco aspectos que se pueden considerar y los cuales pueden ayudar a elegir el diseño de experimentos el cual cumpla con el estudio a realizar (Gutiérrez & De La Vara (2008).

Figura 2. Aspectos para elegir el diseño de experimentos

Algunos de los principales diseños de experimentos se muestran en el esquema de la Figura 3

Figura 3. Tipos de diseño de experimentos

Etapas del Diseño de Experimentos
En la Tabla 1 se muestra una comparación de las etapas para realizar un diseño de experimentos como lo describen algunos autores.

Tabla 1. Etapas del diseño de experimentos

Humberto, G. P., & De La Vara, R. (2008).	Montgomery, D. C. (2008).	Melo, O. O., López, L. A., & Melo, S. E. (2007).
Etapa I. Planeación y realización		
1.Entender y delimitar el problema u objeto de estudio	1.Identificación y enunciación del problema	1.Conocimiento claro del material experimental
2.Elegir la (s) variables (s) de respuesta que será medida en cada punto del diseño y verificar que se mide de manera confiable		
3.Determinar cuáles factores deben estudiarse, de acuerdo con la supuesta influencia que tiene sobre la respuesta	3.Selección de la variable de respuesta	3.Selección de las variables de respuesta según los objetivos
4.Seleccionar los niveles de cada factor, así como el diseño experimental adecuado a los factores se tienen y al objetivo del experimento	4. Elección del diseño experimental	4.Selección del diseño experimental a. Diseño de tratamientos b. Diseño del control del error c. Estructura del control del error d. Muestreo y diseño de observaciones
5.Planear y organizar el trabajo experimental 6.Realizar el experimento	5.Realización del experimento	5. Conducción del experimento
Etapa II. Análisis	6.Análisis estadístico de los datos	6.Análisis de datos a. Estimación de los parámetros del modelo b. Teoría de estimabilidad c. Pruebas de hipótesis
Etapa III. Interpretación	7.Conclusiones y recomendaciones	7.Conclusiones y recomendaciones
Etapa IV. Control y conclusiones		

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

En la Figura 4 se observa un esquema de las etapas para realizar un diseño de experimentos, la cual es una propuesta realizada, tomando como base los diferentes autores (Montgomery 2004, Gutiérrez y De La Vara 2008, y Melo, O. O., López, L. A., y Melo, S. E. (2007)

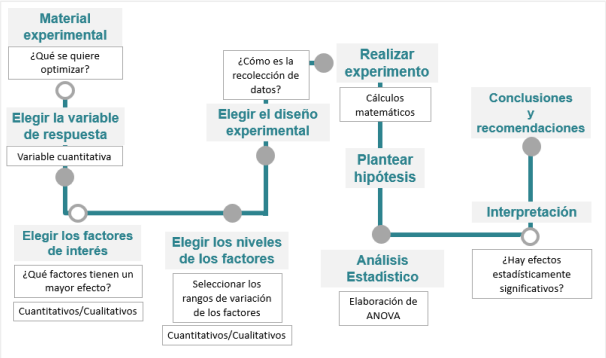


Figura 4. Esquema de las etapas del diseño de experimentos

Esta propuesta se desarrolla de la siguiente manera:

Material experimental: la interrogante en este apartado es ¿qué se quiere optimizar? Y desde un enfoque estadístico-matemático optimizar es la selección del mejor elemento de entre varios disponibles, desde la perspectiva del material compuesto se buscaría:

- Mejores condiciones mecánicas, que combinación en contenido de peso de fibra natural en una matriz cerámica o plástica se obtienen mejores resultados en propiedades mecánicas.
- Evaluación de la fibra natural, que tratamiento químico y en que proporción genera que la fibra presente mejor interfaz en la matriz.

Elegir la variable de respuesta: el análisis estadístico requiere de cálculos matemáticos, lo cual, es importante que la variable de respuesta sea cuantitativa, por ejemplo, la resistencia compresión, flexión o tracción. Medir la conductividad térmica, analizar la densidad del material, entre otros ejemplos.

Elegir los factores de interés: como todo investigador y la consulta que realiza en la literatura, debe considerar que pretende obtener en el análisis del diseño de experimentos, desde el enfoque de materiales compuestos este se define como la combinación de dos o más elementos que poseen propiedades químicas, físicas y mecánicas específicas, por lo que, al combinarse adquieren propiedades mejoradas de acuerdo con Herrera, 2021 de manera que se deben elegir los factores de interés como: cantidad de fibra natural, tipo de fibra natural, longitud de fibra natural, tratamiento químico aplicado a la fibra natural, orientación de la fibra, entre otros.

Elegir los niveles de los factores: si el interés del investigador es analizar diferentes tipos de fibras naturales como refuerzo en materiales compuestos puede elegir tres niveles para un factor, o si el interés es analizar el material compuesto a diferentes temperaturas podría elegir los siguientes niveles, considerando que los niveles son de carácter cuantitativo o cualitativo, por ejemplo:

Cualitativo
- Nivel 1: Fibra de coco
- Nivel 2: Cascarilla de arroz
- Nivel 3: Bagazo de caña

Cuantitativo
- Nivel 1: Temperatura alta (180°C)
- Nivel 2: Temperatura media (140°C)
- Nivel 3: Temperatura baja (90°C)

Elegir el diseño de experimental: la cuestión en esta etapa es como se realiza la recolección de datos, lo ideal es la aleatoriedad, además si hay replicas o solo un valor a considerar, de eso dependerá, de utilizar uno por bloques o un factorial.

Realizar el experimento: llevar a cabo la experimentación, es decir, la elaboración del material compuesto con los factores de interés, y con ello realizar los cálculos matemáticos.

Plantear hipótesis: Al realizar el análisis estadístico se plantean dos principales hipótesis:

$$H_0: \mu_i = 0 \text{ para toda i}$$
$$H_1: \mu_i \neq 0 \text{ para al menos una i}$$

Se acepta H_0 cuando no hay un efecto significativo o H_0 se rechaza cuando si hay un efecto significativo.

Análisis estadístico: todos los diseños de experimentos se analizan a través del análisis de varianza, el cual, con los cálculos matemáticos correspondiente, permite observar que factores se encuentran activos, y con estadístico y F_0 determinar si H_0 se acepta o rechaza.

Interpretación: la interpretación dependerá de los factores de interés y las hipótesis planteadas. Es decir, que si el investigador busca mejorar la interfaz de la fibra natural y la matriz, es conveniente que al analizar diferentes tratamientos químicos se presente una diferencia significativa al evaluarlos con diferentes tratamientos o diferentes niveles de un solo tratamiento. Si no se presentara diferencia significativa, se entendería que no es relevante aplicar uno u otro tratamiento.

Conclusiones y recomendaciones: por último, en este apartado, se describe con base a los resultados y análisis estadístico las conclusiones de la finalidad de la investigación aplicando diseño de experimentos.

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

Materiales compuestos
Un material compuesto es la combinación de dos o más elementos que poseen propiedades químicas, físicas y mecánicas específicas, por lo que, al combinarse adquieren propiedades mejoradas, el material compuesto dispone de una fase continúa llamada matriz, las cuales en su mayoría son poliméricas y sueles ser termoplásticas o termoestables, y una fase discontinua llamada refuerzo que pueden ser fibras (Herrera, A. M. C., 2021), estas fibras pueden ser sintéticas o naturales.

Las propiedades de la matriz y el refuerzo, así como la interacción entre estos elementos, influyen en las propiedades finales del material compuesto (Aquim, E., Vianello, M. A., & Castello, W. 2022). El refuerzo cumple una función muy importante como elemento del material compuesto, es el que recibe y absorbe las cargas de la fuerza aplicada que se ejerce sobre el material, por lo tanto, es importante mencionar que la elección de la fibra, el tamaño de la partícula y en sí la composición del material compuesto influyen para la optimización en los materiales (Marcalla, A. M., & Coyago, A. P. R. 2021).

A la hora de formular un material compuesto, se cometen algunos errores como omitir las contribuciones exactas que da cada componente, además de los parámetros del proceso de elaboración. Por lo que el uso de herramientas como el diseño de experimentos factoriales, se considera la cuantificación de cada variable de los elementos que compone el material compuesto, como porcentaje de contenido de fibra, longitud de la fibra, temperaturas de elaboración, dosis de la matriz, entre otras variables que se relacionan directamente en las propiedades finales del material (Gutiérrez, H. O. C., Barrera, G. M., Córdoba, L. I. Á., & de Oca Valdés, P. M. 2022).

Actualmente, existe una preocupación por el agotamiento de los recursos no renovables, el calentamiento global el cual ha dado apertura a una mayor investigación sobre el reemplazo del uso de fibras sintéticas por fibras naturales en los materiales compuestos, la fibra natural ofrece varias ventajas como la biodegradabilidad, bajo costo, peso ligero, sostenibilidad y con buenas propiedades mecánicas (Constante, A. M., & Coyago, A. P. R. 2021). Además, los residuos agroindustriales representan más del 40% de los residuos a nivel mundial (Quinchía-Figueroa, A. M., & Valencia-García, M. F., 2023). En la elaboración de nuevos materiales compuestos, la tendencia en los investigadores es buscar materiales eco-amigables para contribuir al desarrollo sostenible, y utilizar materiales que son considerados desechos, lo que permite mantenerlos en la cadena de valor dentro de una economía circular.

DISCUSIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

El uso de los diseños de experimentos permite al investigador a obtener los resultados en menor tiempo, tomar decisiones inmediatas, así como limitar la cantidad de experimentos a realizar, fijar las variables de interés, reducir costos y no desperdiciar material en experimentación a base de prueba y error.

Quinchía y Valencia (2023), analizan la elaboración de un material compuesto con un diseño de experimentos, toman como variable de respuesta la resistencia a la tracción, para el refuerzo del material se utilizó fibras de tallo alto residual del girasol como alternativa viable en su valorización, se tomó un material cerámico como matriz, se consideraron como variables de entrada para el factor A: horas de carbonatación (2, 3 y 5 h), factor B horas de secado en horno (2 y 3 h) y factor C: tratamiento químico (Na_2SiO_3 al 25% v/v, $Ca(OH)_2$ al 4% m/v, $Ca(ClO)_2$ al 9% m/v, $NaHCO_3$ al 9% m/v y NaOH al 5% m/v) manteniendo constante la temperatura de secado a 50°C, realizando tres replicas por cada combinación, con un nivel de significancia del 0.05 se concluye que las horas de secado a diferencia del tiempo de carbonatación y el tipo de tratamiento químico no presentan una diferencia estadísticamente significativa, los tratamientos aplicados de silicato de sodio Na_2SiO_3 e hidróxido de sodio NaOH sumados a la carbonatación incrementan la resistencia a la tracción en fibra de girasol en un 75.53 y 100% favoreciendo una mejor interfase en el material compuesto, también con la aplicación del tratamiento químico a la fibra de tallo alto de girasol, se observó un 43% de incremento de la resistencia a la tracción superando a fibras como polietileno y polipropileno.

Mas., (2021) estudia la relación del fresado en materiales compuestos con base a la rugosidad, desgaste de la herramienta y de laminado, se utilizó el estudio experimental, se tomaron como variables de entrada las condiciones de corte: velocidad de corte (Vc) con tres niveles: 300, 385 y 470 m/min, avance por diente (Fz) en tres niveles: 0.1, 0.25 y 0.4 mm/diente y profundidad de pasada (a_p) con dos niveles: 0.5 y 1.5 mm. Se consideraron otras variables que afectan el material del laminado como volumen de fibra (Fv) en dos niveles: 40 y 60% y orientación de la fibra (Fo) en dos niveles: 0°-90° y 45-135°, las variables de salida son: la rugosidad superficial, desgaste de la herramienta y laminado de la pieza, el diseño se realizó sin réplicas por los costos del consumo de material y tiempo de mecanizado, concluyendo que cuando el tiempo de corte aumenta con Fv=60% y Fo=45° dan peores resultados a la rugosidad, en relación al desgaste Fz=0.4 mm/diente y Vc=470 m/min dan un mayor desgaste a la herramienta de corte, finalmente para el laminado con Fv=40% no aparece delaminado pero con Fv=60% si presenta.

Ulibarrie *et al*., (2019) para obtener una mezcla optimizada de los componentes en la elaboración de un material, utilizaron un diseño de experimentos permitiendo reducir la cantidad de muestras a fabricar. Al material con relleno celulósico se le realizaron pruebas de conductividad térmica y densidad, la función principal es

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

utilizarlo como panel para una arquitectura sustentable. Determinando una relación directamente entre la densidad y el coeficiente de conductividad térmica, presentando resultados óptimos de 390 kg/m3 y 0.306 Kcal/h°Cm los cuales son comparados con placas de yeso comerciales dando valores aproximados en función de la densidad.

Paredes *et al*., (2021) Aplicaron un análisis de diseño de experimentos se realizó la caracterización mecánica de un material compuesto con matriz de látex reforzado con fibra de cabuya corta y aleatorizada. La variable del factor de la matriz fue en tres niveles 20, 30 y 45 % de látex y en la variable de contenido de fibra también tres niveles con 80, 70 y 55% de contenido de fibra de cabuya. Logrando la optimización de la elaboración del material compuesto con 20% de látex y 80% de contenido de fibra con un centímetro de longitud.

Herrera, (2021) realizó un diseño de un proceso de curado automatizado utilizado en materiales compuestos, parte del diseño de experimentos que permite evaluar condiciones ideales para probar la fiabilidad del equipo, por lo que, plantean un diseño factorial 2x2, factor de temperatura con dos niveles: 65 y 50°C y factor de presión de vacío con dos niveles: 19 y 17 In Hg, las variables de salida del diseño son el esfuerzo último de tensión y módulo de elasticidad, pruebas mecánicas en las que se enfoca dicho análisis, las probetas realizadas son bajo las especificaciones de la norma ASTM D3039/D3039 M-17 con cinco replicas. Los resultados obtenidos son: la combinación de temperatura a 65°C y presión de 17 In Hg genera un mayor esfuerzo último a la tensión con valor de 392.086 Mpa y la combinación temperatura 50°C y presión 17 In Hg genera mayor módulo de elasticidad con 2807.66 Mpa.

Solórzano *et al*., (2023) elaboraron un plástico biodegradable con almidón de la tusa de maíz se plantea a partir de un diseño de experimentos considerando como factor la cantidad de almidón con tres niveles: 4, 5 y 6 g fijando la cantidad de plastificante a 2 g, posterior a los resultados obtenidos se realizó un segundo diseño de experimentos con la cantidad fija de almidón 5 g y cuatro niveles para el factor del plastificante: 1.5, 1.75, 2.25 y 2.5 g. Se obtuvieron buenos resultados con la mezcla de 5 g de almidón y 1.75 g de sorbitol en condiciones de humedad con 16.69 ± 0.02 %, densidad 0.93 ± 0.06 g/mL, solubilidad en agua 57.79 ± 0.04 %, espesor 0.63 ± 0.02 mm y biodegradabilidad 31.92 ± 5.61%

Hernández *et al.,* (2021) realizan un análisis de la superficie de la fibra de coco las cuales se caracterizaron mediante FTIR, SEM y EDS, así como la resistencia a la tracción de fibra única con base la norma ASTM D 3379-75 con un diseño de experimentos factorial 3x2x3 con tres replicas, como factor A tratamiento químico: 3, 6% de NaOH y sin tratamiento, factor B longitud de empotramiento: 15 y 25 mm y factor C días de fraguado: 7, 14 y 28 días, lo que permitió determinar con el diseño de experimentos que no hay diferencia significativa entre aplicar el tratamiento químico del 3 o 6% de NaOH, ambos pueden ser considerados para aplicar a la superficie de la fibra para la elaboración del material compuesto, lo que también se visualizó en la caracterización FTIR en la disminución de los modos vibracionales de los grupos funcionales de la lignina.

Ganesan et al., 2021 menciona que los compuestos a base de fibras naturales están reemplazando gradualmente a los materiales tradicionales en una amplia gama de aplicaciones estructurales utilizadas en diversos entornos. Sin embargo, las fibras naturales son susceptibles a los choques térmicos, lo que afecta su uso en entornos fríos, especialmente en el caso de fibras de yute y aserrín en entornos criogénicos. Estos compuestos enfrentan problemas de adhesión y agrietamiento debido a las tensiones internas generadas por las bajas temperaturas, lo que impacta negativamente en su resistencia, flexión, impacto y dureza. Para abordar este problema, se emplean tratamientos químicos alcalinos y criogénicos con el objetivo de optimizar la interacción entre la matriz de poliéster y los refuerzos. La metodología de superficie de respuesta (MSR) se utilizó en conjunto con un diseño experimental Taguchi L27 para modelar y analizar las interacciones entre seis parámetros críticos: densidad y proporción de aserrín, tipo y número de capas de fibra de yute, y las duraciones de los tratamientos criogénico y alcalino. Gracias a la MSR, fue posible predecir las respuestas mecánicas del material y determinar las condiciones óptimas que maximizan sus propiedades.

Iliyasu et al., 2022 estudian la problemática de optimizar las propiedades físico-mecánicas de compuestos epóxicos reforzados con fibra natural extraída del fruto de la palmera Deleb, el problema radica en encontrar la combinación óptima de parámetros, como la cantidad y la longitud de la fibra. Esto es crucial para mejorar propiedades esenciales como su resistencia a la tensión y la energía de impacto, su flexibilidad y la reducción de la absorción de agua, aspectos críticos en aplicaciones estructurales. Para abordar este desafío, se utilizó la metodología de superficie de respuesta (RSM) basada en un diseño central compuesto (CCD), lo que permitió evaluar cuantitativamente la influencia de las variables y sus interacciones. Los modelos matemáticos obtenidos facilitaron la predicción y optimización de los parámetros de procesamiento, identificándose una formulación óptima con 38,3% en peso de refuerzo y una longitud de fibra de 3 mm. Esto se tradujo en mejoras significativas en las propiedades del material. Este enfoque innovador demuestra ser eficaz.

CONCLUSIONES

Como muestra la literatura, no únicamente los diseños de experimentos permiten crear las mezclas óptimas para la

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

elaboración de materiales compuestos, si no que también tienen una aplicación en el análisis de dichos materiales principalmente en pruebas mecánicas como flexión, compresión, entre otras, así como en la evaluación de las fibras como refuerzo en su uso en materiales compuestos. La aplicación de los diseños de experimentos también es aplicada para encontrar la mezcla óptima de bioplásticos.

La metodología de superficie de respuesta (RSM) es una herramienta poderosa en el diseño experimental y la optimización de procesos. Su capacidad para analizar y modelar relaciones entre múltiples variables independientes y las respuestas resultantes permite identificar condiciones óptimas de funcionamiento de manera eficiente. A través de diseños experimentales estructurados, como el diseño central compuesto (CCD), la RSM minimiza el número de experimentos necesarios, lo que reduce significativamente el tiempo y los costos sin comprometer la calidad de los resultados. Además, facilita la detección de interacciones entre variables, lo que es crucial para comprender los efectos combinados y tomar decisiones informadas. Su enfoque cuantitativo y predictivo es fundamental en áreas como el diseño de materiales y procesos industriales, proporcionando un marco sólido para mejorar la eficiencia, calidad y desempeño de productos complejos.

Finalmente, este análisis permite dar un enfoque sobre el uso de los diseños de experimentos desde la perspectiva de los materiales compuestos, lo que ha demostrado ser una herramienta eficiente que le permite al investigador ser más productivo y obtener resultados en menor tiempo, con la certeza de un análisis estadístico-matemático. Su aplicación es especialmente valiosa en industrias donde la experimentación es costosa o el tiempo es crítico, como en el desarrollo de materiales compuestos, procesos químicos y biotecnología. Proporciona a los investigadores una comprensión intuitiva de la relación entre variables. En resumen, las herramientas del diseño experimental proporcionan un enfoque sistemático que mejora la calidad de los productos, reduce costos y acelera la innovación, convirtiéndola en una herramienta esencial en el ámbito científico e industrial.

BIBLIOGRAFÍA

[1.] Aquim, E., Vianello, M. A., & Castello, W. (2022). Simulación numérica de la delaminación en materiales compuestos. Revista de la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, 9(2), 15-21.

[2.] Concepción Toledo, D. N., González Suárez, E., López Bastida, E. J., & Ramos Miranda, F. (2021). Gestión del conocimiento en la proyección científica de la industria química mediante diseños experimentales. Revista Universidad y Sociedad, 13(2), 446-451.

[3.] Constante, A. M., & Coyago, A. P. R. (2021). Aplicaciones en la industria automotriz de materiales reforzados con fibra natural. Polo del Conocimiento: Revista científico-profesional, 6(6), 182-208.

[4.] Crespo, B. A. A., & FRANCO, E. G. C. (2022). Métodos de Muestreo para la Optimización de Diseño de Experimentos. In Memorias del Congreso Internacional de Investigación Academia Journals Celaya 2022 (Celaya, Guanajuato, México, 9-11 de noviembre de (Vol. 14, No. 9, pp. 39-44).

[5.] Gutiérrez, H. O. C., Barrera, G. M., Córdoba, L. I. Á., & de Oca Valdés, P. M. (2022). Fibras naturales y la radiación gamma en la elaboración de materiales compuestos. In Materiales Avanzados y Nanomateriales: aprovechamiento de fuentes naturales y sus beneficios al medio ambiente (p. 95). OmniaScience.

[6.] Hernández, I. L., Vargas Galarza, Z., García Hernández, E., Hernández Díaz, W. N., & Cárdenas Valdez, R. C. (2021). Evaluación de la superficie de la fibra de coco para su utilización como refuerzo de un material compuesto con matriz de cemento. Congreso Internacional En Tecnología Innovación y Docencia, 3, 46. http://www.zacatepec.tecnm.mx/archivos/posgrado/REVISTA-CITID-2021-1.pdf

[7.] Herrera, A. M. C. (2021). Diseño E Implementación De Un Proceso Automatizado Para Curado De Materiales Compuestos. Revista de Ciencias de Seguridad y Defensa, 6(4), 19-19.

[8.] Humberto, G. P., & De La Vara, R. (2008). Análisis y diseño de experimentos. Editorial Mc Graw Hill, 368.

[9.] Marcalla, A. M., & Coyago, A. P. R. (2021). Materiales compuestos de polímero reforzado con fibra de cabuya y coco aplicado al sector automotriz. Dominio de las Ciencias, 7(3), 436-465.

[10.] Mas, M. D. N. (2021). Análisis experimental del fresado de materiales compuestos reforzados con fibra de basalto (Doctoral dissertation, Universitat Politècnica de València).

[11.] Melo, O. O., López, L. A., & Melo, S. E. (2007). Diseño de experimentos: métodos y aplicaciones. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ciencias.

[12.] Montgomery, D. C. (2008). Diseño y análisis de experimentos. 2da. Limusa. México, DF.

[13.] Paredes, J., Arroba, C., Machado, A., & Castillo, W. (2021). Mechanical Properties Optimization of the Elastomeric Matrix Reinforced Composite Material with Cabuya Fiber, Using the DOE/Complete Factorial Design and Desirability Function. Key Engineering Materials, 872, 45-53.

[14.] Quinchía-Figueroa, A. M., & Valencia-García, M. F. (2023). Evaluación de fibras del tallo residual de girasol (Helianthus annuus) en materiales compuestos de matriz cerámica. Ciencia y

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

Tecnología Agropecuaria, 24(2), e2825. https://doi.org/10.21930/rcta.vol24_num2_art:2825

[15.] Solórzano-Vélez, J. J., Vargas-Delgado, M. X., Saltos, W. H. P., Delgado, E. A. R., & Riera, M. A. (2023). Obtención de plástico biodegradable a partir de almidón de la tusa de maíz (Zea mays). Publicaciones en Ciencias y Tecnología, 17(1), 19-31.

[16.] Taverna, M. E., Boriglio, R., Dobler, S., Lesta, M., Scocco, N. y Garnero, P. C. (2023, abril-junio). Preparación de un barniz basado en residuos poliméricos como complemento experimental para estudiantes de ingeniería. Educación Química, 34(2), 81-93. http://dx.doi.org/10.22201/fq.18708404e.2023.2.83552

[17.] Ulibarrie, N. O., Beltramini, L. B., Defagot, V., Bourquen, N. L., & Andrés, F. (2019). Utilización del Diseño de Experimentos para la Optimización de Mezclas. Revista Tecnología y Ciencia, (36), 11-21.

[18] Ganesan, V., Shanmugam, V., Kaliyamoorthy, B., Sanjeevi, S., Shanmugam, S. K., Alagumalai, V., ... & Das, O. (2021). Optimisation of mechanical properties in saw-dust/woven-jute fibre/polyester structural composites under liquid nitrogen environment using response surface methodology. Polymers, 13(15), 2471.

[19] Iliyasu, I., Bello, J. B., Dibal, M. N., Oyedeji, A. N., Salami, K. A., & Oyedeji, E. O. (2022). Response surface methodology for the optimization of the effect of fibre parameters on the physical and mechanical properties of deleb palm fibre reinforced epoxy composites. Scientific African, 16, e01269.

AUTORIZACIÓN Y RENUNCIA.

Los autores del presente artículo autorizan al TecNM/Instituto Tecnológico de Zacatepec para publicar el escrito en el libro electrónico del CITID 2025. El TecNM/ITZ o los editores no son responsables ni por el contenido ni por las implicaciones de lo que está expresado en el escrito.

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

CORROSIÓN INDUCIDA POR MICROORGANISMOS EN ACERO 1018 Y SU ESTUDIO CON UN ANTIBIÓTICO Y EXTRACTO NATURAL

Palacios Talavera Aurelio Alejandro[1], León Silva Ulises[2], Saldivar Guerrero Rubén[3], Escobedo Alatorre Jesús[4], Olarte Paredes Alfredo[5], Salgado Delgado Rene[6]

[1]Maestro en Ciencias de la Ingeniería. Universidad Autónoma del Estado de Morelos, Centro de Investigación en Ingeniería y Ciencias Aplicadas, Corrosión Electroquímica, ale.palacios1802@gmail.com, 62209. Av. Universidad 1001, Col. Chamilpa, Cuernavaca, Morelos. [2]Doctorado, Universidad Autónoma del Estado de Morelos, Centro de Investigación en Ingeniería y Ciencias Aplicadas, Corrosión Electroquímica, ulises.leon@uaem.mx, 62209. Av. Universidad 1001, Col. Chamilpa, Cuernavaca, Morelos. [3]Centro de Investigación en Química Aplicada, ruben.saldivar@ciqa.edu.mx, 25294. Blvd. Enrique Reyna Hermosillo No. 140 Saltillo, Coahuila México. [4]Doctorado, Universidad Autónoma del Estado de Morelos, Centro de Investigación en Ingeniería y Ciencias Aplicadas, jescobedo@uaem.mx, 62209. Av. Universidad 1001, Col. Chamilpa, Cuernavaca, Morelos. [5]Doctorado, Tecnológico Nacional de México Instituto tecnológico de Zacatepec, Posgrado en Ciencias de la Ingeniería, alfredo.op@zacatepec.tecnm.mx, 62780. Calzada Tecnológico #27, Zacatepec, Tetelpan, Morelos. [6]Doctorado, Tecnológico Nacional de México Instituto tecnológico de Zacatepec, posgrado en ciencias de la ingeniería, rene.sd@zacatepec.tecnm.mx, 62780. Calzada Tecnológico #27, Zacatepec, Tetelpan, Morelos.

Resumen -- La corrosión inducida por microorganismos (MIC) es un fenómeno que compromete significativamente la integridad de los materiales metálicos como el acero 1018 en entornos húmedos, típicos del sector industrial. Para evaluar la MIC, se empleó la siguiente técnica electroquímica: potencial de circuito abierto (OCP). Para las pruebas se utilizó agua desionizada en presencia y ausencia de las bacterias *Nitrobacter spp., Arthrobacter* spp. y *Bacillus subtillis*, en presencia y ausencia de Ceftriaxona (CRO) y extracto de muicle (*Justicia spicigera*). Esto se realizó con el objetivo de estudiar si el consorcio de bacterias acelera la corrosión en el acero y determinar si la CRO y/o la *Justicia spicigera* eliminan a las bacterias ayudando al control de la corrosión. Los resultados mostraron que las bacterias no aceleran la corrosión y la CRO actúa como un inhibidor de la corrosión en el acero 1018.

Palabras Clave: MIC, OCP, CRO, *Justicia spicigera*, Ceftriaxona

Abstract – Microorganism-induced corrosion (MIC) is a phenomenon that significantly compromises the integrity of metallic materials such as 1018 steel in humid environments, typical of the industrial sector. To evaluate the MIC, the following electrochemical technique was used: open circuit potential (OCP). For the tests, deionized water was used in the presence and absence of the bacteria Nitrobacter spp., Arthrobacter spp. and Bacillus subtillis, in the presence and absence of Ceftriaxone (CRO) and muicle extract (Justicia spicigera). This was carried out with the objective of studying whether the bacterial consortium accelerates corrosion in steel and determining whether CRO and/or Justicia spicigera eliminate bacteria, helping to control corrosion. The results showed that bacteria do not accelerate corrosion and CRO acts as a corrosion inhibitor on 1018 steel.

Key words – MIC, OCP, CRO, *Justicia spicigera*, Ceftriaxone

INTRODUCCIÓN

La MIC, representa un desafío significativo para la durabilidad y la integridad de los aceros estructurales. Este tipo de corrosión es el resultado de la actividad metabólica de microorganismos como bacterias, algas y hongos, los cuales pueden producir ácidos o sulfuros que aceleran el deterioro de los metales [1, 2].

La presencia de bacterias como por ejemplo *Bacillus subtilis* y *Pseudomonas aeruginosa* que se encuentran en las plantas de tratamiento de agua residual, ambientes naturales acuosos y fluidos industriales, generan productos metabólicos corrosivos para diversos metales [3]. Este fenómeno no solo compromete la seguridad de las estructuras, sino que también incrementa los costos de mantenimiento y reparación. Para mitigar la MIC, tradicionalmente se han utilizado biocidas y la remoción mecánica de la suciedad.

Así mismo, es menos frecuente que se utilicen extractos naturales para la eliminación de las bacterias causantes de la corrosión. Sin embargo, se han utilizado compuestos tóxicos que representan riesgos ambientales significativos [4, 5]. La creciente preocupación por estos riesgos ha impulsado la búsqueda de inhibidores de corrosión más seguros y sostenibles. Los extractos de plantas como *Thymus vulgaris*, *Pithecellobium dulce* y *Opuntia ficus-indica* han mostrado propiedades prometedoras como inhibidores de la corrosión en estudios recientes [6-8].

El problema central es la necesidad de comprender y controlar eficazmente la MIC en aceros estructurales mediante el uso de compuestos que sean tanto efectivos como ambientalmente benignos. Esto implica investigar no solo el comportamiento de la MIC bajo diversas condiciones, sino también la eficacia comparativa de compuestos naturales frente a los artificiales. Aún no se ha determinado completamente cómo estos compuestos interactúan con los microorganismos responsables de la MIC y cuál es su impacto a largo plazo en las estructuras

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

de acero. Por lo tanto, se requiere un enfoque integral y multidisciplinario que combine la microbiología, la química de materiales y la ingeniería ambiental para desarrollar soluciones innovadoras y sostenibles. Investigar y desarrollar inhibidores de la corrosión que tengan un impacto en los microorganismos y lograr controlar la MIC de una manera amigable con el planeta es lo más deseable en estos momentos.

DESARROLLO

Elaboración del extracto de muicle (*Justicia spicigera*)
La planta se dejó secar al sol y una vez seca, las hojas se trituraron y se maceraron durante una semana (168 h) [9] utilizando alcohol del 96 °. Después, el material se filtró y se recuperó el contenido químico extraído; se obtuvo un residuo liquido de color rojizo.

Antibiótico comercial
Se utilizó la ceftriaxona (CRO) inyectable de 1 g. de la marca Pharmalife.

Bacterias Gram (+) y Gram (-)
Las bacterias *Bacillus subtillis*, *Arthrobacter* spp. y *Nitrobacter* spp. Fueron proporcionadas por el laboratorio biotecnológico ROHM BioPro/RT Biotech. Estas bacterias son utilizadas como biodigestoras en las plantas de tratamiento de aguas residuales y se encuentran clasificadas como clase 1: riesgo individual y poblacional escaso o nulo. Las bacterias tienen pocas probabilidades de provocar enfermedades en el ser humano o los animales, de acuerdo con la ATCC (American Type Culture Collection) [10]: son encontradas de manera natural, no son patogénicas y oportunistas.

Potencial de circuito abierto
Para el estudio de la MIC utilizando las bacterias anteriormente descritas, se utilizó el potencial de circuito abierto (OCP) el cual se llevó a cabo registrando una lectura cada 1 segundo durante 3600.

La prueba electroquímica se realizó en diferentes soluciones a 35 ± 3 °C sin agitación. Para esto, se utilizó una celda estándar de tres electrodos (Figura 1): a) barra de grafito como electrodo auxiliar (AE), b) electrodo de calomel saturado como electrodo de referencia (RE) y c) como electrodo de trabajo (WE) el acero 1018 encapsulado con resina y un área efectiva de 0.3167 cm^2.

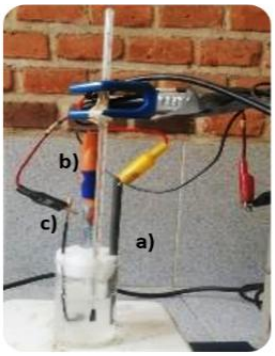


Figura 1. Celda electroquímica de tres electrodos utilizada en las pruebas.

Preparación de los electrodos de trabajo para las pruebas electroquímicas
El procedimiento utilizado para la fabricación de electrodos de trabajo consistió en lo siguiente: Se soldaron con un cable de cobre con una sección de 1.31 mm^2 y diámetro de 1.29 mm en al acero 1018, usando una soldadora portátil (Unidad de Conexión de Termopar). Después, el acero junto con el cable se encapsuló en resina epóxica YD-128 (proporción de 2:1 con el endurecedor), obteniendo probetas cilíndricas con 1 cm de diámetro y 1.5 cm de altura (Figura 2). Se probó la continuidad entre el acero y cable de cobre con un voltímetro. Después, se realizó un tratamiento de la cara expuesta del acero con diferentes grados de lijas (120, 200, 400, 600, 1000 y 1200) y para un acabado espejo se utilizó alúmina (1µm) con un paño. Por último, las probetas se lavaron con agua destilada y para no dejar residuo y desengrasar se utilizó acetona y se secaron con aire caliente.

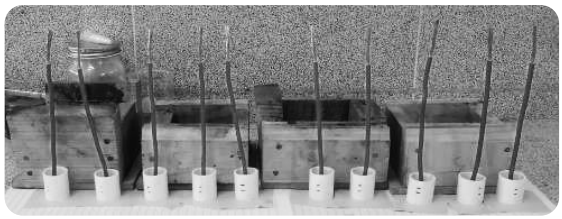


Figura 2. Electrodos de trabajo fabricados con el acero 1018 y resina epóxica YD-128.

Esterilización
Para todas las pruebas realizadas, los electrodos de trabajo y materiales utilizados se esterilizaron con radiación ultravioleta C emitida por una lámpara de 6 W (110 V), con una longitud de onda de 365 nm. Para ello, en una cámara se metieron los materiales y probetas durante 30 min (Figura 3). Cabe mencionar que la ceftriaxona, extracto de muicle y las bacterias no fueron radiadas.

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

Figura 3. Esterilización por radiación ultravioleta C.

Observación de las bacterias

Para observar las bacterias en un microscopio óptico, se realizaron diluciones. Para 100 mL de agua desionizada, se pesó 0.5 g del producto liofilizado con bacterias, se agitó con un vortex y se tomó 1 mL de la solución madre y se agregó a 9 mL de agua desionizada del tubo que se le denominará 10^{-1}. Después se vortexeo y se tomó 1 mL de la solución para agregarla al segundo tubo denominado 10^{-2}, así sucesivamente hasta llegar a la cuarta dilución (10^{-4}) (Figura 4), [11]. Después de la última dilución, se tomaron 50 µL de la solución sin tinción y se vertió en un portaobjetos y el cual fue cubierto por un cubreobjetos, para ser analizada en el microscopio a 100 aumentos, con aceite de inmersión. Se contaron las Unidades Formadoras de Colonia (UFC) por mL [12], con la ecuación 1. La fórmula general para calcular la Concentración Bacteriana (CB) es:

CB = (Numero de colonias contadas * Factor de dilución) / Volumen inoculado Ec. (1)

Donde el factor de dilución (inverso) es el siguiente: -1 = 1:10, -2 = 1:100, -3 = 1: 1,000, -4 = 1: 10,000.

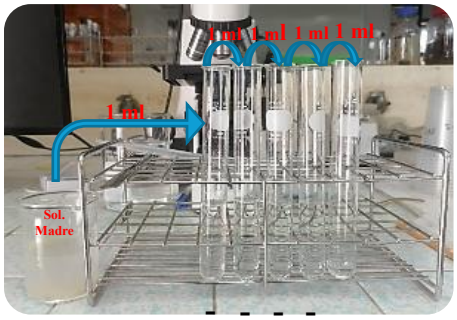


Figura 4. Diluciones preparadas.

DISCUSIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

En la (Figura 5). Se pueden observar las bacterias utilizadas en las pruebas de corrosión; dentro de los círculos rojos las partículas del liofilizado y dentro de los círculos azules el consorcio de bacterias. Estas imágenes están de acuerdo con las reportadas en la literatura [13]. Así mismo, mediante la ecuación 1, la concentración de las bacterias calculada fue de 60,000 UFC/ mL.

Figura 5. Consorcio de bacterias.

En la (Figura 6) se presentan los resultados de la prueba de potencial de circuito abierto. Se puede observar que los sistemas acero 1018/Agua, Agua + E. Muicle, Agua + CRO, Agua + Bacterias, Agua + Bacterias + E. Muicle y Agua + Bacterias + CRO alcanzaron un equilibrio termodinámico [14]. El sistema acero/agua a temperatura de 35 ± 3 °C, presenta valores aproximados de -0.5 V a -0.7 V [15], así mismo se puede observar que en la solución de Agua + CRO es menos activo con un potencial aproximado de -215 mV volviendo al metal más pasivo ya que la ceftriaxona se adsorbió en la superficie del acero 1018, formando una capa protectora que reduce la interacción del metal con el medio corrosivo. Esta capa puede disminuir la tasa de corrosion al bloquear los sitios activos en la superficie del acero [16], en comparación con las otras soluciones antes mencionadas.

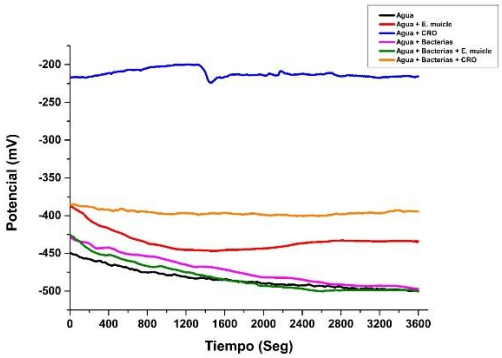


Figura 6. Grafica de OCP.

CONCLUSIONES

Se evaluó la influencia de las bacterias *Bacillus subtillis*, *Nitrobacter* spp y *Arthrobacter* spp, en la corrosión del acero 1018 en medio acuoso (agua desionizada a 35 ± 3 °C) y para ayudar a mitigar este fenómeno en el caso de que las bacterias fueran responsables de un aumento en la velocidad de corrosión, se utilizó ceftriaxona (CRO) y extracto de muicle. Los resultados de la prueba electroquímica mostraron que la solución agua + ceftriaxona ofreció una mayor protección contra la corrosión en el medio. Sin embargo, la *Justicia spicigera* (Muicle) provocó una mayor velocidad de corrosión en el acero. Los resultados electroquímicos de las probetas de acero 1018 indicaron un menor daño superficial del acero en presencia de la ceftriaxona. Las bacterias arriba mencionadas han sido reportadas en la literatura de forma

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

separada, es decir, la *Bacillus* sp. provoca un aumento en la velocidad de corrosión, la *Nitrobacter* sp. y *Arthrobacter* sp. protegen a los aceros de bajo carbono. Sin embargo, en la literatura no hay reportes del consorcio de estas bacterias y en lo que respecta al presente trabajo dicho consorcio tiende a tener una ligera protección contra la corrosión del acero 1018 en agua desionizada. Así mismo, según la prueba de OCP la sinergia entre el acero, la ceftriaxona, el medio y las bacterias provocan una mayor protección del acero en el tiempo.

BIBLIOGRAFÍA

[1] Hadley, R. F. (1948). Corrosion by microorganisms in aqueous and soil environments. *Corrosion handbook. John Wiley, New York*, 466-481.

[2] Greathouse, G. A., & Wessel, C. J. (1951). The role of bacteria in the corrosion of metals. Journal of Bacteriology, 62(3), 321-332.

[3] Zheng, Y., Xiao, K., & Wang, G. (2023). Bacterial communities and their influence on corrosion behavior of carbon steel in marine environments. Applied Microbiology and Biotechnology, 107(2), 467-479.

[4] Oguzie, E. E. (2010, March). Evaluation of the inhibitive effect of some plant extracts on the acid corrosion of mild steel. In NACE CORROSION (pp. NACE-10149). NACE.

[5] Santos, V. B., & Lima, R. C. (2019). Artificial inhibitors of corrosion in acidic cleaning and pickling processes in the petroleum industry. Journal of Petroleum Science and Engineering, 176, 21-30.

[6] Saidi, S., Bouyanzer, A., & Majidi, L. (2016). Thymus vulgaris as an eco-friendly corrosion inhibitor for steel in 1M HCl. Journal of Materials and Environmental Science, 7(1), 103-111.

[7] Moura, C. F., Tavares, S. S., & Costa, A. S. (2015). Inhibition of corrosion of carbon steel in acidic medium by Pithecellobium dulce extract. Journal of Materials Research and Technology, 4(3), 253-258.

[8] Hu, Z., Li, Q., Wang, W., & Zhang, Z. (2022). Corrosion inhibition of mild steel in acidic medium by Opuntia ficus-indica extract. Journal of Environmental Chemical Engineering, 10(3), 107-11.

[9] Sánchez-C., X. M., Ruíz R., J. C., Salazar V., M., Méndez F., O., & Olivo V., Z. E. (2019). Compuestos Fenólicos y Actividad Antiinflamatoria *in Vitro*, de Extractos de *Tradescantia Zebrina*. Investigaciones científicas y agrotecnológicas para la seguridad alimentaria, 451.

[10] UCM, UNIVERSIDAD COMPLUTENSE MADRID (2024, 26 de agosto). Grupos de riesgo. Centro de Vigilancia Sanitaria Veterinaria (VISAVET) https://www.visavet.es/es/bioslab/grupos-de-riesgo.php

[11] Cancino, I. P. A. R., Vera, A. V., Jaramillo, S. E. M., Pérez, C. A., Romo, C. R. R., Edith, N. E. P. G. N. & Vergara, S. (2023). Evaluación de parámetros fisicoquímicos y microbiológicos del agua de lluvia en la ENMSG. JÓVENES EN LA CIENCIA, 21, 1-9.

[12] Suarez, J. M. R., Pazmiño, J. P. S., Mendoza, G. A. G., Párraga, M. E. N., & Adrián, H. M. D. (2024). Optimización de Sustratos Sólidos para la Producción de Conidios de *Beauveria* spp. e *Isaria* spp. Emergentes-Revista Científica, 4(2), 611-626.

[13] Khan, MS, Yang, K., Liu, Z., Zhou, L., Liu, W., Lin, S. y Shang, C. (2023). Microorganismos implicados en la biodegradación y corrosión microbiológica de materiales estructurales. Coatings, 13 (10), 1683.

[14] Medina C., O., Ortiz p., A., Jacobo A., V. H., & Schouwenaars F., R. (2009). Corrosión microbiológica en aceros de bajo carbono. Ingeniería, investigación y tecnología, 10(1), 9-19.

[15] Rodríguez, V., Chavarín, U., & la Reforma, H. 2009 Corrosión de acero SAE 1018 en aguas amargas colectadas de la industria del petróleo: efecto de la temperatura.

[16] Vicencio Reyes, J. C. (2024). Desarrollo y evaluación de un inhibidor de corrosión de extractos naturales de residuos sólidos orgánicos.

AUTORIZACIÓN Y RENUNCIA.

Los autores del presente artículo autorizan al TecNM/Instituto Tecnológico de Zacatepec para publicar el escrito en el libro electrónico del CITID 2025. El TecNM/ITZ o los editores no son responsables ni por el contenido ni por las implicaciones de lo que está expresado en el escrito.

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

CAPACIDAD ANTIOXIDANTE DE HOJAS Y TALLOS DE RUTA GRAVEOLENS (RUDA) EXTRAIDOS CON DISOLVENTES EUTÉCTICOS PROFUNDOS

Ceja Gordillo Edson Javier [1], Pérez González Mariana Zuleima [2], Vicencio Reyes Juan Carlos [3], Vazquez Ramos Mayra Beatriz [4], Sánchez Ortiz William [5*]

[1]Ingeniero Químico. Tecnológico Nacional de México, TES de Ecatepec, División de ingeniería Química y Bioquímica, Av. Tecnológico S/N, Valle de Anahuac, Cp. 55210 Ecatepec de Morelos, Edo. Méx., México.
[2]Doctora. Tecnológico Nacional de México, TES de Ecatepec, División de ingeniería Química y Bioquímica, Av. Tecnológico S/N, Valle de Anahuac, Cp. 55210 Ecatepec de Morelos, Edo. Méx., México.
[3]M. en C. Tecnológico Nacional de México, TES de Ecatepec, División de ingeniería Química y Bioquímica, Av. Tecnológico S/N, Valle de Anahuac, Cp. 55210 Ecatepec de Morelos, Edo. Méx., México.
[4]Ingeniera Química. Tecnológico Nacional de México, TES de Ecatepec, División de ingeniería Química y Bioquímica, Av. Tecnológico S/N, Valle de Anahuac, Cp. 55210 Ecatepec de Morelos, Edo. Méx., México.
[5]Doctor. Tecnológico Nacional de México, TES de Ecatepec, División de ingeniería Química y Bioquímica, Av. Tecnológico S/N, Valle de Anahuac, Cp. 55210 Ecatepec de Morelos, Edo. Méx., México.
Correos: williamso@tese.edu.mx Cel. 5564617858.

Resumen -- La *Ruta Graveolens* (ruda), cuenta con compuestos químicos como alcaloides furoquinólicos, flavonoides, entre otros, dándole propiedades benéficas para el cuerpo, algunos estudios han demostrado que sirve como antiespasmódicas, antiparasitarias, hipotensoras, sedantes, entre muchas otras. En este estudio se pretende utilizar solventes no convencionales para la extracción de compuestos fenólicos mediante el uso de disolventes eutécticos profundos (DES), las mezclas que fueron utilizadas fueron a partir del cloruro de colina (HBA) y diferentes donadores de hidrógeno (HBD), urea (Reline), etilenglicol (Ethaline) y glicerol (Glyceline). Para la inhibición de radicales por el método DPPH se utilizaron distintas concentraciones (125 a 5000 µg/ml) de los extractos de hojas (HR) y tallos (TR), como control se utilizó quercetina (125 a 250 µg/ml). El extracto HR en Reline mostró una CI_{50} de 8.992 mg/ml, mientras que el extracto HR en Ethaline su CI_{50} fue de 7.608 mg/ml, finalmente, el extracto HR en Glyceline la CI_{50} fue de 6.470 mg/ml. En el caso de los extractos de TR, para Reline, Ethaline y Glyceline sus CI_{50} fueron de 81.988, 63.612 y 33.202 mg/ml respectivamente. Por otro lado, se evaluó la capacidad de extracción de los HBD sin mezclar etilenglicol (ET) y glicerol (GL) mostrando una CI_{50} para HR de 6.195 y 8.307 mg/ml respectivamente, mientras que para el TR la CI_{50} fue de 80.010 mg/ml para ET y 42.208 mg/ml GL. Con la cromatografía en capa fina (ccf) se identificó los metabolitos mayoritarios en los extractos HR Y TR, siendo el ácido clorogénico, ácido gálico y acido cafeico los predominantes. De manera general los extractos HR muestran mayor capacidad antioxidante en comparación con los extractos TR. De acuerdo con la literatura los metabolitos identificados son antioxidantes por naturaleza, y así mismo, la capacidad de extracción de los DES mostró valores significativos en comparación con solventes tradicionales.

Palabras Clave: Disolventes Eutécticos profundos (DES), Extracción, Ruda (*Ruta Graveolens*).

Abstract -- *Ruta Graveolens* (rue), has chemical compounds such as furoquinolic alkaloids, flavonoids, among others, giving it beneficial properties for the body, some studies have shown that it serves as antispasmodic, antiparasitic, hypotensive, sedative, among many others. In this study we intend to use unconventional solvents for the extraction of phenolic compounds by using deep eutectic solvents (DES), the mixtures that were used were from choline chloride (HBA) and different hydrogen donors (HBD), urea (Reline), ethylene glycol (Ethaline) and glycerol (Glyceline). Radical inhibition by the DPPH method, different concentrations (125 to 5000 µg/ml) of leaf (HR) and stem (TR) extracts were used; quercetin (125 to 250 µg/ml) was used as a control. The HR extract in Reline showed an IC_{50} of 8,992 mg/ml, while the HR extract in Ethaline its IC_{50} was 7,608 mg/ml, finally, the HR extract in Glyceline the IC_{50} was 6,470 mg/ml. In the case of TR extracts, for Reline, Ethaline and Glyceline their CI_{50} were 81,988, 63,612 and 33,202 mg/ml respectively. On the other hand, the extraction capacity of HBDs without mixing ethylene glycol (ET) and glycerol (GL) was evaluated showing an IC_{50} for HR of 6.195 and 8.307 mg/ml respectively, while for TR the IC_{50} was 80.010 mg/ml for ET and 42.208 mg/ml GL. Thin layer chromatography (TLC) was used to identify the major metabolites in the HR and TR extracts, being chlorogenic acid, gallic acid and caffeic acid the predominant ones. In general, HR extracts showed higher antioxidant capacity compared to TR extracts. According to the literature, the metabolites identified are antioxidants by nature, and likewise, the extraction capacity of the DES showed significant values in comparison with traditional solvents.

Key words – Deep Eutectic Solvents (DES), Extraction, Ruda (*Ruta Graveolens*).

INTRODUCCIÓN

La Organización Mundial de la Salud (OMS) define a las plantas medicinales como materiales vegetales naturales. Estas tienen un futuro prometedor ya que existen alrededor de medio millón de plantas en todo el mundo,

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

la gran mayoría de estas aún no han sido estudiadas por lo que si llegaran a ser evaluadas podrían ser eficaces en el tratamiento de enfermedades [1]. Las plantas medicinales se emplean para propósitos terapéuticos o cuyos principios activos pueden servir de precursores para la síntesis de nuevos fármacos. Se estima que el 80% de la población utiliza estas plantas como medicina tradicional para aliviar distintos malestares [2]. La *Ruta Greoveolens* (ruda) es una planta originaria del sur de Europa y del Mediterráneo Oriental. En América se encuentra en Canadá, Estados Unidos, México, Bolivia, Brasil, Colombia, Ecuador, Perú, y Chile. Su tamaño va desde los 50 a 100 cm de altura, sus hojas son alternas de color verde azulado, las flores son de color amarillas o amarillo verdoso, estas suelen medir de 8 a 10 mm de diámetro, la flore central de la planta cuenta con 5 pétalos y 5 sépalos, mientras que las restantes que se encuentran repartidas en el tallo tienen 4 pétalos y 4 sépalos. La ruda posee diferentes principios activos, distintas bibliografías coinciden que contiene en su mayoría glucósido flavonoide rutina ($C_{27}H_{30}O_{16}$) localizado principalmente en las hojas de la planta, también contiene aceite escencial, terpenos, alcaloides, taninos, furocumarinas, flavonoides (quercetina y luteolina), entres otros [3]. Deido a sus propiedades la ruda es usada en la medicina tradicional para aliviar cólicos menstruales, molestias digestivas, dolor de cabeza, para eliminar lombrices, problemas de circulación y reducir hemorragias [4]. Los antioxidantes se consideran nutraceuticos debido a su importancia en la mejora de la salud por lo que es muy importante se determinación [5]. El método utilizado para analizar la capacidad antioxidante es el que emplea el DPPH. Este método utiliza un radical estable para medir el efecto antioxidante de un extracto de la muestra [6]. La cromatografía en capa fina (ccf) es una técnica analítica rápida y sencilla que consiste en la separación de los componentes de una muestra debido a su migración diferencial a través de una capa delgada de adsorbente. La ccp permite determinar el grado de pureza de un compuesto, identificar y comparar analitos y realizar el seguimiento de una reacción, razón por la que es ampliamente usada [7]. Un solvente orgánico (SO) es un compuesto, generalmente líquido, que contiene carbono y que posee la característica de disolver otras sustancias. A nivel industrial, son utilizados en operaciones de disolución de reactivos, extracción, lavado y separación de mezclas, además son empleados en laboratorios de docencia universitaria. A pesar de sus múltiples aplicaciones, la mayor parte de los solventes orgánicos son altamente volátiles, influyendo en la contaminación del aire y agua, así como en la salud de las personas [8].

Las técnicas clásicas de extracción y preconcentración de analitos como son la Extracción Líquido-Líquido (LLE) y la Extracción en Fase Sólida (SPE) presentan algunas limitaciones como son el alto consumo de disolvente orgánico y en muchos casos el tiempo empleado en todo el proceso. Para solventar estos inconvenientes se han desarrollado nuevas técnicas y metodologías, agrupadas bajo el término de Técnicas de Micro extracción, que emplean cantidades mínimas de disolventes orgánicos [9]. Debido a la reciente preocupación por el medio ambiente, surge la búsqueda de nuevos disolventes ecológicos, entre los que destacan los disolventes eutécticos profundos (DES). La formación de estos disolventes no requiere reacción química lo que implica bajo coste, eficiencia total y nulos residuos. Además, sus componentes, generalmente, presentan baja toxicidad. Un DES es una mezcla de dos o más componentes que forman un líquido de temperatura de fusión inferior a la que tendría la mezcla si fuera ideal. Se han encontrado múltiples aplicaciones para estos disolventes siendo la farmacológica [10]. Las aplicaciones de los DES son amplias e incluyen extracción de compuestos funcionales, tecnología de alimentos, catálisis enzimática, síntesis de nanopartículas, biotecnología y biorremediación. A pesar de sus beneficios, los DES enfrentan desafíos como una baja estabilidad térmica y electroquímica, así como la complejidad en su selección y formulación [11].
En este trabajo se identificó la capacidad antioxidante de las hojas y tallos de ruda a partir de la extracción con disolventes eutécticos profundos, también la identificación de los diversos metabolitos presentes en estas partes mediante una cromatografía de capa fina (ccp), obteniendo resultados bastante interesantes que merecen ser tomados en cuenta.

DESARROLLO

"Secado y tamizado de la ruda"

La ruda (*Ruta Graveolens*) se adquirió en el mercado local ubicado en la colonia Jardines de Santa Clara en Ecatepec de Morelos Estado de México (19°32'58.5"N 99°02'25.6"W). Se separaron las hojas de *R. Graveolens* (HR) y los tallos (TR), posteriormente se llevaron a un horno a 60°C para deshidratarlas [12]. Cada hora se pesaron las muestras de HR y los TR, se repitió este procedimiento hasta que el peso sea constante. Una vez ya secas las muestras de HR y TR se trituraron, se pasaron por un tamiz del número 35 marca Itomak (tamaño de partícula 0.5 mm).

"Preparación de los DEP"

Para la preparación de los DEP, estos se definen comúnmente como sistemas compuestos por una mezcla de al menos dos componentes, un aceptor de enlaces de hidrógeno (HBA, *por sus siglas en ingles Hydrogen Bound Acceptor*) y un donante de enlaces de hidrógeno (HBD, *por sus siglas en ingles Hydrogen Bound Donor*), pueden auto-asociarse para formar una nueva fase eutéctica. Es por ello, que primero se deshidrataron las sales en un horno de la marca 'Thermo Fisher' a una temperatura de 80°C durante 2 horas. Se prepararon

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

combinando los reactivos como se muestra en la Tabla 1 en una relación 1:2 M [13], a una temperatura de 90°C durante 24 horas con agitación constante.

Tabla 1. Preparación de los distintos DEP

Sistema	HBA	HBD
Reline	Cloruro de colina	Urea
Ethaline	Cloruro de colina	Etilenglicol
Glyceline	Cloruro de colina	Glicerol
Etilenglicol	-	Etilenglicol
Glicerol	-	Glicerol

"Preparación del extracto"

Se desarrollaron extractos combinando las HR y TR con cada uno de los DEP con una relación 1:10 (p/v), la extracción se llevó en un equipo ultrasónico de marca "Velaquin" modelo 8899, a condiciones de temperatura ambiente, a 40 kHz y con una potencia máxima de 200 W. El extracto se colocó en un recipiente de extracción en la tina durante 15 minutos. Las ondas electromagnéticas generadas por el equipo rompen la estructura permitiendo la extracción de los metabolitos secundarios.

"Capacidad antioxidante por el método DPPH"

El método DPPH nos permite cuantificar la capacidad antioxidante de la ruda. Preparamos el reactivo DPPH (2,2-difenil-1-picrilhidrazilo) disolviéndolo con metanol (a una concentración $9x10^{-5}$M) [14]. Se realizó una curva patrón de quercetina a diferentes concentraciones (4, 8,16, 31,63, 125 y 250 µg /ml). Se preparó una solución con una relación 1:20 (p/v) de extracto metanol generando soluciones con diferentes concentraciones (5000, 2000, 1000, 500, 250, 125) (µg/ml). Se prepararon tubos de ensayo con un volumen de 2900µl de DPPH y distintos volúmenes de extracto (Tabla 2); se dejó incubar por 30 minutos en total oscuridad y se leyeron las absorbancias en un espectrofotómetro UV-Vis marca Velab a una longitud de onda de 517 nm.

Tabla 2. Preparación de las distintas concentraciones.

Concentración (µg/ml)	Stock (µl extracto)	Aforado (µl metanol)
5000	1000	0
2000	400	600
1000	200	800
500	100	900
250	50	950
125	25	975

Una vez teniendo las absorbancias se calculó el % de inhibición con la Ec 1 [15] y la concentración inhibitoria media (CI_{50}) con la Ec 2 [16].

$$\textbf{\% de Inhibición} = \frac{Abs.\ Control - Abs.\ Muestra}{Abs.\ Control} * 100 \quad \text{Ec. (1)}$$

Donde:
Abs Control: Absorbancia del control (DPPH).
Abs Muestra: Absorbancia de los extractos de HR y TR.

Para la obtención de la ecuación de la pendiente se graficó la concentración del extracto en función del porcentaje de inhibición.

$$CI_{50} = \frac{50 - b}{m} \quad \text{Ec. (2)}$$

Donde:
b: ordena de la gráfica obtenida de los % de inhibición de los extractos de ruda.
m: Pendiente de la gráfica obtenida de los % de inhibición de los extractos de ruda.

"Cromatografía de capa fina (ccf)"

La cromatografía de capa fina (ccf) es una técnica utilizada para identificar cualitativamente los metabolitos presentes en nuestros extractos. Se utilizó placas para cromatografía, se preparó solución de extractos - metanol con una relación (1:3) de cada uno de los extractos. Con ayuda del capilar se colocó de 10 a 12 puntadas sobre la placa de cada uno de nuestros extractos y controles. Como eluyente una solución de cloroformo: metanol [85:15], se adiciono ácido sulfúrico al 10% sobre la superficie de la placa para revelar. Se dejó secar y se llevó a calentar a una parrilla de 110 a 120°C para observar las manchas y analizar los resultados. Y calcular el factor de retención con la Ec 3 [17].

$$R_f = \frac{Distancia\ recorrida\ por\ el\ soluto}{Distancia\ recorrida\ por\ el\ frente\ del\ solvente} \quad \text{Ec. (3)}$$

DISCUSIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

"Actividad antioxidante (DPPH)"

Una vez que obtenemos las lecturas de las absorbancias en el UV-Vis procedemos a calcular el % de inhibición con ayuda de la Ec 1, para posteriormente calcular el CI_{50} los cual nos ayudó a analizar y determinar que DEP contiene la mejor actividad antioxidante (Tabla 3). En el caso de las HR de los 3 DEP el que obtuvo la mejor actividad antioxidante fue el Glyceline el cual tuvo un CI_{50} de 6.747 mg/ml, sin embargo, el HBD etilenglicol obtuvo una capacidad antioxidante de 6.184 mg/ml, siendo esta superior a la del Glyceline.

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

Tabla 3. Resultados de la actividad antioxidante de las HR.

Extracto	Concentración (µg/ml)	% de Inhibicion	CI_{50} (mg/ml)
Reline	5000	37.030	8.992
	2000	21.414	
	1000	13.377	
	500	9.156	
	250	8.087	
	125	6.358	
Ethaline	5000	42.178	7.608
	2000	19.950	
	1000	14.158	
	500	8.366	
	250	7.277	
	125	6.436	
Glyceline	5000	42.481	6.747
	2000	20.569	
	1000	11.493	
	500	6.660	
	250	5.263	
	125	3.813	
Etilenglicol	5000	45.913	6.194
	2000	24.521	
	1000	13.017	
	500	7.871	
	250	4.440	
	125	4.440	
Glicerol	5000	37.179	8.307
	2000	20.256	
	1000	11.897	
	500	7.487	
	250	5.333	
	125	5.692	

Para la actividad antioxidante de los TR (Tabla 4), se obtuvo que de los tres DEP el Glyceline es el que contiene la mayor actividad antioxidante reportando 33.202 mg/ml.

Con base a los resultados obtenidos las HR cuentan con una mayor actividad antioxidante, los TR contienen menor actividad, pero si contienen, esto es muy importante ya que estos tallos en su mayoría son desechados. De los tres DEP tanto en HR como en TR, el Glyceline fue el que presento mayor actividad antioxidante, sin embargo, en las hojas el HBD etilenglicol solo supero a este.

Posteriormente se realizó un análisis estadístico de las HR y TR para determinar si existen diferencias significativas entre los extractos, este análisis se presenta en la Figura 1 para HR y en la Figura 2 para TR.

Tabla 4. Resultados de la actividad antioxidante de los TR.

Extracto	Concentración (µg/ml)	% de Inhibicion	CI_{50} (mg/ml)
Reline	5000	11.190	81.988
	2000	8.800	
	1000	7.935	
	500	8.087	
	250	6.511	
	125	8.444	
Ethaline	5000	11.444	63.612
	2000	10.053	
	1000	7.647	
	500	7.005	
	250	6.684	
	125	6.524	
Glyceline	5000	3.491	33.202
	2000	0	
	1000	0	
	500	0	
	250	0	
	125	0	
Etilenglicol	5000	8.910	80.010
	2000	8.595	
	1000	7.180	
	500	6.132	
	250	5.975	
	125	5.346	
Glicerol	5000	11.050	42.208
	2000	7.550	
	1000	6.400	
	500	5.850	
	250	5.700	
	125	3.900	

En el caso del estadístico de HR no se mostró diferencias significativas en el análisis, por el contrario, en el de TR se muestran diferencias significativas en el DES Reline vs Glyceline, Ethaline vs Glyceline y en el Glyceline vs Glicerol.

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

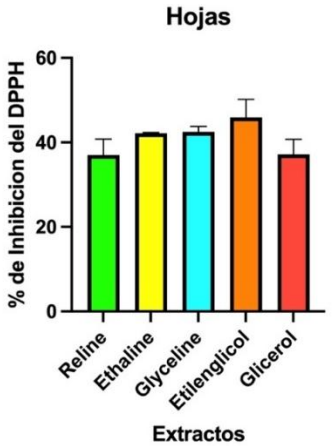


Figura 1. Se obtuvo el porcentaje de inhibición del DPPH a una concentración de 5000 $\mu g/ml$ $(\pm)$ desviación estándar (d.e) de HR. Se realizo un análisis estadísticos ANOVA de una vía ($p<0.05$) a vs Reline, b vs Ethaline c vs Glyceline, d vs etilenglicol, e vs Glicerol.

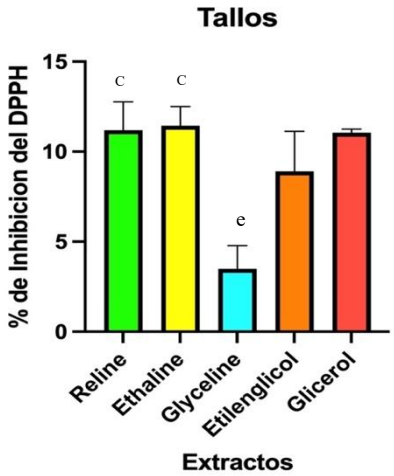


Figura 2 Se obtuvo el porcentaje de inhibición del DPPH a una concentración de 5000 µg/ml (±) desviación estándar (d.e) de TR. Se realizo un análisis estadísticos ANOVA de una vía ($p<0.05$) a vs Reline, b vs Ethaline c vs Glyceline, d vs etilenglicol, e vs Glicerol.

"Comparación extracción por maceración y ultrasónico"

En la Tabla 5 se muestran los resultados de la comparación de la capacidad antioxidante por el método ultrasónico y maceración de todos los extractos.

Se obtuvo como resultados que la actividad antioxidante en el caso del método ultrasónico si extrae un poco más que el método de maceración, siendo este el mejor para extraer los metabolitos secundarios. Sin embargo, el método de maceración puede ser utilizado de igual manera ya que la diferencia no es mucha y evaluando otros aspectos como por ejemplo no contar con un equipo ultrasónico, puede utilizarse como una muy buena alternativa.

Tabla 5. Comparación de la extracción por el método ultrasónico y maceración en las hojas de ruda (Ruta Graveolens.

Extracto por método ultrasónico	CI_{50} (mg/ml)	Extracto por método de maceración	CI_{50} (mg/ml)
Reline	8.992	Reline	10.257
Ethaline	7.608	Ethaline	9.472
Glyceline	6.747	Gliceline	9.342
Etilenglicol	6.194	Etilenglicol	8.441
Glicerol	8.307	Glicerol	9.107

"Cromatografía de capa fina (TLC)"

Se realizo la cromatografía de capa fina de las HR y TR con distintos controles.

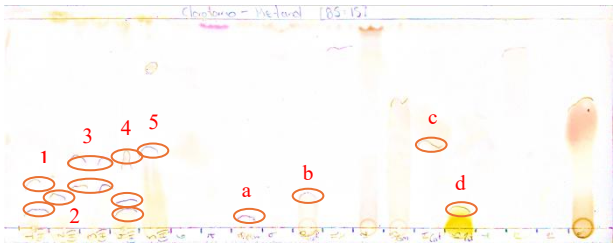


Figura 3. Cromatografía de capa fina realizada a las HR. Los numeros representan los extractos utilizados,(1) Reline, (2) Glyceline, (3) Ethaline, (4) Etilenglicol y (5) Glicerol. Las lestras representan los metabolitos presentes, (a) Ácido clorogenico, (b) Ácido gálico, (c) Ácido cafeico y (d) Rutina.

En la Figura 3 se pueden observar los distintos metabolitos presentes en los diferentes extractos de HR.

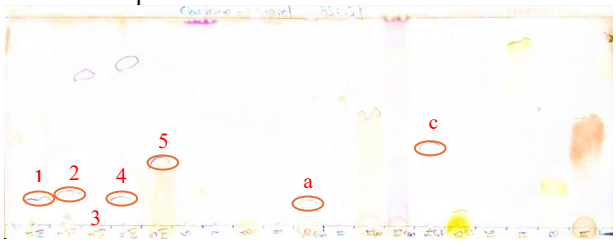


Figura 4. Cromatografía de capa fina realizada a los TR. Los numeros representan los extractos utilizados,(1) Reline, (2) Glyceline, (3) Ethaline, (4) Etilenglicol y (5) Glicerol. Las lestras representan los metabolitos presentes, (a) Ácido clorogenico y (c) Ácido cafeico.

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

En la Figura 4 se pueden observar los distintos metabolitos presentes en los diferentes extractos de TR.

Se calculo el factor de retención de cada uno de los extractos obteniendo los siguientes resultados presentados en la Tabla 6 para HR y Tabla 7 para TR.

Tabla 6. Factor de retención de los extractos de HR con los diferentes controles.

HR	Controles	R_f
(1) Reline	(a) Ac. clorogenico	0.085
	(b) Ac. gálico	0.228
(2) Glyceline	(b) Ac. gálico	0.157
(3) Ethaline	(b) Ac. gálico	0.200
	(c) Ac. cafeico	0.340
(4) Etilenglicol	(c) Ac. cafeico	0.385
(5) Glicerol	(a) Ac. clorogenico	0.085
	(d) Rutina	0.128
	(c) Ac. cafeico	0.371

Tabla 7. Factor de retención de los extractos de TR con los diferentes controles.

TR	Controles	R_f
(1) Reline	(b) Ac. gálico	0.128
(2) Glyceline	(b) Ac. gálico	0.157
(3) Ethaline	-	-
(4) Etilenglicol	(c) Ac. cafeico	0.328
(5) Glicerol	(b) Ac. gálico	0.128

Podemos observar que tanto en las HR como en los TR tenemos presencia de distintos metabolitos, las HR tienen más metabolitos que los TR, los DES demostraron ser eficientes para la extracción de estos metabolitos y podemos decir que nos pueden ayudar a extraer metabolitos en específico. Es importante hacer más experimentos en diferentes sistemas para observar si se pueden identificar diferentes metabolitos.

CONCLUSIONES

En conclusión, los DES muestran un gran potencial como disolventes para extraer compuestos fenólicos, siendo una gran opción para sustituir a solventes convencionales gracias a que estos son fáciles de preparar, mucho más económicos y son más amigables con el medio ambiente. En el caso de la capacidad antioxidante el DES Glyceline fue el que mostro la mejor capacidad antioxidante, sin embargo, no descartamos que los HBD como etilenglicol de igual forma puede ser una buena opción. De igual forma los DEP muestran que pueden ser una buena opción para la selección de metabolitos secundarios de interés. Sin duda alguna los DEP demostraron tener una buena respuesta como solventes nuevos en comparación con los convencionales.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco la beca de maestría otorgada por la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI), al Dr. William Sánchez Ortiz y a la Dra. Mariana Zuleima Pérez González por su apoyo y asesoramiento y al Tecnológico de Estudios Superiores de Ecatepec (TESE).

BIBLIOGRAFÍA

[1] Jamshidi-Kia, F., Lorigooini, Z., & Amini-Khoei, H. (2017). Medicinal plants: Past history and future perspective. *Journal of herbmed pharmacology*, *7*(1), 1-7.

[2] Loraine, S., & Mendoza-Espinoza, J. A. (2010). Las plantas medicinales en la lucha contra el cáncer, relevancia para México. *Revista Mexicana de Ciencias Farmacéuticas*, *41*(4), 18-27.

[3] Naveda González, G. F. (2010). *Establecimiento de un proceso de obtención de extracto de ruda (Ruda Graveolens), con alto contenido de polifenoles* (Bachelor's thesis, QUITO/EPN/2010).

[4] Fernández Romero, L. T., & Reascos Flores, L. C. (2022). Extracción de aceite esencial de Ruda (ruta graveolens) mediante la metodología de arrastre de vapor.

[5] Sharma, O. P., & Bhat, T. K. (2009). DPPH antioxidant assay revisited. *Food chemistry*, *113*(4), 1202-1205.

[6] Repo de Carrasco, R., & Encina Zelada, C. R. (2008). Determinación de la capacidad antioxidante y compuestos fenólicos de cereales andinos: quinua (Chenopodium quinoa), kañiwa (Chenopodium pallidicaule) y kiwicha (Amaranthus caudatus). *Revista de la sociedad química del Perú*, *74*(2), 85-99.

[7] Vallejo-Rosero, Y. J., Barrios-Correa, L., & Anaya-Gil, J. (2021). La cromatografía en capa fina: una alternativa vigente en la industria farmacéutica. Revista de Química, 35(2), 19-25.

[8] Mora-Barrantes, J. C., Morera-Ramos, L., Ulate-Salas, M., Núñez-Agüero, V., Acuña-Salazar, E., & Cordero-Carvajal, M. (2022). Chemical risk classification of organic solvents by using the"CHEM21 selection guide of classical-and less classical-solvents". Revista Tecnología en Marcha, 35(1), 28-43.

[9] Santana Viera, S., & Santana-Rodríguez, J. J. (2015). Técnicas analíticas avanzadas para la extracción y preconcentración de contaminantes emergentes en muestras líquidas. Revista de la Academia Canaria de Ciencias.

[10] Artal Lerín, M. Formulaciones farmacéuticas eutécticas: Preparación y caracterización.

[11] Carreón-Hidalgo, J. P., de Lourdes Ruiz-Peralta, M., & Corona-Jiménez, E. Solventes eutécticos profundos

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

naturales: Aplicaciones en biotecnología y otros sectores industriales Natural deep eutectic solvents: Applications in biotechnology and other industrial sectors.

[12] DUCHEN, E. H. (2018). EXTRACCIÓN EXPERIMENTAL DE ACEITE ESENCIAL DE RUDA (Ruta graveolens L.) POR ARRASTRE CON VAPOR DE AGUA: Proyecto de Grado Modalidad Investigación Aplicada. *Repositorio UAJMS*.

[13] Smith, E. L., Abbott, A. P., & Ryder, K. S. (2014). Deep eutectic solvents (DESs) and their applications. Chemical reviews, 114(21), 11060-11082.

[14] Pérez-González, M. Z., Nieto-Trujillo, A., Gutiérrez-Rebolledo, G. A., García-Martínez, I., Estrada-Zúñiga, M. E., Bernabé-Antonio, A., ... & Cruz-Sosa, F. (2019). Lupeol acetate production and antioxidant activity of a cell suspension culture from Cnidoscolus chayamansa leaves. *South African journal of botany*, *125*, 30-38.

[15] Sánchez-Chino, X. M., Jiménez-Martínez, C., Ramírez-Arriaga, E., Martínez-Herrera, J., Corzo-Ríos, L. J., & García, L. M. G. (2019). Actividad antioxidante y quelante de metales de las mieles de Melipona beecheii y Frieseomelitta nigra originarias de Tabasco, México. *TIP Revista Especializada en Ciencias Químico-Biológicas*, *22*(1), 1-7.

[16] Rodríguez, L. M., Flores, N. R., Ferreira, D. S., Guerrero, A. M., Ciangherotti, C., Bermúdez, J., ... & Bor, M. (2023). Efecto comparativo de la actividad antioxidante del Ácido Gálico y diferentes Alquilgalatos. *Revista de la Facultad de Farmacia*, *86* (1y2).

[17] Armenta-Barrios, J. A., Extocapan-Molina, J., Ávila-Soto, M., Juárez-Santillán, L. F., García-Rodríguez, Y. M., & Espinoza-García, F. J. Fraccionamiento y elucidación de compuestos bioactivos de Reseda luteola por CC y TLC.

AUTORIZACIÓN Y RENUNCIA.

Los autores del presente artículo autorizan al TecNM/Instituto Tecnológico de Zacatepec para publicar el escrito en el libro electrónico del CITID 2025. El TecNM/ITZ o los editores no son responsables ni por el contenido ni por las implicaciones de lo que está expresado en el escrito.

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

POLI(3-HEXILTIOFENO) SU APLICACIÓN EN DISPOSITIVOS DE ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA

Adriana Cervantes-Mendiola[1], M.E. Nicho-Díaz[2], U. León-Silva[3], JA Sandoval-Espino[4] y Rene Salgado-Delgado[5]

[1]Maestra en Ingeniería y Ciencias Aplicadas. Universidad Autónoma del Estado de Morelos, Centro de Investigación en Ingeniería y Ciencias Aplicadas. Laboratorio de Síntesis de Polímeros. adriana.cervantesmen@uaem.edu.mx, 777 105 3675, Av. Universidad 1001, Col. Chamilpa, Cuernavaca, Morelos, México.
[2]Doctorado en Ciencias Químicas. Universidad Autónoma del Estado de Morelos, Centro de Investigación en Ingeniería y Ciencias Aplicadas. Laboratorio de Síntesis de Polímeros. menicho@uaem.mx, Av. Universidad 1001, Col. Chamilpa, Cuernavaca, Morelos, México.
[3]Doctor en Ciencia de Materiales. Universidad Autónoma del Estado de Morelos, Centro de Investigación en Ingeniería y Ciencias Aplicadas. Laboratorio de Corrosión Electroquímica. ulises.leon@uaem.mx, Av. Universidad 1001, Col. Chamilpa, Cuernavaca, Morelos, México.
[4]Doctor en Ingeniería y Ciencias Aplicadas. Universidad Autónoma del Estado de Morelos, Centro de Investigación en Ingeniería y Ciencias Aplicadas. Laboratorio de Procesamiento Digital de Señales. jorgearturo.sandoval@uaem.mx, Av. Universidad 1001, Col. Chamilpa, Cuernavaca, Morelos, México.
[5]Doctor en Ingeniería. Tecnológico Nacional de México Campus Zacatepec. rene.sd@zacatepec.tecnm.mx 734 343 2110, Tecnológico 27, Plan de Ayala, 62780, Zacatepec de Hidalgo, Morelos, México.

Resumen – Actualmente, la creciente demanda mundial de energías renovables, junto con la intermitencia inherente de las fuentes principales como la solar o la eólica ha impulsado la necesidad de desarrollar sistemas avanzados de almacenamiento de energía, como baterías y supercapacitores (SCs). En este trabajo, se fabricó y caracterizó un dispositivo SC simétrico a partir de electrodos de poli(3-hexiltiofeno) (P3HT) como material activo. Para este estudio, empleamos un electrolito acuoso de hidróxido de potasio 3 molar (KOH 3 M) y colectores de corriente de espuma de níquel (NF). El comportamiento electroquímico del dispositivo se investigó mediante espectroscopia de impedancia electroquímica (EIS), voltamperometría cíclica (CV) y, además, se llevó a cabo una prueba de carga/descarga que confirmó el comportamiento capacitivo del dispositivo basado en P3HT. La capacitancia específica más alta exhibida por el dispositivo SC fue de 254.86 mF g^{-1} a una velocidad de barrido de 10 mV s^{-1} y una baja resistencia en serie equivalente (ESR) de 8.20 Ω. Además, el dispositivo exhibió ciclos rápidos de carga y descarga alcanzando una saturación máxima de 0.6 V.

Palabras Clave: Almacenamiento de energía, colector de corriente, polímeros conductores, supercapacitores.

Abstract -- Currently, the increasing global demand for renewable energy coupled with the inherent intermittency of mainstream sources such as solar and wind has driven the need to develop advanced energy storage systems such as batteries and supercapacitors (SCs). In this work, a symmetric SC device was fabricated and characterized based on poly(3-hexylthiophene) (P3HT) electrodes as the active material. For this study, we employ a 3 molar potassium hydroxide (3 M KOH) aqueous electrolyte and nickel foam (NF) current collectors. The electrochemical behavior of the device was investigated by electrochemical impedance spectroscopy (EIS), cyclic voltammetry (CV), and furthermore, a charge/discharge test was carried out which confirmed the capacitive behavior of the P3HT-based device. The highest specific capacitance exhibited by the SC device was 254.86 mF g-1 at a sweep rate of 10 mV s-1 and a low equivalent series resistance (ESR) of 8.20 Ω. Moreover, the device exhibited fast charge-discharge cycles reaching a maximum saturation of 0.6 V.

Key words – Energy storage, current collector, conductive polymers, supercapacitors.

INTRODUCCIÓN

A pesar de que las baterías poseen una tecnología bien establecida en almacenamiento energético, presentan algunas desventajas a considerar como un menor tiempo de vida útil, menor densidad de potencia, mayor tiempo de carga, problemas de calentamiento y no son seguras para el medio ambiente. Una alternativa de gran interés es los SCs que al combinar las propiedades de las baterías y los capacitores ofrecen una gran capacitancia [1,2].
Los SCs son dispositivos de almacenamiento de energía electroquímica que se destacan por ofrecer una alta densidad de potencia, rápida velocidad de carga y descarga, y vida útil prolongada [3]. Por su seguridad, estos dispositivos son prometedores reemplazos o complementos de las baterías de iones tradicionales, siendo ampliamente empleados en diversas aplicaciones que van desde la alimentación de pequeños implantes médicos hasta vehículos eléctricos [4,5].

Un SC (ver Figura 1) está integrado por dos electrodos uno con polaridad positiva y el otro con polaridad negativa. Estos permanecen unidos iónicamente por un medio electrolítico y, separados por una membrana porosa y aislante impregnada con electrolito [6]. De acuerdo con la literatura, el electrodo es un componente clave en un SC, siendo los materiales basados en carbón

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

los más utilizados debido a su gran área superficial. Debido a esto, continúan siendo populares junto con los óxidos metálicos y los polímeros conductores (PCs) en la fabricación de electrodos para SCs [7].

Los PCs como el P3HT, la polianilina (PANI) y el polipirrol (PPY) utilizan procesos redox para almacenar y liberar carga. En particular, el P3HT se destaca por su comportamiento pseudocapacitivo, alta densidad de energía y buena conductividad eléctrica, entre otras ventajas tiene compatibilidad con electrolitos acuosos y orgánicos, así como la capacidad de operar en amplios rangos de potencial. Este conjunto de propiedades vuelve a los PCs candidatos prometedores como materiales activos en dispositivos de almacenamiento de energía [8,9,10].

Diversas investigaciones han explorado el uso de PCs como materiales activos en electrodos. Vinod Kumar et al., 2016 [11] reportaron la construcción de SCs basados en politiofeno (PT), obteniendo una capacitancia de 32.97 mF cm^{-2} empleando un electrolito de perclorato de litio ($LiClO_4$). En otro estudio realizado por A. R. Peringath et al., 2023 [12] se evaluaron SCs simétricos a partir de PT y PANI utilizando dos electrolitos diferentes, los resultados revelaron una mejor capacitancia de 13.22 mF cm^{-2} para el dispositivo de PANI cuando se utilizó un electrolito de ácido fosfórico (H_3PO_4). Para la evaluación del desempeño del electrodo en este estudio utilizaremos NF como colector de corriente, un electrolito acuoso de KOH 3 M y celulosa como membrana de separación.

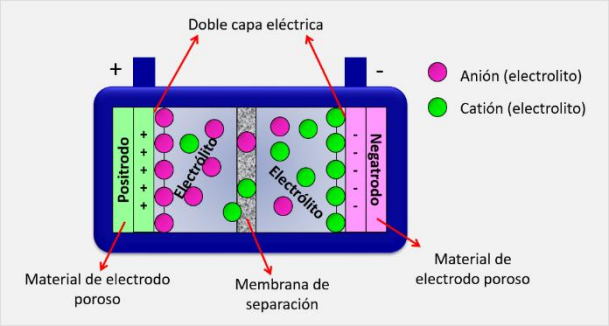


Figura 1. Configuración típica de un dispositivo SC.

DESARROLLO

"Síntesis de P3HT"

El P3HT se sintetizó químicamente mediante el método oxidativo [13], utilizando cloruro férrico ($FeCl_3$) como agente oxidante a 0°C en una atmósfera inerte. Se disolvieron 0.00278 moles de 3-hexiltiofeno destilado en cloroformo ($CHCl_3$) anhidro y se adicionaron lentamente a 0.00647 moles de $FeCl_3$ previamente disueltos en $CHCl_3$ anhidro. La mezcla de reacción se agitó durante 24 h a 0 °C en una atmósfera inerte. El producto se precipitó en metanol, se filtró y se lavó con metanol, acetona y hexano. El P3HT se secó a 55 °C. El proceso se ilustra en la Figura 2.

"Preparación de electrodos"
Se cortaron colectores de corriente de NF de 1 x 2.5 cm, luego se lavaron con alcohol isopropílico y acetona durante 15 min en ultrasonido. La solución de P3HT se preparó disolviendo 15 mg de P3HT en 1 mL de tolueno y se agitó hasta obtener una solución homogénea. Utilizando esta solución, sobre un vidrio Corning se formó una película de P3HT por el método de drop-casting permitiendo la evaporación del solvente en una atmósfera saturada de tolueno. Una vez seca la película, se desprendió del vidrio y se cortó en hojas de 1 cm^2. Finalmente, las películas de P3HT se compactaron sobre los colectores de NF (ver Figura 3).

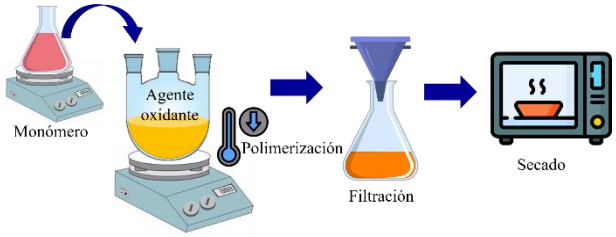


Figura 2. Síntesis oxidativa de poli(3-hexiltiofeno).

"Fabricación de los dispositivos SCs"
Se colocó un electrodo recubierto con P3HT (hacia arriba), luego una membrana de celulosa impregnada con KOH 3 M y, enseguida un electrodo idéntico con el material activo (había abajo) como se muestra en la Figura 4. Finalmente, se colocó en una carcasa de acrílico sujeta con tornillos para evitar la movilidad de sus componentes.

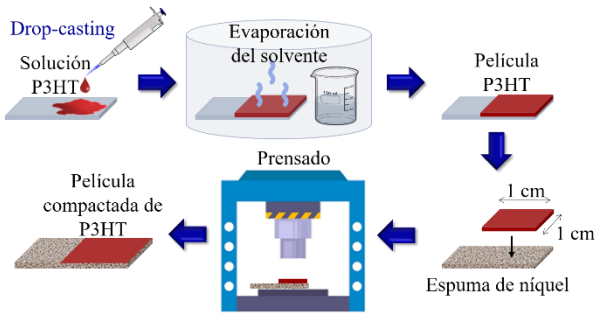


Figura 3. Preparación de los electrodos basados en P3HT.

CARACTERIZACIÓN

Para evaluar el rendimiento electroquímico del dispositivo SC simétrico se realizó una prueba de EIS en un potenciostato/galvanostato GILL AC (ACM Instruments) en un rango de frecuencias de 30 kHz a 0.1

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

Hz con 100 lecturas por década utilizando una amplitud de potencial AC de 10 mV. Además, el dispositivo se caracterizó por la técnica voltamperometría cíclica (CV) a diferentes velocidades de barrido: 10, 20, 50 y 100 mV s^{-1} en un rango de potencial de 0 a 800 mV. La capacitancia específica se determinó a través de las curvas CV mediante la Ecuación 1 [14]:

$$C_s = \frac{\int_{V_1}^{V_2} I(V)dV}{mv(V_2 - V_1)} \qquad \text{Ec. (1)}$$

Donde C_S es la capacitancia específica en Fg^{-1}, v es la velocidad de barrido en Vs^{-1}, m es la masa del material activo en g, V_1 y V_2 representan el potencial inicial y final, respectivamente, y $\int_{V_1}^{V_2} I(V)\, dV$ es el área integrada de la curva CV. Adicionalmente, se realizó una prueba de carga/descarga a corriente variable empleando un osciloscopio Tektronix para confirmar el almacenamiento de carga del dispositivo. Se aplicó un voltaje de 0.8 V a corriente directa y se utilizó una resistencia de 10 kΩ para el proceso de carga y descarga.

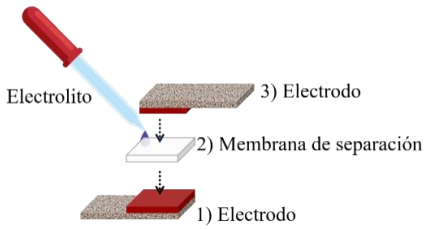
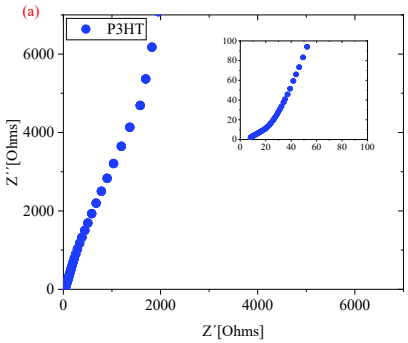


Figura 4. Proceso de fabricación de dispositivo SC.

DISCUSIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Los diagramas de Nyquist y BODE se muestran en la Figura 5. Se puede observar que una difusión iónica y el transporte de carga en los electrodos del SC. El diagrama de Nyquist (Figura 5a) exhibe un semicírculo en altas frecuencias como resultado de la resistencia a la transferencia de carga entre el electrolito y el electrodo.



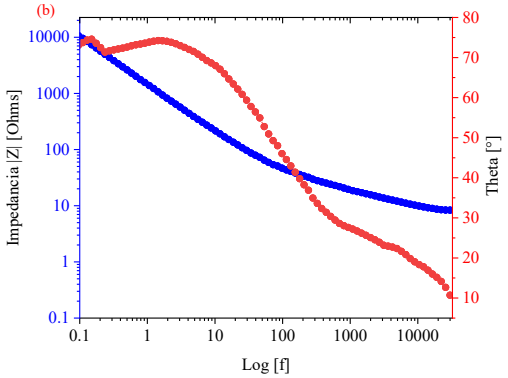
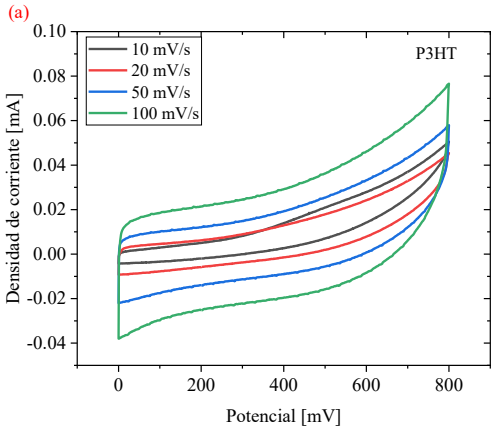


Figura 5. Análisis EIS (a) diagrama de impedancia de Nyquist y (b) diagrama de impedancia de Bode.

En la zona de frecuencias medias es posible observar un comportamiento capacitivo de Warburg controlado por la difusión. Mientras que, a bajas frecuencias se logra observar una línea casi recta, asociada al comportamiento capacitivo del dispositivo. Es posible estimar la resistencia en serie equivalente (ESR) a partir de la intersección en alta frecuencia (aquí medida a 30 kHz) en el eje Z´ (eje real) del diagrama de Nyquist. El valor medido en la Figura 5a fue de 8.20 Ω. En la figura 5b, se muestra la impedancia de Bode y el ángulo de fase. En comparación con un capacitor ideal que posee un ángulo de fase de 90 ° [15], el dispositivo SC exhibió un valor próximo a los 75 °, el cual también confirma el comportamiento altamente capacitivo del dispositivo basado en electrodos de P3HT.

En la Figura 6a, se muestran los voltamogramas del dispositivo SC de P3HT a diferentes velocidades de barrido (10, 20, 50 y 100 mV s^{-1}).



Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

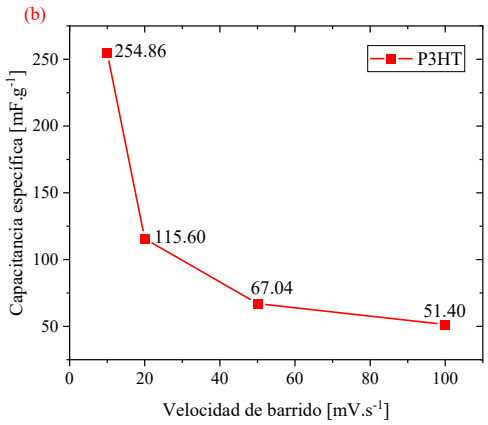


Figura 6. (a) Curvas CV de dispositivo SC simétrico basado en P3HT a diferentes velocidades de barrido de 10-100 mVs^{-1}. (b) Capacitancia de P3HT en KOH 3 M a diferentes velocidades de barrido.

Se observa que las curvas CV mantienen una forma cuasi rectangular característica de los supercapacitores a diferentes velocidades de barrido, revelando una buena estabilidad del material activo.

Además, se logra apreciar que la densidad de corriente aumentó lentamente a medida que aumentó la velocidad de barrido, sugiriendo que la corriente voltamperométrica es directamente proporcional a la velocidad de barrido [12]. Esto coincide con los resultados obtenidos en la prueba EIS, pues indican la naturaleza capacitiva del material activo debido a una mayor acumulación de carga cuando la velocidad de barrido aumenta.

La capacitancia específica del dispositivo SC calculada a partir de la Ec. (1) fue de 254.86 mF g^{-1} a una velocidad de barrido de 10 mV s^{-1}. En la Figura 6b, se muestra como varía la capacitancia específica en función de la velocidad de barrido.

La tendencia indica que el valor de la capacitancia específica disminuye con el aumento de la velocidad de barrido esto es debido a que a altas velocidades de barrido el tiempo disponible para que los iones se difundan hacia o desde la superficie del electrodo en muy limitado, provocando que solo las regiones superficiales del electrodo sean de fácil acceso para los iones que participan en el proceso. En consecuencia, los sitios activos más profundos no contribuyen a la capacitancia del dispositivo.

Se realizó una verificación adicional del desempeño del dispositivo SC mediante una prueba de carga/descarga a corriente directa. En la Figura 7 se muestra la curva de carga/descarga para dicho dispositivo. Durante la carga se observa que la curva asciende rápida y posteriormente comienza a saturarse a menor velocidad hasta alcanzar la saturación máxima en 0.6 V. Durante la descarga la curva desciende abruptamente después de la carga máxima. La pendiente indica la velocidad con la que se entrega la carga.

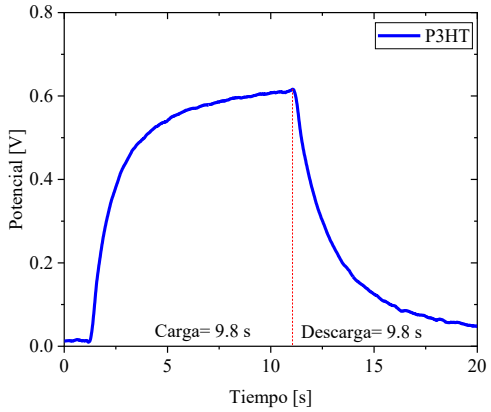


Figura 7. Curva de carga/descarga para el dispositivo SC basado en electrodos de P3HT.

CONCLUSIONES

En este trabajo se desarrolló un dispositivo SC simétrico basado en electrodos de P3HT sintetizado por un método simple y mediante una técnica de deposición sencilla y económica utilizando NF como colector de corriente. El análisis EIS reveló el comportamiento capacitivo de los electrodos simétricos. En el diagrama de Nyquist se observó el comportamiento característico de un dispositivo SC y el ángulo de fase de casi 75 ° (Vs. 90 ° en un capacitor ideal) corrobora la acumulación de carga en la superficie de los electrodos. La ESR obtenida fue baja indicando una eficiencia aceptable en el transporte de carga. Mediante las curvas de CV la capacitancia específica calculada fue de 245.86 mF g^{-1} a una velocidad de barrido de 10 mV s^{-1}. La forma cuasi rectangular de los voltamperogramas es debido a la buena respuesta capacitiva del P3HT como material activo. La disminución de la contribución capacitiva está asociada con la limitada difusión de los iones hacia sitios activos más profundos debido a lo rápido que deben de ocurrir estos procesos. La prueba de carga/descarga se realizó en tiempos cortos, alcanzando una saturación máxima de 0.6 V. La respuesta capacitiva y ESR baja, así como los ciclos "rápidos" de carga y descarga, demuestran que el P3HT es una opción viable para la fabricación de dispositivos de almacenamiento de energía, en específico de SCs.

BIBLIOGRAFÍA

[1] S. K. Smoukov, K. D. Fong, and T. Wang, "Multidimensional performance optimization of conducting polymer-based supercapacitor electrodes," vol. 1, no. 9, 2017, doi: 10.1039/c7se00339k.

[2] G. Gautham Prasad, N. Shetty, S. Thakur, Rakshitha, and K. B. Bommegowda, "Supercapacitor technology and its applications: A review," IOP

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

Conf. Ser. Mater. Sci. Eng., vol. 561, no. 1, 2019, doi: 10.1088/1757-899X/561/1/012105.

[3] K. Sharma, A. Arora, and S. K. Tripathi, "Review of supercapacitors : Materials and devices," vol. 21, no. October 2018, pp. 801–825, 2019, doi: 10.1016/j.est.2019.01.010.

[4] C. Lamiel, I. Hussain, X. Ma, and K. Zhang, "Properties, functions, and challenges: current collectors," Mater. Today Chem., vol. 26, p. 101152, 2022, doi: https://doi.org/10.1016/j.mtchem.2022.101152.

[5] J. Libich, J. Máca, J. Vondrák, O. Čech, and M. Sedlaříková, "Supercapacitors: Properties and applications," J. Energy Storage, vol. 17, no. March, pp. 224–227, 2018, doi: 10.1016/j.est.2018.03.012.

[6] D. Majumdar and S. Ghosh, "Recent advancements of copper oxide based nanomaterials for supercapacitor applications," J. Energy Storage, vol. 34, no. September, p. 101995, 2021, doi: 10.1016/j.est.2020.101995.

[7] Z. S. Iro, C. Subramani, and S. S. Dash, "A brief review on electrode materials for supercapacitor," Int. J. Electrochem. Sci., vol. 11, no. 12, pp. 10628–10643, 2016, doi: 10.20964/2016.12.50.

[8] M. Ates, M. A. Serin, I. Ekmen, and Y. N. Ertas, "Supercapacitor behaviors of polyaniline/CuO, polypyrrole/CuO and PEDOT/CuO nanocomposites," Polym. Bull., vol. 72, no. 10, pp. 2573–2589, 2015, doi: 10.1007/s00289-015-1422-4.

[9] D. Momodu, A. Bello, J. Dangbegnon, F. Barzeger, M. Fabiane, and N. Manyala, "P3HT:PCBM/nickel-aluminum layered double hydroxide-graphene foam composites for supercapacitor electrodes," J. Solid State Electrochem., vol. 19, no. 2, pp. 445–452, 2015, doi: 10.1007/s10008-014-2602-0.

[10] A. Shokry, M. Karim, M. Khalil, S. Ebrahim, and J. El Nady, "Supercapacitor based on polymeric binary composite of polythiophene and single-walled carbon nanotubes," Sci. Rep., vol. 12, no. 1, pp. 1–13, 2022, doi: 10.1038/s41598-022-15477-z.

[11] V. Kumar Kasana, Y. Kumar, P. Singh, and S. Dixit, "Experimental Studies on Poly(3-Hexylthiophene) Electrode Based Supercapacitors: A Comparison of Electrolytic Species," J. Mater. Sci. Surf. Eng., vol. 4, no. 2, pp. 364–367, 2016, [Online]. Available: http://www.jmsse.org/.

[12] A. R. Peringath et al., "Chemical synthesis of polyaniline and polythiophene electrodes with excellent performance in supercapacitors," J. Energy Storage, vol. 73, no. PA, p. 108811, 2023, doi: 10.1016/j.est.2023.108811.

[13] D. Hernández-Martínez, C. Martínez-Alonso, M. M. Castillo-Ortega, M. C. Arenas-Arrocena, and M. E. Nicho, "Preparation and characterization of electrospun fibers containing poly(3-hexylthiophene) and poly(3-hexylthiophene)/CdS," *Synth. Met.*, vol. 209, pp. 496–501, 2015, doi: 10.1016/j.synthmet.2015.09.001.

[14] H. Vijeth, S. P. Ashokkumar, L. Yesappa, M. Niranjana, M. Vandana, and H. Devendrappa, "Flexible and high energy density solid-state asymmetric supercapacitor based on polythiophene nanocomposites and charcoal," *RSC Adv.*, vol. 8, no. 55, pp. 31414–31426, 2018, doi: 10.1039/c8ra06102e.

[15] A. C. Lazanas and M. I. Prodromidis, "Electrochemical Impedance Spectroscopy─A Tutorial," *ACS Meas. Sci. Au*, vol. 3, no. 3, pp. 162–193, Jun. 2023, doi: 10.1021/acsmeasuresciau.2c00070.

AUTORIZACIÓN Y RENUNCIA.

Los autores del presente artículo autorizan al TecNM/Instituto Tecnológico de Zacatepec para publicar el escrito en el libro electrónico del CITID 2025. El TecNM/ITZ o los editores no son responsables ni por el contenido ni por las implicaciones de lo que está expresado en el escrito.

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

CITID 2025 ISSN: 2992-8516

POLIFENOLES TOTALES Y CAPACIDAD ANTIOXIDANTE DE EXTRACTOS DE CÁSCARA DE CHILE ANCHO (*CAPSICUM ANNUUM L. GROSSUM SENDT)*

Vazquez Ramos Mayra Beatriz[1], Pérez González Mariana[2], Ceja Gordillo Edson [3], Vicencio Reyes Juan[4], Sánchez Ortiz William[5*]

[1]I.Q. Tecnológico Nacional de México, TES de Ecatepec, División de ingeniería Química y Bioquímica, Av. Tecnológico S/N, Valle de Anahuac, Cp. 55210 Ecatepec de Morelos, Edo. Méx., México.

[2]Dra. Tecnológico Nacional de México, TES de Ecatepec, División de ingeniería Química y Bioquímica, Av. Tecnológico S/N, Valle de Anahuac, Cp. 55210 Ecatepec de Morelos, Edo. Méx., México.

[3]I.Q. Tecnológico Nacional de México, TES de Ecatepec, División de ingeniería Química y Bioquímica, Av. Tecnológico S/N, Valle de Anahuac, Cp. 55210 Ecatepec de Morelos, Edo. Méx., México.

[4]M. en C. Tecnológico Nacional de México, TES de Ecatepec, División de ingeniería Química y Bioquímica, Av. Tecnológico S/N, Valle de Anahuac, Cp. 55210 Ecatepec de Morelos, Edo. Méx., México.

[5]Dr. Tecnológico Nacional de México, TES de Ecatepec, División de ingeniería Química y Bioquímica, Av. Tecnológico S/N, Valle de Anahuac, Cp. 55210 Ecatepec de Morelos, Edo. Méx., México. Correos: williamso@tese.edu.mx, Cel. 5618181821, 5518934478

Resumen- El chile ancho (*Capsicum annuum L. grossum sendt*), originario de México, es un fruto deshidratado que posee una rica composición nutricional, destacando por su alto contenido en vitamina A, carotenoides, terpenos, azúcares, vitamina C y polifenoles [1]. En este trabajo de investigación se realizó la comparación de solventes no convencionales (SNC) como los disolventes eutécticos profundos (DEP) (Ethaline (Eth), Reline (Re), glyceline (Gly)), y disolventes donadores de puentes de hidrogeno (HBD) (glicerol y etilenglicol). Por otro lado, como solvente convencional (SC) el metanol (MeOH), para extraer metabolitos mayoritarios (MM) de la cascara de C. annuum. La determinación del efecto de los solventes en la extracción se observó con la cantidad de polifenoles totales, su capacidad antioxidante y la identificación por cromatografía de capa fina (ccf) de los MM responsables de las actividades in-vitro. Los resultados de polifenoles totales se cuantifico para el extracto de Re con un valor de 2.222 mg GAE/g extracto, para los casos de Et, glicerol, etilenglicol y MeOH los valores de 35.429, 0.857, 0.952 y 4.619 mg GAE/g extracto respectivamente. Mediante la capacidad antioxidante se determinó la concentración inhibitoria media (CI50) a partir del radical DPPH, se obtuvieron valores significativos en Re 42.780 mg /ml, Et 6.937 mg /ml, Gly 18.466 mg /ml, glicerol 10.848 mg /ml, etilenglicol 5.009 mg /ml y MeOH 5.838 mg /ml. Por último, en la cromatografía de capa fina se encontraron los MM en los extractos con SNC como la quercetina, ácido sinápico y ácido cafeico; y para el MeOH, ácido cinámico y ácido cafeico. De acuerdo con los resultados obtenidos los SNC son una alternativa viable para la mejora del rendimiento, amigables con el medio ambiente, simplificando la metodología para la extracción de fenoles, presentando una capacidad antioxidante similar a los SC y mostrando una selectividad para los MM.

Palabras Clave: Antioxidantes, Capsicum annuum, Disolventes Eutécticos Profundos.

Abstract- Ancho chili (*Capsicum annuum L. grossum sendt*), originally from Mexico, is a dehydrated fruit that has a rich nutritional composition, standing out for its high content of vitamin A, carotenoids, terpenes, sugars, vitamin C and polyphenols. [1] In this research work, the comparison of non-conventional solvents (NCS) such as deep eutectic solvents (DEP) (Ethaline (Et), Reline (Re), glyceline (Gly)), and hydrogen bridge donor solvents (HBD) (glycerol and ethylene glycol) was carried out. On the other hand, methanol (MeOH) was used as a conventional solvent (SC) to extract major metabolites (MM) from C. annuum peel. The determination of the effect of the solvents in the extraction was observed with the amount of total polyphenols, their antioxidant capacity and the identification by thin layer chromatography (ccf) of the MMs responsible for the in-vitro activities. The results of total polyphenols were quantified for the Re extract with a value of 2.222 mg GAE/g extract, for Et, glycerol, ethylene glycol and MeOH with values of 35.429, 0.857, 0.952 and 4.619 mg GAE/g extract, respectively. By means of the antioxidant capacity, the mean inhibitory concentration (CI50) was determined from the DPPH radical, significant values were obtained in Re 42.780 mg /ml, Et 6.937 mg /ml, Gly 18.466 mg /ml, glycerol 10.848 mg /ml, ethylene glycol 5.009 mg /ml and MeOH 5.838 mg/ml. Finally, in the thin layer chromatography, in the extracts with CNS, the MMs were found to be quercetin, sinapic acid and caffeic acid; and for MeOH, cinnamic acid and caffeic acid. According to the results obtained, CNS are a viable alternative for yield improvement, environmentally friendly, simplifying the methodology for phenol extraction, presenting a similar antioxidant capacity to SC and showing selectivity for MM.

Key words: Antioxidants, Capsicum annuum, Deep Eutectic Solvents.

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

INTRODUCCIÓN

El chile ancho (*Capsicum annuum L. grossum sendt*), pertenece a la familia de las solanáceas, es un fruto de forma triangular y acorazonado, con pericarpio grueso, con un tamaño promedio de 12 a 19.5 cm de largo, con un ancho promedio de 4 a 10 cm. Se cultiva principal mente en los estados de Zacatecas, Durando, San Luis Potosí, Puebla y Guanajuato [1]. El chile ancho es una de las variedades más cultivadas de México, en el 2020 se llegaron a producir alrededor de 3.6 toneladas de este tipo de chile [2]. El 95 % de la producción del chile ancho se realiza a cielo abierto. Además, se planta en prácticamente todos los meses del año, a excepción de enero, febrero, noviembre y diciembre; permitiendo que sea un fruto con libre acceso [3]. Sus principales MM son capsaucinoides, carotenoides, vitaminas, minerales, y algunos flavonoides [4].

Sus principales usos etnomedicinales son como antiinflamatorio, antiirritantes, previene enfermedades respiratorias por su alto contenido en vitaminas C, cicatrizante, por su alto contenido en hierro mejora la apariencia de la piel, anticoagulante y reduce el colesterol. Los flavonoides son metabolitos secundarios generalmente extraídos de las plantas, poseen 13 subclases con un total de 4000 compuestos y su principal función es como agentes antioxidantes [5]. Debido a su importancia la búsqueda de MM con capacidad antioxidante se vuelve una prioridad para explorar métodos de extracción fáciles, de bajo costo, amigables con el medio ambiente en comparación con los métodos convencionales como los mecánicos, destilación, extracción con fluidos supercríticos, extracción con solventes; siendo técnicas limitadas por las características polares del analito, metodología complicada (presión, temperatura, etc.) aunque son los más utilizados en la industria química y farmacéutica [6]. Estas técnicas ofrecen beneficios ambientales, así como mejoras en el rendimiento, ahorro de tiempo y costos, como la extracción asistida por baño ultrasónico [7]. Elegir un método de extracción adecuado para aislar compuestos bioactivos es crucial, ya que la preparación de la muestra, como el primer paso en el análisis de plantas medicinales, tiene un impacto significativo en los resultados finales.[8]Sin embargo, en las últimas décadas, ha surgido una alternativa innovadora con el uso de Disolventes Eutécticos Profundos (DES, por sus siglas en inglés), son básicamente mezclas preparadas a partir de compuestos aceptores de puentes de hidrógeno llamados HBA (generalmente sales de amonio cuaternarias) y donantes de puentes de hidrógeno de diferente naturaleza (HBD) por ejemplo, alcoholes, ácidos carboxílicos, aminas, amidas y aminoácidos [9]. Forman sistemas que contienen una amplia variedad de especies catiónicas y/o aniónicas regidas por interacciones, principalmente de puentes de hidrógeno, que presentan una baja energía de enlace que causan los bajos puntos de fusión que presentan. A diferencia de los solventes convencionales (SC) ofrecen ventajas, presentando una presión de vapor baja, son difícilmente inflamables, toxicidad baja, biodegradabilidad alta, precursores baratos y renovables [10]. Han sido ampliamente utilizados y estudiados en procesos de extracción de biomasa, síntesis de polímeros, catálisis, electroquímica, síntesis de nanopartículas, entre otros [11]; estos solventes en comparación con SC (metanol y etanol) han demostrado que son una tecnología verde de extracción y una alternativa viable. En este caso los DEPs que se utilizaron en este trabajo son basados en el cloruro de colina (ChCl), debido a la en la literatura es la composición más utilizada para prepararlos; permitiendo una mayor captación de puentes de hidrógeno en comparación con los SC [12]. Es por lo que, en esta investigación se evaluará la combinación (ChCl) con urea (U), etilenglicol (Et) y glicerol (Gl) para la extracción de MM a partir de la cáscara C. annuum L. en comparación con extracciones MeOH.

DESARROLLO

Preparación de la cáscara de chile ancho (Capsicum annuum L. grossum sendt)

Se adquirió 100 g de chile ancho *Capsicum annuum L. grossum sendt*, de la marca “Don Zabor”. Fue sometido a un proceso inicial de lavado con agua para eliminar suciedad e impurezas. Se le retiró las venas, semillas y pedículo, quedando únicamente la cáscara del chile ancho (CCA). Se llevó la cáscara a un proceso de deshidratación, colocándola en un horno de la marca ‘Thermo Fisher’ a temperatura no máxima de 60 °C, hasta lograr un peso constante. Una vez deshidratada, con un mortero se pulverizó y con un tamiz de la marca “Itomak” del No.35 se unificó el tamaño de partícula a 0.500 mm.

Preparación de los Disolventes eutécticos Profundos (DEP)

La elaboración de los disolventes eutécticos profundos (DEP) se llevó a cabo utilizando cloruro de colina (HBA) con una pureza del 98% de la marca Sigma Aldrich se mezcló con los HBD con etilenglicol (Et), urea (U) y glicerol (Gl), en una relación molar de 1:2 M. Durante 24 horas con agitación constante a temperatura de 90°C se nombrando dichas mezclas: Ethaline (ChCl-Et), Reline (ChCl-U) y Glyceline (ChCl-Gl) [13].

Extracción con un solvente convencional ‘MeOH’

Para la extracción MeOH se utilizó un dispositivo de ultrasonido de la marca Yelaquin, modelo 8899 que se trabajó a condiciones de temperatura ambiente, a 40 kHz y con una potencia máxima de 200 W. El extracto se colocó en un recipiente de extracción, con una relación 1:2 (p/v) por quintuplicado [14].

Extracción con solventes no convencionales (DEP)

Para generar los sistemas con DEP, se tuvo una relación de 1:10 (p/v) de cáscara de chile ancho y cada uno de los DEP. Así mismo, se probaron únicamente como solventes para la extracción el etilenglicol y glicerol con la misma relación; en todos los sistemas se realizó la extracción por el método de maceración. Durante un periodo de 24 h, con una agitación constante a temperatura ambiente.

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

Cuantificación de polifenoles totales por el método de Folin-Ciocalteu

Los compuestos fenólicos se cuantificaron de acuerdo con la reacción que se lleva a cabo con el reactivo de Folin-Ciocalteu de la marca Sigma Aldrich. Para la curva de calibración se realizó diluciones (25–200 µg /ml) de ácido gálico (AG) de la marca Sigma Aldrich con una pureza 98%. Se midió la absorbancia con un espectrofotómetro de UV-VIS de la marca "velab" a 700 nm. Para los extractos se preparó una solución madre de cada uno (con un factor de dilución de 20). Con la que se hicieron diluciones de 25-250µg/ml de cada extracto y se midió la absorbancia por triplicado. El contenido de polifenoles totales se calculó en miligramos equivalentes de ácido gálico por gramo de extracto seco (mg GAE/g), definido de la Ecuación 1[15].

$$CPT\left(\frac{mgAG}{gchile}\right) = CAG\ \left(\frac{mg}{mL}\right) * \frac{Vext(mL)}{mchile(g)} * D \quad \text{Ec. (1)}$$

Donde CAG es la concentración de ácido gálico calculado por la curva de calibración de (AG) ácido gálico, D es el factor de disolución, Vext es el volumen del solvente para la extracción y mchile es la masa de la cáscara de chile ancho usada para la extracción.

Evaluación de los antioxidantes

Se preparó una solución de 90 µM [16]. Para la obtención de la curva de calibración se realizó diluciones (4, 8,16, 31,63, 125 y 250 µg /ml) de quercetina de la marca Sigma Aldrich con una pureza 98%. Se midió la absorbancia con un espectrofotómetro de UV-VIS de la marca "velab" a 517 nm. Para determinar los extractos se utilizó las concentraciones 125, 250, 500, 1000, 2000 y 5000 µg /ml para cada uno de ellos, adicionando 2.9 ml de la solución de DPPH más 100 µL de la mezcla del extracto. Se deja incubar por 30 min en oscuridad, posteriormente se medió sus absorbancias. La Ecuación (2) se aplicó para calcular el porcentaje de actividad antioxidante de los extractos.

$$\%\ inhibición = \frac{Abs.control - Abs.muestra}{Abs.control} * 100$$

Ec. (2)

Abs muestra: Absorbancia de muestra de los extractos del chile.
Abs Control: Absorbancia del control (DPPH)

Para la capacidad antioxidante media expresado como CI50 (concentración de muestra necesaria para inhibir el 50% de radicales DPPH). El CI50 se obtuvo de la ecuación 3, que representa la pendiente de la recta de la gráfica de cada concentración de extracto vs. porcentaje de inhibición de radicales libres.

$$Cl50 = \frac{(50-b)}{m} \quad \text{Ec. (3)}$$

Donde:
b = Ordenada al origen de la gráfica de la concentración de cada extracto vs. Porcentaje de inhibición
m =Pendiente de la gráfica de las concentraciones de cada extracto vs. Porcentaje de inhibición [17].

Cromatografía de capa fina(ccf)

La determinación de la actividad antioxidante de los extractos se evaluó mediante la capacidad captadora del radical 2,2-difenil-1-picril-hidrazilo (DPPH) de la marca Sigma Aldrich con una pureza del 99%.

La determinación con la ccf consistió en una fase estacionaria y una fase móvil. En la realización de la ccf, se apoyó la placa cromatográfica sobre un recipiente de vidrio que contenía el eluyente en polifenoles; CH3 – MeOH [85:15], a 20 ml. Para revelar la placa, se utilizaron dos técnicas, donde la primera se observó en ultravioleta (UV) de onda corta mediante una lámpara de ccf a 254 nm, de la marca Merck. En este caso, solo los indicadores fluorescentes se permitieron visualizar. La segunda técnica, se humedeció la placa con algodón con una solución al 10 % de ácido sulfúrico (H2SO4) de la marca Sigma Aldrich (98 % de pureza) y se calentó la placa a 40 °C hasta su revelado. Para identificar los compuestos de manera cuantitativa que se encontraban en la placa, se utilizó el factor de referencia (Rf), utilizando la Ecuación 4 [18].

$$R = \frac{Distancia\ recorrida\ por\ el\ compuesto}{Distancia\ recorrida\ por\ el\ disolvente}$$

Ec. (4)

DISCUSIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Los resultados obtenidos en la cuantificación de los polifenoles totales, se analizó con la comparación de los extractos tomado en cuenta la concentración más alta de 250 µg /ml de cada uno de ellos. En la Tabla 1 los valores de CPT que se determinaron para los SNC, presentando un mayor contenido para el Et, posteriormente el glicerol, Re y etilenglicol con valores de 35.429, l0.857, 2.222 y 0.952 mg EAG/ g chile respectivamente. Observando que el HBD es importante para la extracción de MM, ya que, puede a ver una diferencia significativa en la cantidad de CPT extraídos. En el caso del MeOH presento un valor de 4.619 los mg EAG/ g chile, comparándolo con los valores de los SNC está por debajo del Et y glicerol, similar al Re y superior al etilenglicol. Román-Arce et.at.[19] reporta el contenido de *C. annum* para diferentes tiempos de recolecta del fruto; para el caso de fruto prematuro fresco 0.633 mg GAE/g chile, para fruto prematuro deshidratado 0. 645 mg GAE/g chile, para un fruto maduro fresco 0.675 mg GAE / g chile y en estado deshidratado 0.899 mg GAE/g chile ancho por una extracción etanólica. En comparación con lo obtenido en este trabajo de investigación los SCN presentan mejores y/o similares valores de CPT, en el caso del extracto MeOH presenta mejores resultados.

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

A continuación, se muestra la Cuantificación de polifenoles totales en la Tabla 1

Tabla 1: Cuantificación de polifenoles

Extracto	C (µg /ml)	A (AG mg/ml)	CPT (mg GAE/g A)
Ethaline (a)	250	0.0177±0.004	35.429
	200	0.173±0.003	34.651
	150	0.171±0.002	34.175
	100	0.163±0.001	33.079
	50	0.161±0.001	32.143
	25	0.158±0.001	31.540
Reline (b)	250	0.011±0.001	2.222
	200	0.007±0.004	1.460
	150	0.005±0.001	0.905
	100	0.005±0.002	0.952
	50	0.002±0.000	0.365
	25	0.001±0.000	0.270
Glicerol(c)	250	0.004±0.002	0.857
	200	0.004±0.004	0.810
	150	0.004±0.001	0.873
	100	0.002±0.000	0.460
	50	0.002±0.000	0.317
	25	0.001±0.000	0.206
Etilenglicol (d)	250	0.005±0.000	0.952
	200	0.003±0.001	0.603
	150	0.003±0.000	0.683
	100	0.002±0.000	0.429
	50	0.002±0.000	0.476
	25	0.002±0.000	0.492
Metanólico (e)	250	0.023±0.001	4.619
	200	0.018±0.001	3.603
	150	0.015±0.001	3.079
	100	0.012±0.001	2.444
	50	0.009±0.000	1.778
	25	0.067±0.102	13.381

Se realizó un estudio estadístico en el programa "Prism 9" analizando la prueba de Tukey para comparación de medias y Anova de una vía ($p<0.05$) del contenido de compuestos fenólicos de los SC y SNC donde se pude notar una diferencia significativa en el extracto Et (a, SNC) donde tuvo un mejor contenido de polifenoles totales a diferencias de los otros extractos, en el caso MeOH (e, SC) tuvo una diferencia, pero no tan significativa como el Et.

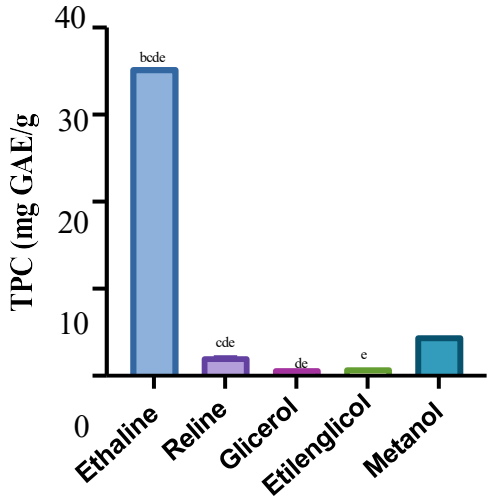


Figura1: CTP (mg GAE/g A) de las concentraciones más alta 250 (µg /ml). Se realizo el análisis estadístico ANOVA de una via y ($p<0.05$) y prueba de Tukey para comparación de medias*, donde: los SNC (a, b, c,) y los SC (d, e)*

Evaluación de los antioxidantes

Para la capacidad antioxidante CI50 los resultados obtenidos de cada extracto donde se obtuvo valores significativos en Re de 42.780 mg /ml, Et de 6.937 mg/ml., Gly de 18.466 mg /ml, glicerol de 10.848 mg /ml. etilenglicol de 5.009 mg /ml. En donde nuevamente el sistema Et en conjunto con el de etilenglicol presentan los mejores valores de los SNC, denotando el caso del Et que presenta mayor CPT y es directamente proporcional al CI50. Siendo un caso particular por que para los demás SNC no se cumple. En el caso del MeOH tuvo un valor de 5.838 mg /ml, siendo este nuestro control comparándolo con los SCN, como se mencionó los sistemas Et y etilenglicol presentan valores muy similares. Citando a Román-Arce et.at.[19] reporta el contenido de C. annum para diferentes tiempos de recolecta del fruto; para el caso de fruto prematuro fresco 0.427 mg /ml, para fruto prematuro deshidratado 0. 621 mg/ ml, para un fruto maduro fresco 0.535 mg /ml y en estado deshidratado 0.695 mg /m por una extracción etanólica. En comparación con lo obtenido en este trabajo de investigación los SNC el Et presenta una similitud con el extracto el MeOH y etilenglicol presentando mejores resultados.

En la tabla 2 se reporta el % de inhibición y la CI50 de los diferentes extractos.

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

Tabla 2: Capacidad antioxidante CI_{50}

Extracto	Concentraciones (µg /ml)	% inhibición	CI_{50} mg /ml
Metanólico (a)	125	9.659±1.174	5.838
	250	10.469±1.732	
	500	12.025±1.417	
	1000	13.568±1.352	
	2000	26.260±2.681	
	5000	43.201±5.508	
Ethaline (b)	125	6.486±0.268	6.937
	250	6.843±0.797	
	500	9.934±0.380	
	1000	17.009±0.665	
	2000	20.855±0.417	
	5000	36.992±1.326	
Glyceline (c)	125	0.286±1.227	18.466
	250	1.274±0.498	
	500	1.558±0.398	
	1000	3.701±0.270	
	2000	7.214±1.063	
	5000	13.485±0.786	
Reline (d)	125	1.557±0.480	42.780
	250	1.801±0.344	
	500	2.589±0.589	
	1000	2.576±0.355	
	2000	4.204±0.285	
	5000	7.198±1.139	
Glicerol (e)	125	2.544±3.075	10.848
	250	2.866±0.922	
	500	3.983±0.370	
	1000	9.676±2.185	
	2000	12.719±1.618	
	5000	23.766±1.556	
Etilenglicol (f)	125	6.531±1.242	5.009
	250	10.233±2.471	
	500	16.218±4.755	
	1000	27.909±0.008	
	2000	33.586±6.709	
	5000	46.182±4.611	

Para determinar si existen diferencias significativas se realizó un estudio estadístico en el programa "Prism 9" analizando la prueba de Tukey para comparación de medias y Anova de una vía ($p<0.05$) los resultados del CI50 mostrando una diferencia significativa en los extractos de Etilenglicol teniendo un CI50 de 5.009 mg/ml comparando con los extractos DEP el extracto Ethaline tuvo un valor de 6.937 mg /ml y para el Metanólico tuvo un valor de 5.838 mg /ml podemos observar que sus diferencias no son tan significativas, comprobando que se podría usar como alternativa viable la extracción de SNC. Como podemos observar en la Figura 2 la diferencia significativa fue del extracto RE (d, SNC), los demás extractos presentar una similitud evidente como es el caso de Et (b, SNC) con MeOH y etilenglicol (a, f, SNC).

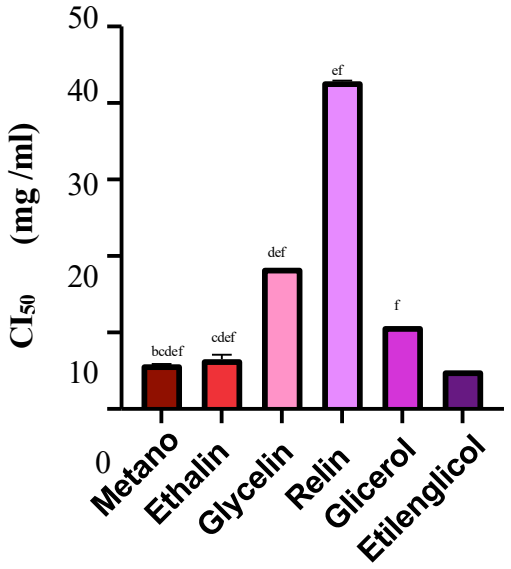


Figura 2: Capacidad antioxidante *CI50 de cada extracto. Se realizo el análisis estadístico ANOVA de una via y (p<0.05) y* prueba de Tukey para comparación de medias, *donde: los SNC (b, c, d,) y los SC (a, e, f)*

Cromatografía de capa fina (ccf)

Mediante ccf, se realizó la identificación de polifenoles empleando el sistema de elución CH3 – MeOH [85:15]. En los extractos ethaline, reline, glyceline, glicerol y etilenglicol, en la Figura 3 se presenta el extracto ethatline, siendo este el que presento mejores valores den CPT y IC50, para la identificación de polifenoles en la placa el extracto de CCA- Et (1) comparándolas con referencias puras de quercetina (2), ácido sinápico (3), y ácido cafeico (4) marca Sigma Aldrich, estos metabolitos ya reportados dentro de su composición [20]. En la cromatografía del extracto se pudo identificar con las dos técnicas de revelación (UV y H2SO4). Obteniendo valores de Rf, para la quercetina R*f* =0.57, ácido sinápico R*f* =0.71 y ácido cafeico R*f* = 0.32.

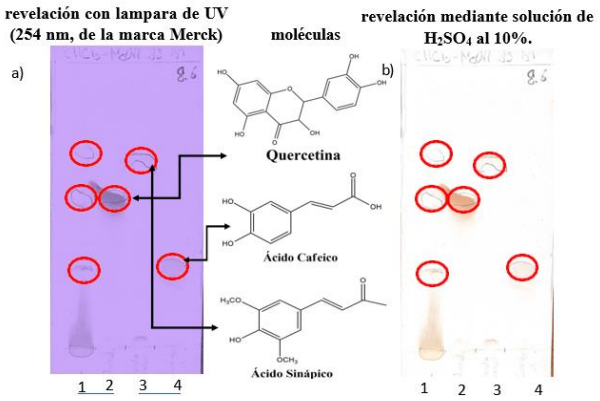


Figura 3: El Sistema utilizado CH3 – MeOH [85:15] a) revelación con lampara de UV y b) revelación mediante solución de H_2SO_4 al 10%.

En la Figura 4 la ccf se identificó con el mismos sistema eluyente para los polifenoles del extracto de Chile Ancho en MeOH (1) comparándolas con referencias puras de ácido clorogénico (2), quercetina (3), ácido cinámico (4), ácido gentísico (5), ácido cafeico (6), ρ– cumárico (7) y kamp (8) marca Sigma Aldrich. En donde la ccf del extracto metanólico se revelo con las dos técnicas (UV y H2SO4), dando un resultado que se encontró ácido cinámico (Rf = 0.51) y ácido cafeico (Rf = 0.24) en el extracto generado. En comparación con el sistema de Et, se determina que los MM son similares en el caso de ácido cafeico, sin embargo, para los demás MM son distintos indicando que los SNC son selectivos para otros metabolitos y esto define las características de los extractos.

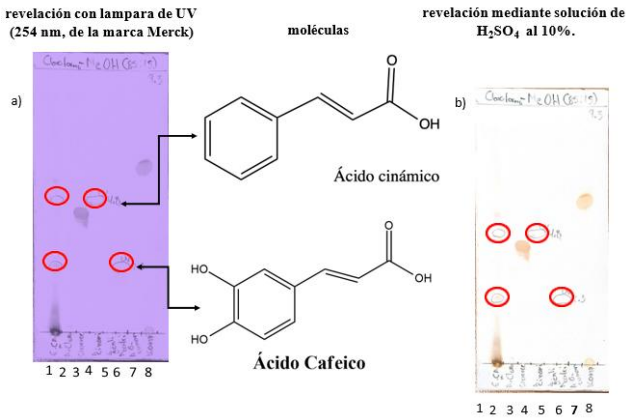


Figura 4: El Sistema utilizado CH3 – MeOH [85:15] a) revelación con lampara de UV y b) revelación mediante solución de H_2SO_4 al 10%.

CONCLUSIONES

Se puede concluir que los disolventes eutécticos profundos (SNC, DEP) son una alternativa viable para la extracción de compuestos bioactivos de la cáscara de *C. annuum.* Particularmente, el extracto de ChCl-Et mostró un alto contenido de polifenoles de 35.429 mg GAE/g de CCA y una capacidad antioxidante CI50 de 6.937 mg/ml. En comparación con el SC (MeOH), presentó 4.619 mg GAE/g CCA siendo muy bajo en comparación con el ChCl-Et. Para el caso del CI50 los valores de ambos sistemas son muy similares 5.838 mg/ml (MeOH). Además, la cromatografía en capa fina permitió identificar compuestos como quercetina, ácido sinápico y ácido cafeico en el extracto de Et (SNC), y ácido cinámico y ácido cafeico en el extracto de MeOH; esto sugiere que los DEP pueden extraer otros MM en comparación con los SC. En general, los SNC presentaron ventajas tanto en términos de eficiencia como de sostenibilidad, demostraron una selectividad hacia los metabolitos de interés. Su uso podría optimizar el proceso de obtención de extractos con propiedades antioxidantes para diversas aplicaciones.

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer a la UAM-Azc y al Tecnológico de Estudios Superiores de Ecatepec por prestar sus instalaciones y equipos. A los Drs. William y Mariana por su orientación en este proyecto. A SECIHTI por la beca otorgada para los estudios de posgrado en maestría Ciencias de ingeniería Bioquímica

BIBLIOGRAFÍA

[1] Acuña, J. L. A., Cabrera, O. A. G., Cisneros, M. A. V., Hernández, M. M., Moya, E. S., Cázares, T. M., & Ramírez, A. R. (2005). Eficiencia de fertilizantes aplicados con fertirriego en chile ancho (Capsicum annuum L.). *Agricultura técnica en México*, *31*(2), 177- 189.

[2] Huarcaya, P., & Alberto, R. (2017). Pérdida de peso en frutos de seis híbridos de pimiento tipo ancho (Capsicum annuum L.) bajo las condiciones de Casma.

[3] Hernández Hernández, I. (2021). Manejo postcosecha y transformación de chile de agua (Capsicum annum L.) en un grupo de productores de Ayoquezco de Aldama, Zimatlán, Oaxaca mediante la implementación de prácticas solidarias.

[4] Ochoa-Alejo, N. biotecnología de capsicum (chile): Cultivo de tejidos, transcriptómica y algo más. *Biotecnología Productiva y Sostenible*, 17.

[5] Zhañay Andrade, M. Á. (2013). *Relación entre la Actividad Antioxidante y Concentración de Compuestos Fenólicos Contenidos en el Fruto del Pungal (Solanum crinitipes)*(Bachelor's thesis, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo).

[6] Ramón, C., & Gil-Garzón, M. A. (2021). Efecto de los parámetros de operación de la extracción asistida por ultrasonido en la obtención de polifenoles de uva: una revisión. *TecnoLógicas*, *24*(51), 263-277.

[7] Robledo, D. M., Jasso, E. G., & Hurtado, M. A. V. (2024). Uso de solventes eutécticos profundos naturales como alternativa a solventes convencionales para extracción de principios activos de hojas de neem (Azadirachta indica). *declaración legal*.

[8] Fandiño Moreno, Y. (2020). Evaluación de la eficiencia de extracción y contenido de compuestos antioxidantes del fruto de Mora de Castilla (Rubus Glaucus Benth) utilizando Cloruro de Colina: Urea como Solvente Eutéctico y Ultrasonido en comparación con una técnica de extracción convencional.

[9] La extracción, D. E. N. P. (2023). *IQ ROCÍO Aguirre Domínguez* (Doctoral dissertation, Universidad Nacional Autónoma De México).

[10] Carreón-Hidalgo, J. P., de Lourdes Ruiz-Peralta, M., & Corona-Jiménez, E. Solventes eutécticos profundos naturales: Aplicaciones en biotecnología y otros sectores industriales Natural deep eutectic solvents: Applications in biotechnology and other industrial sectors.

[11] Rodríguez, J. C. D., & Benitez, R. B. (2022).

Extracción verde de cannabinoides y terpenos de Cannabis Sativa empleando disolventes eutécticos profundos naturales, una extracción más eficiente. Reflexiones de los proyectos de Jóvenes Investigadores e Innovadores en el Departamento del Cauca 2022, 155.

[12] Samaniego, R. P. (2010). Utilización de Solventes Eutécticos como medio de miscibilidad de compuestos bioactivos y polisacáridos.

[13] Smith, E. L., Abbott, A. P., & Ryder, K. S. (2014). Deep eutectic solvents (DESs) and their applications. *Chemical reviews*, *114*(21), 11060-11082.

[14] Alejandro, G. N. M. (2009). Cuantificación de fenoles y flavonoides totales en extractos naturales. *Universidad Autónoma de Querétaro. Rev Acad*, *1*, 1-4.

[15] Sánchez Llamosa, M. J., & Anicama Pariona, N. E. (2015). Contenido de polifenoles totales y actividad antioxidante in vitro del extracto etanólico de hojas y flores de Chuiraga spinosa Less" huamanpinta".

[16] Pérez-González, M. Z., Nieto-Trujillo, A., Gutiérrez- Rebolledo, G. A., García-Martínez, I., Estrada-Zúñiga,M. E., Bernabé-Antonio, A., ... & Cruz-Sosa, F. (2019). Lupeol acetate production and antioxidant activity of a cell suspension culture from Cnidoscolus chayamansa leaves. *South African journal of botany*, *125*, 30-38.

[17] Guija-Poma, E., Inocente-Camones, M. Á., Ponce- Pardo, J., & Zarzosa-Norabuena, E. (2015). Evaluación de la técnica 2, 2-Difenil-1-Picrilhidrazilo (DPPH) para determinar capacidad antioxidante. *Horizonte medico (lima)*, *15*(1), 57-60.

[18] Vallejo-Rosero, Y. J., Barrios-Correa, L., & Anaya- Gil, J. (2021). La cromatografía en capa fina: una alternativa vigente en la industria farmacéutica. Revista de Química, 35(2), 19-25.

[19] Román-Arce, B., Quiroz-González, B., García-Mateos, R., Ybarra-Moncada, C., & Corrales-García, J. (2019). Nutraceutical value of fresh and dried chili (Capsicum annuum L.) in different stages of maturity. *Bioagro*, *31*(2), 123-132

[20] Hafiz, T. A., Mubaraki, M., Dkhil, M., & Al-Quraishy, S. (2017). Antiviral activities of Capsicum annuum methanolic extract against herpes simplex virus 1 and 2. *Pak. J. Zool*, *49*(1), 251-255.

AUTORIZACIÓN Y RENUNCIA

Los autores del presente artículo autorizan al TecNM/Instituto Tecnológico de Zacatepec para publicar el escrito en el libro electrónico del CITID 2025. El TecNM/ITZ o los editores no son responsables ni por el contenido ni por las implicaciones de lo que está expresado en el escrito.

.

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

CONTROL DE SEGUIMIENTO DE TRAYECTORIA BASADO EN LMI APLICADO A UN UAV TIPO CUADRICÓPTERO, CONSIDERANDO UNA REGIÓN LMI.

Arturo D. Espinosa Pedroza[1], Manuel Adam-Medina[2], Jarniel García-Morales[3], Marisol Cervantes-Bobadilla [4]

[1] MC. Tecnológico Nacional de México/CENIDET, Interior Internado Palmira S/N, Col. Palmira, Cuernavaca, Mor. México. e-mail:D22ce059@cenidet.tecnm.mx, 62490.
[2] Dr. Tecnológico Nacional de México/CENIDET, Interior Internado Palmira S/N, Col. Palmira, Cuernavaca, Mor. México. e-mail: manuel.am@cenidet.tecnm.mx, 62490.
[3] Dr. Tecnológico Nacional de México/CENIDET, Interior Internado Palmira S/N, Col. Palmira, Cuernavaca, Mor. México. e-mail: jarniel.gm@cenidet.tecnm.mx, 62490.
[4] Dra. Tecnológico Nacional de México/CENIDET, Interior Internado Palmira S/N, Col. Palmira, Cuernavaca, Mor. México. e-mail: marisol.cb@cenidet.tecnm.mx, 62490.

Resumen – En este trabajo se desarrolla un control de seguimiento de trayectoria basado en desigualdades matriciales lineales (LMI, por sus siglas en inglés) aplicado a un UAV tipo cuadricóptero. Se consideran dos enfoques para la solución de la LMI: uno sin restricciones y otro que incorpora una región circular, con el objetivo de garantizar que las referencias impuestas sean físicamente alcanzables por el UAV. La región circular en el espacio de control permite imponer restricciones en variables clave, como el empuje máximo y la velocidad angular de los rotores, evitando así la generación de leyes de control inviables en la práctica. A través de simulaciones, se comparan ambas soluciones, evaluando su desempeño en términos de error de seguimiento, esfuerzo de control y factibilidad de implementación en un sistema real. Los resultados muestran que la incorporación de restricciones LMI permite obtener un desempeño más realista, asegurando que el UAV opere dentro de sus capacidades físicas y mejorando la factibilidad del control en aplicaciones prácticas.

Palabras Clave: Control basado en LMI, UAV, Región LMI, seguimiento de trayectoria, sistema LPV.

Abstract -- In this work, a trajectory tracking control based on Linear Matrix Inequalities (LMI) is developed and applied to a quadrotor UAV. Two approaches for solving the LMI are considered: one without constraints and another that incorporates a circular region, aiming to ensure that the imposed references are physically achievable by the UAV. The circular region in the control space allows for imposing constraints on key variables, such as the maximum thrust and the rotor angular velocity, thus preventing the generation of infeasible control laws in practice. Through simulations, both solutions are compared by evaluating their performance in terms of tracking error, control effort, and feasibility for implementation in a real system. The results show that incorporating LMI constraints enables a more realistic performance, ensuring that the UAV operates within its physical limits and enhancing the feasibility of control in practical applications.

Key words – LMI-based control, UAV, LMI region, trajectory tracking, LPV system.

INTRODUCCIÓN

En la última década los drones han tenido un auge muy grande, estudios reflejan sus aplicaciones en vigilancia [1], control remoto, simulación virtual [2], aprendizaje aumentado y operaciones autónomas mediante tecnologías avanzadas como IoT [3], realidad mixta y aprendizaje profundo. Así mismo, en la literatura se menciona que el control de los drones es crucial para optimizar el rendimiento en diversas aplicaciones, garantizar un vuelo estable, mejorar la autonomía y mejorar la seguridad y la confiabilidad a través de estrategias de control avanzadas, modelos matemáticos e integración de inteligencia artificial [4], estrategias de control basadas en LMI [5] y estrategias de control PI.

El uso de un controlador PI ha demostrado ser eficaz para el control de seguimiento de vehículos aéreos no tripulados [6]. Sin embargo, para garantizar estabilidad y robustez en presencia de incertidumbres y perturbaciones, el uso de LMI en el diseño de controladores no solo garantiza el cumplimiento de condiciones mínimas de desempeño dinámico, como la estabilidad, sino que también permite satisfacer especificaciones específicas adicionales [7]. Además, al utilizar una región LMI, es posible restringir la solución para reflejar mejor las limitaciones físicas del sistema, ya que permite confinar los polos dentro de una región específica. Esto proporciona una aproximación más realista del comportamiento del UAV en entornos reales.

Los sistemas parámetros variables lineales (LPV, por sus siglas en inglés) permiten replicar de manera más precisa el comportamiento del sistema en comparación con el modelo no lineal [8], ya que representan variaciones paramétricas dependientes del estado dentro de un marco de control lineal. Esto permite diseñar estrategias de control basadas en un enfoque lineal, pero que son capaces de aplicarse con eficacia incluso en sistemas no lineales. Además, la implementación de estrategias de control lineal para determinar las ganancias del sistema no lineal simplifica el diseño del controlador, reduciendo la complejidad computacional y permitiendo un ajuste más eficiente de los parámetros de control. Este trabajo se enfoca en el desarrollo de una estrategia de control de seguimiento de trayectoria basada en LMI para un cuadricóptero,

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

incorporando restricciones en el espacio de control. El enfoque garantiza que las trayectorias sean físicamente alcanzables, limitando variables clave como el empuje máximo y la velocidad angular de los rotores.

La Sección III se presenta el diseño del controlador PI basado en LMI para un sistema LPV. La Sección IV presenta el modelo no lineal del cuadricóptero dentro de un marco cuasi-LPV. Los resultados de simulación en la Sección V demuestran la efectividad del uso de región LMI. En la Sección VI se presentan las conclusiones.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Consideremos un sistema LPV descrito por las siguientes ecuaciones:

$$\dot{x}(t) = A(\eta(t))x(t) + B(\eta(t))u(t), \quad y(t) = C(\eta(t))x(t). \qquad \text{Ec. (1)}$$

Este modelo representa la dinámica de un sistema cuyos parámetros varían en el tiempo de acuerdo con una variable $\eta(t)$. Donde: $x(t) \in \mathbb{R}^s$ es el vector de estado, $u(t) \in \mathbb{R}^i$ es la entrada de control aplicada, $y(t) \in \mathbb{R}^0$ es la salida medida del sistema y $A(\eta(t))$, $B(\eta(t))$, $C(\eta(t))$ son matrices que dependen de $(\eta(t))$, cuyas dimensiones son: $A \in \mathbb{R}^{sxs}$, $B \in \mathbb{R}^{sxi}$, $C \in \mathbb{R}^{oxs}$. El enfoque de *bounding box* utilizado para expresar estas funciones como una combinación convexa de ρ matrices de vértices.

$$\begin{pmatrix} A(\eta_n(t)) \\ B(\eta_n(t)) \\ C(\eta_n(t)) \end{pmatrix} = \sum_{z=1}^{\rho} \beta_z(\eta_n(t)) \begin{pmatrix} A_z \\ B_z \\ C_z \end{pmatrix}. \qquad \text{Ec. (2)}$$

$$\sum_{z=1}^{\rho} \beta_z(\eta_n(t)) = 1, \beta_z(\eta_n(t)) \geq 0. \qquad \text{Ec. (3)}$$

Considerando el sistema LPV en su representación LPV:

$$\dot{x}(t) = \sum_{z=1}^{\rho} \beta_z(\eta(t))(A_z x(t) + B_z u(t)), \quad y(t) = Cx(t), \qquad \text{Ec. (4)}$$

Donde: $A_z \in \mathbb{R}^{nxn}$ son las matrices de estado correspondientes a cada modelo local z, $B_z \in \mathbb{R}^{nxm}$ son las matrices de entrada correspondientes a cada modelo local z, ρ es el número total de modelos locales en la representación del sistema, z es el índice del modelo local, variando de 1 a ρ, $\eta \in \mathbb{R}^q$ es el vector de variables de programación o parámetros que determinan la ponderación de cada modelo local y $\beta_z(\eta)$ son las funciones de activación o ponderación que cumplen.

La forma general de un control PI, se define como:

$$u(t) = K_P \cdot e(t) + K_I \cdot \int e(t)\, dt, \qquad \text{Ec. (5)}$$

Donde: K_P es la ganancia proporcional, K_I es la ganancia integral y $e(t)$ es el error del sistema, definido como la diferencia entre la referencia y la salida del sistema, es decir, $e(t) = ref - y(t)$. En un sistema LPV con representación politópica, la señal de control $u(t)$ se define como una combinación convexa de las ganancias de control correspondientes a los vértices del politopo. El control PI en este caso se expresa como:

$$u = \sum_{z=1}^{\rho} \beta_z(\eta(t)) \left(K_{P_z} \cdot e + K_{I_z} \cdot \int e\, dt \right) \qquad \text{Ec. (6)}$$

Nota: Para simplificar la notación, se omite la dependencia del tiempo en las ecuaciones. El problema consiste en diseñar un esquema de control que garantice la estabilidad y el desempeño deseado del sistema.

CONTROL SEGUIMIENTO DE TRAYECTORIA BASADO EN LMI

En esta sección, se plantea el diseño de un controlador para el seguimiento de trayectoria de un sistema dinámico, con el objetivo de garantizar que el sistema siga una trayectoria deseada. Para lograr esto, se utiliza el análisis de estabilidad de Lyapunov, el cual permite derivar condiciones basadas en LMI que aseguran la existencia de las ganancias de control

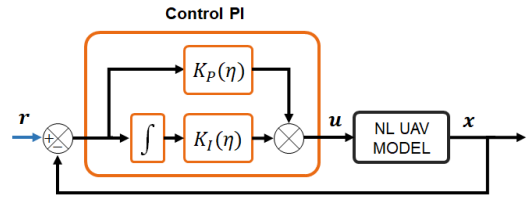


Figura 1. Esquema de control PI.

El error se define como:

$$e = ref - y. \qquad \text{Ec. (7)}$$

Realizando el siguiente cambio de variable de $\dot{\xi} = e$ y $\xi = \int e$, la Ec. 7 se puede reescribir como:

$$\dot{\xi} = ref - Cx \qquad \text{Ec. (8)}$$

El sistema en lazo cerrado se expresa como:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_l \\ \dot{\xi} \end{bmatrix} = \sum_{z=1}^{\rho} \beta_z(\eta) \left(\begin{bmatrix} A_z & 0 \\ -C & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_l \\ \xi \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_z \\ 0 \end{bmatrix} u_l + \begin{bmatrix} 0 \\ I \end{bmatrix} r \right) \qquad \text{Ec. (9)}$$

Sustituyendo Ec. 6 en Ec. 9 y el cambio de variable mostrado en la Ec. 8, se obtiene:

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

$$\begin{bmatrix}\dot{x}_l\\ \dot{\xi}\end{bmatrix} = \sum_{z=1}^{8}\beta_z(\eta) \left(\begin{bmatrix}A_z - B_z K_{P_z} C & BK_{I_z}\\ -C & 0\end{bmatrix}\begin{bmatrix}x_l\\ \xi\end{bmatrix} + \begin{bmatrix}BK_{p_z}\\ I\end{bmatrix} r\right). \quad \text{Ec. (10)}$$

Para el diseño de las ganancias K_{P_z} y K_{I_z}, se considera el sistema en lazo cerrado sin la influencia de la referencia r. Para ello, se establece $r = 0$ y se reescribe la Ec. 10 para agrupar las ganancias, obteniéndose:

$$\begin{bmatrix}\dot{x}_l\\ \dot{\xi}\end{bmatrix} = \sum_{z=1}^{8}\beta_z(\eta) \left(\begin{bmatrix}A_z & 0\\ -C & 0\end{bmatrix}\begin{bmatrix}x_l\\ \xi\end{bmatrix} - \begin{bmatrix}B_z\\ 0\end{bmatrix}\begin{bmatrix}K_{p_z} & -K_{I_z}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}C & 0\\ 0 & I\end{bmatrix}\begin{bmatrix}x_l\\ \xi\end{bmatrix}\right) \quad \text{Ec. (11)}$$

Se realiza un cambio de variable para reformular el sistema en una representación más compacta.

$$\dot{\bar{x}}_l = \sum_{z=1}^{8}\beta_z(\eta)\,((\bar{A}_z - \bar{B}_z\bar{K}_z\bar{C}))\bar{x}_l. \quad \text{Ec. (12)}$$

Se considera el vector de parámetros variantes en el tiempo: $\eta(t) = [\eta_1^T]^T$, se define la siguiente matriz:

$$\beta_{zw}(\eta(t)) = diag(\beta_z(\eta_1(t)), \beta_w(\eta_1(t))). \quad \text{Ec. (13)}$$

Por lo tanto Ec. 12 queda expresada por:

$$\dot{\bar{x}}_l = \sum_{z=1}^{8}\sum_{w=1}^{8}\beta_{zw}(\eta)\,((\bar{A}_z - \bar{B}_z\bar{K}_w\bar{C}))\bar{x}_l. \quad \text{Ec. (14)}$$

El siguiente teorema establece condiciones suficientes para asegurar la convergencia asintótica global del controlador en el seguimiento de trayectoria.

Teorema 1. Dado el sistema (Ec. 4) con la ley de control (Ec. 6), el error del sistema en lazo cerrado (Ec. 8) es asintóticamente estable si existen matrices $S > 0$ y Γ_w con $w = 1, \dots, \rho$, tal que;

$$\sum_{z=1}^{\rho}\sum_{w=1}^{\rho}\beta_{zw}(\eta)\,Q_{ij} < 0 \quad \text{Ec. (15)}$$

Donde: $Q_{ij} = He\{\bar{A}_z S - \bar{B}_z\Gamma_w\}$, y las ganancias del controlador estan dadas por: $K_w = \Gamma_w S^{-1}\bar{C}^{-1}$

DEMOSTRACIÓN

Considere la función candidata de Lyapunov como:

$$V = \bar{x}_l^T P \bar{x}_l, \quad \text{Ec. (16)}$$

Donde: P es una matriz simétrica definida positiva y V>0 debe ser definida positiva. La derivada de la función de Lyapunov viene dada por:

$$\dot{V} = \dot{\bar{x}}_l^T P \bar{x}_l + \bar{x}_l^T P \dot{\bar{x}}_l, \quad \text{Ec. (16)}$$

Donde: $\dot{V} < 0$ deber ser definida negativa.
Sustituyendo Ec. 14 en Ec. 16, se obtiene:

$$\dot{V} = \sum_{z=1}^{\rho}\sum_{w=1}^{\rho}\beta_{zw}(\eta)\,\bar{x}_l^T[(\bar{A}_z - \bar{B}_z\bar{K}_w\bar{C})^T + P(\bar{A}_z - \bar{B}_z\bar{K}_w\bar{C})] < 0 \quad \text{Ec. (17)}$$

La desigualdad mostrada en la Ec. 17, no es una LMI debido a que presenta bilinealidades, con el propósito de agrupar las variables desconocidas, se pre y post-multiplica.

$$\dot{V} = \sum_{z=1}^{\rho}\sum_{w=1}^{\rho}\beta_{zw}(\eta)\,\bar{x}_l^T[P^{-1}(\bar{A}_z - \bar{B}_z\bar{K}_w\bar{C})^T + (\bar{A}_z - \bar{B}_z\bar{K}_z\bar{C})P^{-1}]\bar{x}_l < 0 \quad \text{Ec. (18)}$$

Considerando la propiedad de la parte hermitiana de una matriz ($He\{H\} = H^T + H^T$), la Ec. 18 se puede reescribir como sigue:

$$\dot{V} = \sum_{z=1}^{8}\sum_{w=1}^{8}\beta_{zw}(\eta)\,\bar{x}_l^T[He\{\bar{A}_z P^{-1} - \bar{B}_z\bar{K}_w\bar{C}P^{-1}\}]\bar{x}_l < 0 \quad \text{Ec. (19)}$$

Realizando un cambio de variable $S = P^{-1}$ y $\Gamma = \bar{K}_w\bar{C}P^{-1}$, la Ec. 19 se puede reformular como:

$$\dot{V} = \sum_{z=1}^{8}\sum_{w=1}^{8}\beta_{zw}(\eta)\,\bar{x}_l^T[He\{\bar{A}_z P^{-1} - \bar{B}_z\bar{K}_w\bar{C}P^{-1}\}]\bar{x}_l < 0 \;\blacksquare \quad \text{Ec. (20)}$$

La estabilidad del sistema está dada por:

$$He\{\bar{A}_z S - \bar{B}_z\Gamma_w\} < 0 \quad \text{Ec. (21)}$$

Al garantizar que la desigualdad matricial lineal (LMI) en la Ecuación (21) se cumple, se garantiza la estabilidad del sistema, ya que dicha condición implica que la derivada de la función de Lyapunov es negativa definida.

Al aplicar la región LMI, se obtiene una región circular con centro en $(-\lambda, 0)$ y radio r, tal como se ilustra en la Figura 2. Esta región tiene la siguiente forma:

$$\begin{bmatrix}-rS & \lambda S + Z^T\\ \lambda S + Z & -rS\end{bmatrix} < 0, \quad \text{Ec. (22)}$$

Donde: $S = S^T > 0$.

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

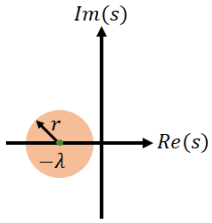


Figura 2. Región LMI circular $\mathcal{D}_2$.

Para obtener esta región, se considera una desigualdad de la forma $z^T + z < 0$, lo que permite derivar la expresión de la región circular, como se describe en la Ec. (22) como:

$$\begin{bmatrix} -rS & \lambda S + (\bar{A}_z S - \bar{B}_z \Gamma_w)^T \\ \lambda S + \bar{A}_z S - \bar{B}_z \Gamma_w & -rS \end{bmatrix} < 0 \qquad \text{Ec. (23)}$$

MODELO MATEMÁTICO DEL CUADRICÓPTERO

En esta sección se presenta el modelado matemático de un UAV, con un enfoque específico en el cuadricóptero, este tipo es caracterizado por su configuración de cuatro rotores, ha adquirido gran relevancia en diversas aplicaciones debido a su agilidad, estabilidad y capacidad de maniobra en entornos restringidos. La Figura 3 ilustra un esquema en el que se representan las principales fuerzas que actúan sobre el cuadricóptero. Para la obtención del modelo dinámico, se establecen las siguientes suposiciones [9]:

- Suposición 1: La estructura del cuadricóptero y sus hélices se consideran rígidas y simétricas.
- Suposición 2: El centro de masa del cuadricóptero coincide con el origen del sistema de referencia del cuerpo $O_{\propto_2}$.

La dinámica del cuadricóptero se define mediante el siguiente conjunto de ecuaciones:

$$\begin{aligned} &\dot{\xi} = v, \\ &m_s \dot{v} = RF, \\ &\dot{R} = R\widehat{\Omega}, \\ &J\dot{\Omega} = -\Omega \times J\Omega + \tau, \end{aligned} \qquad \text{Ec. (24)}$$

Donde: La posición del centro de masa del vehículo en el sistema inercial α está dada por el vector $\xi = [x, y, z]^T \in R^3$, mientras que su velocidad está representada por $v = [\dot{x}, \dot{y}, \dot{z}]^T \in R^3$.

La orientación con respecto a otro sistema inercial α_2 se describe mediante $\Omega = [p, q, r]^T \in R^3$. La masa total del UAV se denota como m_s, y la matriz de inercia, $J = \mathrm{diag}(J_x, J_y, J_z) \in R^{3\times3}$, caracteriza la distribución de masa en torno a su centro de masa en el sistema α_2. Además, el vector de torques $\tau = (\tau_\phi, \tau_\theta, \tau_\psi)^T$ representa las fuerzas de rotación en los ejes de alabeo, cabeceo y guiñada. La matriz de rotación R transforma las coordenadas del sistema inercial α al sistema α_2, mientras que el término F agrupa las fuerzas generadas por los motores del UAV.

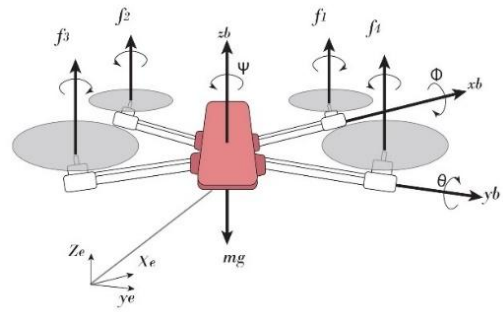


Figura 3. Diagrama de un cuadricóptero que muestra las principales fuerzas actuantes en el vehículo.

Teniendo en cuenta las suposiciones (1 y 2) y aplicando el formalismo de Newton-Euler, la ecuación dinámica representada en Ec. 24 puede reformularse como en [10]:

$$\begin{aligned} &\dot{p}_x = v_x, \\ &\dot{v}_x = (\mathrm{c}(\psi)\, s(\theta)\, \mathrm{c}(\phi) + \mathrm{s}(\psi)\, \mathrm{s}(\phi)) \frac{1}{m_s} u_{z,} \\ &\dot{p}_y = v_y, \\ &\dot{v}_y = (\mathrm{s}(\psi)\, s(\theta)\, \mathrm{c}(\phi) - \mathrm{c}(\psi)\, \mathrm{s}(\phi)) \frac{1}{m_s} u_z, \\ &\dot{p}_z = v_z, \\ &\dot{v}_z = -g + (c(\theta)\, \mathrm{c}(\phi)) \frac{1}{m_s} u_z, \\ &\dot{\phi} = p + (s(\phi)\, \mathrm{t}(\theta))q + (c(\phi)\, \mathrm{t}(\theta))r\,, \\ &\dot{p} = \left(qr(J_y - J_z) + u_\phi\right) \frac{1}{J_x}, \\ &\dot{\theta} = c(\phi)q - s(\phi)r, \\ &\dot{q} = (pr(J_z - J_x) + u_\theta) \frac{1}{J_y}, \\ &\dot{\psi} = (s(\phi)q + c(\phi)r) \frac{1}{\mathrm{c}(\theta)}, \\ &\dot{r} = \left(pq(J_x - J_y) + u_\psi\right) \frac{1}{J_z}, \end{aligned} \qquad \text{Ec. (25)}$$

Donde: c, s y t representan las funciones trigonométricas coseno, seno y tangente, respectivamente. Las entradas del sistema para la dinámica de traslación y actitud se definen como $u = [u_z, u_\phi, u_\theta, u_\psi]^T$. Sin embargo, las entradas reales del sistema son las fuerzas generadas por cada hélice, denotadas f_1, f_2, f_3 y f_4 (véase la Fig. 2).

Las entradas de control pueden definirse en términos de las velocidades angulares de los rotores BLDC de un UAV. Por lo tanto, las entradas del sistema pueden expresarse de la siguiente manera como lo expresan en [11]:

$$u = \Gamma\Omega^2 \qquad \text{Ec. (26)}$$

Donde: $\Omega = [\Omega_1, \Omega_2, \Omega_3, \Omega_4]^T$ es el vector de velocidades angulares y Γ es la matriz de coeficientes definida como:

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

$$\Gamma = \begin{bmatrix} b & b & b & b \\ -bl & 0 & bl & 0 \\ 0 & -bl & 0 & bl \\ -\epsilon & \epsilon & -\epsilon & \epsilon \end{bmatrix} \qquad \text{Ec. (27)}$$

Donde: b, ϵ y l representan el coeficiente de sustentación, el coeficiente de arrastre y la longitud del brazo del cuadricóptero, respectivamente.

Dado que u y Γ son conocidos, se puede aislar la variable Ω y obtener la siguiente expresión:

$$\Omega = \sqrt{\Gamma^{-1}} \cdot \mathrm{u} \qquad \text{Ec. (26)}$$

MODELO SIMPLIFICADO

Un modelo dinámico simple para un cuadricóptero puede obtenerse aplicando simplificaciones al sistema no lineal (Ec. 25). Cuando el cuadricóptero se encuentra cerca del vuelo estacionario, es posible simplificar la dinámica rotacional expresando $(\dot{\phi}, \dot{\theta}, \dot{\psi})$ en términos de (p, q, r), como se indica en [12]. Así mismo, si se asume que el UAV mantiene una condición de vuelo estacionario a lo largo del tiempo, la entrada u_z puede aproximarse como $m_s g$, considerando además que el coeficiente de arrastre ϵ es despreciable a bajas velocidades de rotación. Con estas consideraciones, el modelo no lineal descrito en la ecuación (Ec. 25) se reformula en su representación en el espacio de estados LPV.

$$\begin{aligned} \dot{x} &= A(\eta)x + B(\eta)u, \\ y &= Cx. \end{aligned} \qquad \text{Ec. (27)}$$

Donde:

$$A(\eta) = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & g & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -g & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \Lambda_1\eta_3 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \Lambda_2\eta_2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \Lambda_3\eta_3 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$B(\eta) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\eta_1}{m_s} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{J_x} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{J_y} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{J_z} \end{bmatrix},$$

.

Donde: $\Lambda_1 = (\mathrm{J_y} - \mathrm{J_z})/\mathrm{J_x}$, $\Lambda_2 = (J_z - J_x)/\mathrm{J_y}$, $\Lambda_3 = (J_x - J_y)/\mathrm{J_z}$, $\eta_1 = \cos(\theta) \cdot \cos(\phi)$, $\eta_2 = \dot{\phi}$, $\eta_3 = \dot{\theta}$. El vector de estado x está compuesto por doce componentes: las posiciones (p_x, p_y, p_z), las velocidades (v_x, v_y, v_z), los ángulos de Euler (ϕ, θ, ψ) y sus correspondientes velocidades angulares $(\dot{\phi}, \dot{\theta}, \dot{\psi})$. La matriz C se actualiza para garantizar que el vector de salida y incluya las posiciones traslacionales y angulares.

REPRESENTACIÓN q-LPV DEL UAV

El enfoque LPV destaca por su habilidad para adaptar estrategias de control lineal a sistemas no lineales, representándolos mediante la creación de submodelos lineales. Las variables de programación se definen como $\eta_j \in [\overline{\eta_j}, \underline{\eta_j}]$ con $j = 1, \dots, q$, donde η_j corresponde a los términos variables en (Ec. 27). El número total de no linealidades es q, y para cada η_j, se generan dos funciones de ponderación, cada una con un valor máximo y mínimo.

$$\mu_j^0 = \frac{\eta_j^1 - \eta_j}{\eta_j^1 - \eta_j^0}, \quad \mu_j^1 = 1 - \mu_j^0. \qquad \text{Ec. (28)}$$

Para determinar los límites de η_1, se asume que el cuadricóptero está restringido a variaciones de los ángulos θ y ∅ dentro de $\pm\pi/4$ (rad). En el caso de η_2 y η_3, se consideran referencias con dinámicas lentas en los desplazamientos [13], por lo tanto, los límites para cada término no lineal son: $\eta_1 \in [0.5, 1]$ rad, $\eta_2 \in [-\pi/2, \pi/2]$ rad/s y $\eta_3 = \eta_2$. Las funciones de ponderación se expresan como:

$$\begin{aligned} \mu_1^0 &= \frac{1 - \cos(\theta)\cos(\phi)}{0.5}, \mu_1^1 = 1 - \mu_1^0, \\ \mu_2^0 &= \frac{\pi - 2\dot{\phi}}{2\pi}, \mu_2^1 = 1 - \mu_2^0, \\ \mu_3^0 &= \frac{\pi - 2\dot{\theta}}{2\pi}, \mu_3^1 = 1 - \mu_3^0. \end{aligned} \qquad \text{Ec. (29)}$$

El modelo global está compuesto por $\rho = 2^q$ submodelos, donde la función de programación se calcula como el producto de las funciones de peso asociadas a cada modelo local, de la siguiente manera:

$$\beta_z(\eta) = \mu_{z_1}^1, \mu_{z_2}^2, \mu_{z_3}^3. \qquad \text{Ec. (30)}$$

Donde: la representación binaria de 3 dígitos de $(z - 1)$ se denota como $[z_1, z_2, z_3]$. Las matrices A_z y B_3, calculadas para $z = 1, \dots, 8$, se obtienen al sustituir las variables de programación η_j^0 y η_j^1, con $j = 1,2,3$, en las matrices $A(\eta)$ y $B(\eta)$ de la Ec. 27:

$$A_z = A(\eta_1^{z_1}, \eta_2^{z_2}, \eta_3^{z_3}), \quad B_z = B(\eta_1^{z_1}, \eta_2^{z_2}, \eta_3^{z_3}), \qquad \text{Ec. (31)}$$

Donde η_j indica qué parte de la variable de programación j-ésima está involucrada en el z-ésimo submodelo. Considerando las funciones de programación proporcionadas por Ec. 29, el sistema no lineal (Ec. 25) se representa exactamente, solo en el conjunto convexo, por el modelo cuasi-LPV que se muestra como:

$$\dot{x} = \sum_{z=1}^{8} \beta_z(\eta)\,(A_z x + B_z u). \qquad \text{Ec. (32)}$$

RESULTADOS DE SIMULACIÓN

En esta sección, se presenta una estrategia de control de seguimiento de trayectoria basada en LMI, aplicada a un UAV tipo cuadricóptero.

Primero, se determinan los valores físicos alcanzables por el dron. La fuerza de empuje generada por el cuadricóptero en condiciones de vuelo estacionario (*hover*) se puede calcular mediante la siguiente expresión:

$$u_z = m_s \cdot g = 0.91\ kg \cdot\ 9.81\ \frac{m}{s^2} =\ 8.9271\ N.$$

La velocidad de sustentación del cuadricóptero es de aproximadamente 517 rad/s. Es fundamental analizar los valores máximos que la aeronave puede alcanzar para garantizar que los resultados obtenidos sean realistas y aplicables en la práctica. Para ello, se consideran las siguientes especificaciones principales:

- Voltaje de la batería: 14.8 V
- Empuje máximo por rotor: 850 g
- Velocidad del rotor: 800 rpm/V, lo que equivale a 11,840 rpm (1239.8 rad/s)

El empuje generado de cada rotor proviene de convertir los 850 g de empuje máximo (dado en gramos) a Newtons usando la relación entre masa y fuerza gravitacional.

$$F_{motor} = 0.850\ kg\ \cdot\ 9.81\ \frac{m}{s^2} =\ 8.3385\ N.$$

Por lo tanto, el empuje total es:

$$F_T = 8.3385\ N\ \cdot\ 4 =\ 33.354\ N.$$

Tabla 1. Parámetros del cuadricóptero FlameWheel 450 (DJI F450) [14].

Parámetro	Valor	Unidad
Masa del dron, m_s	0.91	kg
Largo del brazo, l	0.225	m
Gravedad, g	9.81	$\frac{m}{s^2}$
Momento de inercia en el eje X, J_x	0.0104	$kg \cdot m^2$
Momento de inercia en el eje Y, J_y	0.0104	$kg \cdot m^2$
Momento de inercia en el eje X, J_z	0.0196	$kg \cdot m^2$
Coeficiente de empuje, b	$8.35x10^{-6}$	$\frac{N}{\left(\frac{rad}{s}\right)^2}$
Coeficiente de arrastre, d	$1.52x10^{-7}$	$\frac{N \cdot m}{\left(\frac{rad}{s}\right)^2}$

Las condiciones iniciales del UAV, se presentan en la TABLA. 2

Tabla 2. Condiciones iniciales.

P_X[m]	P_y[m]	P_z[m]
0	0	0

Las ganancias del control de vértices K_z se calcularon utilizando el *software* MATLAB, empleando la caja de herramientas SDPT3 [15] para obtener una solución al Teorema 1 mediante la representación q-LPV (Ec. 32). Adicionalmente, el Teorema 1 se resolvió aplicando una región LMI con el fin de comparar los resultados, con los siguientes parámetros $r = 0.2$ y $\lambda = 0.45$. A continuación, se presentan primero los resultados obtenidos con el Teorema 1 y, posteriormente, aquellos correspondientes a la región LMI. La referencia se expresa a continuación:

$$r = [0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 15 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0]^T. \qquad \text{Ec. (33)}$$

El objetivo del UAV es alcanzar una altitud de 15 m. En la Figura 4 se muestra la trayectoria en el eje Z junto con la referencia, donde se observa que alcanza la altitud deseada en aproximadamente 11 segundos, presentando además un sobreimpulso.

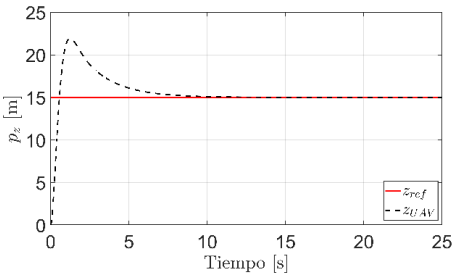


Figura 4. Altitud del UAV.

En la Figura 5 se presenta la ley de control de la fuerza de elevación, donde se observa que esta alcanza un valor elevado, aproximadamente 258.9 N, lo cual resulta físicamente imposible de generar para el cuadricóptero.

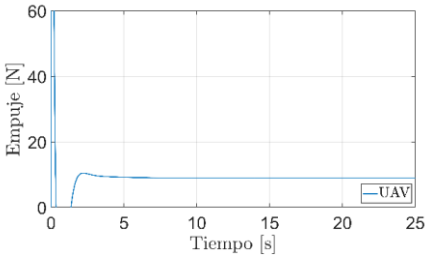


Figura 5. Empuje del UAV.

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

En la Figura 6 se muestran las velocidades angulares de los cuatro rotores, destacando que la máxima alcanzada es de 2784.2 rad/s, un valor que excede las capacidades físicas del cuadricóptero y resulta inviable en la práctica.

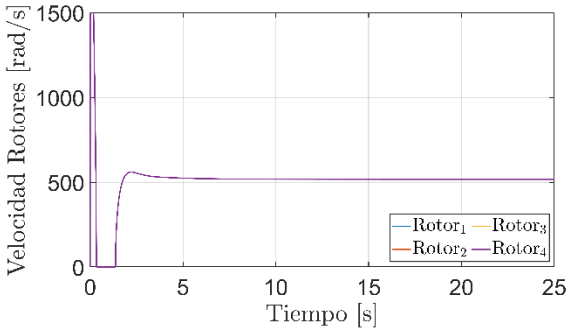


Figura 6. Velocidades de los rotores.

En la Figura 7 se muestra la altitud del UAV. Se observa que el uso de la región LMI modifica la respuesta del sistema, haciendo que el UAV tarde más en alcanzar la referencia. Así mismo, se presenta un menor sobreimpulso en comparación con el resultado anterior, lo que indica una mejora en la estabilidad de la respuesta.

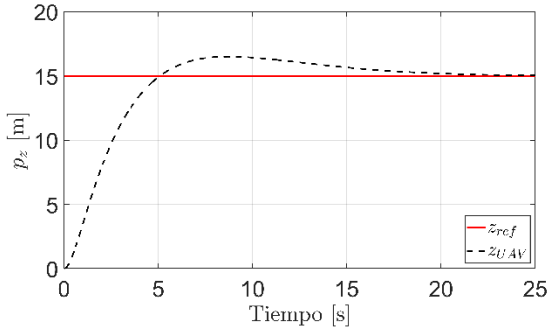


Figura 7. Altitud del UAV.

En la Figura 8 se muestra la fuerza de elevación generada por el sistema de control, la cual alcanza un valor cercano a 22.09 N, manteniéndose dentro de los límites operativos del UAV y siendo considerada un valor adecuado para su funcionamiento.

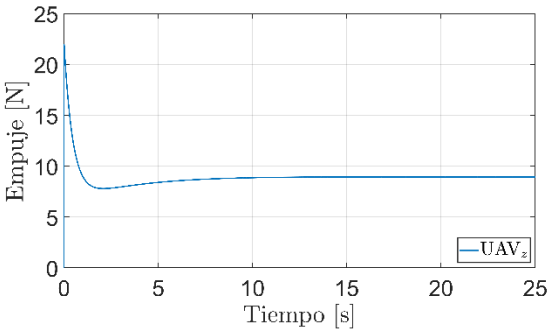


Figura 8. Empuje del UAV.

En la Figura 9 se muestran las velocidades angulares de los cuatro rotores, resaltando que la máxima alcanzada es de 812.4 rad/s, un valor que se mantiene dentro de los límites operativos físicamente admisibles.

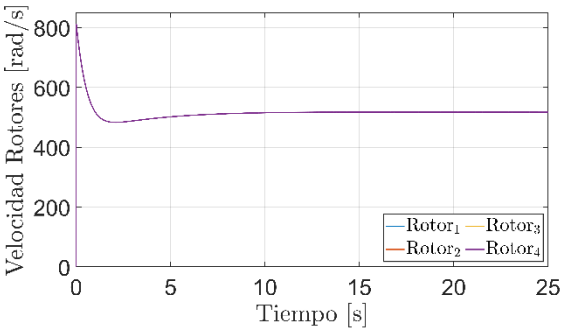


Figura 9. Velocidades de los rotores.

Al analizar ambas soluciones, es evidente que al utilizar una región LMI se garantiza que el sistema permanezca dentro de los parámetros de operación del cuadricóptero, lo que contribuye a un mejor desempeño y estabilidad. En la Tabla 3, se muestra una comparativa de ambos resultados.

Tabla 3. Comparativa de ambas soluciones.

	Solución sin LMI	Solución con región LMI
Empuje máximo	258.9 N	22.09 N
Velocidad máxima	2782.4 rad/s	812.4 rad/s
Tiempo de asentamiento	7.5 seg	18.4 seg
Sobreimpulso	46.18 %	10 %

CONCLUSIONES

Este estudio examinó la aplicación de una región circular en la LMI con el objetivo de asegurar una conducta más parecida a los valores reales en un UAV. A través de la comparación de los resultados con y sin la implementación de la región LMI, se evidenció que su aplicación brinda beneficios considerables en cuanto a realismo físico. Al analizar los parámetros de operación, como la velocidad máxima de los rotores y el empuje generado por los motores, se notó que, al emplear la región LMI, los valores están dentro de los límites operativos del cuadricóptero.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece al *Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (CENIDET)* por el apoyo brindado en el desarrollo de esta investigación y a la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI)

BIBLIOGRAFÍA

[1] Li, C. S. (2019). Intelligent Mobile Drone System Based on Real-Time Object Detection. *Journal on Artificial Intelligence*, https://doi.org/10.32604/JAI.2019.06064.

[2] Huang, J. Z. (2024). A Novel Quadcopter Drone Simulation Platform Based on Mixed Reality. *43rd*

Chinese Control Conference (CCC), 9116-9120. https://doi.org/10.23919/ccc63176.2024.10661945. https://doi.org/10.23919/ccc63176.2024.10661945.

[3] Udaykumar, H. R. (2022). IoT-Based Quadcopter with Automatic Landing System and Object Detection. Fourth International Conference on Emerging Research in Electronics, Computer Science and Technology (ICERECT)., 01-04.

[4] Pavlenko, V. P. (2023). Using Artificial Intelligence to Control Drones. . IEEE 7th International Conference on Methods and Systems of Navigation and Motion Control (MSNMC).

[5] Samadzadeh, S. &. (2019). LMI-based LPV control strategy considering UAV systems. . *Spatial Information Research*, 425-431. https://doi.org/10.1007/s41324-019-00243-7

[6] Can, K. O. (2016). Trajectory tracking control of a four rotor unmanned aerial vehicle (UAV) using two degree of freedom PI controller. *National Conference on Electrical, Electronics and Biomedical Engineering (ELECO)*, 682-686.

[7] Aguilar-Jaramillo, E. &.-R. (2017). APLICACIÓN DE LA LMI AL DISEÑO DE CONTROLADORES ROBUSTOS. Ingenius. Revista de Ciencia y Tecnología, pp. 93-105.

[8] Sadeghzadeh, A., Sharif, B., & Tóth, R. (2020). Affine Linear Parameter-Varying Embedding of Nonlinear Models with Improved Accuracy and Minimal Overbounding. *ArXiv*, abs/2010.01500. https://doi.org/10.1049/IET-CTA.2020.0474.

[9] Ortiz-Torres, G. C.-V.-M.-M.-S.-G. (2020). Fault estimation and fault tolerant control strategies applied to VTOL aerial vehicles with soft and and aggressive actuator faults. *IEEE Access*, 10649-10661.

[10] Sadeghzadeh, I. C. (2014). Linear parameter varying control synthesis: State feedback versus H∞ technique with application to quadrotor uav. . International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS), 1099-1104.

[11] Jun, W. X.-D.-Y. (2018). Fault-tolerant control design of quadrotor UAV based on CPSO. . *International Conference on Control Science and Systems Engineering (ICCSSE)*, pp. 279-283.

[12] Hancer, C. O. (2010). Robust position control of a tilt-wing quadrotor. *Conference on Decision and Control (CDC)* , pp. 4908-4913.

[13] Alwi, H. &. (2015). Sliding mode fault-tolerant control of an octorotor using linear parameter varying-based schemes. IET Control Theory & Applications, pp. 618-636.

[14] Toapanta, C. V. (2018). 3DoF multi-rotor experimental testbed for teaching control systems. *IEEE Third Ecuador Technical Chapters Meeting (ETCM)* , pp. 1-6.

[15] Kim-Chuan Toh, Michael J Todd, and Reha H Tütüncü. Sdpt3—a matlab software package for semidefinite programming, version 1.3. Optimization methods and software, 11(1-4):545–581, 1999.

AUTORIZACIÓN Y RENUNCIA.

Los autores del presente artículo autorizan al TecNM/Instituto Tecnológico de Zacatepec para publicar el escrito en el libro electrónico del CITID 2025. El TecNM/ITZ o los editores no son responsables ni por el contenido ni por las implicaciones de lo que está expresado en el escrito.

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

USO DE SiO_2 OBTENIDO A PARTIR DE CASCARILLA DE ALPISTE PARA LA SÍNTESIS DE P3HT

Liliana Cajero-Sotelo[1], María Elena Nicho-Díaz[2], Ulises León-Silva[2], Mario Román Díaz-Guillén[3] y Alfredo Olarte-Paredes[4]

[1] *Maestría en Ciencias de la Ingeniería. Universidad Autónoma del Estado de Morelos, Centro de Investigación en Ingeniería y Ciencias Aplicadas, Laboratorio de Síntesis de Polímeros.* liliana.cajero@uaem.edu.mx, 777 329 7084, *Ave. Universidad 1001, Col. Chamilpa, Cuernavaca, Morelos, México.*

[2]*Doctorado. Universidad Autónoma del Estado de Morelos, Centro de Investigación en Ingeniería y Ciencias Aplicadas, Laboratorio de Síntesis de Polímeros.* menicho@uaem.mx y ulises.leon@uaem.mx, 777 329 7084, *Ave. Universidad 1001, Col. Chamilpa, Cuernavaca, Morelos, México.*

[3]*Doctorado. Instituto Nacional de Electricidad y Energías Limpias (INEEL).* mario.diaz@ineel.mx, *777 362 3811, Reforma 113, Col. Palmira, C.P. 62490, Morelos, México.*

[4]*Doctorado, Tecnológico Nacional de México, Campus Zacatepec, División de Estudios de Posgrado e Investigación.* alfredo.op@zacatepec.tecnm.mx, *734 343 2110, Calz. Tecnológico 27, Col. Plan de Ayala, C.P. 62780, Zacatepec, Morelos, México.*

Resumen – Debido a sus propiedades electrocrómicas, los polímeros semiconductores han recibido una atención considerable [1]. A pesar de que ya se han realizado varias investigaciones en las cuales se exploran estas propiedades, los materiales desarrollados aún podrían optimizarse para obtener mejores resultados cuando se aplican en dispositivos electrocrómicos [2]. Aunado a esto, los problemas medioambientales que estamos enfrentando actualmente, han generado una mayor preocupación por el uso de materiales sostenibles, como los residuos agroindustriales [3]. En la presente investigación, se sintetizó un compósito polimérico por polimerización *in-situ* del monómero 3-hexil tiofeno (3HT) en presencia de nanopartículas de SiO_2 obtenidas previamente de cascarillas de alpiste, con una concentración del 1% p/p. Los materiales obtenidos se caracterizaron mediante espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier (FTIR), espectroscopia de luz ultravioleta y visible (UV-Vis), difracción de rayos X (DRX), microscopia de fuerza atómica (AFM) y voltamperometría cíclica (VC). Los resultados mostraron una mejora de las propiedades del P3HT con la adición de SiO_2, tales como el incremento de cristalinidad, así como la disminución de la brecha de energía, indicativo de longitud de conjugación y rugosidad. El compósito desarrollado tiene potencial para su aplicación en dispositivos electrocrómicos.

Palabras Clave: Biosílice, electrocromismo, nanopartículas, polímero semiconductor.

Abstract -- Due to their electrochromic properties, semiconducting polymers have received considerable attention [1]. Although several investigations have already been conducted exploring these properties, the developed materials could still be optimized to obtain better results when applied in electrochromic devices [2]. In addition, the environmental problems we are currently facing have generated a greater concern for the use of sustainable materials, such as agro-industrial waste [3]. In the present investigation, polymeric composite was synthesized by the in-situ polymerization of the 3-hexyl thiophene (3HT) monomer in the presence of SiO_2 nanoparticles previously obtained from birdseed husks. The obtained materials were characterized by Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR), ultraviolet-visible light spectroscopy (UV-Vis), X-ray diffraction (XRD), atomic force microscopy (AFM) and cyclic voltammetry (CV). The results showed improved properties of P3HT with the addition of SiO_2, such as increased crystallinity, as well as decreased energy gap, indicative of conjugation length and roughness. The developed composite has potential for application in electrochromic devices.

Key words – Biosilica, electrochromism, nanoparticles, semiconductor polymer.

INTRODUCCIÓN

Actualmente nos enfrentamos a graves problemas ambientales causados por las grandes cantidades de gases de efecto invernadero emanados por la actividad humana, que a su vez contribuye con el cambio climático [4]. Esto ha llevado a varios investigadores a desarrollar materiales nuevos que tengan un menor impacto en el ambiente y que también contribuyan a mitigar las condiciones extremas del cambio climático. Se han desarrollado varios compósitos poliméricos para su aplicación en dispositivos electrocrómicos, tales como las ventanas inteligentes [5, 6].

Sin embargo, las propiedades de los compósitos sintetizados pueden optimizarse con la finalidad de reducir costos de producción, contribuir con la economía circular y mejorar propiedades electrocrómicas. En el presente trabajo, se propone el desarrollo de un compósito polimérico de P3HT y SiO_2 obtenido a partir de cascarilla de alpiste, el cual es un residuo agroindustrial que no se había reportado para la obtención del SiO_2 hasta el 2024 por Cajero-Sotelo *et al.* [7]. Se pretende incorporar el 1% de las partículas de SiO_2 en 99% de la matriz polimérica del P3HT para determinar sus propiedades fisicoquímicas y la factibilidad para su aplicación en dispositivos electrocrómicos.

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

DESARROLLO

Obtención de nanopartículas de SiO_2

El proceso para la obtención de nanopartículas de SiO_2 fue el reportado por Cajero-Sotelo et al., 2024 [7], el cual implica tres etapas. La primera de ellas es el acondicionamiento de la materia prima (la cascarilla de alpiste), que consistió en lavar el material con agua corriente, secar a 60 °C por 24 h y posteriormente tratarlo con HCl 1M en agitación magnética a 95 °C por 2 h, para posteriormente enjuagar con agua corriente y secar a 60 °C por 24 h. En la segunda etapa se llevó a cabo la incineración de las cascarillas de alpiste a 800 °C por 3 h. En la tercera etapa, se purificó el SiO_2 mediante fases de reflujo con NaOH 2.5N y HCl 6N, para finalmente precipitar con NH_4OH, enjuagar y secar a 60°C por 24 h.

Síntesis in-situ de compósitos P3HT:SiO_2

El P3HT y el compósito de P3HT:SiO_2 se sintetizaron por polimerización del monómero 3HT mediante el método oxidativo *in situ*, para el caso del compósito la polimerización del 3HT se realizó en presencia del 1% p/p de las partículas de SiO_2. El agente oxidante fue el $FeCl_3$ y la reacción se llevó a cabo a 0 °C por 24 h en agitación magnética, bajo una atmósfera inerte de N_2. La concentración de partículas de SiO_2 fue de 1% p/p. Concluidas las polimerizaciones, los materiales se lavaron con diferentes solventes para poder eliminar impurezas, el orden fue el siguiente: metanol, HCl 10% p/v, acetona, NH_4OH 10% p/v, EDTA 1% p/v y agua desionizada. Posteriormente, los polímeros fueron secados a 60 °C por 24 h. Se prepararon soluciones poliméricas de concentración de 20 mg/mL en clorobenceno con la finalidad de depositar películas sobre sustratos de vidrio mediante la técnica de *spin coating* para poder evaluar los materiales.

Caracterización

Las partículas de SiO_2, el P3HT y el compósito de P3HT:SiO_2 fueron evaluados mediante la técnica de espectroscopia infrarroja por FTIR, el equipo utilizado fue el espectrofotómetro marca Perkin Elmer, modelo Spectrum Two, se realizaron 16 barridos y la longitud de onda analizada fue de 4000 a 500 cm^{-1}. Los materiales también se caracterizaron por UV-Vis en un equipo marca Thermo, modelo Genesys 10, se hizo un barrido de 200 a 800 nm, el solvente utilizado para dispersar las partículas de SiO_2 fue agua desionizada, mientras que el P3HT y el compósito se evaluaron en forma de película depositada sobre sustratos de vidrio. Para la caracterización por XRD se utilizó un equipo marca Malvern Panalytical modelo Empyrean, el ángulo 2 theta que se evaluó fue de 5 a 70° y la longitud de onda fue de 1.541 Angstroms. La medición de la rugosidad de las películas del P3HT y del compósito se llevó a cabo en un AFM de marca Nanosurf Naio, el área que se evaluó fue de 44.86 µm x 44.86 µm. Para la caracterización electroquímica del P3HT y del compósito de P3HT:SiO_2 se llevó a cabo el análisis de voltamperometría cíclica en un equipo potenciostato BAS 100 B/W, la velocidad de barrido fue de 20 mVs^{-1} y el rango del potencial evaluado fue de -100 a 1200 mV, el electrolito estuvo constituido por una solución anhidra de tetra-butil amino-hexa-fluorofosfato ($TBAPF_6$) 0.1M en acetonitrilo, mientras que el electrodo de referencia fue de Ag/$AgNO_3$, el contraelectrodo una malla de platino y el electrodo de trabajo fueron las películas de los polímeros sobre sustratos de vidrio ITO.

DISCUSIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Los espectros obtenidos mediante la caracterización de FTIR de las partículas de SiO_2, el P3HT y el compósito de P3HT:SiO_2 se presentan en la figura 1.

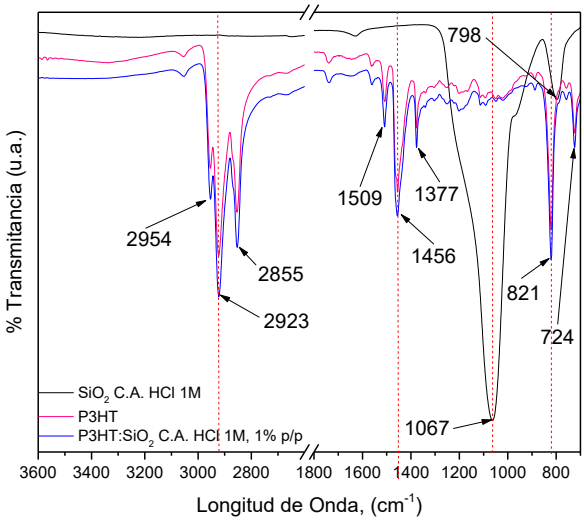


Figura 1. FTIR de SiO_2, P3HT y compósito

En el espectro FTIR de las partículas de SiO_2 se observan dos señales características del óxido, las cuales se encuentran a 798 cm^{-1} y a 1067 cm^{-1}, relacionadas al estiramiento simétrico del Si-O y del Si-O-Si, respectivamente [8], patrón que ya se ha reportado previamente para SiO_2. El espectro del P3HT presentó también picos característicos de los polímeros politiofénicos, los cuales se localizan en 724 cm^{-1}, indicando la vibración oscilante de los metilenos del hexilo sustituyente. Otro pico a 821 cm^{-1}, relacionado al estiramiento del H fuera del plano del anillo tiofénico trisustituido. La flexión simétrica del CH_3 se evidenció en una señal a 1377 cm^{-1}, mientras que los estiramientos simétrico y asimétrico del enlace doble entre carbono y carbono del anillo tiofénico se presentaron a 1456 y 1509 cm^{-1}. Finalmente, los picos relacionados a los estiramientos del -CH_2 se observaron a 2855 y 2923 cm^{-1} y el estiramiento asimétrico del enlace C-H se presentó a 2954 cm^{-1}, todas estas señales ya se han reportado previamente como características del P3HT [9]. Para el compósito P3HT:SiO_2 no se obtuvieron desplazamientos o surgimientos de señales, sin embargo, se llevó a cabo el cálculo del indicativo de longitud de conjugación mediante la relación

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

de las señales obtenidas a 1456 y 1509 cm^{-1}, cuyo valor al disminuir está relacionado con un aumento en la longitud de enlaces conjugados [10]. En la Tabla 1 se muestran los resultados del indicativo de conjugación, de acuerdo a estos, el compósito presenta una mayor longitud de conjugación en comparación con el P3TH prístino. Esto sugiere que las partículas de SiO_2 contribuyen a un mejor ordenamiento de la cadena polimérica.

Tabla 1. Indicativo de conjugación, brecha de energía y rugosidad

No.	P3HT	SiO_2 C.A HCl 1M	Indicativo de longitud de conjugación	Brecha de energía (eV)	Rugosidad Sa (nm)
1	100%	-------	3.083	1.97	158.22
2	99%	1%	2.782	1.96	122.68

En la figura 2 se presentan los espectros UV-Vis de las partículas de SiO_2, del P3HT y del compósito P3HT:SiO_2. En el espectro de las partículas de SiO_2 no se presenta absorbancia significativa en el rango de 350 a 800 nm lo cual se ha reportado previamente [11]. Tanto el P3HT y el compósito P3HT:SiO_2 presentan un pico de absorbancia máxima a 492 nm el cual es generado por la transición de electrones en los enlaces pí [12]. Así mismo también se observó un desplazamiento hipercrómico, lo cual indica una mayor absorbancia cuando se añadieron las partículas de SiO_2 al P3HT, esto debido al aumento en la conjugación de las estructuras [13]. También, se presentó un hombro a 605 nm, lo cual, de acuerdo con trabajos anteriores, indican un empaquetamiento compacto de las cadenas del polímero en la fase condensada, indicando una interacción del SiO_2 con las cadenas poliméricas. Por otro lado, se llevó a cabo el cálculo de la brecha de energía mediante el método del Tauc, los resultados se muestran en la Tabla 1, en la cual se puede observar que la brecha de energía disminuye ligeramente cuando se agrega SiO_2 al compósito, lo cual indica que la incorporación de SiO_2 facilita el paso de los electrones de la capa de valencia a la capa de conducción en la estructura del compósito.

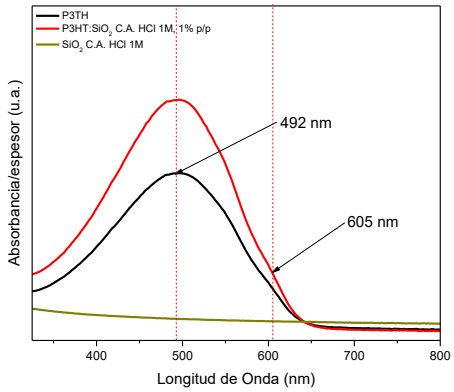


Figura 2. Espectros UV-Vis de SiO_2, P3HT y compósito

Los difractogramas obtenidos por DRX se presentan en la figura 3, donde se aprecian los resultados para las partículas de SiO_2, del P3HT y del compósito P3HT:SiO_2. Todos los difractogramas exhiben picos anchos, lo cual indica que son materiales amorfos, las partículas de SiO_2 presentan un solo pico a 22.6°, comportamiento que coincide con lo previamente reportado para SiO_2 amorfo [14], tanto el P3HT como el compósito P3HT:SiO_2 presentaron picos en los mismos grados en el ángulo 2 theta: 10.7°, 16.2°, 23.2°, 27.9° y 38.2°, mismos que han sido obtenidos con anterioridad [15]. Se puede observar que en el difractograma del compósito los picos a 10.7° y 23.2° se encuentran más definidos que en el difractograma del P3HT prístino, lo cual podría indicar un mejor acomodo en las cadenas poliméricas.

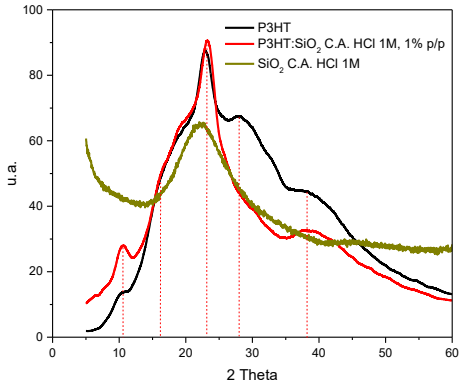
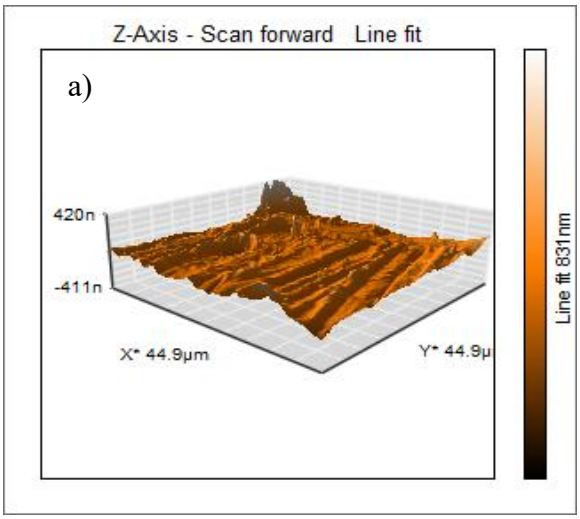


Figura 3. Difractogramas de SiO_2, P3HT y compósito

Las micrografías obtenidas por AFM se presentan en la figura 4. Los resultados de rugosidad por área (2.028 nm^2) se observan en la Tabla 1. En ambos se puede notar que la rugosidad de la película del compósito P3HT:SiO_2, comparada con la rugosidad de la película del P3HT prístino, es menor, lo que sugiere que el SiO_2 se dispersa en el polímero y contribuye a un mejor acomodo del mismo.



Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

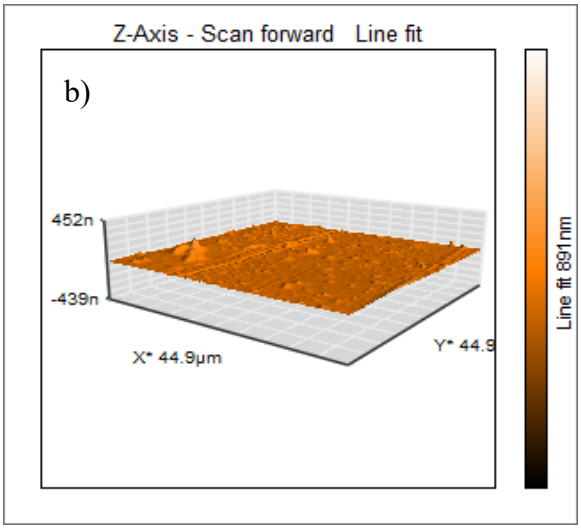


Figura 4. Microscopías: a) P3HT, b) P3HT:SiO_2 99:1 C.A. HCl 1M.

En la figura 5 se encuentran los voltamperogramas obtenidos para las películas sobre vidrio ITO del P3HT y del compósito P3HT:SiO_2. Los voltamperogramas presentaron un patrón similar, el del P3HT prístino muestra un pico de oxidación a 0.71 V, mientras que en la etapa de reducción se presenta un pico a 0.40 V. Para el compósito se presentó una variación en el potencial de los picos máximos de oxidación y reducción, moviéndose el pico de oxidación a un potencial más bajo (0.60 V), lo que indica que cuando al P3HT se le agrega SiO_2 aumenta su capacidad para oxidarse en comparación con el P3HT prístino. En cambio, el pico de reducción se desplazó a un potencial más alto (0.43 V), por lo que la capacidad para descargar el material se vio ligeramente disminuida. En la Tabla 2 se presentan los resultados del almacenamiento de carga y la relación del área de carga y descarga de los materiales. La reversibilidad de los sistemas se calculó mediante esta relación del área integral de las ramas anódica y catódica (Q_{oxi}/Q_{red}), la cual se ha reportado que, al disminuir, la reversibilidad del sistema aumenta [5]. Los resultados exhiben un ligero aumento en el área integral de la rama anódica (Q_{oxi}) en el compósito, en comparación con el P3HT prístino. La relación Q_{oxi}/Q_{red} indica que la reversibilidad del sistema se ve ligeramente disminuida al agregar SiO_2 al P3HT.

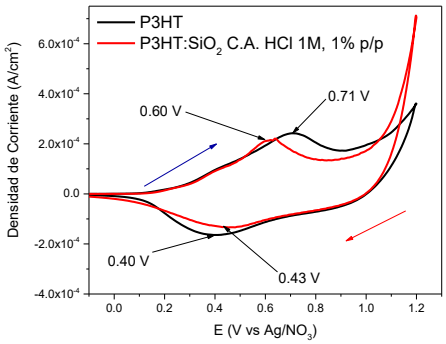


Figura 5. Voltamperogramas de P3HT y compósito

Tabla 2. Relación área de carga y descarga

Núm.	P3HT	SiO_2 C.A HCl 1M	Q_{oxi}(mC/cm^2)	Q_{oxi}/Q_{red}
1	100%	----------	7.25	1.68
2	99%	1%	6.27	1.72

CONCLUSIONES

Se obtuvo un compósito de P3HT:SiO_2 mediante el método *in-situ*. Los resultados de las caracterizaciones muestran que las propiedades del P3HT, como la cristalinidad, absorbancia y la longitud de conjugación, se ven aumentadas al incorporar el SiO_2. Así mismo, la rugosidad del material se vio disminuida al agregar el SiO_2 al polímero. Sin embargo, no se observó una mejora en el proceso de carga y descarga en la voltamperometría cíclica. Esto abre una oportunidad para evaluar otras concentraciones de SiO_2 en los compósitos con la finalidad de determinar si los materiales resultantes tienen potencial para aplicarse en dispositivos electrocrómicos.

AGRADECIMIENTOS

A la SECIHTI, por haber otorgado una beca económica (CVU 935939) durante el tiempo en el que se llevó a cabo el proyecto.

BIBLIOGRAFÍA

[1] Padilla-Martínez, J. (2006). Caracterización Y Optimización Electroquímica De Dispositivos Electrocrómicos Duales Basados En Polímeros Conductores. [Tesis doctoral]. Universidad Politécnica De Cartagena, España.

[2] Benchaabane, A., Hajlaoui, M. E., Hnainia, N., Al-Tabbakh, A., Zeinert, A., & Bouchriha, H. (2020). Optical properties enhancement of hybrid nanocomposites thin films based on P3HT matrix and ZnO@SiO2 core-shell nanoparticles. Optical Materials, 102, 109829.

[3] Embong, R., Shafiq, N., & Kusbiantoro, A. (2016). Silica extraction and incineration process of sugarcane bagasse ash (scba) as pozzolanic materials: a review., ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences, 11(11).

[4] Gobinath, P., Crawford, R. H., Traverso, M., & Rismanchi, B. (2024). Life cycle energy and greenhouse gas emissions of a traditional and a smart HVAC control system for Australian office buildings. Journal of Building Engineering, 82, 108295.

[5] Gómez-Cortez, A., Hernández-Martínez, D., Baray-Calderón, A., Altuzar-Coello, P., Resendiz-González, M. C., & Nicho, M. E. (2023). Synthesis and characterization of novel P3HT-CuO composites for their application in electrochromic devices. Synthetic Metals, 300, 117487.

[6] Vergara-Juárez, F., Baray-Calderón, A., León-Silva, U., Delgado-Arroyo, F., & Nicho, M. E. (2021). Effect of

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

incorporating silica extracted from natural source in poly(3-hexylthiophene-2,5-diyl). Journal of Polymer Research, 28(12), 485.

[7] Cajero-Sotelo, L., Nicho-Díaz, M. E., León-Silva, U., Díaz-Guillén, M. R., Salgado-Delgado, R., & García-Hernández, E. (2024). Caracterización de SiO_2 obtenido a partir de fuentes naturales. Revista Politécnica de Aguascalientes, 3(3).

[8] Shi, B., Xie, L., Ma, B., Zhou, Z., Xu, B., & Qu, L. (2022). Preparation and Properties of Highly Transparent SiO_2 Aerogels for Thermal Insulation. Gels, 8(11), 744.

[9] Ramoroka, M. E., Yussuf, S. T., Nwambaekwe, K. C., Ndipingwi, M. M., John-Denk, V. S., Modibane, K. D., Iwuoha, E. I., & Douman, S. F. (2023). Highly Electro-Conductive Thiophene and N-methylpyrrole functionalized hyperbranched polypropylenimine tetramine-co-poly(3-hexylthiophene-2,5-diyl) donor materials for organic solar cells. Journal of Science: Advanced Materials and Devices, 8(3), 100614.

[10] Chen, T.-A., Wu, X., & Rieke, R. D. (1995). Regiocontrolled Synthesis of Poly(3-alkylthiophenes) Mediated by Rieke Zinc: Their Characterization and Solid-State Properties. Journal of the American Chemical Society, 117(1), 233-244.

[11] Arun Kumar, D., Merline Shyla, J., & Xavier, F. P. (2012). Synthesis and characterization of TiO_2/SiO_2 nano composites for solar cell applications. Applied Nanoscience, 2(4), 429-436.

[12] Sasakura, H., Kinoshira, Y. & Tamiaki, H. (2025) Visible absorption and fluorescence emission of synthetic dimers of chlorophyll- a derivatives linked with a π-conjugated oligoene spacer at the peripheral 3-position. Journal of Photochemistry & Photobiology, A: Chemistry, 462 (116270).

[13] Huang, X., Lan, M., Wang, J., Guo, L., Lin, Z., Zhang, F., Zhang, T., Wu, C., & Qiu, B. (2021). A dual-mode strategy for sensing and bio-imaging of endogenous alkaline phosphatase based on the combination of photoinduced electron transfer and hyperchromic effect. Analytica Chimica Acta, 1142, 65-72.

[14] Mehravar, M., Mirjalili, B. B. F., Babaei, E., & Bamoniri, A. (2021). Nano-SiO2/DBN: An efficacious and reusable catalyst for one-pot synthesis of tetrahydrobenzo[b]pyran derivatives. BMC Chemistry, 15(1), 34.

[15] Sang, S., Li, L., Li, Q., Ding, L., Li, X., Chang, Z., Chen, Y., Ullan, R., Ma, J., & Ji, J. (2024). A high-performance organic thin-film transistor with Parylene/PMMA bilayer insulation based on P3HT. iScience, 27(5), 109724.

AUTORIZACIÓN Y RENUNCIA.

Los autores del presente artículo autorizan al TecNM/Instituto Tecnológico de Zacatepec para publicar el escrito en el libro electrónico del CITID 2025. El TecNM/ITZ o los editores no son responsables ni por el contenido ni por las implicaciones de lo que está expresado en el escrito.

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

POLIMERIZACIÓN RADICALARIA POR TRANSFERENCIA DE ÁTOMO (ATRP) INDUCIDA POR LUZ LED UTILIZANDO UN COMPLEJO CICLOMETALADO DE RUTENIO (II)

Jessica J. Sánchez Garcìa[1], Carla Aguilar Lugo[2], Salvador López Morales[3], Larissa Alexandrova[4]

[1]Doctora en Ciencias Químicas, Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Investigaciones en Materiales, Departamento de polímeros, heparina250ml@quimica.unam.mx, tel. 55 56 22 45 82, CP. 04510.
[2]Doctora en Ciencias e Ingeniería en Materiales, Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Investigaciones en Materiales, Departamento de polímeros, Carla.aguilar.lugo@gmail.com, tel. 55 56 22 45 82, CP. 04510.
[3] Maestro en Ciencias e Ingeniería de Materiales, Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Investigaciones en Materiales, Departamento de polímeros, slm@iim.unam.mx, tel. 55 56 22 45 82, CP. 04510.
[4]Doctora en Química de Macromoleculas, Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Investigaciones en Materiales, Departamento de polímeros, laz@unam.mx, tel. 55 56 22 45 82, CP. 04510.

Resumen – La técnica de ATRP permite obtener materiales poliméricos con baja polidispersidad y peso molecular definido, que al ser catalizadas por complejos organometálicos ofrecen la posibilidad de activación por medio de luz. La polimerización fotoiniciada proporciona un control especial en el proceso de la polimerización, es simple y requiere de condiciones más suaves de reacción. En este trabajo se describen experimentos realizados mediante la técnica de ATRP, que fueron inducidas por fotopolimerización mediante diferentes luces LED con longitudes de onda de 400-700 nm con los colores (azul, rojo, amarillo, verde), irradiación de luz visible, irradiación de ultravioleta utilizando como catalizador al complejo ciclometalado de rutenio *cis*[Ru(o-C_6H_4-2-Py)(phen)$(MeCN)_2$]PF_6, realizando polimerizaciones de monómeros vinílicos (estireno y metacrilato de metilo). Los resultados fueron confirmados por RMN, y GPC.

Palabras Clave: Luz LED, polímeros, ATRP, Rutenio, fotopolimerización.

Abstract -- The ATRP technique allows the obtaining of polymeric materials with low polydispersity and defined molecular weight, using organometallic complexes as catalysts, thus offering the possibility of activation by light. Photoinitiated polymerization provides special control in the polymerization process, is simple and requires milder reaction conditions. This work describes experiments carried out using the ATRP technique, which were induced by photopolymerization using different LED lights with wavelengths of 400-700 nm with the colors (blue, red, yellow, green), visible light irradiation, ultraviolet irradiation using as catalyst the ruthenium cyclometallated complex *cis*[Ru(*o*-C_6H_4-2-Py)(phen)$(MeCN)_2$]PF_6, carrying out polymerizations of vinyl monomers (styrene and methyl methacrylate). The results were confirmed by NMR and GPC.

Key words – LED light, polymers, ATRP, Ruthenium, photopolymerization.

INTRODUCCIÓN

En la actualidad, se han realizado muchos esfuerzos en la búsqueda de procesos de síntesis alternativos que puedan reemplazar los métodos convencionales por alternativas más económicas y amigables con el medio ambiente, especialmente mejorando las condiciones de reacción [1]. La polimerización radicalaria controlada por transferencia de átomo (ATRP), es un método de preparación de materiales poliméricos funcionalizados con estructura controlada. Este método permite obtener materiales de baja polidispersidad y peso molecular definido, con la posibilidad de obtener diversas topologías y arquitecturas, de esta manera conseguir propiedades determinadas para aplicaciones específicas. Por otro lado, las reacciones activadas por luz ofrecen muchas ventajas, son procedimientos experimentales simples con condiciones de reacción suaves, reacciones secundarias mínimas, fuentes de luz accesibles y sintonizables [2]. Con respecto a otras fuentes de irradiación, la luz es menos dañina ya que tiene menor energía a diferencia de la UV cuya energía es alta (~ 6 e V) [3]. Por estas razones, la luz LED (400-700 nm) [4], es más atractiva y prometedora, y se ha probado con diferentes aplicaciones sintéticas. A diferencia de las técnicas de polimerización termoiniciada, la fotopolimerización constituye una forma eficaz y fácil de preparar polímeros ya que ofrece beneficios atractivos, como el control espacio-temporal y el control de la velocidad de polimerización a través de una modulación de la intensidad de la luz y la longitud de onda.

La polimerización fotoiniciada es un proceso que transforma monómeros en polímeros bajo irradiación de luz ultravioleta-visible (UV-Vis) [5]. La polimerización es iniciada por especies reactivas fotogeneradas, ya sean radicales libres o iones, que se producen a partir de compuestos fotosensibles añadidos (fotoiniciadores (PI) y/o fotosensibilizadores (PS).

Los fotocatalizadores orgánicos se caracterizan por tener un bajo peso molecular, en comparación con los complejos metálicos, debido a la presencia del centro metálico y de los ligandos que generalmente tienen un alto peso molecular. Esto es una gran ventaja, ya que el fotocatalizador se

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

introduce en la reacción de polimerización como un porcentaje en peso con respecto al monómero, por lo que, al convertirse a unidades de mol, la concentración del fotocatalizador es extremadamente baja. Se han desarrollado catalizadores fotoredox orgánicos y organometálicos de polimerización, pero la disponibilidad de fotocatalizadores sintetizados y conocidos en la literatura con base en metales siguen siendo limitados [6].

La polimerización fotoiniciada proporciona un control especial del proceso de polimerización que permite determinar en qué situación se puede aplicar [7], además de que la polimerización se puede controlar ajustando la intensidad de la luz y la concentración de compuestos fotosensibles. El desarrollo de nuevos fotocatalizadores que presenten propiedades mejoradas de absorción de luz centradas en el rango visible y que muestren reactividades mejoradas en la fotoiniciación representa sin duda, en la actualidad, todavía un gran desafío.

La actividad fotocatalítica de los fotoiniciadores está directamente relacionada con parámetros clave, que son los siguientes [8]:

(1) Sus propiedades de absorción, incluyendo tanto su rango de absorción como sus coeficientes de extinción molar.
(2) Sus tiempos de vida en estado excitado. La eficiencia de polimerización se mejora al prolongar el tiempo de vida en estado excitado de los fotoiniciadores.
(3) Sus propiedades electroquímicas, los complejos metálicos también deben mostrar procesos de oxidación y reducción reversibles.

Se han investigado ejemplos de CRP (polimerización radical controlada) fotomediada exitosa basados en la integración de compuestos fotosensibles (fotoiniciadores, fotosensibilizadores o catalizadores fotorredox). El papel de los compuestos fotosensibles se refiere a convertir la energía física de la luz incidente en energía química en forma de radicales reactivos capaces de regenerar un activador de menor estado de oxidación a partir de un desactivador de mayor estado de oxidación [9].

Se han estudiado compuestos sensibles a la radiación UV y visible, incluidos los radicales libres fotoiniciadores unimoleculares y bimoleculares [10-13], que pueden iniciar y controlar los procesos ATRP (polimerización radical por transferencia de átomo).

Con el objetivo de desarrollar polímeros mediante la técnica de ATRP de manera más sostenibles y mediadas por luz visible, se han desarrollado sistemas catalíticos fotorredox utilizando catalizadores como el cobre (Cu) [14-16], el iridio ciclometalado (Ir) [17-18], el hierro [19-20] o el rutenio (Ru) [21]. Figura 1.

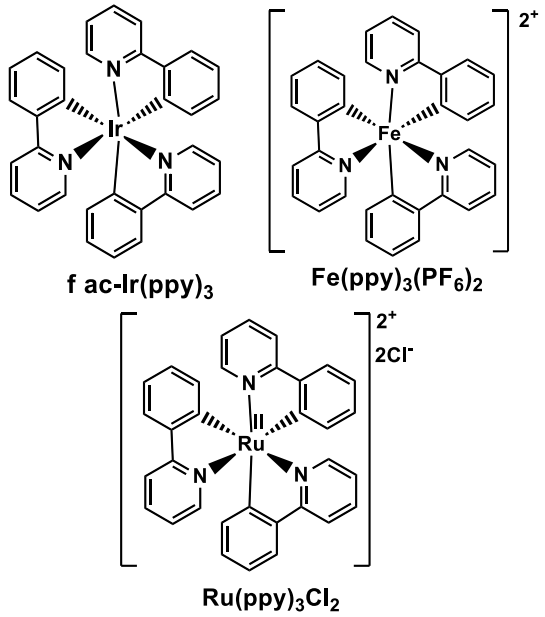


Figura 1. Complejos ciclometalados de iridio, hierro y rutenio utilizado en fotocatálisis por ATRP

El rutenio es un metal importante que se ha estudiado como catalizador en la polimerización radicalaria viviente (LRP). El rutenio tiene como ventajas su amplia esfera de coordinación y gran tolerancia a diferentes grupos funcionales, lo que le permite coordinarse con un gran número de ligandos [22-24]. El catalizador fotorredox cloruro de tris(biridina)rutenio(II) ($Ru(bpy)_3Cl_2$) fue reconocido como un fotosensilizador capaz de iniciar una polimerización por radicales libres en presencia de un donador de electrones de sacrificio trimetilamina en 1985 [25]. Otros complejos de $Ru(bpy)_3Cl_2$ combinados con *N,N*-diisopropiletilamina en presencia de *EBiB* bajo irradiación de luz visible se han utilizado con éxito en el año 2011 [26].

Nuestro grupo de investigación ha trabajado con compuestos de Ru(II) ciclometalados para LRP (Living Radical Polymerization) de monómeros hidrófilos e hidrófobos [27-28]. Especialmente, el *cis*-[Ru(o-C_6H_4-2-py)(phen)$(MeCN)_2$]PF_6 catiónico ciclometalado (1) (Figura 2), ha sido capaz de catalizar la LRP de estireno (St), metacrilato de metilo (MMA), con cierto nivel de control para obtener homo y copolímeros en bloque [29].

En este trabajo se describe la fotopolimerización mediante luces LED de diferente longitud de onda usando el complejo ciclometalado de rutenio *cis*[Ru(o-C_6H_4-2-Py)(phen)$(MeCN)_2$]PF_6 para polimerizar diversos monómeros vinílicos (estireno y metacrilato de metilo). Los resultados fueron confirmados por RMN, y GPC.

DESARROLLO

Materiales

Todos los reactivos utilizados en la síntesis de los complejos organometálicos y en la síntesis de los polímeros fueron adquiridos de Aldrich Chem. Co. Para la síntesis de

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

los complejos, los principales reactivos utilizados son; tricloruro de rutenio trihidratado ($RuCl_3.3H_2O$) (99%), 1,4-ciclohexadieno (97%), etanol (99%), 2-fenilpiridina (98%), hexafluorofosfato de potasio (98%), hidróxido de sodio (99%), 1,10-fenantrolina (99%). Los monómeros utilizados para la síntesis de polímeros fueron: estireno (St) al 99%, metacrilato de metilo (MMA) al 99%, así como 2-bromoisobutirato de etilo (EBiB, 98%) como iniciador. Disolventes: diclorometano, acetonitrilo (99,9% anhidro), éter (99,9% anhidro), *N,N'*-dimetilformamida (99,9%) y tetrahidrofurano son de grado HPLC.

Sistemas LED

Se utilizaron LED de alta potencia ultravioleta (λ = 365 nm), azul (λ = 450 nm), verde (λ = 530 nm), amarillo (λ = 590 nm) y rojo (λ = 640 nm) (potencia eléctrica de 50 W, 4500 lúmenes, 0,02 W.cm-2) de Bailina Lighting Electric Appliance Co., Ltd. para el ATRP fotoinducido catalizado por *cis*-[Ru(*o*-C_6H_4-2-py)(phen)$(MeCN)_2$]PF_6.

Las mediciones y las caracterizaciones de los espectros de resonancia magnética de protones (RMN ^{1}H y RMN ^{13}C) se registraron en un espectrómetro Bruker Avance de 400 MHz, que operaba a 400 y 100 MHz para ^{1}H y ^{13}C, respectivamente, utilizando tetrametilsilano (TMS) como estándar interno.

Las conversiones se determinaron mediante cromatografía de gases (GC) utilizando un cromatógrafo de gases Shimadzu GC-2010 a partir del monómero residual en relación con un estándar interno (n-decano). El peso molecular y las distribuciones de peso molecular (MWD) de los polímeros se determinaron mediante cromatografía GPC. (Módulo de separación ALLIANCE 2695 de Waters equipado con dos columnas de gel HSP (rango de peso molecular HR 4E de 50 a 1x105 y HR 5E de 2x103 a 4x106) en serie y un detector RI Waters 2414. Se utilizó THF como eluyente a 35 ºC con un caudal de 1,0 ml/min. Todos los pesos moleculares (Mn) y distribuciones de peso molecular (dispersidad, Mw/Mn, D) se determinaron mediante calibración con poli(metacrilato de metilo) y poli(estireno) estándares conocidos que se utilizaron para las calibraciones de GPC.

Los pesos moleculares teóricos se calcularon de acuerdo con la siguiente ecuación: $Mn,th = ([Monómero]_0/[Iniciador]_0)$ x conversión x MW monómero donde $0 \leq$ conversión ≤ 1.

Síntesis de complejos de Rutenio

El complejo, *cis*-[Ru(o-C_6H_4-2-py)(phen)$(MeCN)_2$]PF_6, se preparó de acuerdo con los procedimientos descritos [30].

Procedimiento de polimerización

Las polimerizaciones se llevaron a cabo en atmósfera de nitrógeno en tubos de vidrio Schlenk de 15 mL equipados con una barra de agitación.

Homopolimerizaciones

Las polimerizaciones se llevaron a cabo en soluciones (monómero/disolvente 50 % v/v) con 2-bromoisobutirato de etilo *EBiB* como iniciador y n-decano (0,3 mL) como estándar interno. Las relaciones molares iniciales en la mayoría de las polimerizaciones fueron [Monómero]o/[*EBiB*]o/$[RuII]_o$ = 200/1/1 o 200/1/0,5 o 200/1/0,20. El procedimiento típico se realizó de la siguiente manera: se añadió el complejo *cis*-[Ru(o-C_6H_4-2-py)(phen)$(MeCN)_2$]PF_6 (I), (mmol correspondiente) a un tubo Schlenk bajo flujo constante de nitrógeno, se introdujeron St (2,0 mL, 17,0 mmol) o MMA (2,0 mL, 18,77 mmol) y tolueno (2,0 mL) mediante una jeringa y la mezcla se desgasificó mediante un ciclo de congelación-bombeo-descongelación (3 veces). Después de agitar unos 15 minutos para generar soluciones homogéneas, se añadió *EBiB* (0,0138 mL, 0,093 mmol). La mezcla de reacción se irradió con LED. LED UV (200 mW cm-2, 365 nm), LED azules (50 W, 4500 lúmenes, 450 nm), LED verdes (50 W, 4500 lúmenes, 530 nm), LED amarillos (50 W, 4500 lúmenes, 590 nm), LED rojos (50 W, 4500 lúmenes, 640 nm). Se tomaron muestras periódicamente con una jeringa purgada con N_2. Finalmente, los productos poliméricos resultantes se precipitaron en MeOH frío. Las muestras para el análisis de RMN de ^{1}H se pasaron a través de una capa de Florisil para eliminar el catalizador y se analizaron mediante GPC.

Procedimientos de polimerización utilizando irradiación de luz visible

En un tubo Schlenk de 25 ml equipado con un agitador magnético bajo flujo constante de argón, se agregó el complejo ciclometalado de rutenio (0,057 g, 0,0871 mmol), seguido de 2,0 mL (17 mmol) de estireno o metilmetacrilato, 2,0 mL (18,77 mmol) y 0,2 mL de n-decano como estándar interno. La mezcla se desoxigenó realizando tres ciclos de congelación con nitrógeno líquido y vacío.

Este procedimiento se realizó de la misma manera para todas las reacciones); se burbujeó con argón durante 5 minutos y se agitó bajo la irradiación del Sistema de iluminador de Fibra Óptica Regulada DC de Cole-Palmer con una bombilla de alta intensidad de 150 W (λ de 400 a 900 nm), equipada con tubos LED y cuello de cisne con lente para proporcionar iluminación definida. La distancia entre el tubo de reacción y la fuente de luz se mantuvo constante a una distancia de 2,5 cm. Finalmente, con una jeringa se añadieron 13 µL de EBiB (0,0869 mmol). Se tomaron muestras de aproximadamente 0,5 mL a varios intervalos de tiempo a través de una jeringa previamente purgada con argón. Estas muestras se dividieron en 2 fracciones, la primera (0,1 mL) se diluyó en THF y se utilizó para monitorear el progreso de la reacción mediante cromatografía de gases. La segunda fracción (0,4 mL) se utilizó para caracterizar el polímero mediante GPC.

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

DISCUSIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Homopolimerizaciones

Como primer paso de la metodología experimental se realizan las homopolimerizaciones del complejo ciclometalado de rutenio (cis-[Ru(o-C_6H_4-2-py)(phen)$(MeCN)_2$]PF_6 (I), el cual ha sido utilizado como catalizador principal en las polimerizaciones, el compuesto es muy estable y puede ser manejado sin precauciones especiales en aire, además, su síntesis es bastante sencilla y efectiva [31], el cual puede actuar como catalizador para polimerizaciones radicalarias de St y MMA en tolueno a 100 y 80 °C respectivamente, con *EBiB* como iniciador. Los datos principales de las polimerizaciones se encuentran en la Tabla 1, utilizando (monómero/disolvente 50% v/v) bajo atmósfera de argón. La relación molar inicial fue $[monómero]_0/[Ru^{II}]_0/$ [*EBiB*]0 = 200/1/1. Las polimerizaciones fueron rápidas y razonablemente controladas, donde se observa que los pesos moleculares crecieron proporcionalmente a la conversión, muy cerca de los valores calculados, con la hipótesis de que una molécula del iniciador generó una cadena del polímero. Las polidispersidades encontradas son estrechas para ambos polímeros (en un rango de polidispersidades 1.10 -1.70) Tabla 1.

Tabla 1. Termopolimerizaciones mediada por el complejo cis-[Ru(o-C_6H_4-2-py)(phen)$(MeCN)_2$]PF_6

#	Mon	T (° C)	Conv (%)	Mn, GPC	PDI
1	St	80	4	-	-
2		90	7	-	-
3		100	60	10200	1.10
4	MMA	80	55	11253	1.35
5		90	60	11154	1.35
6		100	62	11762	1.70

Condiciones: $[monómero]_0/[Ru^{II}]_0/[EBiB]_0$ = 200/1/1; Monómero/Solvente= 50% v/v, tiempo 8 hr.

En la Figura 2 se muestra el complejo ciclometalado de rutenio utilizado en las polimerizaciones.

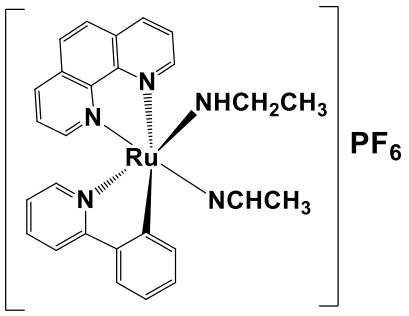


Figura 2. Estructura del complejo cis-[Ru(o-C_6H_4-2-py)(phen)$(MeCN)_2$]PF_6 (I), complejo de rutenio (I)

Se conoce que los complejos que se encuentran saturados de manera coordinada requieren de la disociación de uno de sus ligandos para llevar a cabo su activación, como se ha demostrado con otros complejos de rutenio con 18 electrones. Una de las vías mecanísticas que se piensa que lleva a cabo la activación es la disociación del ligando MeCN en posición *trans* al enlace Ru-C de la 2-fenilpiridina. Esto ha sido corroborado por una señal libre de MeCN libre mediante RMN de ^1H [28,29].

Polimerización por irradiación de luz visible

Se observa que el complejo ciclometalado de rutenio puede sufrir fácilmente una sustitución bajo una leve irradiación de luz visible, para lo cual se estudió la reacción con diferentes disolventes (tolueno, acetona, dimetilformamida, metiletilcetona). En esta reacción se observa que la temperatura del recipiente de reacción se calentó ligeramente de 35-38°C, durante la irradiación. Los datos después de 8 horas de irradiación con luz visible se muestran en la Tabla 2, utilizando el monómero de metacrilato de metilo.

Tabla 2. Polimerización por irradiación de luz visible mediada por el complejo de rutenio I

#	Solvente	Conv (%)	Mn, GPC	PDI
1	Tolueno	45	7766	1.30
2	Acetona	47	10284	1.46
3	DMF	50	9039	1.26
4	MEK	24	1341	1.45

Condiciones: $[MMA]_0/[Ru^{II}]_0/[EBiB]_0$ = 200/1/1, Solvente: Tolueno= 50% v/v, 8 hr de irradiación.

La polimerización se llevó a cabo en todos los disolventes en condiciones homogéneas y fue más rápida en acetona y en dimetilformamida (DMF), observándose una conversión superior al 47% y 50% respectivamente en 8 horas de reacción. Se obtuvieron polímeros de mayor peso molecular en acetona. Estos resultados son muy similares a los obtenidos en termopolimerizaciones.

Se observó que la polimerización no continúa en condiciones de "oscuridad".

Tabla 3. Polimerizaciones de St y MMA mediada por el complejo de rutenio I, con diferentes luces LED.

#	LEDs	Mon	Conv (%)	Mn GPC	PDI GPC
1	UV	St	60	35663	1.75
2		MMA	55	59937	2.04
3	Azul	St	35	31848	1.59
4		MMA	40	46090	1.79
5	Verde	St	37	27559	1.67
6		MMA	25	34256	1.91
7	Amarillo	St	12	20911	1.88
8		MMA	15	10666	2.03
9	Rojo	St	20	22125	2.04
10		MMA	35	16116	2.01

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

Condiciones: $[MMA]_0$/ $[RuII]_0$/ $[EBiB]_0$ = 200/1/1, Solvente: Tolueno= 50% v/v, 8 hr de irradiación.

Se observa en la Tabla 3, que los mayores % de conversión se llevan a cabo con los dos monómeros de St y MMA, cuando se utilizan luz UV, con respecto a las luces LED el % de la conversión se observa de la siguiente manera luz LED (azul>verde>amarillo>rojo). Se puede observar que cuando las polimerizaciones se llevan a cabo para los monómeros de St y MMA en los colores Amarillo y rojo, las polimerizaciones se llevan a cabo de forma lenta, de acuerdo a los valores obtenidos en los experimentos los valores de PDI>2 cuando se catalizan con LEDs color amarillo y rojo, lo que se puede interpretar es que no se tenía un control completo de la polimerización.

Se realiza el estudio de la cinética de la reacción, donde se observa que los mejores porcentajes de conversión para ATRP se llevan a cabo bajo irradiación ultravioleta (UV). Tabla 4.

Tabla 4. Polimerización del monómero de MMA, mediante irradiación UV

#	Tiempo (h)	Conv (%)	Mn GPC	PDI
1	2	25	8971	1.08
2	3	35	10271	1.07
3	4	44	14625	1.24
4	5	48	16955	1.32
5	6	50	20238	1.33
6	7	55	38191	1.36
7	8	60	49386	1.71

Condiciones: $[MMA]_0$/ $[Ru^{II}]_0$/ $[EBiB]_0$ = 200/1/1, Solvente: Tolueno= 50% v/v, 8 hr de irradiación.

Se grafican los valores obtenidos de la polimerización de MMA en la Figura 3.

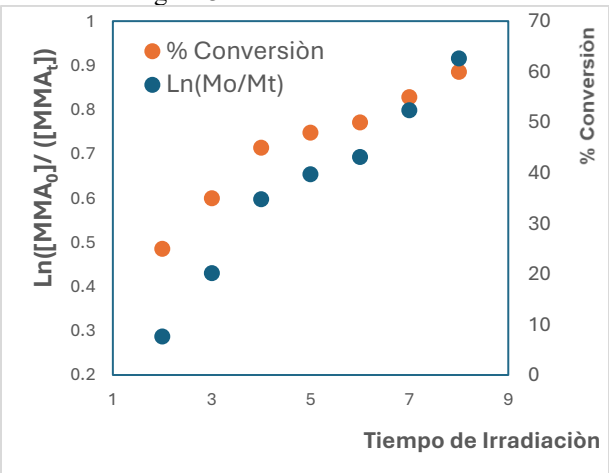


Figura 3. Polimerización del MMA catalizada por el complejo 1 de rutenio y=0.097x para In([MMA]0/[MMA]t) vs tiempo de irradiación.

La polimerización sigue una cinética de primer orden a lo largo de la reacción Figura 4, con la ecuación y=0,097x + 0,1403 para Ln($[MMA_0]$/ ($[MMA_t]$) frente al tiempo de reacción (h). La velocidad es de 0,097 h-1, lo que sugiere que la concentración de los radicales se propaga de forma constante a lo largo de la polimerización.

Los pesos moleculares obtenidos por GPC de los polímeros son muy próximos a los valores teóricos sugiriendo una polimerización por irradiación. Las gráficas muestran cómo el aumento del tiempo de irradiación conlleva el aumento del tamaño del polímero. Los valores moderados del PDI (1,08-1,36) en un tiempo de 2 a 7 horas indican una desactivación relativamente lenta, pero con un rango de control de la polimerización con valores inferiores de PDI (<1,5).

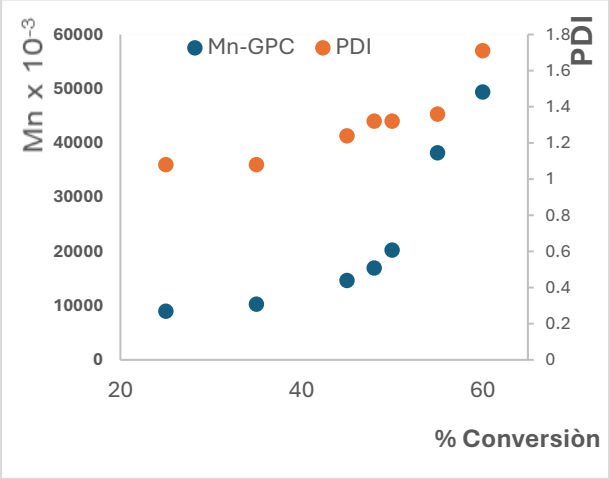


Figura 4. Polimerización del MMA catalizada por el complejo 1 de Rutenio, con Mn determinada por GPC vs PDI.

Tabla 4. Polimerización del monómero de St mediada por el complejo de rutenio I, en tolueno mediante irradiación UV, a temperatura ambiente.

#	Tiempo (h)	Conv (%)	Mn GPC	PDI
1	2	10	4241	1.31
2	3	30	10945	1.35
3	4	35	11006	1.34
4	5	40	14625	1.24
5	6	48	14144	1.31
6	7	53	16107	1.35
7	8	65	22599	1.62

Condiciones: $[MMA]_0/[Ru^{II}]_0/[EBiB]_0$ = 200/1/1, Solvente: Tolueno= 50% v/v, 8 hr de irradiación.

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

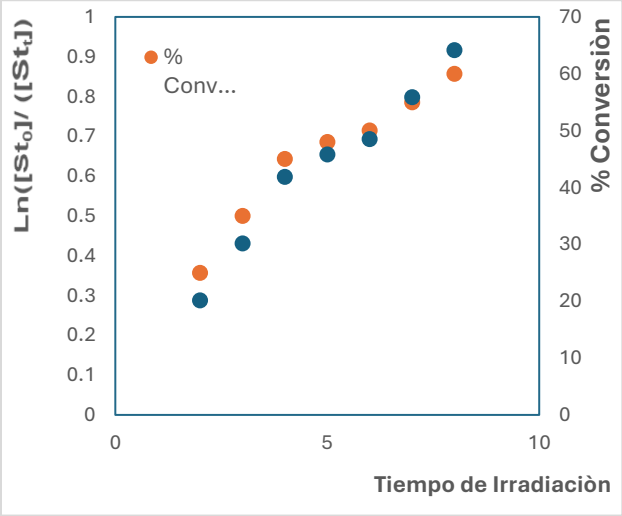


Figura 5. Polimerización del St catalizada por el complejo 1 de rutenio y=0.097x para In([MMA]$_0$/[MMA]t) vs tiempo de irradiación.

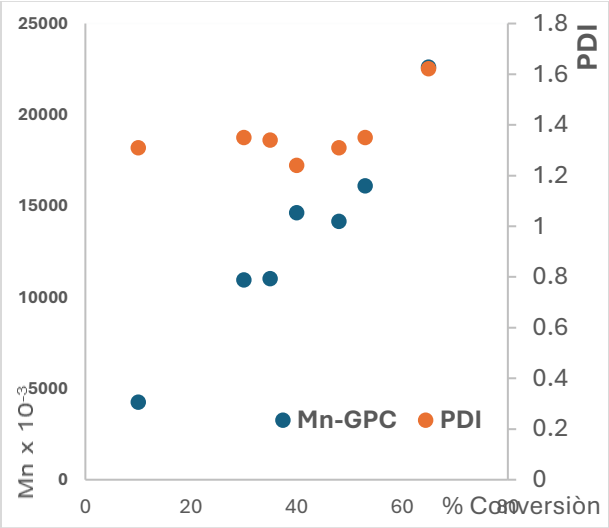


Figura 6. Polimerización del MMA catalizada por el complejo 1 de rutenio, con Mn determinada por GPC vs PDI.

La polimerización del poliestireno sigue una cinética de primer orden a lo largo de la reacción (Figura 6), con la ecuación y=0,1212x para Ln([St$_0$]/ ([St$_t$]) vs. tiempo de reacción (h). La constante de velocidad es 0,1212 h-1, lo que sugiere que la concentración de los radicales se propaga de forma constante a lo largo de la polimerización.

Los pesos moleculares medidos por GPC de los polímeros son muy próximos a los valores teóricos sugiriendo polimerización por irradiación. Los gráficos muestran cómo el aumento del tiempo de irradiación conduce al aumento del tamaño del polímero. Los valores moderados del PDI (1,24-1.35) en un tiempo de 2 a 7 horas indican una desactivación relativamente lenta, pero con un rango de control de la polimerización con valores inferiores de PDI .(<1,5).

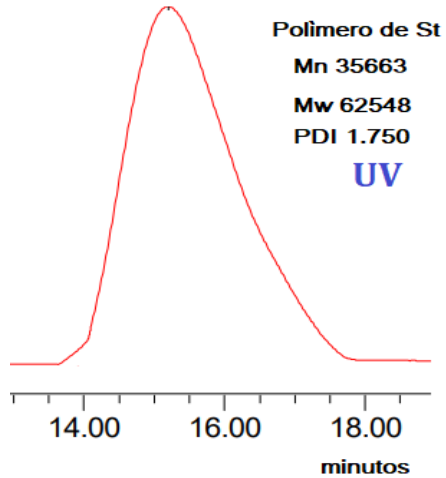


Figura 7. GPC de los polímeros de St mediante fotopolimerizaciòn de luz UV.

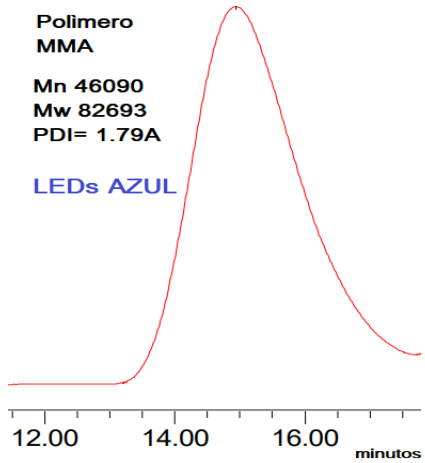


Figura 8. GPC de los polímeros de MMA mediante fotopolimerización de luz LEDs azul.

La curva GPC del copolímero reveló cierta asimetría debido a una cola en las cadenas muertas de PSt, pero la mayoría de las cadenas de PSt se extendieron con éxito gracias a las unidades de estireno. Los valores de PDI nos indican que se ha controlado la polimerización.

Algo muy parecido pasa con los polímeros de MMA mediante la polimerización de luz LEDs azul en donde se observan la simetría y un valor bajo de PDI.

CONCLUSIONES

Las termopolimerizaciones mediadas por el complejo ciclometalado de rutenio se llevan a cabo con un % de conversión del 60% para estireno y del 60% para MMA, con un PDI de 1,10-1,70. Ambas polimerizaciones cumplen los criterios de polimerización radicalaria controlada.
Se logro la polimerización del MMA mediada por el catalizador ciclometalado de rutenio usando irradiación de luz visible a temperatura ambiente, con buenos rendimientos y baja polidispersidad.

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

Se observa que las polimerizaciones se pueden llevar a cabo bajo diferentes longitudes de onda de luces LED (UV, azul, verde, amarilla, roja) para los monómeros MMA y St, en condiciones de encendido y apagado, donde la polimerización se detiene en condiciones de oscuridad (en ausencia de irradiación).

Se estudiaron las diferentes condiciones de reacción de la relación complejo rutenio ciclometalado, encontrando los siguientes resultados:

St= UV (60%)> LEDs verdes (42%)> LEDs azules (35%)> LEDs rojos (20%)> LEDs amarillos (15%).
MMA= UV (55%)> LEDs verdes (35%)> LEDs azules (35%)> LEDs rojos (35%)> LEDs amarillos (12%).

Se estudiaron las reacciones de polimerización con irradiación UV a temperatura ambiente, se realiza la cinética para MMA y St, donde ambas siguen cinéticas de primer orden lo que confirma su carácter controlado.

Lo que se puede observar es que se utilizan longitudes de onda de alta energía como las luces UV y los LED azules, ya que las altas energías son necesarias para que las copolimerizaciones se lleven a cabo.

AGRADECIMIENTOS

La Dra. Jessica Jazmín Sánchez García, agradece a DGAPA por la beca de posdoctorado DGAPA-UNAM. Los autores agradecemos el apoyo técnico a M. en C. Gerardo Cedillo Valverde y a los proyectos DGAPA-PAPIIT IG-100323 y CONAHCyT CF-2023-G-220 por los fondos otorgados.

BIBLIOGRAFÍA

[1] Mikulics, M., Sofer, Z., Winden, A., Trellenkamp, S., Foster, B., Mayer, J., Hardtdegen, H.H, (2020) Nano-Led induced chemical reactions for structuring processes, Nanoscale Adv, 2, pp. 5421-5423

[2] Chen, M., MacLeod, M. J, Johnson, J. A., (2015), ACS Macro Lett, 4, pp. 566–569.

[3] Kumar G. S., Neckers, D. C., (1989) Chem. Rev, 89, pp. 1915– 1925

[4] Liu, S., Borjigin, T., Schmitt, M., Morlet-Savarym F., Xiao, P., Lalevee, J., (2023) High-Performance Photoinitiating Systems for LED-Induced Photopolymerization, Polymers, 15(2), pp. 342

[5] Yagci, Y., Jockusch, S., Turro, N.J. (2010), Photoinitiayed polymerization: advances, challenges and opportunities, Macromolecules, 43, pp. 6245-6260

[6] (a) Parasram, M., Gevorgyan, V., (2017), Visible light-induced transition metal-catalyzed transformations: Beyond conventional photosensitizers, Chem. Soc. Rev. 46, pp. 6227–6240. (b) Bonardi, A.H., Dumur, F., Noirbent, G., Lalevée, J., Gigmes, D., (2018), Organometallic vs organic photoredox catalysts for photocuring reactions in the visible region. Beilstein J. Org. Chem. 14, pp. 3025–3046.

[7] Tasdelen, M.A., Yagci, Y., (2011), photochemical methods for the preparation of complex linear and cross-linked macromolecular structures. Aust J Chem, 64, 982-991.

[8] Dumur, F., (2019), Recent Advances on Visible ligth Metal-Based Photocatalysts for Polymerization under Low Ligth Intensity, Catalyst, 9, pp. 736,

[9] Dadashi-Silab, S., Tasdelen, M.A., Yagci, Y., (2014), Photoinitiated atom transfer radical polymerization: current status and future perspectives. J. Polym Sci Part A, Polym Chem, 52, pp. 2878-88

[10] Tasdeled, M.A., Uygun, M., Yagci, Y., (2011), Studies on photoinduced ATRP in the presence of photoinitiator, Macromol Chem Phys, 212, pp. 2036-2042

[11] Yagci, Y., Tasdelen, M.A., Jockusch, S., (2014), Reduction of Cu(II) by photochemically generated phosphonyl radicals to generate Cu(I) as catalyst for atom transfer radical polymerization and azide-alkyne cycloaddition click reactions, Polymer, 55, pp. 3468-3474

[12] Tasdelen, M.A., Ciftci, M., Yagci, Y., (2012), Visible light-induced atom transfer radical polymerization. Macromol Chem Phys, 213, pp.1391-1396

[13] Ciftci, M., Tasdelen, M.A., Li, W., Matyjaszewski, K., Yagci, Y., (2013), Photoinitiated ATRP in inverse microemulsion, Macromolecules, 46, pp. 9537-9543

[14] Tasdelen, M. A., Uygun, M., Yagci, Y., (2011), Photoinduced controlled radical polymerization. Macromol. Rapid Commun, 32, pp. 58–62.

[15] Tasdelen, M. A., Uygun, M. Yagci, Y, (2010), Photoinduced controled radical polymerization in metanol, Macromol Chem Phys, 211, pp. 2271-2275.

[16] Anastasaki, A., Nikolaou, V., McCaul, N.W., Simula A, Godfrey J, Li M, Nurumbetov G, Wilson P, Haddleton, D.M, (2014), Expanding the scope of the photoinduced living radical polymerization of acrylates in the presence of CuBr2 and Me6-Tren, Macromolecules, 47, pp.3852-3859.

[17] Fors, B. P., Hawker, C. J., (2012), Control of a living radical polymerization of methacrylates by light. Angew. Chem. Int. Ed. Engl., 51, pp. 8850–8853.

[18] Lalèvee, J., Blanchard, N., Tehfe, M.A., Peter, M., Morlet-Savary, F, Fouassier, J.P., (2011), A novel photopolymerization initiating system base don an iridium complex photocatalyst, Macromol Rapid Commun, 32, pp. 917-920

[19] Bansal, A., Kumar, P., Sharma, C.D., Ray, S.S., Jain, S.L., (2015), Light-induced controlled free radical polymerization of methacrylates using iron based photocatalyst in visible light, J Polym Sci Part A Polym Chem, 53, pp. 2739-2746

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

[20] Telitel, S., Dumur, F., Campolo, D., Poly, J., Gigmes, D., Pierre, Fouassier, J., Lalevee, J., (2011), Iron complexes as potential photocalyst for controlled radical photopolymerizations: a tool for modifications and patternind of surfaces, J, Polym Sci Part A Polym Chem, 54, pp. 702-713

[21] Alfredo, N. V., Jalapa, N. E., Morales, S. L., Ryabov, A. D., Le Lagadec, R., Alexandrova, L., (2012), Light-driven living/controlled radical polymerization of hydrophobic monomers catalyzed by ruthenium(II) metalacycles, Macromolecules, 45, pp. 8135–8146

[22] Ouchi, M., Terashima, T., Sawamoto, M., (2009), Chem. Rev., 109 (11), pp. 4963-5050

[23] Kato, M., Kamigaito, M., Sawamoto, M., Higashimura, T., (1995), Macromolecules, 28, pp. 1721-1723

[24] Murahashi, S.I., (Ed) Ruthenium in Organic Synthesis WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, 2004

[25] Iwai, K., Uesugi, M., Takemura, F., (1985), Tris(2,2`-bipyridine)ruthenium(II) sensitized photopolymerization of acrylamide, Polym J, 17, pp. 1005-1011

[26] Zhang, G., Song, I.Y., Ahn, K.H., Park, T., Choi, W., (2011), Free radical polymerization initiated and controlled by visible light photocatalysis at ambient temperature, Macromolecules, 44, pp. 7594-7599

[27] García-Vargas, M., Mendoza-Aquino, G., Aguilar-Lugo, C., López-Morales, S., Torres-Gonzalez, J.E., Le Lagadec R., Alexandrova, L., (2018), Eur. Polym. J. (108), pp. 171-181

[28] Vargas, N, Espinoza Jalapa, N., López Morales, S., Alexander, D, Ryabov, Le Lagadec, R., Alexandrova, L, (2012), Macromolecules, 45(20), pp.8135-8146

[29] Vargas, N., Aguilar Lugo, C, Diaz Gonzalez, O., Le Lagadec, R, Alexandrova, L, (2013), Macromol Sym, 10-20, pp. 325-326

[30] Ryabov, A.D., Le Lagadec, R., Estevez, H, Toscano, R.A., Hernandez, S., Alexandrova, L., Kurova, V.S., Fischer, A., Sirlin, C., Pfeffer, M., (2005), Inorg. Chem., 44, pp. 1626-1634

[31] Ryabov, A. D., Sukharev, V. S., Alexandrova, L, Le Lagadec, R., Pfeffer, M., (2001), Inorg Chem, 40, pp. 6529-6532.

AUTORIZACIÓN Y RENUNCIA.

Los autores del presente artículo autorizan al TecNM/Instituto Tecnológico de Zacatepec para publicar el escrito en el libro electrónico del CITID 2025. El TecNM/ITZ o los editores no son responsables ni por el contenido ni por las implicaciones de lo que está expresado en el escrito.

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

ESTIMACIÓN DE FALLAS EN EMPUJE MEDIANTE UN OBSERVADOR PI BASADO EN LMI Y SU APLICACIÓN PARA UN DRON EXPERIMENTAL

Dryden Estrada Téllez [1], Isay Huicochea Ríos [1], José Fermi Guerrero Castellanos, Natalio Mendoza Robles, Manuel Adam Medina.

[1]Ingeniería, [1]Maestría en Ciencias de la Ingeniería. Departamento de Ingeniería Electrónica Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, Facultad de Ciencias de la Electrónica Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. m23ce098@cenidet.tecnm.mx-7471627668-62493, d21ce081@cenidet.tecnm.mx–7771076748- 62493, manuel.am@cenidet.tecnm.mx – 7773465450-62493, fguerrero@ece.buap.mx – 2223559339-72570, natalio.mendoza@alumno.buap.mx -9513781331-72570

Resumen – El surgimiento de los vehículos aéreos no tripulados (UAVs) ha impulsado el desarrollo de controladores que aseguren el despliegue de estas plataformas bajo condiciones adversas que comprometen tareas; por lo tanto, múltiples trabajos han sido desarrollados con la finalidad de identificar fallas en UAVs. En este artículo se presenta el diseño de un observador Proporcional-Integral (PI) para estimar fallas de un UAV, el cual se ve afectado por un malfuncionamiento en la fuerza de empuje. Las ganancias del observador fueron obtenidas analizando la estabilidad en el enfoque de Lyapunov del sistema. Finalmente, con el fin de evaluar el desempeño del observador, el método propuesto fue probado experimentalmente en un UAV utilizando la herramienta Motion Capture de Optitrack.

Palabras Clave: Observador PI, UAV, Thrust, Estimación de fallas.

Abstract – The emergence of unmanned aerial vehicles (UAVs) has promoted the development of controllers that assure the deployment of this platforms under adverse conditions which compromises the development of tasks; therefore, multiple works have been developed aiming to identify UAV's faults. In this article, a Proportional-Intrgral (PI) observer is designed, to estimate UAV faults, which is affected by a malfunction in thrust force. The observer gains were obtained by analyzing stability of the system using Lyapunov stability analysis approach. Finally, in order to assess the performance of the observer, the proposed method was experimentally tested in a UAV by using Motion Capture tool from Optitrack.

Key words – PI Observer, UAV, Thrust, Fault Estimation.

INTRODUCCIÓN

A medida que la tecnología avanza, se vuelve indispensable dirigir los esfuerzos de investigación hacia el desarrollo de métodos que mejoren el rendimiento y la funcionalidad de los sistemas modernos. En este contexto, los vehículos aéreos no tripulados (UAVs) han emergido como una de las innovaciones más prometedoras en el campo de la ingeniería, debido a su versatilidad y capacidad para realizar tareas específicas de manera eficiente [12]. Su aplicación abarca diversas áreas, como la agricultura de precisión, la grabación de video profesional, espectáculos visuales coordinados, operaciones de rescate, vigilancia y monitoreo ambiental, consolidándolos como herramientas fundamentales en diversas industrias [6] [8] [15].

El funcionamiento adecuado de los UAVs no solo implica el seguimiento preciso de trayectorias programadas, sino también la capacidad de mantener la estabilidad y el rendimiento del sistema ante posibles fallas imprevistas [2]. Estos contratiempos pueden comprometer la funcionalidad del vehículo, provocando una pérdida de estabilidad e incluso fallas críticas en misiones importantes. Por lo tanto, se vuelve esencial implementar estrategias de diagnóstico de fallas y sistemas de control tolerante a fallas [5] que permitan mantener el desempeño del vehículo incluso en presencia de anomalías [10].

Una de las fallas más comunes en los UAVs es la disminución del thrust o empuje, el cual es fundamental para mantener el vuelo y alcanzar las posiciones de referencia deseadas [13]. La pérdida de empuje puede deberse a diversos factores, como fallos en los motores [3], problemas estructurales o perturbaciones externas, y puede impedir que el UAV cumpla con su objetivo operativo de manera eficiente [14].

Para mejorar la confiabilidad de estos sistemas, es importante el diseño de un control tolerante a fallas que nos permita mantener un desempeño aceptable a pesar de que se presenten variaciones en el thrust. Sin embargo, para implementar un CTF efectivo, es necesario contar con la información correspondiente sobre la magnitud y evolución de la falla, lo que destaca la importancia de un esquema de estimación de fallas.

Entre las estrategias de detección de fallas, se cuenta con el uso de observadores PI, permitiéndonos estimar señales desconocidas, incluyendo las fallas. No obstante, su diseño requiere garantizar la estabilidad y convergencia de los estados, por lo que se ocupan la solución de LMIs [7].

Para lograr que el sistema sea tolerante a fallas, es necesario detectar oportunamente la presencia de fallas, así como identificar su magnitud y tipo [11]. La implementación de un observador proporcional-integral (PI) se presenta como una opción efectiva para la estimación tanto de estados como de fallas en sistemas dinámicos [1]. La solución de

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

una desigualdad matricial lineal (LMI) permite obtener las ganancias adecuadas del observador, garantizando una estimación precisa de las fallas y la estabilidad del sistema, respaldada por el criterio de estabilidad de Lyapunov [7]. Este enfoque no solo proporciona una base teórica sólida, sino que también representa un paso significativo hacia la integración de técnicas de diagnóstico y control en UAVs, contribuyendo al desarrollo de sistemas más robustos y confiables en aplicaciones del mundo real.

DESARROLLO

Planteamiento del problema:

Para estimar fallas en un UAV dado por el siguiente espacio de estados:

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + B(u(t) + f(t)) \qquad (1)$$
$$y(t) = Cx(t)$$

Donde $x \in \mathcal{R}^n$ es el vector de estados; $u \in \mathcal{R}^r$ es la ley de control; $y \in \mathcal{R}^p$ es el vector de salidas, $f \in \mathcal{R}^r$ son las fallas en los actuadores del sistema y $A \in \mathcal{R}^{n\times n}$, $B \in \mathcal{R}^{n\times m}$ y $C \in \mathcal{R}^{p\times n}$.

Se propone el siguiente observador PI, para estimar estados con la parte proporcional y las fallas con la parte integral [3].

$$\dot{\hat{x}}(t) = A\hat{x}(t) + Bu(t) + L_p(y(t) - \hat{y}(t)) + Bf(t) \qquad (2)$$

$$\boldsymbol{\dot{f}(t) = L_I(y(t) - \hat{y}(t))}$$

$$\boldsymbol{\hat{y}(t) = C\,\hat{x}(t)}$$

Donde $\hat{\boldsymbol{x}} \in \mathcal{R}^n$ es el vector de estados estimados, $\hat{y} \in \mathcal{R}^p$ es el vector de salidas estimades, $f \in \mathcal{R}^r$ es el vector de fallas estimadas, $L_p \in \mathcal{R}^{p\times n}$ la ganancia proporcional y $L_I \in \mathcal{R}^{p\times p}$ la ganancia integral.

El error de estimación de estados está dado por:

$$e = y - \hat{y}, \qquad (3)$$

y el error de estimación de estados se define como:

$$e_f = f - \hat{f}. \qquad (4)$$

Donde $e \in \mathcal{R}p$ es el vector de error de estimación y $ef \in \mathcal{R}r$ es el vector de error de fallas estimadas.

De manera general, el problema de este trabajo radica en diseñar un observador PI basado en LMI para la estimación de fallas en el empuje de un UAV. Habiendo definido el sistema y el observador para la estimación de fallas, la obtención simultanea de las ganancias Lp y LI se considera el problema principal de este trabajo.

Contribución

En este trabajo se utiliza la solución basada en LMI para estimar fallas de un UAV tipo cuadricóptero, el cual es afectado en su empuje por una falla física intencionada.

Obtención de ganancias del Observador.

Las matrices A, B y C del sistema (1) y el observador (2) son las siguientes:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1/m & 0 & 0 \\ 0 & 1/m & 0 \\ 0 & 0 & 1/m \end{bmatrix},$$

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

El vector de estados es definido como $x(t) = [px\ py\ pz\ vx\ vy\ vz]$ siendo p las posiciones y v las velocidades en los ejes x, y, z. El vector de entradas se compone por $u(t) = [\theta\ \phi\ T]$, en el cual θ corresponde al ángulo roll, ϕ al ángulo pitch y Tal empuje. Por último, el vector de salidas es $y(t) = [px\ py\ pz]$. En el caso de este sistema en particular, el vector de fallas está compuesto por $f(t) = [\theta f\ \phi f\ Tf]$. Las ganancias Lp y LI son obtenidas usando el siguiente teorema.

Teorema 1 [7]: Si existen matrices $P1 = PT > 0$ y W, tales que la desigualdad matricial lineal $He\{P1\ \bar{A} - W\ \bar{C} < 0$ se cumpla, entonces la ganancia del observador se calcula como $L = P{-}1W$, garantizando la estimación de estados y fallas del sistema.

Donde $\bar{A} = \begin{bmatrix} A & B \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$ y $\bar{C} = \begin{bmatrix} C & 0 \end{bmatrix}$.

La resolución de la LMI se hizo mediante el software Matlab y el Toolbox Yalmip SDPT-3.

Las matrices obtenidas fueron:

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

$$L_P = \begin{bmatrix} 24.71 & -0.01 & -0.01 \\ -0.01 & 24.71 & -0.01 \\ -0.01 & -0.01 & 24.71 \\ 59.89 & -0.02 & -0.02 \\ -0.02 & 59.89 & -0.02 \\ -0.02 & -0.02 & 59.89 \end{bmatrix},$$

$$L_I = \begin{bmatrix} 18.36 & -0.01 & -0.01 \\ -0.01 & 18.36 & -0.01 \\ -0.01 & -0.01 & 18.36 \end{bmatrix}.$$

En la figura 1 se muestra el esquema general del método desarrollado en este trabajo.

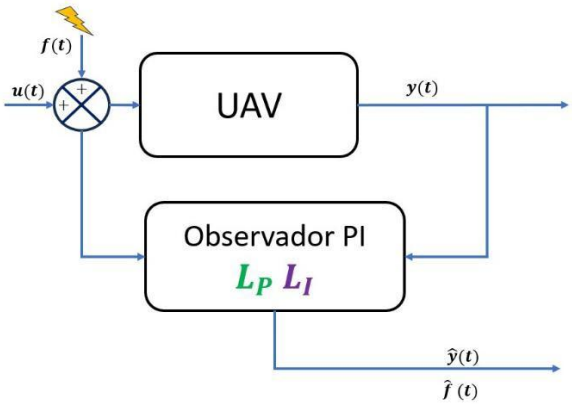


Figura 1: Esquema general del trabajo realizado

RESULTADOS

Simulación:

Antes de realizar las pruebas experimentales, se llevó a cabo una simulación en Matlab con el objetivo de validar el enfoque propuesto en un entorno controlado. En esta simulación, se diseñó un control de altura para el UAV, estableciendo como objetivo que el vehículo alcanzara una posición deseada en el eje z.

A continuación, se muestra el comportamiento sin falla del cuadricóptero.

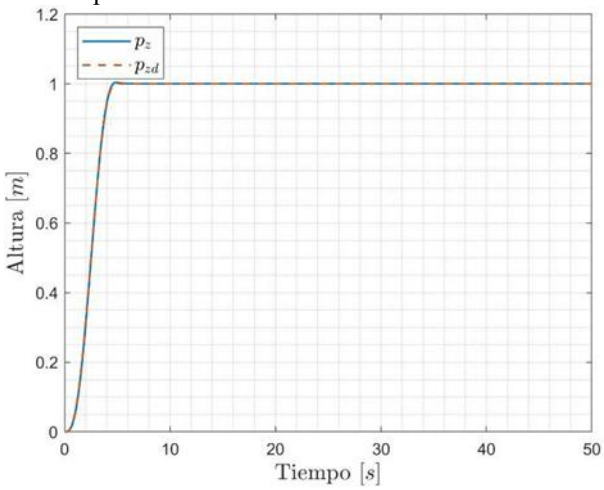


Figura 2: Control de altura de UAV simulado

Se presenta el control de altura de un UAV simulado. La gráfica muestra la respuesta del sistema ante una referencia de altura deseada. El UAV alcanza rápidamente la altura objetivo, con un tiempo de establecimiento aproximado de 10 segundos, sin sobrepaso significativo. Esto indica un desempeño adecuado del controlador implementado.

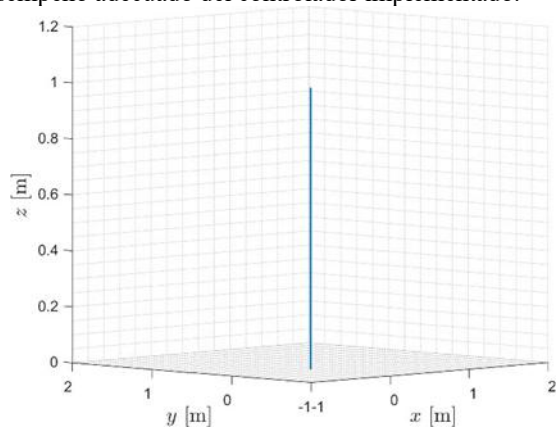


Figura 3: Trayectoria 3D del UAV.

La trayectoria 3D del UAV en el espacio es mostrada en la figura 3. La gráfica muestra un ascenso vertical desde la posición inicial, con una trayectoria que sigue un desplazamiento en el eje z mientras los movimientos en los ejes x y y permanecen mínimos.

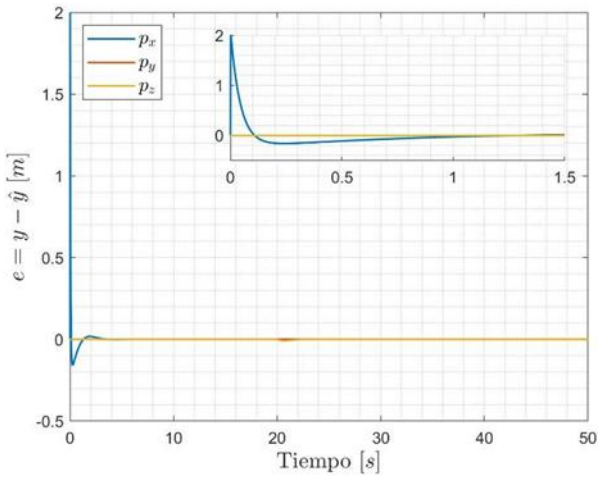


Figura 4: Error de estimación de estados.

Se muestra el error de estimación de estados del UAV. Las curvas representan la diferencia entre los estados reales y estimados en diferentes componentes del sistema. Inicialmente, se observa un pico en el error, que disminuye rápidamente y se estabiliza cerca de cero, indicando una adecuada convergencia del observador implementado.

La falla en el empuje se modela como una reducción en su magnitud, es decir, una falla negativa. Para representar la disminución, se añadió al UAV una masa de 20 g, cuya contribución a la fuerza es calculada al multiplicarla por la aceleración gravitacional, teniendo una fuerza de -0.19 N.

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

Figura 5: Medición de la masa en gramos.

En el entorno simulado, se modifica el vector de las fallas de la siguiente manera:

$$f(t) = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -0.19 \end{bmatrix}$$

Para este ejemplo numérico, la falla afectará al sistema en el segundo 20.

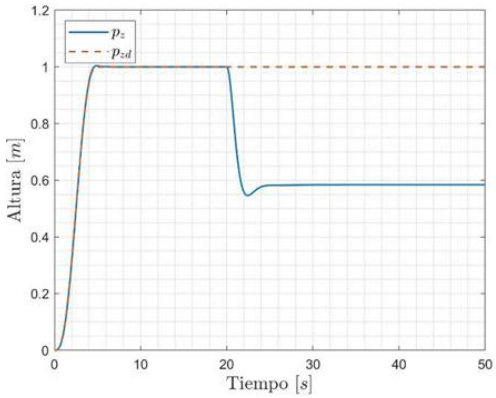


Figura 6: Decremento de la altura del dron tras ser afectado por la falla.

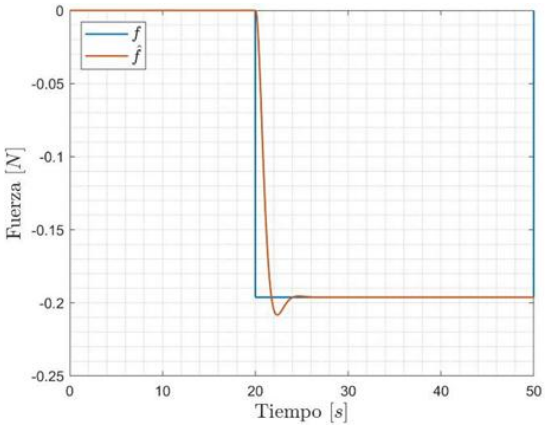


Figura 7: Estimación de fallas

La Figura 7 muestra la comparación entre la fuerza aplicada real y la fuerza estimada por el sistema de detección de fallas. Se observa que, hasta ambas señales coinciden, lo que indica un funcionamiento normal del sistema.

La respuesta del estimador de fallas (línea en color rojo) sigue de cerca la variación de la fuerza real (línea en color azul), con un pequeño retraso y un ligero sobreimpulso antes de estabilizarse.

Este comportamiento sugiere que el algoritmo de estimación logra detectar la falla de manera efectiva, con un margen de error reducido.

Resultados experimentales

Para el entorno experimental se utilizó un UAV junto con un alambre para facilitar la implementación de la masa.

Figura 8: Medición de la masa del UAV.

Para conocer los estados del dron, específicamente sus posiciones y velocidades, se utiliza un sistema de seis cámaras distribuidas estratégicamente alrededor del área de vuelo. Estas cámaras están colocadas de manera que cubren diferentes ángulos y perspectivas, permitiendo una captura precisa y continua del movimiento del vehículo en el espacio tridimensional.

El sistema de cámaras funciona mediante técnicas de visión por computadora, las cuales permiten rastrear marcadores específicos colocados en el dron. Esta configuración asegura una cobertura completa del entorno de vuelo, mejorando la precisión en la estimación de la posición y velocidad del dron en tiempo real.

La información recopilada por las cámaras se procesa para obtener datos detallados de los estados del UAV, como su altura, desplazamiento, así como la velocidad en cada uno de estos ejes. Estos datos son fundamentales para validar el desempeño del sistema de control y la efectividad del observador PI en la estimación de fallas.

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

Figura 9: Área de vuelo del dron.

Para la adquisición de los datos se utilizó Matlab simulink, de igual manera para la implementación del observador PI. De igual manera en la implementación se ocupa un control de posición para el UAV donde la referencia es 1 m, utilizando un controlador PID.

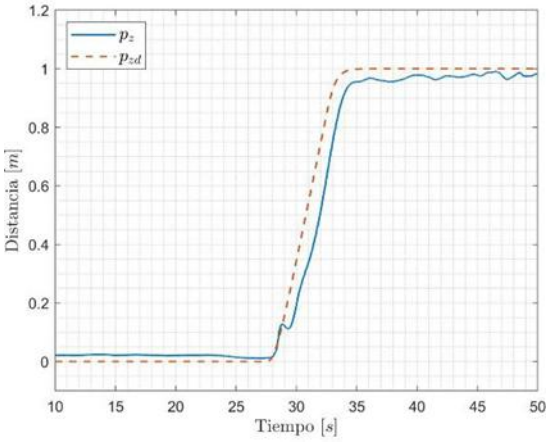


Figura 10: Altura del UAV.

La figura 9 nos muestra el seguimiento de referencia en la posición vertical del dron. Se aprecia que el dron responde al cambio de referencia con un retraso y presenta pequeñas oscilaciones en torno al valor deseado estando cerca de 1 m.

Figura 11: Altura del UAV en el escenario real

A partir del segundo 52, se introduce la falla en el sistema, correspondiente a una masa colgante.

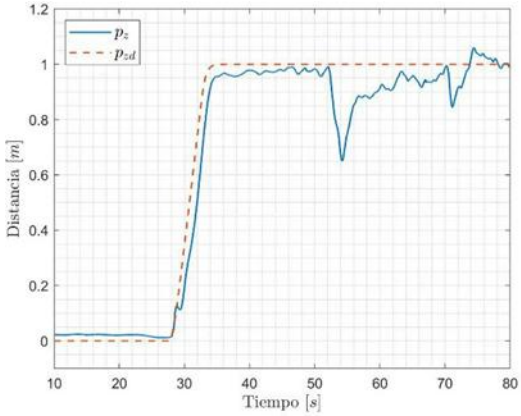


Figura 12: Altura del UAV con falla

En la figura 11 se observa cómo el dron llega a un valor cercano al de la referencia con ligeras oscilaciones, pero al entrar la falla, el sistema tiene una desviación significativa en la altura. Posteriormente, se intenta recuperar su posición, aunque sigue presentando oscilaciones por efecto de la falla.

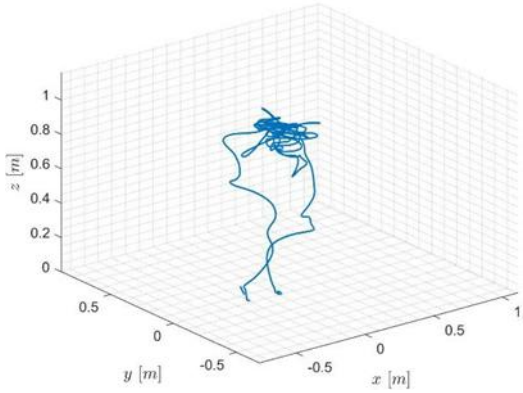


Figura 13: Trayectoria del UAV 3D con falla

En la figura 13, se aprecia la trayectoria tridimensional del dron bajo la influencia de una falla. La gráfica muestra el desplazamiento en los ejes x,y,z expresados en metros. Se nota como la falla provoca desviaciones notorias en la trayectoria, principalmente en la altura, donde se observa una pérdida momentánea de estabilidad.

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

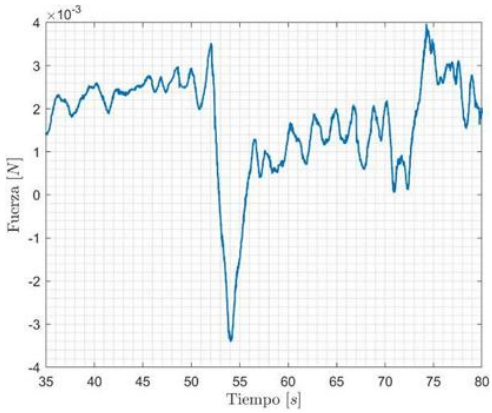


Figura 14: Estimación de falla.

Se aprecia en la figura 13 cómo al segundo 52 que se introduce la falla, se ve reflejada su detección mediante una caída abrupta en la estimación, y se aprecia como el control intenta hacer un ajuste, disminuyendo el valor falla.

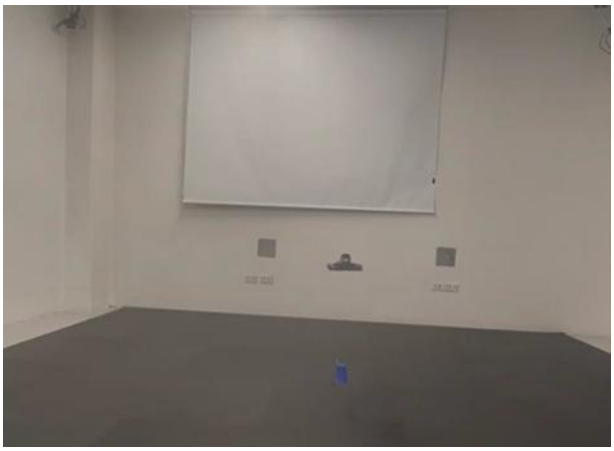


Figura 15: Dron con masa colgante.

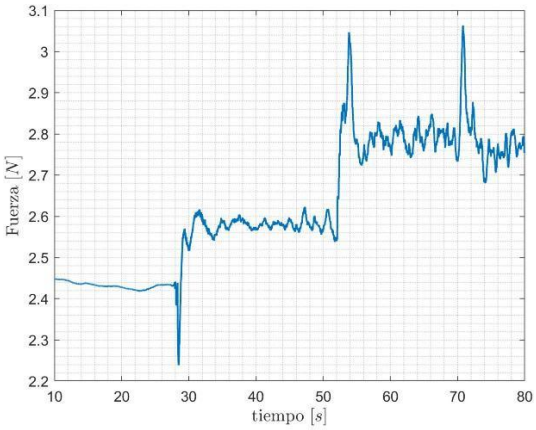


Figura 16: Thrust afectado por la falla.

La falla se manifiesta como un incremento repentino en el thrust, alcanzando picos de hasta 3N, lo que indica que el sistema intenta compensar el efecto de la masa añadida. Posteriormente, el thrust se estabiliza alrededor de los 2.7 N con oscilaciones menores que reflejan el esfuerzo del controlador por mantener el equilibrio frente a la falla.

Cuando se compara con la estimación de la falla obtenida por el observador PI, se aprecia que ambos resultados coinciden en el momento de la falla, validando la efectividad del esquema propuesto para detectarla.

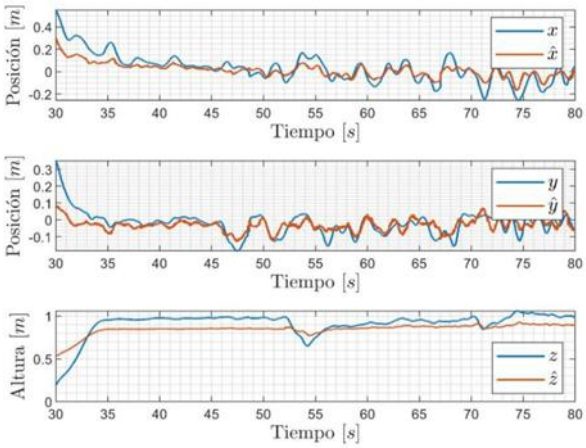


Figura 17: Posiciones estimadas.

Las gráficas en la figura 17 presentan la evolución de las posiciones estimadas en función del tiempo, comparando la trayectoria real con la estimada. A partir del segundo 52, se observa un aumento en el error de estimación debido a la falla introducida, sin embargo, el observador logra mantener un seguimiento aceptable.

DISCUSIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Los resultados experimentales revelan diferencias significativas en el comportamiento del sistema respecto a lo observado en simulación. Estas variaciones se deben principalmente a la presencia de factores externos que no se consideran en un entorno simulado, como el viento, el efecto suelo del dron y otras perturbaciones aerodinámicas inherentes a un escenario real.

El ruido observado en las señales es un claro reflejo de estas influencias externas, afectando tanto la estimación de fallas como el comportamiento general del sistema. A pesar de ello, el esquema de estimación propuesto logró detectar correctamente la falla introducida, mostrando un incremento en la estimación de la fuerza coherente con el efecto de la masa colgada.

En comparación con los resultados de simulación, las pruebas experimentales reflejan una disminución en la precisión de la estimación debido a la presencia de ruido y perturbaciones externas. Sin embargo, el desempeño del observador sigue siendo adecuado al identificar de manera efectiva el momento y la magnitud aproximada de la falla.

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

Estos resultados subrayan la necesidad de ajustar los parámetros del sistema para escenarios reales y considerar posibles estrategias de mitigación del ruido, con el fin de mejorar la robustez del esquema de estimación en condiciones experimentales.

CONCLUSIONES

En este trabajo se presentó un esquema de estimación de fallas aplicado a un dron real, utilizando un observador proporcional-integral (PI) basado en el criterio de estabilidad de Lyapunov y la resolución de una LMI. Los resultados experimentales demostraron que la metodología propuesta es capaz de detectar fallas de manera efectiva, incluso en presencia de perturbaciones externas. La estimación logró identificar el momento en que se introdujo la falla y reflejar su magnitud aproximada, validando así la efectividad del observador en condiciones reales.

Sin embargo, se evidenció que el comportamiento del sistema difiere significativamente respecto a las simulaciones, principalmente debido a factores no modelados como el viento, el efecto suelo y otras perturbaciones inherentes al entorno físico. Estos elementos introdujeron ruido en las mediciones y afectaron la precisión de la estimación, lo que pone en evidencia la necesidad de robustecer el esquema frente a estas condiciones.

Como línea de investigación futura, se propone implementar técnicas de filtrado avanzadas o estrategias de control robusto que mitiguen los efectos de las perturbaciones externas. Además, se sugiere explorar la adaptación de los parámetros del observador en tiempo real, con el fin de mejorar la precisión de la estimación bajo distintas condiciones operativas.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece al Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (CENIDET) por el respaldo institucional brindado a lo largo del desarrollo de este trabajo.

Asimismo, se extiende un agradecimiento a la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla (BUAP) por facilitar el acceso a sus instalaciones, lo que permitió realizar pruebas experimentales que complementaron los resultados obtenidos en simulación.

Este artículo es resultado del apoyo institucional proporcionado por el CENIDET y la BUAP, cuya colaboración fue fundamental para la validación experimental y el enriquecimiento académico del proyecto.

Finalmente, se agradece al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT) por el respaldo financiero otorgado durante la realización de la maestría, lo que hizo posible la dedicación a este trabajo de investigación.

BIBLIOGRAFÍA

[1] Farrera, B., López-Estrada, F. R., Chadli, M., Valencia-Palomo, G., & Gómez-Peñate, S. (2020). Distributed fault estimation of multi–agent systems using a proportional–integral observer: A leader–following application. International Journal of Applied Mathematics and Computer Science, 30(3), 551-560.

[2] George K Fourlas y George C Karras. “A survey on fault diagnosis and fault-tolerant control methods for unmanned aerial vehicles”. En: Machines 9.9 (2021), pág. 197.

[3] SP Linder, B Shafai y M Saif. “Estimating and Accommodating Unknown Actuator Faults with PI Observers. IEEE CCA’98”. En: Conference on Control Applications, págs. 461-465.

[4] Zhang, K., Jiang, B., Shi, P., and Cocquempot, V. (2018). Observer-based fault estimation techniques, volume 127. Springer.

[5] Amin, A.A. and Hasan, K.M. (2019). A review of fault tolerant control systems: advancements and applications. Measurement, 143, 58–68.

[6] Mendoza, N. (2025). Control cooperativo de un conjunto de cuadricópteros: aplicación al transporte de objetos en situación de desastre natural.

[7] Estrada Téllez, D. (2024). Fault Estimation in Multi-Agent Systems: A Distributed PI Observer Approach.

[8] Vazquez Trejo, J.A. (2020). Control de formación distribuido para una flotilla de vehículos autónomos basado en sistemas multi-agentes.

[9] Lan, J., & Patton, R. J. (2016). A new strategy for integration of fault estimation within fault-tolerant control. Automatica, 69, 48-59.

[10] Koenig, D., & Mammar, S. (2002). Design of proportional-integral observer for unknown input descriptor systems. IEEE transactions on automatic control, 47(12), 2057-2062.

[11] Puchalski, R., & Giernacki, W. (2022). UAV fault detection methods, state-of-the-art. Drones, 6(11), 330.

[12] Trejo, J. A. V., Medina, M. A., Trejo, J. A. V., Beltrán, C. D. G., & Morales, J. G. (2021). Robust observer-based leader-following consensus for multi-agent systems. IEEE Latin America Transactions, 19(11), 1949-1958.

[13] Guerrero-Castellanos, J. F., Madrigal-Sastre, H., Durand, S., Torres, L., & Munoz-Hernández, G. A. (2013). A robust nonlinear observer for real-time attitude estimation using low-cost MEMS inertial sensors. Sensors, 13(11), 15138-15158.

[14] Zhou, L., Xu, S., Jin, H., & Jian, H. (2021). A hybrid robust adaptive control for a quadrotor UAV via mass observer and robust controller. Advances in Mechanical Engineering, 13(3), 16878140211002723.

[15] Espinosa Pedroza, A. D. (2024). Diseño de esquema de control robusto líder-seguidor basado en

observador para sistemas multi-agentes LPVs bajo perturbaciones externas con aplicación en vehículos aéreos no tripulados.

AUTORIZACIÓN Y RENUNCIA.

Los autores del presente artículo autorizan al TecNM/Instituto Tecnológico de Zacatepec para publicar el escrito en el libro electrónico del CITID 2025. El TecNM/ITZ o los editores no son responsables ni por el contenido ni por las implicaciones de lo que está expresado en el escrito.

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

CASO DE ESTUDIO EN LA CENTRAL GEOTÉRMICA "LOS HUMEROS" SOBRE EL COMPORTAMIENTO DEL COBRE ANTE LA CORROSIÓN EN ROTORES DE LOS GENERADORES ELÉCTRICOS DE LAS UNIDADES 9 Y 10.

Adrián Cristóbal Neri [1], Daniel López Domínguez [2], Nestor Belisario Gomez Guzman [3], Adrián Méndez Ochoa [4], Jesus Alberto López Najera [5]

[1]Maestría en Ciencias Aplicadas. Centro de Investigaciones Químicas-UAEM, adrian.neri@live.com, +52 55 4143 6784, Av. Universidad 2001, Universidad Autónoma del Estado de Morelos, 62210 Cuernavaca, Mor.

[2]Maestría en Ciencias de la Ingenieria. Asesoría Industrial Sea, Investigación y Desarrollo. daniel.lopez@asesoriaindustrialsea.com.mx, 777-5947844, Av. Taxqueña 1594-106, Col. Quetzalcóatl, CP 04270, CDMX.

[3]Doctorado en Ingeniería y Ciencias Aplicadas. Asesoría Industrial Sea, Investigación y Desarrollo. nestor.gomez@asesoriaindustrialsea.com.mx, 777-4209949, Av. Taxqueña 1594-106, Col. Quetzalcóatl, CP 04270, CDMX.

[4]Doctorado en Ciencias. Asesoría Industrial Sea, Investigación y Desarrollo. adrian.mendez@asesoriaindustrialsea.com.mx, 777- 1754247, Av. Taxqueña 1594-106, Col. Quetzalcóatl, CP 04270, CDMX.

[5]Maestría en Ingeniería Aplicada. Universidad de Colima, maxem7@hotmail.com, +52 282 1488536, Avenida Universidad 333, Las Víboras, 28040 Colima, Col.

Resumen.- Se realizó una visita a la planta Geotermoeléctrica "Los Humeros" en el estado de puebla. Derivado en la visita se obtuvieron muestras de polvo negro de diversos sitios, particularmente de cables de cobre empleados como aterrizaje (conocidas como tierras físicas), muestras fueron evaluadas con técnicas especializadas como Difracción de rayos X (DRX), se colocaron cupones corrosimétricos de cobre C11000 con la finalidad de determinar la cinética de corrosión por un periodo de 35 días, además durante la visita se muestreo líquido del vapor condensado. La muestra líquida se analizó en laboratorio para su caracterización fisicoquímica. Mientras tanto en el laboratorio se realizó una prueba en condiciones controladas simulando las condiciones de trabajo de la turbina, la prueba tuvo una duración de 30 días, para analizar, el efecto sobre la corrosión del Cobre por ensayo gravimétrico y mediciones electroquímicas (curvas de polarización potenciodinámica, potencial de circuito abierto, resistencia a la polarización lineal). Los resultados gravimétricos y electroquímicos indicaron la agresividad del ambiente corrosivo en las condiciones expuestas, la agresividad de la atmosfera propicia la degradación no solo del cobre, sino de otros materiales como acero al carbono, acero galvanizado creando desgaste prematuro y con ello; pérdida de recursos materiales.

Palabras Clave: Corrosión atmosférica, mediciones electroquímicas, Sulfuro de Hidrogeno, Vapor Geotérmico.

Abstract -- A visit was made to the Geothermal Power Plant "Los Humeros" in the state of Puebla. As a result of the visit, samples of black dust were obtained from various sites, particularly from copper cables used as grounding (known as physical grounds), samples were evaluated with specialized techniques such as X-ray diffraction (DRX), copper C11000 corrosimetric coupons were placed in order to determine the corrosion kinetics for a period of 35 days, and during the visit, liquid sampling of the condensed vapor was carried out. The liquid sample was analyzed in the laboratory for its physicochemical characterization. Meanwhile, in the laboratory, a test was carried out under controlled conditions simulating the working conditions of the turbine. The test lasted 30 days, to analyze the effect on the corrosion of Copper by gravimetric testing and electrochemical measurements (potentiodynamic polarization curves, open circuit potential, resistance to linear polarization). The gravimetric and electrochemical results indicated the aggressiveness of the corrosive environment under the exposed conditions. The aggressiveness of the atmosphere favors the degradation not only of copper, but also of other materials such as carbon steel and galvanized steel, creating premature wear and, therefore, loss of material resources.

Key words – Atmospheric corrosion, electrochemical measurements, Hydrogen Sulfide, Geothermal Steam.

INTRODUCCIÓN

La generación de energía geotérmica se basa en el fluido geotérmico que se extrae de un pozo de producción el cual pasa por diversos procesos o equipos durante su recorrido hacia la central eléctrica. A diferencia del vapor limpio de una central térmica convencional, el vapor geotérmico contiene gases no condensables (NCG), la proporción varia ampliamente generalmente en rangos de 0.1 a 10% del volumen total de la fase vapor.

Los gases no condensables son todos los demás gases diferentes al H_2O que están presentes en el vapor geotérmico, la composición y concentración varia en dependencia de su origen, sin embargo, los siguientes gases dióxido de carbono (CO_2), sulfuro de hidrogeno (H_2S), amoniaco (NH_3), nitrógeno (N_2), hidrogeno (H_2) y metano (CH_4), con vapor de agua, están constantemente presentes

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

en las descargas geotérmicas. En estos sistemas el CO_2 equivale al 90% del contenido total del NCG, siguiendo H_2S y SO_2 y los restantes en concentraciones menores [1].

El campo geotérmico "Los Humeros" se encuentra localizado en el municipio de Chignautla, Puebla. Actualmente se tiene una capacidad instalada de 35 MW [2].

La siguiente tabla presenta las mediciones de gases mediante análisis químicos promedio efectuado en los pozos del campo geotérmico "Los Humeros" [2]:

Tabla 1. Composición química del condensado de vapor geotérmico

pH	5.60
T°C	30.5
Conductividad (20°C) µS	341.0
Na	1.23
NH_4	14.03
K	0.62
Mg	0.02
Ca	0.32
Cl	0.98
NO_3	0.12
SO_4	10.32
HCO_3	158.59
Br	158.60

La siguiente tabla presenta la composición química aproximada de los gases no condensables NCG en el vapor (promedios en por ciento de masa) [2]:

Tabla 2. Composición química de los gases no condensables NCG

Ar	0.04
CH_4	0.48
CO_2	91.2
H_2	0.11
H_2S	6.8
N_2	1.0
NH_3	0.23
Gas Total (% en peso del vapor geotérmico)	0.03

Los fluidos geotérmicos se encuentran en altas temperaturas y son muy corrosivas. Por tal motivo, la corrosión de los materiales dentro de la industria geotérmica es una preocupación importante. La formación de productos de corrosión y su prevención son un gran desafío técnico a lo que se enfrenta la industria.[3], [4]. Las condiciones de operación en la generación de energía geotérmica promueven una corrosión más rápida de los materiales base, utilizados en tuberías, tanques y equipos que están en contacto con el fluido geotérmico. La resistencia a la corrosión de los materiales en estas condiciones depende de la formación de productos de corrosión estables, que no sean solubles, esto da como resultado la formación de óxidos no protectores y de rápido crecimiento y el incremento de la degradación del material debido a mayores tasas de corrosión.

Este estudio se centra en el sitio campo geotérmico "Los Humeros", se investigó la corrosión del Cobre C11000 (que se usa comúnmente en los sistemas geotérmicos existentes) en un entorno geotérmico para evaluar su comportamiento. Se realizaron ensayos de pérdida de peso con muestras en entorno in situ y de laboratorio simulados. Se colocaron cupones corrosimétricos de cobre C11000 con la finalidad de determinar la cinética de corrosión por un periodo de 35 días en la turbina. Mientras tanto en el laboratorio se realizó una prueba en condiciones controladas simulando las condiciones de trabajo de la turbina, la prueba tuvo una duración de 30 días.

DESARROLLO

Metodología

Análisis fisicoquímico del agua

Se obtuvo una muestra de vapor que alimenta a una turbina, y se realizó un proceso de análisis cromatográfico.

Difracción de rayos X para productos de corrosión de Cobre por Sulfuro de Hidrógeno

Se realiza un muestreo aleatorio directamente en campo en zonas de interés por parte del cliente, un segmento de cobre que funge como tierra física fue tratado mecánicamente para retirar los compuestos a evaluar. Para la obtención de patrones de difracción se utilizó un difractómetro Bruker D8 ADVANCE procesados en Software de simulación Avogadro, Gaussian, Material Studio y Match para el refinamiento.

Evaluación del cobre C11000 por técnica gravimétrica *in situ*

Preparación de las muestras

Se cortaron cupones de cobre en forma de láminas (tamaño aproximado 15 cm2) deben prepararse a partir de láminas de 0.635 cm de espesor libre de oxígeno, alta conductividad, con una pureza de 99.99 %. La superficie de los cupones se preparó con desbastado con papel metalográfico de grado 200X a 600X, con una limpieza posterior con alcohol isopropílico en baño ultrasónico, de acuerdo con la norma ISA 71.04 [5].

Exposición de las muestras

Se colocaron tres cupones de cobre en forma vertical en el cuarto eléctrico y casa de máquinas de las unidades 9 y 10 de la CG Humeros, como se muestra en la Figura 1. Teniendo un especial cuidado para evitar la contaminación de la superficie, como huellas dactilares. La instalación se realizó en un área que presenta caudales de aire característicos del sitio [5].

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

4141 4142 4144

Figura 1. Imágenes de los cupones expuestos en 4141 entrada de turbina, 4142 salida de turbina 4144 cuarto de control

Limpieza de muestra posterior a la exposición

El procedimiento de limpieza se repitió varias veces en las muestras ver Figuras 2-4. La pérdida de masa se determinó después de cada limpieza pesando la muestra. La pérdida de masa se graficó como una función de seis ciclos de limpieza iguales, la limpieza química para eliminar los productos de corrosión de acuerdo a la norma ASTM G1-03 procedimiento C.2.3, consistió en una solución de 100 ml de ácido sulfúrico (H2SO4) en 1L de agua de 1 a 3 minutos con un cepillado ligero [6].

Figura 2. Cupones corrosimétricos de cobre después de limpieza química.

Figura 3. Cupones corrosimétricos de cobre después de limpieza química.

Figura 4. Cupones corrosimétricos de cobre después de limpieza química.

Evaluación de la tasa de corrosión

Se determina en la superficie total inicial de la muestra y la pérdida de masa durante la prueba. La velocidad de corrosión se obtiene con la ecuación 1 [5]:

$$V_{corr} = \frac{(K)(w)}{(a)(t)(\rho)} \qquad \text{Ec. (1)}$$

Donde:
K = constante
t = tiempo de exposición (h)
a = área (cm^2)
w = pérdida de peso (g)
ρ = densidad en (g/cm^3)

Evaluación del cobre C11000 por técnica gravimétrica en laboratorio
Preparación de las muestras

Se cortaron cupones de cobre en forma de láminas (tamaño aproximado 15 cm^2) deben prepararse a partir de láminas de 0.635 mm de espesos libre de oxígeno, alta conductividad, con una pureza de 99.99 %. La superficie de los cupones se preparó con desbastado con papel metalográfico de grado 200X a 600X, con una limpieza posterior con alcohol isopropílico en baño ultrasónico, de acuerdo a la norma ISA 71.04 [5].

Exposición de las muestras

En un inicio y como parte de las pruebas mediante evaluaciones gravimétricas en una cámara hermética con control de temperatura, agregando el agua de sitio como electrolito, y en un vidrio de reloj se colocó ácido acético y sulfuro de sodio para generación de H2S.

Se expusieron a la evaluación dos cupones de cobre C11000 un cupón utilizado como blanco (4140) y el segundo aplicando un inhibidor de corrosión atmosférico Nanopátina NP1® (4150). La temperatura de trabajo fue de 90°C por un tiempo de exposición de 30 días [5].

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

Limpieza de muestra posterior a la exposición.
El procedimiento de limpieza se repitió varias veces en las muestras. La pérdida de masa se determinó después de cada limpieza pesando la muestra. La pérdida de masa se graficó como una función de seis ciclos de limpieza iguales, la limpieza química para eliminar los productos de corrosión de acuerdo con la norma ASTM G1-03 procedimiento C.2.3, consistió en una solución de 100 ml de ácido sulfúrico (H2SO4) en 1L de agua de 1 a 3 minutos con un cepillado ligero [6].

Evaluación de la tasa de corrosión
Se determina en la superficie total inicial de la muestra y la pérdida de masa durante la prueba. La velocidad de corrosión se obtiene con la ecuación 1 [5]:

Pruebas electroquímicas del Cobre C11000

Polarización potenciodinámica
El arreglo experimental se realizó con testigos corrosimétricos de cobre (C11000), el medio utilizado fue un electrolito con presencia de gas sulfuro (H2S), la curva de polarización se realizó con un barrido de 0.10 mV/s con una polarización en sentido catódico de 0.20 mV/s y la polarización en sentido anódico que es la parte de interés para el análisis se polarizó a 1 V en condiciones de temperatura de 60 y 90°C. De manera adicional se realizó una tercera prueba con polarización a 1.5 V.

De las curvas obtenidas se determinaron los parámetros electroquímicos (Ecorr, Icorr, pendientes anódica y catódica) extrapolando las pendientes de Tafel en el rango de ± 250 mV alrededor del valor de Ecorr.

Potencial a Circuito abierto OCP

Las mediciones de potencial a circuito abierto fueron realizadas midiendo el potencial del electrodo de trabajo respecto al electrodo de pseudo- referencia en intervalos de 5 horas durante todo el ensayo.

Resistencia a la polarización lineal LPR

Las mediciones de resistencia a la polarización lineal fueron realizadas aplicando un sobrepotencial de ± 10 mV con respecto al valor del potencial de circuito abierto a una velocidad de barrido de 0.1667 mV/s en intervalos de 5 horas durante todo el ensayo.

DISCUSIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Resultados análisis fisicoquímico del agua

Al llevarse a cabo el muestreo de vapor, se obtiene una muestra representativa de agua, producto de condensación, se trabaja en laboratorio a fin de conocer los parámetros comunes como densidad, pH, entre otros. En la tabla 3, se muestran los resultados del análisis.

Tabla 3. Caracterización de vapor condensado.

PARÁMETRO	VALOR	UNIDADES
Alcalinidad total	70	ppm
Sulfatos	298	ppm
Cloruros	<20	ppm
pH	7.75	Adimensional
Conductividad	865	µS
Solidos disueltos totales	435	ppm

Por el valor de sólidos disueltos totales, se considera como agua dura, ligeramente alcalina por el pH aunado al valor de alcalinidad total, por su conductividad se considera un buen fluido conductor, lo que puede promover el fenómeno de corrosión.

La cantidad de alcalinidad total es expresada en ($CaCO_3$) presentó lo que se puede considerar un valor bajo, si bien no representa una problemática, contribuye a la cantidad de sólidos totales disueltos, que represente sales inorgánicas que pueden ser calcio, magnesio, bicarbonatos, sulfatos, cloruros. Añadiendo una característica importante de ser un electrolito con buena conductividad.

La cantidad de sulfatos es de 298 (mg/L o partes por millón, ppm) este valor nos indica que la atmosfera es de carácter industrial azufrada con la facilidad de formar compuestos sulfurosos, es importante mencionar que se deberá calcular la velocidad de deposición de sulfatos (SO_4) con la finalidad de tener un valor exacto de la capa que se está formando sobre el cobre, ocasionando una barrera que se comienza a depositar sobre el rotor de la turbina, provocando fallas en la misma.

Resultados análisis por difracción de rayos x filamentos tierra tanque aire seco

Una muestra representativa fue retirada de la parte inferior del cable de tierra ubicado en el tanque referido, como se aprecia en la Figura 5, se observa una coloración azul del cable, existen muchos productos de corrosión que no pueden ser separados con precisión, la muestra comprende sólidos extremadamente finos, un tamaño de partícula muy pequeño, razón por la cual no es posible tamizar la alícuota.

Figura 5. Cable de puesta a tierra, tanque aire seco 21- UF1-0151-02

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

En una imagen estereoscópica se observan los filamentos retirados del cable, el diámetro de cada hilo ha disminuido de forma considerable, se puede medir un grosor menor a 1mm. En la figura 6 se muestra esta degradación, a su vez, se aprecia la gruesa capa de productos de corrosión.

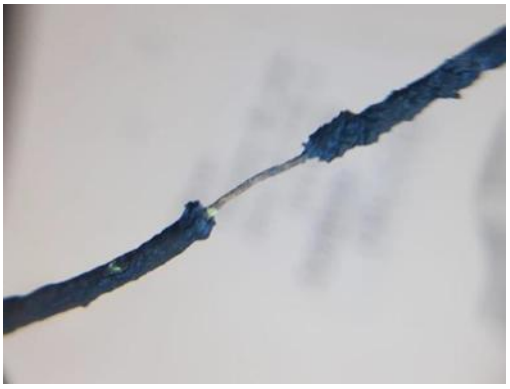


Figura 6. Hilo del cable de tierra, se observa deterioro el alma de cobre

Los productos de corrosión que comprenden esa capa están conformados por una mezcla de CuS, Cu2S, CuO y Cu2O (Figura 7), aunque esta técnica no permite obtener de forma directa un análisis cuantitativo, se puede utilizar el área de integración de señales para obtener un patrón composicional de 50,27,10,7%, el resto refiere a cobre residual y otros productos.

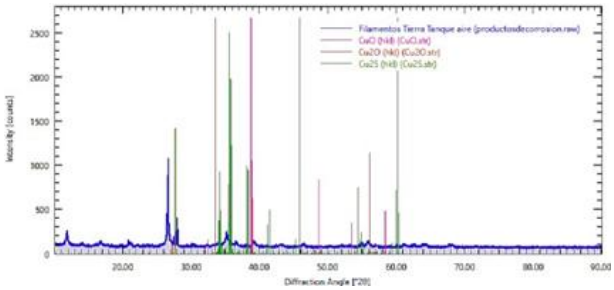


Figura 7. Difractograma con fases de óxidos de cobre y sulfuros de cobre presentes en la muestra problema.

La presencia de sulfuros en la muestra abre la hipótesis de degradación de material pétreo a través de dos procesos o mecanismos de reacción, el primero a pesar de que el H_2S disuelto en agua, aunque sea en forma de brisa, aerosol, aspersión o gotículas, presenta una constante de acidez de 6.80-6.90 pKa, lo que le confiere un pH aproximado comprendido entre 5-6, condiciones apropiadas para tener reactividad química con los compuestos alcalinos que comprenden dichos materiales de construcción.

Con esto se genera un par de reacción ácido-base con una cinética de reacción de orden 1 con una taza relativamente lenta, esto se asemeja a un proceso de degradación de concreto por acidificación, sin embargo, cuando se trata sólo de este gas disuelto en agua, el factor de reacción tiene a cero, es decir, ocurre de manera lenta, sin embargo y como se mencionó al inicio de este numeral, el proceso degradativo se lleva a cabo por una dualidad donde el otro factor importante es el de óxido-reducción, donde se realiza una transferencia de carga, transferencia de electrones donde una especie se oxida (pierde electrones) mientras que la otra se reduce (ganancia de electrones).

Resultados del Cobre C11000 por técnica gravimétrica in situ.

En la tabla 4 se muestran las pérdidas de masa de los cupones de cobre C11000, 4141 ubicado en la entrada de la turbina, 4142 ubicado en la salida de la turbina y 4144 ubicado en el cuatro eléctrico, se realizaron seis ciclos de lavado, aproximadamente en el cuarto ciclo de lavado los cupones se mantuvieron estables al ser pesados en balanza analítica. Todos los ciclos como equipo de apoyo para la remoción de la capa de sulfuros se utilizó una tina de baño ultrasónico.

Tabla 4. Resultados de pérdida de peso de los cupones de cobre C11000 por técnica gravimétrica in situ durante 30 días de exposición.

Cupón	Ubicación	Pérdida de peso (g/cm^2)	Vcorr (µm/año)	Vcorr (mm/año)
4141	Entrada de turbina	0.0003	6.1785	0.0062
4142	*Salida de turbina*	0.0004	7.9128	0.0079
4144	*Cuarto Eléctrico*	0.0001	1.9511	0.0020

La tasa de corrosión para las muestras del cobre C11000 ubicado en la entrada de la turbina, en la salida de turbina y el cuarto eléctrico resultó ser 0.0062, 0.0079 y 0.002 (mm/año) respectivamente después de 30 días, tiempo de exposición. La mayor velocidad de corrosión (Vcorr) fue obtenida en los cupones 4141 y 4142.

El cupón con número 4142 con un valor de 0.0079 mm/año (7.91 µm/año), cupón que se colocó en la salida de la turbina, se debe considerar que este cupón contaba con la presencia de un líquido aceitoso sobre la superficie, posiblemente siendo el causante que la deposición fuera mayor sobre la superficie del cobre. La segunda mayor velocidad se obtuvo en el cupón 4141, mostrando un valor de 0.00617 mm/año (6.17 µm/año). Ambos cupones estaban ubicados en la misma región con la diferencia que estaban en la entrada y salida de la turbina.

La menor velocidad de corrosión se obtuvo en el cupón 4144, colocado dentro del cuarto de control, con un valor de Vcorr de 0.0020 mm/año (1.95 µm/año), si bien el valor es menor a los demás no se debe descartar que dentro del cuarto de control existe una difusión de vapores del exterior al interior. Según la clasificación realizada por Cabeza et al., Javier et al [7], [8] mostrado en la tabla 4. Se recomienda para uso a largo plazo.

Sin embargo, el valor es muy cercano a 0.01 mm por año para las ubicaciones de la entrada y salida de la turbina. Por lo

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

tanto, este material se recomienda tomar precauciones, según su aplicación especifica en planta. Pruebas más prolongadas en condiciones dinámicas podrían brindar más información sobre la estabilidad de la capa de corrosión y la evolución de la corrosión durante períodos de exposición más prolongados (>1 año).

Tabla 5. Tasas de corrosión y su operabilidad en las industrias.[7], [8]

Vcorr (mg/cm^2 año)	Vcorr (mm/año)	Recomendaciones
> 1000	2	Completamente destruido en cuestión de días.
100 – 999	0.2 – 1.99	No recomendado para servicio de más de un mes.
50 – 99	0.1 – 0.19	No recomendado para servicio de más de un año.
10 – 49	0.02 – 0.09	Se recomienda precaución, según la aplicación especifica.
0.3 – 9.9	-	Recomendado para servicio a largo plazo.
< 0.2	-	Recomendado para servicio a largo plazo, no se evidencia corrosión, excepto como resultado de la limpieza de la superficie.

Los valores con mayor velocidad de corrosión (Vcorr) fue obtenida en las muestras 4141 y 4142. La muestra 4142 con un valor de 0.0079 mm/año (7.91 µm/año), muestra que se colocó en la salida de la turbina, se debe considerar que esta muestra contaba con la presencia de un líquido aceitoso sobre la superficie, posiblemente siendo el causante que la deposición fuera mayor sobre la superficie del cobre. La segunda mayor velocidad se obtuvo en la muestra 4141, mostrando un valor de 0.00617 mm/año (6.17 µm/año). Ambas muestras estaban ubicadas en la misma región con la diferencia que estaban en la entrada y salida de la turbina. De acuerdo con la clasificación de la ISO 9224 (tabla 6 y 7) se encuentran en rangos C5 y CX, es decir, clasificados como ataque muy altos y extremos.

La menor velocidad de corrosión se obtuvo en la muestra 4144, colocada dentro del cuarto de control, con un valor de Vcorr de 0.00195 mm/año (1.9 µm/año), si bien el valor es menor a los demás no se debe descartar que dentro del cuarto de control existe una difusión de vapores del exterior al interior. La clasificación para el cuarto de control se encuentra en C3 y C4, es decir, clasificados la severidad de ataque media y alta.

Tabla 6. Clasificación ISO 9224 de ambientes reactivos [9]

Nivel de gravedad	G1	G2	G3	GX
Nivel de reactividad del Cobre	Leve	Moderado	Duro	Severo
Nivel de reactividad del Cobre (Å)	< 300	< 1000	< 2000	≥ 2000

Los niveles de concentración de gas que se muestran a continuación se proporcionan a modo de referencia. Se cree que son aproximados a los niveles de reactividad del cobre indicados anteriormente, siempre que la humedad relativa sea inferior al 50 %. Para una concentración de gas determinada, se puede esperar que el nivel de gravedad (y el nivel de reactividad del cobre) aumenten en un nivel por cada aumento del 10 % en la humedad relativa por encima del 50 % o para una tasa de cambio de la humedad relativa superior al 6 % por hora.

Contaminante		Gas	Concentración
Especies Reactivas	Grupo A	H_2S	< 3 < 10 < 50 ≥ 50
		SO_2	< 10 < 100 < 300 ≥ 300
		SO_3	
		CL_2	< 1 < 2 < 10 ≥ 10
		NO_X	< 50 < 125 < 1250 ≥ 1250

Tabla 7. Categorías de corrosividad atmosférica [10]

Categoría Corrosividad	Pérdida de masa por unidad de superficie/pérdida de espesor (después del primer año de exposición)	
	Pérdida de masa (g/cm^2)	Perdida de espesor (µm)
C1 (muy bajo)	≤ 0.7	≤ 0.1
C2 (bajo)	≤ 0.7-5	≤ 0.1-0.7
C3 (medio)	> 5-15	> 0.7-2.1
C4 (alto)	> 15-30	> 2.1-4.2
C5-I (muy alto) Industrial	> 30-60	> 4.2-8.4
C5-M (muy alto) Marino	> 30-60	> 4.2-8.4

Resultados del cobre C11000 por técnica gravimétrica en laboratorio

En la tabla 8 se muestra la pérdida de masa de la muestra de cobre C11000, expuestos en atmosfera controlada simulando las condiciones reales, se realizaron ciclos de lavado hasta obtener peso constante, aproximadamente en

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

el cuarto ciclo de lavado los cupones se mantuvieron estables al ser pesados en balanza analítica. Todos los ciclos como equipo de apoyo para la remoción de la capa de sulfuros se utilizó una tina de baño ultrasónico.

Tabla 8. Resultados de evaluación en laboratorio de cupones de cobre C11000 por técnica gravimétrica.

Cupón	Pérdida de peso (g/cm^2)	Vcorr (µm/año)	Vcorr (mm/año)
4140	0.0032	50.0020	0.0500
4150	0.0019	29.6729	0.0297

La tasa de corrosión para la muestra del cobre C11000 cupón 4140 en laboratorio resultó ser 0.05 mm/año (50.0020 µm/año) después de 30 días, tiempo de exposición. Según la clasificación realizada por Cabeza et al., Javier et al. [7], [8] mostrado en la tabla 5. Se recomienda precaución según la aplicación específica. Para el cobre C11000 cupón 4150 en laboratorio presento una velocidad de corrosión de 0.0297 mm/año (29.6729 µm/año).

El inhibidor de corrosión extiende la vida útil del cobre al menos un 43.47% en condiciones agresivas en presencia de H_2S y en altas temperaturas. De igual manera, es importante mencionar que el inhibidor atmosférico se colocó una sola vez y después fue sometido a las condiciones declaradas durante 30 días, los resultados pueden ser mejorados si la aplicación del inhibidor atmosférico se aplica al menos 2 veces cada 30 días o dependiendo de la operación de las turbinas.

Resultados pruebas electroquímicas del Cobre C11000

Curvas de polarización potenciodinámica del Cobre C11000 a 60 ℃

En la figura 8 se muestra la curva de polarización potenciodinámica del Cobre C11000 inmerso en el medio utilizado fue un electrolito con presencia de gas sulfuro (H_2S) a 60 ℃ 1V, 90 ℃ y 60 ℃ 1.5 V.

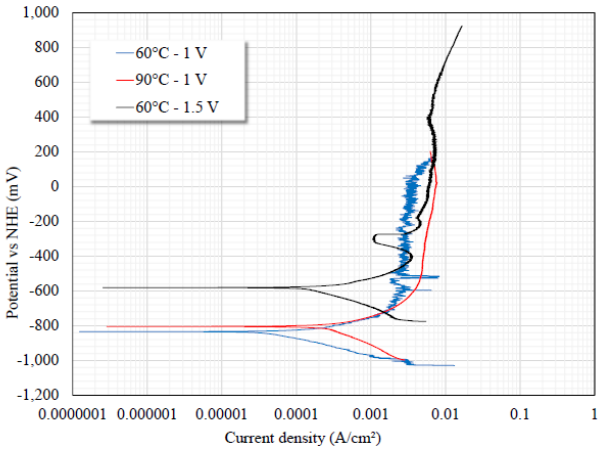


Figura 8. Curva de polarización para cobre C11000 en presencia de gas H_2S a 60°C y 1 V, 90 ℃ 1V y 60 ℃ 1.5 V.

El método de polarización potenciodinámica ha sido ampliamente utilizado como una poderosa técnica para pruebas generales de corrosión y medición de la tasa de corrosión de diferentes aleaciones en estudios de corrosión atmosférica. La Figura 8 mostró las curvas de polarización potenciodinámica a 60 °C, 90 ℃ y 60 ℃ 1.5 V. Además, la densidad de corriente de corrosión (icorr), el potencial de corrosión y la pendiente de Tafel catódica, que se extrajeron de los datos de polarización potenciodinámica a través de la técnica de extrapolación de Tafel, así como los valores calculados de la tasa de corrosión (µm/año), se pueden ver en la Tabla 9.[11] Se determinó que el potencial de corrosión del cobre C11000 en un electrolito con presencia de gas sulfuro (H_2S) a 60°C 1V, 90 °C 1V y 60 °C 1.5 V, es -834, -805 y -581 mV vs NHE, respectivamente, el Ecorr más activa pertenece a 60 °C 1V.

Tabla 9. Valores de velocidad de corrosión (µm/año) y (mm/año) del cobre C11000 a partir de las pendientes Tafel de las curvas de polarización potenciodinámica.

T (℃)	60℃ 1V	90℃ 1V	60℃ 1.5V
Ecorr (mV)	-834	-805	*-581*
Icorr (µA)	*58.27*	*280.04*	*127.20*
Ba (mV/decade)	63.60	*182.10*	*65.53*
Bc (mV/decade)	*136.20*	*419.20*	*104.58*
CR (µm/year)	*26.40*	*126.88*	57.63
CR (mm/year)	*0.68*	*3.27*	*1.49*

Está claro que, al aumentar la temperatura, aumenta la velocidad de corrosión de la aleación y las curvas de polarización potenciodinámica se desplazan hacia densidades de corriente mayores. La actividad de corrosión aumenta con el aumento de la temperatura debido a un aumento en la conductividad eléctrica de la mezcla del electrolito con H_2S, así como a una reducción en la viscosidad del electrolítico, favoreciendo así la difusión de las especies químicas activas. Las pendientes de Tafel inferiores a ≈100 mV respecto a Ecorr son típicas de los sistemas controlados por activación, mientras que las pendientes de Tafel con valores más altos son típicas de los sistemas que no son puramente controlados por activación y difusión, comportamiento pseudo-pasivo [5].

La curva de polarización del cobre a 60 ℃ a 1V en el sentido anódico donde se puede apreciar que la Beta anódica (βa), presenta tendencia a pasivarse, lo que indica la formación de una película pseudo- pasiva, esto se atribuye a la formación de óxidos y/o sulfuros protectores que se adhieren sobre la superficie metálica. Si bien es

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

cierto que la curva anódica presenta un comportamiento característico de una capa pasiva, se puede apreciar que no existe una disminución de la densidad de corriente por lo que se puede atribuir que la capa de sulfuros formada sobre la superficie se debe a una velocidad de corrosión acelerada que a su vez la deposición de sulfuros provoca que en la curva de polarización presente un comportamiento de una pasividad.

En un rango de -617 mV hasta -525 mV se puede apreciar un rompimiento o desprendimiento de la capa de óxidos y/o sulfuros de la superficie metálica sin embargo no existió una disminución de la densidad de corriente, indicativo que la velocidad de corrosión se mantiene en un régimen acelerado y que la capa de sulfuros que se deposita no mitiga el fenómeno de corrosión.

Este comportamiento se puede atribuir al sulfuro de cobre que crece sobre el cobre es mucho más poroso que el Cu2O, esto genera altas tensiones en el límite metal/sulfuro, lo que produce grietas y fracturas en la capa de sulfuro. A través de la aparición de capas porosas, el azufre libre también puede migrar al sulfuro y entrar en contacto directo con el metal [12], [13].

Los productos de corrosión formados en la superficie del Cobre presentan un comportamiento progresivo ellos cuales están compuestos predominantemente de sulfuro de cobre (CuS, Cu_2S) y una pequeña cantidad de sulfato de cobre ($CuSO_4$) y óxido de cobre (Cu_2O) [14].

La curva que corresponde a la muestra del cobre C11000 evaluada a 90 ℃, la curva anódica presenta una tendencia a pasivarse, sin presencia de una ruptura de los productos formados sobre la superficie atribuida a sulfuros de cobre.

Se puede inferir que el comportamiento al aumentar la temperatura crea una capa semiestable depositada sobre la superficie metálica. Sin embargo, no existe una disminución de densidad de corriente durante la formación de esta capa pseudo-pasiva.

La muestra de cobre C11000 evaluada a 60 ℃ a 1.5 V, ya que no se pudo apreciar en la amplitud de polarización a 1 V no nos permitió observar ningún comportamiento de ruptura o desprendimiento en la curva anódica de los productos depositados de sulfuros en la superficie, se tomó la decisión de evaluar ampliando la polarización. Para esta curva de polarización en un potencial de -603 mV se aprecia una tendencia a pasivarse sin embargo fue en un periodo muy corto a los -522 mV se desplazó a densidades de corriente mayores y retomo una tendencia pseudo pasiva atribuido a la deposición de sulfuros.

Los valores de velocidad de corrosión (µm/año) y (mm/año) reportados fueron determinados a partir de los valores de Icorr de acuerdo con la norma ASTM G102 (Standard Practice for calculation of Corrosion Rates and Related Information from Electrochemical Information) [15].

$$CR\left(\frac{\mu m}{year}\right) = K\, I_{corr}\, \frac{EW}{\rho} \qquad \text{Ec. (2)}$$

$$CR\left(\frac{mm}{year}\right) = K\, I_{corr}\, \frac{EW}{\rho} \qquad \text{Ec. (3)}$$

Donde K = 0.1288 (µm·g/µA·cm·year) y K = 0.00327 (mm·g/µA·cm·year), I_{corr} = densidad de corriente de corrosión (µA/cm^2), EW = peso equivalente del material (adimensional) y ρ = densidad del material (g/cm^3). El peso equivalente fue determinado de acuerdo con:

$$EW = \sum \frac{W_i}{n_i f_i} \qquad \text{Ec. (4)}$$

Donde fi = fracción en masa del componente i de la aleación, Wi = peso atómico, y ni = valencia.

Donde de acuerdo con la composición del cobre C11000 la fracción en masa del Cu es 99.9 %, la densidad del material de 8.89 g/cm^3. Con base a estos valores el peso equivalente calculado es de 31.75.

De acuerdo con los valores de reportados, se observa que a 60 °C la velocidad de corrosión no muestra cambios significativos, pero a 90 °C y 60 °C 1.5 V, ésta incrementó en un orden de magnitud.

Potencial Circuito Abierto (OCP) del Cobre C11000 a 60 ℃

En la figura 9 se muestra el gráfico correspondiente a la variación del potencial a circuito abierto del cobre C11000 inmerso en el medio utilizado, un electrolito con presencia de gas sulfuro (H2S) a 60 ℃, durante 100 horas [10].

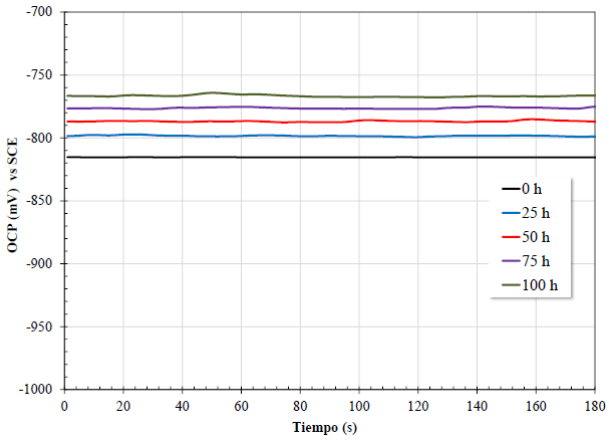


Figura 9. Variación del potencial de circuito abierto (OCP) para el cobre C11000 en presencia de gas H_2S a 60°C.

En corrosión, el concepto de potencial se utiliza como un primer indicativo de si un material es propenso a corroerse en un ambiente especifico. Si un material presenta valores o se desplaza hacia valores positivos (Noble) es menos propenso a corroerse y si presenta valores más negativos (Activo) el material tiende a presentar un mayor grado de corrosión.

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

El cobre C11000 muestra valores de potenciales que oscilan alrededor de los -760 mV y 820 mV, con un ligero desplazamiento hacia valores más positivos con un mayor tiempo de exposición, sin variaciones significativas, esto sugiere la formación de productos de corrosión sobre la superficie.

Resistencia a la Polarización Lineal (LPR) del Cobre C11000 a 60 ℃

En la figura 10 se muestra el gráfico correspondiente a la variación de valores en la resistencia a la polarización lineal Rp contra el tiempo del cobre C11000 inmerso en el medio utilizado, un electrolito con presencia de gas sulfuro (H_2S) a 60 ℃, durante 100 horas.

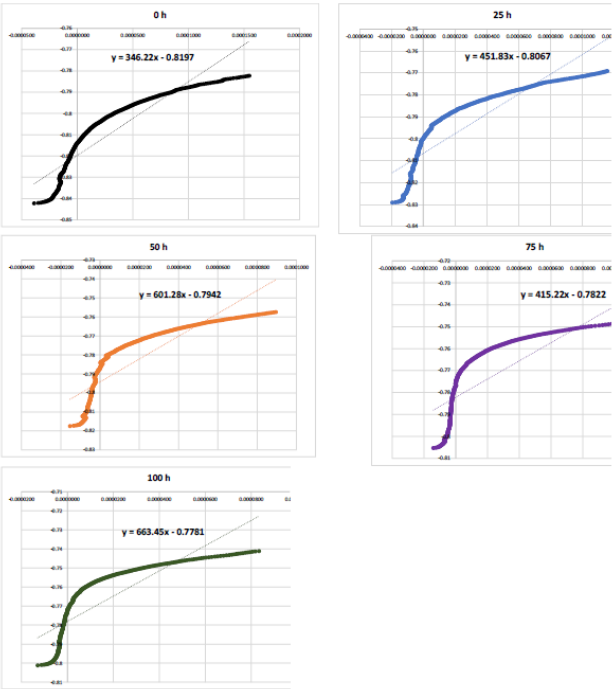


Figura 10. Resistencia a la polarización lineal (LPR) para el cobre C11000 en presencia de gas H_2S a 60 ℃.

El cobre C11000 muestra un incremento en su resistencia con respecto al tiempo los resultados se pueden apreciar en la Tabla 10, sin embargo, se observa una caída en la resistencia a las 75 horas, esto indica que sobre su superficie se formaron óxidos porosos no adherentes, esto se atribuye a la presencia de fluctuaciones conforme el tiempo de exposición se incrementa, lo cual indica que estos óxidos no se encuentran fuertemente adheridos al material.

Tabla 10. Valores de Resistencia a la Polarización (ohm) del cobre C11000

0 h	25 h	50 h	75 h	100 h
Rp	Rp	Rp	Rp	Rp
(ohm)	(ohm)	(ohm)	(ohm)	(ohm)
346.22	451.83	601.28	415.216	663.45

.

CONCLUSIONES

De acuerdo con las observaciones en campo y análisis de laboratorio, la presencia de azufre en forma de sulfuro de hidrógeno está presente, los análisis por difracción de rayos X a los polvos obtenidos de las líneas de aterrizaje muestran fases que contienen el par cobre-azufre como sulfato de cobre, sulfuro de cobre, entre otros, por lo tanto; la agresividad de la atmosfera propicia la degradación no solo del cobre, sino de otros materiales como acero al carbono, acero galvanizado creando desgaste prematuro y con ello; pérdida de recursos materiales.

Se puede atribuir que una de las causas principales del daño sobre estos materiales es la atmósfera que rodea el lugar, atmósfera rica en componentes de azufre, lo cual se puede afirmar ya que en los análisis se encontraron diferentes componentes de azufre.

Otra problemática que es necesario atender es la mezcla de materiales metálicos que por su naturaleza se tienden a formar pares galvánicos, por ejemplo, las líneas de cableado y las piezas que las sostienen, así como la tornillería. Se entiende que reemplazar esas piezas podría representar una inversión no considerada en estos momentos, por lo que se podría recomendar proteger las estructuras, que se detecten con esta problemática, con el inhibidor de corrosión atmosférica NANOPÁTINA NP1®.

BIBLIOGRAFÍA

[1] H. Moon and S. J. Zarrouk, “EFFICIENCY OF GEOTHERMAL POWER PLANTS: A WORLDWIDE REVIEW,” 2012.

[2] O. Arriaga, Z. Aguilar, L. Barrón, and R. Avila, *SIMULADOR TERMODINÁMICO DE UNA PLANTA DE VAPOR GEOTÉRMICO “LOS HUMEROS.”* 2009.

[3] A.J. ELLIS, “Chemical Geothermometry in Geothermal Systems,” *Elsevier Scientific Publishing Company Amterdam*, vol. 25, no. Chemical Geology, pp. 219–226, Aug. 1978.

[4] M. B. C. S. S. S. W. Dighy D., “The Use of Potential-pH Diagrams for the Interpretation of Corrosion Phenomena in High Salinity Geothermal Brines,” *National Association of Corrosion Engineers*, vol. 35, no. Corrosion Geothermal Brines, Jan. 1979.

[5] ISA–71.04–1985, *Environmental conditions for process measurement and control systems : airborne contaminants*. Instrument Society of America, 1986.

[6] ASTM International, “ASTM G1-03 standard practice for preparing cleaning and evaluating corrosion test specimens,” *ASTM International*, vol. 01.03, Oct. 2003.

[7] J. R. M. N. H. M. H. L.F. Cabeza, “Immersion corrosion tests on metal salt,” *Wiley VCH Vergal Gmb H&Co. KGaA, Weinhein*, vol. 53, no.

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

Materials and Corrosion, pp. 902–907, 2002.

[8] J. Nieto-Maestre, B. Muñoz-Sánchez, A. G. Fernández, A. Faik, Y. Grosu, and A. García-Romero, "Compatibility of container materials for Concentrated Solar Power with a solar salt and alumina based nanofluid: A study under dynamic conditions," Renew Energy, vol. 146, pp. 384–396, Feb. 2020, doi:10.1016/j.renene.2019.06.145.

[9] International Standard ISO 9224, "Corrosion of metals and alloys- Corrosivity of atmospheres-Guiding values for the corrosivity categories," Feb. 2012.

[10] ISO 12944-2, "ISO 12944-2 Paints and varnishes-Corrosion protection of steel structures by protective paint systems Part 2: Classification of environments," May 1998. [Online]. Available: https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/8f2e3189-861c-45da-b480-75711006d3d7/sist-en-iso-12944-5-2020

[11] A. J. . Bard and L. R. . Faulkner, Electrochemical methods: fundamentals and applications. John Wiley & Sons, Inc., 2001.

[12] H. Gobrecht et al., "The activities of evaporated metal films in gas chemisorption," 1938. [Online]. Available: https://royalsocietypublishing.org/

[13] s.p. Sharma, "Reaction of Copper and Copper Oxide with H2S," Jan. 1980.

[14] E. Salahinejad, R. Eslami-Farsani, and L. Tayebi, "Corrosion failure analysis of printed circuit boards exposed to H2S- containing humid environments," Eng Fail Anal, vol. 79, pp. 538–546, Sep. 2017, doi:10.1016/j.engfailanal.2017.05.038.

[15] ASTM G102-89, "Standard Practice for Calculation of Corrosion Rates and Related Information from Electrochemical Measurements 1," 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959, United States., 1999. [Online]. Available: www.astm.org

AUTORIZACIÓN Y RENUNCIA.

Los autores del presente artículo autorizan al TecNM/Instituto Tecnológico de Zacatepec para publicar el escrito en el libro electrónico del CITID 2025. El TecNM/ITZ o los editores no son responsables ni por el contenido ni por las implicaciones de lo que está expresado en el escrito.

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

COMPORTAMIENTO ELECTROQUÍMICO DE ALEACIONES ENCONTRADAS EN LOS DEVANADOS DE UN MOTOR ELÉCTRICO DE LA CENTRAL GEOTERMOELÉCTRICA "LOS HUMEROS"

Adrián Cristóbal Neri[1], Nestor Belisario Gómez Guzmán[2], Daniel López Domínguez[3], Rosa Edith Parcero Gómez[4], Jesús Alberto López Nájera[5]

[1]Maestría en Ciencias Aplicadas. Centro de Investigaciones Químicas-UAEM. adrian.neri@live.com, +52 55 4143 6784, Av. Universidad 2001, Universidad Autónoma del Estado de Morelos, CP 62210 Cuernavaca, Mor.
[2]Doctorado en Ingeniería y Ciencias Aplicadas. Asesoría Industrial Sea, Investigación y Desarrollo. nestor.gomez@asesoriaindustrialsea.com.mx, +52 777-5947844, Av. Taxqueña 1594-106, Col. Quetzalcóatl, CP 04270, CDMX.
[3]Maestría en Ingeniería y Ciencias Aplicadas. Asesoría Industrial Sea, Investigación y Desarrollo. daniel.lopez@asesoriaindustrialsea.com.mx, +52 777-4209949, Av. Taxqueña 1594-106, Col. Quetzalcóatl, CP 04270, CDMX.
[4]Ingeniería bioquímica. Asesoría Industrial Sea, Investigación y Desarrollo. edith.parcero@asesoriaindustrialsea.com.mx, +52 777-1754247, Av. Taxqueña 1594-106, Col. Quetzalcóatl, CP 04270, CDMX.
[5]Maestría en Ingeniería Aplicada. Universidad de Colima. maxem7@hotmail.com, +52 282 1488536, Avenida Universidad 333, LasVíboras, CP 28040 Colima, Col.

Resumen –La central "Los Humeros" presenta un gran daño en su infraestructura eléctrica asociada a fenómenos de corrosión por especies químicas presentes en los vapores utilizados en la generación de energía eléctrica, con el fin de programar mantenimientos óptimos sobre los motores eléctricos y desarrollar nuevos métodos de protección, se analizó el comportamiento del cobre, plata y la aleación de plata 56 (elementos presentes en los devanados) por medio de curvas de polarización potenciodinámicas en tres diferentes medios (30 ppm H_2S, 3.5% NaCl y vapor condensado de la central). Las curvas de polarización mostraron que la aleación Ag56 es muy susceptible a la corrosión frente al vapor condensado, mostrando un comportamiento similar al observado en el medio de 3.5% NaCl.

Palabras Clave: Sulfuro de hidrógeno, corrosión, electroquímica, geotermoeléctrica.

Abstract -- The "Los Humeros" power plant exhibits significant damage to its electrical infrastructure due to corrosion caused by chemical species present in the vapors used for electricity generation. To schedule optimal maintenance for electric motors and develop new protection methods, the behavior of copper, silver, and the Ag56 alloy (elements present in the motor windings) was analyzed using potentiodynamic polarization curves in three different environments: 30 ppm H_2S, 3.5% NaCl, and condensed vapor from the plant. The polarization curves revealed that the Ag56 alloy is highly susceptible to corrosion when exposed to condensed vapor, displaying behavior similar to that observed in the 3.5% NaCl medium.

Key words – Hydrogen sulfide, corrosion, electrochemistry, geothermal power.

INTRODUCCIÓN

La energía eléctrica producida por una central geotermoeléctrica es una gran alternativa verde frente al cambio climático por su bajo costo y mínimo impacto ambiental [1]. México cuenta con cinco centrales geotérmicas ubicadas en diferentes zonas del país: Los Azufres en Michoacán, Cerro Prieto en Baja California, Las Tres Vírgenes en Baja California Sur, Los Humeros en Puebla y Domo San Pedro en Nayarit. Estas centrales representan del 1.5 al 2% de la energía eléctrica total producida en México [2].

En una central Geotermoeléctrica es común encontrar fallas en las instalaciones asociadas a corrosión, esto es provocado por la presencia de una gran variedad de especies agresivas en los fluidos geotermales como son: oxigeno, ion hidrógeno (pH), dióxido de carbono, sulfuro de hidrógeno, amoniaco, iones cloruro y sulfato [3]. La presencia de este tipo de compuesto químicos hace de vital importancia la correcta selección de materiales, ya sea la elección de aleaciones o metales con alta resistencia a la corrosión, o aleaciones de bajo costo que sean fácilmente intercambiables en caso de una falla [4]. Sin embargo, esta última no es factible en el caso de transportadores de corriente, barras colectoras, interiores de equipos electrónicos, puntos de unión de soldadura en componentes eléctricos etc., en dónde el principal elemento conductor es el cobre, el cual presenta una gran susceptibilidad a este tipo de atmósfera [5]. La plata otro elemento vital para funcionamiento de componentes eléctricos, tiende a formar compuesto con una baja conductividad eléctrica en presencia del sulfuro de hidrógeno [6], esto representa una gran problemática debido a que una alta resistencia puede conllevar a un incremento de la temperatura en sitios localizados y así acelerar los procesos corrosivos.

La Central Geotermoeléctrica "Los Humeros" ubicada en el estado de Puebla perteneciente a la Comisión Federal de Electricidad (CFE) Generación VI (Figura 1), presenta una falla recurrente asociada a la corrosión del cobre y aleaciones de plata, siendo más específicos en los devanados de los rotores de los generadores eléctricos, los cuales reportan como "Falla a tierra por daño en soldadura de bobinas polares" y "Falla por cortocircuito en bobinas polares" en los años 2017, 2020 y 2021 (Figura 2).

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

Figura 1. Central Geotermoeléctrica "Los Humeros".

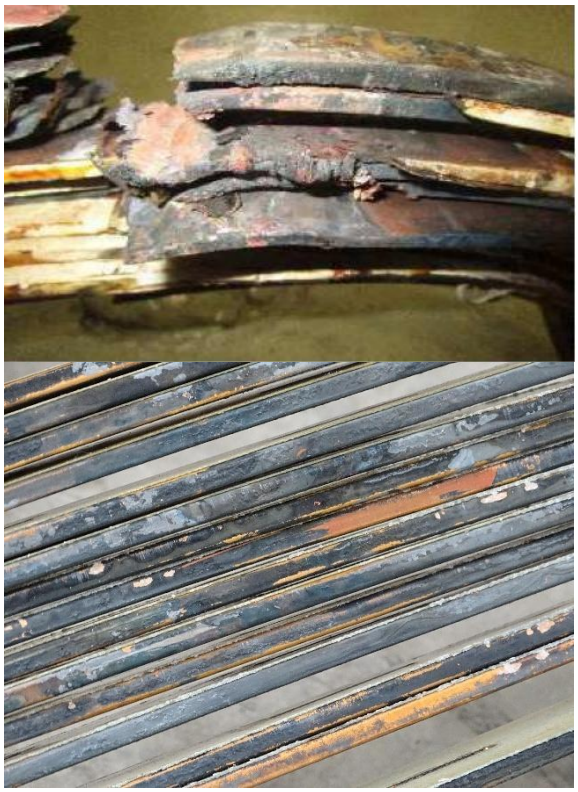


Figura 2. Daños por corrosión presentes en las espiras de cobre.

La corrosión en este tipo de componente representa un gran impacto económico en la producción de energía eléctrica por el incremento en los tiempos de mantenimiento y en la disminución de la vida útil de los motores eléctricos.

Dado lo observado, en el presente estudio se analizó el comportamiento ante la corrosión del Cobre 11000 (Cu), Plata (Ag), y una aleación de Plata, Cobre, Zinc y estaño (Ag56) la cual es comúnmente empleada en procesos de soldadura fuerte en las espiras de los devanados.

DESARROLLO

Metodología

El estudio del comportamiento de Cu 11000, Ag y la aleación Ag56 se realizó por medio de curvas de polarización potenciodinámicas en tres diferentes medios corrosivos.

Medios corrosivos

Solución 30 ppm de H_2S

En 350 ml de agua destilada se adicionó 0.06 g de ácido acético glacial (CH_3COOH, 99%) y sulfuro de sodio nona hidratado ($Na_2S.9H_2O$) tomando en cuenta el envejecimiento del reactivo. El parámetro de 30 ppm se estableció en relación con la máxima concentración encontrada in situ.

Solución 3.5% NaCl.

En un matraz aforado de 1 litro se agregó 35 g de cloruro de sodio 99% y agua destilada.

Vapor condensado

El vapor utilizado para las pruebas fue recolectado en la central "Los Humeros" en las unidades 9 y 10. El análisis fisicoquímico se reporta en la Tabla 1.

Tabla 1. Análisis fisicoquímico del vapor condensado.

Parámetro	Valor	Unidades
Alcalinidad total	70	ppm
Sulfatos	298	ppm
Cloruros	<20	ppm
pH	7.75	
Conductividad	865	µS
Sólidos disueltos totales	435	ppm

Probetas electroquímicas

Para preparar las diferentes probetas electroquímicas se cortaron piezas de Cu 11000 (99%) de 1 x 1 x 0.5 cm, Ag (97%) de 1 x 1 x 0.3 cm y Ag56 de 1 cm de largo con un diámetro de 1 mm. A las diferentes piezas se les soldó un alambre de cobre para establecer conexión entre el metal y el equipo, posteriormente se encapsularon con resina epóxica y se desbastaron con papel de carburo de silicio (SiC) desde grado 120 hasta 1200, se lavaron con agua destilada, etanol y se desengrasaron con acetona.

La aleación Ag56 fue analizada por medio de Fluorescencia de rayos X con el equipo ProsPector 3- Elvatech para comprobar su composición (Tabla 2).

Tabla 2. Composición de la aleación Ag56

Elemento	Concentración (%)
Ag	57.6 ± 0.3
Cu	20.7 ± 0.4
Zn	15.8 ± 0.3
Sn	5.9 ± 0.15

Montaje experimental

En una celda electroquímica de 400 ml se colocó 350 ml de electrolito y se utilizó un arreglo de tres electrodos, la probeta electroquímica como electrodo de trabajo, una

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

malla de platino como pseudo electrodo de referencia y como contra electrodo una barra de grafito.

Para realizar las diferentes curvas de polarización potenciodinámicas se aplicó un sobre potencial desde - 400 a 2500 mV vs OCP con una velocidad de barrido de 1 mV/s. Las mediciones se realizaron con ayuda de un potenciostato-galvanostato Admiral Squidstat Plus a temperatura ambiente (25°C).

Los cálculos de velocidades de corrosión se determinaron con lo establecido en la norma ASTM G102 [7]:

$$CR\left(\frac{\mu m}{year}\right) = KI_{corr}\frac{EW}{\rho} \qquad \text{Ec. (1)}$$

Donde K = 3.27x10^{-6} (µm·g/µA·cm·año), Icorr = densidad de corriente (µA/cm^2), EW = peso equivalente del material (adimensional) y ρ = densidad del material (g/cm^3). El peso equivalente esta dado por la Ecuación (2):

$$EW = \sum\frac{W_i}{n_i f_i} \qquad \text{Ec. (2)}$$

Donde f_i = fracción en masa del componente i de la aleación, W_i = peso atómico y n_i = valencia.

DISCUSIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

En la Figura 3 se presentan las diferentes curvas de polarización potenciodinámicas de las aleaciones en presencia de 30 ppm de H2S. El cobre presenta una densidad de corriente ligeramente más alta en comparación con las otras dos aleaciones (Tabla 3), la rama anódica presenta un comportamiento activo correspondiente a la disolución del Cu, entre -100 y 600 mV se observa un comportamiento psuedopasivo el cual puede ser provocado por la presencia de una capa de $Cu_2S/CuO/Cu_2O$, la cual al no ser completamente protectora permite la difusión de iones Cu^+ desde la superficie metálica hacia el seno de la solución [8].

Para el caso de Ag se observa un potencial más noble (- 300 mV) en comparación a Cu (-507 mV), la disolución de la plata se refleja en el comportamiento activo de la rama anódica, al igual que Cu se observa un intervalo pseudopasivo entre 0 y 600 mV, es evidente que la presencia del H_2S evita la formación de una capa completamente protectora de óxidos debido a la formación de Ag_2S [9].

La aleación Ag56 presenta una densidad de corriente menor con un potencial más noble (-126 mV), en 0 mV se aprecia un intento de pasivación del material seguido de un incremento en la densidad de corriente anódica. De 200 mV a 400 mV se observa una región pasiva y un potencial de picado a 460 mV con un incremento en la densidad de corriente anódica después de este punto. Este comportamiento puede ser atribuido a la presencia de Zn y Sn que mejoran la resistencia a la corrosión de la aleación en presencia de sulfuro [10,11].

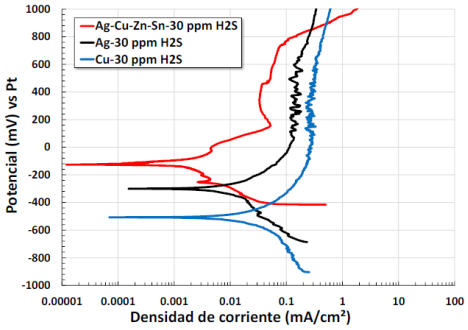


Figura 3. Curvas de polarización potenciodinámicas de las diferentes aleaciones en presencia de 30 ppm de H_2S.

Tabla 3. Parámetros electroquímicos obtenidos de los diferentes materiales en presencia de 30 ppm de H_2S.

Aleación	Potencial (mV)	Icorr (mA/cm^2)	CR (µm)
Ag	-300.50	0.01333	489.74
Cu	-507.64	0.04413	1033.67
Ag-Cu-Zn-Sn	-123.58	0.00141	34.84

En la Figura 4 se muestran las diferentes curvas de polarización potenciodinámicas de los diferentes materiales inmersos en 3.5% de NaCl. En este medio la velocidad de corrosión más alta fue observada nuevamente en Cu (Tabla 4). El Cu presenta una rápida disolución la cual se observa en el comportamiento de la rama anódica, con el incremento del potencial se puede observar un punto crítico de corriente donde se produce una pasivación, posteriormente se alcanza el potencial de picado seguido de una repasivación, esto puede ser ocasionado por la formación CuCl, CuO o CuOH sobre la superficie del Cu [12].

En el caso de Ag se puede observar un comportamiento activo inicial seguido de una pasivación a -120 mV, sin embargo, ocurre una ruptura de la capa pasiva a -75 mV, esto se observa con un incremento abrupto en la densidad de corriente anódica. El intento de pasivación puede ser ocasionado por la formación y acumulación de AgCl [13].

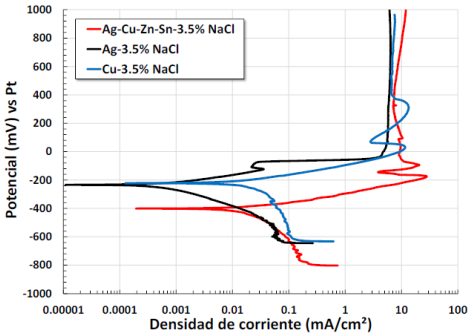


Figura 4. Curvas de polarización potenciodinámicas de las diferentes aleaciones inmersas en 3.5% NaCl.

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

Tabla 4. Parámetros electroquímicos obtenidos de los diferentes materiales inmersos en 3.5% de NaCl.

Aleación	Potencial (mV)	Icorr (mA/cm²)	CR (µm)
Ag	-232.59	0.001	36.73
Cu	-220.96	0.03167	741.82
Ag-Cu-Zn-Sn	-401.18	0.02238	553.08

La aleación Ag56 presenta un comportamiento muy similar al Cu, sin embargo, esta presenta un potencial más activo con una disolución rápida probablemente provocado por los elementos aleantes (Zn y Sn) [14]. A mayores potenciales se aprecia una corriente crítica con un potencial de pasivación y un potencial de picado.

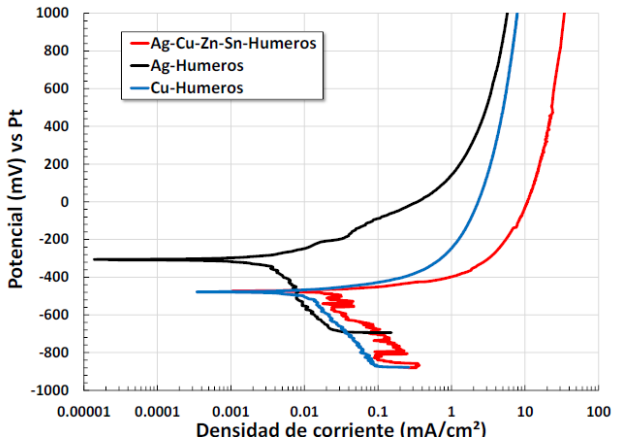


Figura 5. Curvas de polarización potenciodinámicas de las diferentes aleaciones inmersas en el vapor condensado.

Tabla 5. Parámetros electroquímicos obtenidos de los diferentes materiales inmersos en el vapor condensado.

Aleación	Potencial (mV)	Icorr (mA/cm²)	CR (µm)
Ag	-309.84	0.00295	108.38
Cu	-480.47	0.01141	267.26
Ag-Cu-Zn-Sn	-474.02	0.02753	680.35

En la Figura 5 se muestran las curvas de polarización potenciodinámicas de los diferentes materiales inmersos en el vapor condensado de la central "Los Humeros". En este medio la aleación Ag56 y Cu presentan un comportamiento activo con densidades de corrientes anódicas altas. Para el caso de la plata se presenta un potencial más noble y una densidad de corriente, inicialmente se observa un comportamiento activo seguido de un potencial de ruptura a -200 mV, esto puede ser provocado por la acumulación de productos de corrosión poco adherentes.

El comportamiento observado en las curvas de polarización potenciodinámicas en el vapor condensado, es muy similar al obtenido en 3.5% de NaCl. Esto sugiere que la presencia de iones de Cl^- en el vapor condensado tiene una mayor influencia que S^{-2} en el mecanismo de corrosión, lo cual ya ha sido reportado en estudios similares [15,16].

Diversos autores reportan la disolución en H_2S de los diferentes materiales bajo las siguientes reacciones [17-20]:

$$2H_2S + 2e^- \rightarrow H_{2(g)} + 2HS^- \quad \text{Ec. (3)}$$

$$2Ag + HS^- \rightarrow Ag_2S + \frac{1}{2} H_{2\,(g)} \quad \text{Ec. (4)}$$

$$Cu_2O + H_2S \rightarrow Cu_2S + H_2O \quad \text{Ec. (5)}$$

$$Zn + H_2S \rightarrow ZnS_2 + H_{2(g)} \quad \text{Ec. (6)}$$

En el caso de Sn no se reporta una reacción directa con el H_2S, sin embargo, tiende a formar óxidos e hidróxidos [21].

$$Sn + 2OH^- \rightarrow Sn(OH)_2 + 2e^- \quad \text{Ec. (7)}$$

$$Sn + 2OH^- \rightarrow SnO + H_2O + 2e^- \quad \text{Ec. (8)}$$

$$Sn(OH)_2 + 2OH^- \rightarrow Sn(OH)_4 + 2e^- \quad \text{Ec. (9)}$$

$$SnO + H_2O + 2OH^- \rightarrow Sn(OH)_4 \quad \text{Ec. (10)}$$

Esto podría explicar el mejor desempeño de la aleación Ag56 en 30 ppm de H_2S.

En el caso del medio en presencia del ion Cl^- se reportan las siguientes reacciones [17,22- 24]

$$Ag + Cl^- \rightarrow AgCl + e^- \quad \text{Ec. (11)}$$

$$Cu + Cl^- \rightarrow CuCl_{ads} + e^- \quad \text{Ec. (12)}$$

$$CuCl_{ads} + Cl^- \rightarrow CuCl^- \quad \text{Ec (13)}$$

$$4ZnO + Zn^{2+} + 5H_2O + 2Cl^- \rightarrow Zn_5(OH)_8\,Cl_2.\,H_2 \quad \text{Ec. (14)}$$

$$3Sn + 4OH^- + 2Cl^- - 6e^- \rightarrow Sn_3O(OH)_2\,Cl_2 + H_2O \quad \text{Ec. (15)}$$

De acuerdo con lo reportado se puede deducir que los elementos aleantes de la aleación Ag56 son más susceptibles a la presencia de cloruros.

En la Figura 6 se presentan las imágenes de las superficies obtenidas con un microscopio óptico de los diferentes materiales inmersos en la solución de 30 ppm de H_2S después de las pruebas de curvas de polarización potenciodinámicas. De acuerdo con la Figura 6a se observa un ataque generalizado con la presencia de desprendimientos de productos de corrosión en forma de surcos, esto concuerda con lo encontrado en la prueba electroquímica. Al igual que Ag, Cu presenta un ataque

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

generalizado con una diferente morfología en el desprendimiento. La aleación Ag56 presenta una morfología diferente a las otras aleaciones, se puede observar la presencia de productos de corrosión adherentes, los cuales pueden proteger la superficie de una disolución continua.

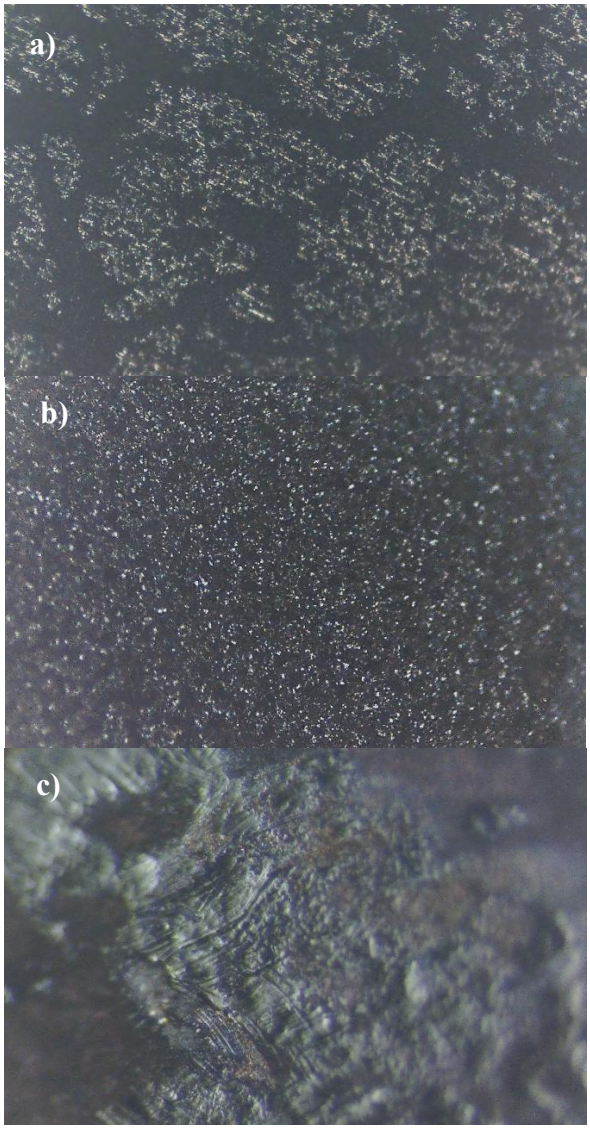


Figura 6. Imágenes ópticas de los materiales después de las pruebas de curvas de polarización inmersos en 30 ppm de H_2S, a) Ag, b) Cu y c) Ag56.

En la Figura 7 se presentan las imágenes ópticas de las superficies de los diferentes materiales inmersos en la solución de 3.5% de NaCl después de la prueba de curva de polarización potenciodinámica. En este medio corrosivo Ag presenta una corrosión más generalizada con la presencia de desprendimientos circulares, lo que conlleva a ataques localizados. El Cu presenta un ataque generalizado con el desprendimiento de productos de corrosión. Sobre la aleación Ag56 se puede apreciar la formación de productos de corrosión densos con picaduras.

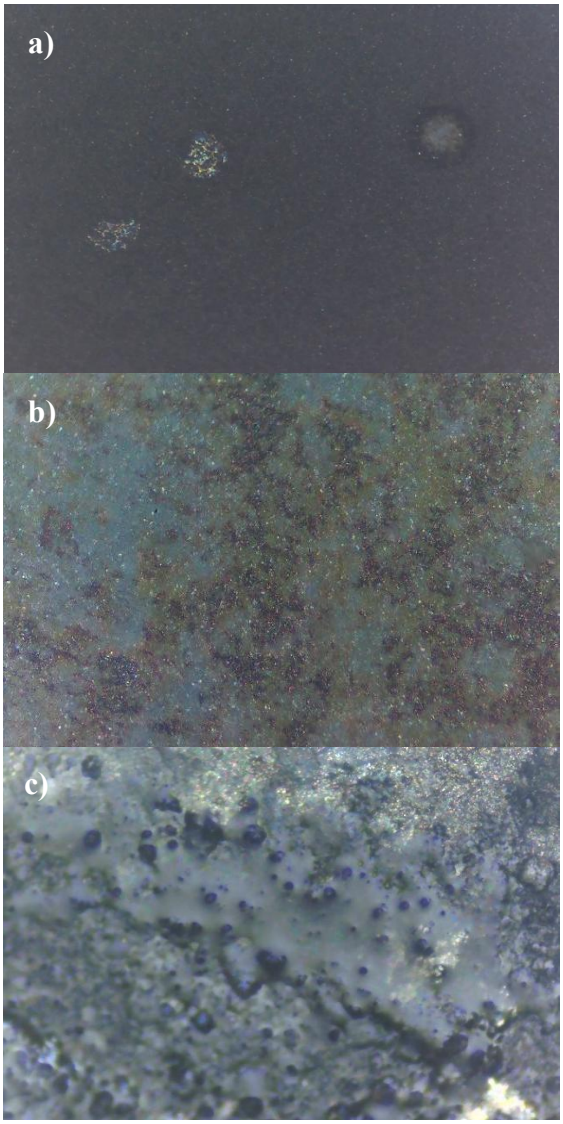


Figura 7. Imágenes ópticas de los materiales después de las pruebas de curvas de polarización inmersos en 3.5% de NaCl, a) Ag, b) Cu y c) Ag56.

En la Figura 8 se muestran las imágenes ópticas de las superficies de las diferentes aleaciones inmersas en el vapor condensado de la central geotérmica después de las pruebas de curvas de polarización potenciodinámicas.

La apariencia de la superficie de Ag (Figura 8a) presenta una combinación de los ataques observados en los medios de H2S y NaCl, se aprecia un ataque generalizado con ataques localizados, esto puede ser ocasionado por presencia simultanea de iones S^{-2} y Cl^{-} que aceleran el proceso corrosivo [25, 26]. En el caso de Cu se aprecia una menor acumulación de productos de corrosión con desprendimientos localizados. La aleación Ag56 en el vapor condensado presenta una mayor cantidad de ataques localizados sin la acumulación de productos de corrosión sobre la superficie.

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

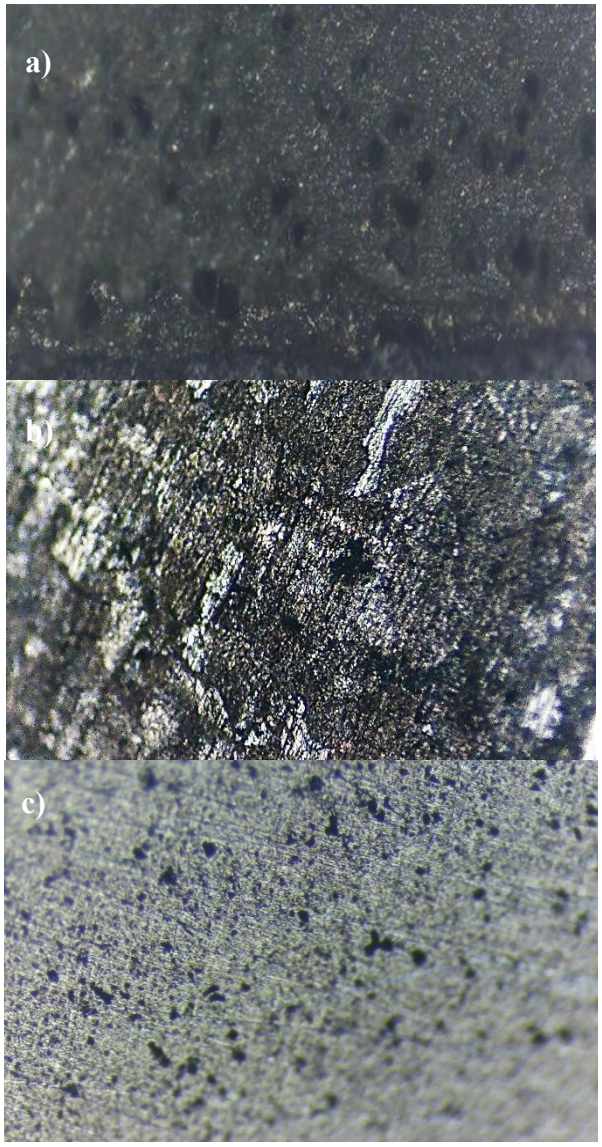


Figura 8. Imágenes ópticas de los materiales después de las pruebas de curvas de polarización inmersos en el vapor condensado, a) Ag, b) Cu y c) Ag56.

En la Figura 9 se presentan las velocidades de corrosión obtenidas a partir de las curvas de polarización potenciodinámicas de las aleaciones en diferentes medios.

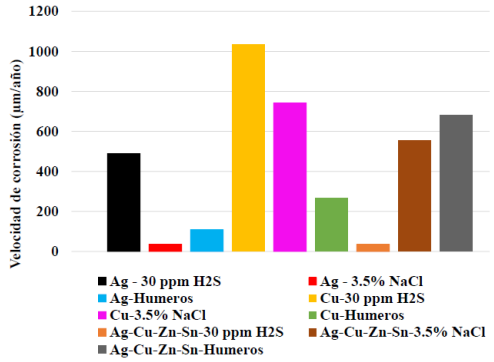


Figura 9. Velocidades de corrosión de las diferentes aleaciones obtenidas en los tres medios corrosivos.

Como se puede observar en el gráfico de la Figura 9, las velocidades de corrosión varían de un medio a otro, siendo en el medio de 30 ppm de H_2S Cu > Ag > Ag56, en 3.5% NaCl Cu > Ag56 > Ag, y en el vapor condensado Ag56 > Cu > Ag.

CONCLUSIONES

La presencia de Sn en la aleación Ag56 mejora la resistencia a la corrosión en el medio de 30 ppm de H_2S.

La presencia de cloruros afecta el mecanismo de corrosión de la aleación Ag56 incrementando su degradación.

El comportamiento electroquímico en el electrolito recolectado en los humeros se asemeja más al provocado por la presencia de cloruros.

La presencia de H_2S y cloruros aceleran la degradación de la aleación Ag56 y favorece la presencia de picadura.

BIBLIOGRAFÍA

[1] Penot C., Martelo D., Paul S. (2023). Corrosion and Scaling in Geothermal Heat Exchangers. Applied Sciences, 13(20), 11549.

[2] México entre las top 6 naciones con potencial geotérmico, UNAM global revista, Recuperado de: https://unamglobal.unam.mx/global_revista/mexico-entre-las-top-6-naciones-con-potencial geotermico/#:~:text=Actualmente%2C%20hay%20cinc o%20centrales%20geot%C3%A9rmicas,Domo%20San%20Pedro%20(Nayarit)

[3] Nogara J., Zarrouk S. J. (2018). Corrosion in geothermal environment: Part 1: Fluids and their impact, Renewable and Sustainable. Energy Reviews, 82 (1), pp. 1333-1346.

[4] Mundehenk N., Huttenloch P., Sanjuan B., Kohl T., Steger H., Zorn R. (2013). Corrosion and scaling as interrelated phenomena in an operating geothermal power plant. Corrosion Science, 70, pp. 17-28.

[5] Ko M., Lichti K. A. (2010). Corrosion of Cu-Base Alloys in Geothermal Condensates. Proceedings World Geothermal Congress 2010, pp. 1-9.

[6] Franey J. P., Kammlott G. W., Graedel T. E. (1985). The corrosion of silver by atmospheric sulfurous gases. Corrosion Science, 25, pp. 133-143.

[7] ASTM G102 (2023), Standard Practice for calculation of Corrosion Rates and Related Information from Electrochemical Information.

[8] Tran T.T. M., Fiaud C., Sutter E. M. M., Villanova (2003). The atmospheric corrosion of copper by hydrogen sulphide in underground conditions. Corrosion Science, 45, pp. 2787-2802.

[9] Lee J.I., Howard S.M., Kellar J.J., Cross W., Han K. N. (2001). Electrochemical Interaction between Silver

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

and Sulfur in Sodium Sulfide Solutions. Metallurgical and Materials Transactions B, 32, pp. 895-901.

[10] Lin H., Wang J., Han E. (2013). Effect of Sn Addition on the Corrosion Performance of Cast X-52 in H_2S-containing Environment at 60°C. Materials Science Forum, Vol. 743-744, pp. 607-612.

[11] Nasser K. Awad, E.A. Ashour, A.S. Fouda, Nageh K. Allam (2014). Effect of alloying elements on the electrochemical behavior of Cu-Ni-Zn ternary system in sulfide-polluted saltwater. Applied Surface Science, 307, pp. 621-630.

[12] Velázquez Torres N., Martínez H., Porcayo Calderón J., Vázquez Vélez E., González Rodríguez J. G, L. Martínez Gómez (2018). Use of an amide-type corrosion inhibitor synthesized from the coffee bagasse oil on the corrosion of Cu in NaCl. Green Chemistry Letters and Reviews, 11, pp. 1-11.

[13] Ha H., Payer J. (2011). The effect of silver chloride formation on the kinetics of silver dissolution in chloride solution. Electrochimica Acta, 56, pp. 2781-2791.

[14] Gerthátová Z., Babincová P., Drienovský M., Pasák M., Cernicková I., Duriska L., Havlík R., Palcut M., (2020). Microstructure and Corrosion Behavior of Sn-Zn Alloys. Materials, 15, 7210.

[15] Liu M., Song J., Sun X. (2020). Model analysis and experimental study on scaling and corrosion tendencies of aerated geothermal water. Geothermics, 85, 101766.

[16] Keserovic A., Bäßler R. (2015). Suitability of UNS S31603 steel for geothermal brines in volcanic areas-Influence of different physicochemical conditions on its corrosion behavior. Geothermics, 53, pp. 479-487.

[17] Zheng Y., Brown B., Nesic S. (2014). Electrochemical Study and Modeling of H_2S Corrosion of Mild Steel. Corrosion, 70, pp. 351-365.

[18] Minzari D., Jellensen M. S., Moller P., Ambat R. (2011). Morphological study of silver corrosion in highly aggressive sulfur environments. Engineering Failure Analysis, 18, pp. 2126-2136.

[19] Graedel T. E., Franey J. P., Gualtieri G. J., Kammlott G. W., Malm D. L. (1985). On the mechanism of silver and copper sulfidation by atmospheric H_2S and OCS. Corrosion Science, 25, pp. 1163-1180.

[20] Svensson J. E., Johansson L. G. (1996). The Synergistic Effect of Hydrogen Sulfide and Nitrogen Dioxide on the Atmospheric Corrosion of Zinc. Journal of The Electrochemical Society, 143, pp. 51-57.

[21] Zou S., Li X., Dong C., Ding K., Xiao K. (2013). Electrochemical migration, whisker formation, and corrosion behavior of printed circuit board under wet H_2S environment. Electrochimica Acta, 114, pp. 363-371.

[22] Khaled K. F. (2011). Studies of the corrosion inhibition of copper in sodium chloride solution using chemical and electrochemical measurements. Materials Chemistry and Physics, 125, pp. 427-433

[23] Qu Q., Yan C., Wan Y., Cao C. (2022). Effects of NaCl and SO_2 on the initial atmospheric corrosion of Zinc. Corrosion Science, 44, pp. 2789-2803.

[24] Tsao L. C., Chen C. W. (2012). Corrosion characterization of Cu-Sn intermetallics in 3.5% NaCl solution. Corrosion Science, 63, pp. 393-398.

[25] Tang J., Yang X., Wang Y., Wang H., Xiao Y., Apreutesei M., Nie Z., Normand B. (2019). Corrosion Behavior of 2205 Duplex Stainless Steel in HCl Solution Containing Sulfide. Metals, 9, 294.

[26] Shen S., Wang Z., Jiang J., Cao X., Sun P., Lu Y., Yang R. (2020). Synergistic Effect of the Total Acid Number, S, Cl, and H_2O on the Corrosion of AISI 1020 in Acidic Environments. ACS OMEGA, 5, pp. 20311- 20320.

AUTORIZACIÓN Y RENUNCIA.

Los autores del presente artículo autorizan al TecNM/Instituto Tecnológico de Zacatepec para publicar el escrito en el libro electrónico del CITID 2025. El TecNM/ITZ o los editores no son responsables ni por el contenido ni por las implicaciones de lo que está expresado en el escrito.

.

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

COMUNICACIONES SEGURAS A TRAVÉS DEL DISEÑO DE UN OBSERVADOR PROPORCIONAL

E. Bahena-Bustamante[1], G.-L. Osorio-Gordillo[2], R.-A. Vargas Méndez[2], J. Reyes-Reyes[2], C.-M. Astorga-Zaragoza[2]

[1]Ing. Tecnológico Nacional de México/CENIDET. Departamento de Ingeniería Electrónica. Tecnológico Nacional de México/CENIDET, Departamento de Ingeniería Electrónica. Interior Internado Palmira S/N, Cuernavaca 62490, México. m23ce094@cenidet.tecnm.mx.

[2]Dr. Tecnológico Nacional de México/CENIDET, Departamento de Ingeniería Electrónica. Interior Internado Palmira S/N, Cuernavaca 62490, México. gloria.og@cenidet.tecnm.mx (G.-L.O.-G.); rodolfo.vm@cenidet.tecnm.mx (R.-A.V.-M.); juan.rr@cenidet.tecnm.mx (J.R.-R.); carlos.az@cenidet.tecnm.mx (C.-M.A.-Z.)

Resumen – Este artículo presenta un enfoque innovador para el desarrollo de un observador proporcional aplicado a sistemas de comunicaciones. En este contexto, se exploran las propiedades de los sistemas dinámicos no lineales mediante la teoría de sincronización caótica, un fenómeno que permite la transferencia de información de manera eficiente y segura. La propuesta se estructura en tres componentes clave: (1) cifrado caótico, que se encarga de la protección de los mensajes en el sistema; (2) el observador de estado, cuya función es la estimación precisa del estado del sistema caótico y (3) el descifrado caótico, que permite recuperar los mensajes originalmente enmascarados.

Palabras Clave: *Comunicación segura, método de Lyapunov, sistema caótico, sistema Takagi-Sugeno.*

Abstract -- This paper presents an innovative approach to the development of a proportional observer applied to communications system. In this context, the properties of nonlinear dynamical systems are explored using chaotic synchronization theory, a phenomenon that allows the transfer of information in an efficient and secure manner. The proposal is structured in three key components: (1) chaotic encryption, which is responsible for the protection of messages in the system; (2) the state observer, whose function is the accurate estimation of the state of the chaotic system; and (3) chaotic decryption, which allows the recovery of originally masked messages.

Key words – *Secure communication, Lyapunov method, chaotic system, Takagi-Sugeno system.*

INTRODUCCIÓN

La comunicación ha sido un aspecto clave en el progreso de las sociedades, ya que la preservación del mensaje es esencial para asegurar su correcta recepción. Para salvaguardarlo de posibles interceptaciones, alteraciones o falsificaciones por parte de personas no autorizadas, se utiliza la criptografía, una herramienta fundamental desde tiempos antiguos [1]. Las comunicaciones seguras son cruciales en áreas como el ámbito militar, las agencias gubernamentales, las instituciones financieras, y otras organizaciones que requieren la protección de datos sensibles y confidenciales.

La criptografía, cuyo objetivo principal es proteger datos sensibles almacenados en dispositivos o transmitidos a través de canales no seguros juega un papel fundamental en la era digital moderna [2]. Un sistema de comunicación se considera seguro cuando logra mantener la confidencialidad de la información frente a cualquier intento de acceso no autorizado [3], es por eso que desde la investigación inicial de Pecora y Caroll [4], la sincronización caótica ha surgido como un campo clave en el estudio y desarrollo de sistemas caóticos [5]. Los cuales se caracterizan por su extrema sensibilidad a los cambios en los parámetros y condiciones iniciales, lo que conduce a oscilaciones e inestabilidad [6],[7].

Los sistemas criptográficos que utilizan el caos presentan características que los hacen adecuados para el cifrado de datos multimedia, imágenes, videos o archivos de audio. Entre estas características se encuentran su comportamiento impredecible, así como su sensibilidad a los parámetros de control y a las condiciones iniciales [8].

El proceso de comunicación segura basada en sincronización caótica es el siguiente: inicialmente, un mensaje se enmascara en una señal caótica con el propósito de ocultarlo en el transmisor. Posteriormente, la señal caótica, que contiene el mensaje, es transmitida al receptor por medio de un canal público como se puede observar en la Figura 1. Finalmente, la recuperación del mensaje es posible cuando se establece la sincronización entre el transmisor y el receptor bajo condiciones específicas [9].

El modelo Takagi-Sugeno (T-S) proporciona una aproximación de los sistemas no lineales a través de conjuntos de reglas difusas, representadas por modelos locales, con el objetivo de facilitar el desarrollo de observadores y controladores [10], [11].

Esta característica los ha hecho altamente relevantes, ya que permiten el uso de técnicas lineales avanzadas, como aquellas basadas en desigualdades matriciales lineales (LMI) [12]. Utilizando el enfoque clásico de Lyapunov, se puede analizar la estabilidad de sistemas representados por modelos Takagi-Sugeno, esto permite establecer condiciones suficientes para garantizar la convergencia de

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

los estados del sistema, facilitando el diseño de observadores y controladores eficientes [13].

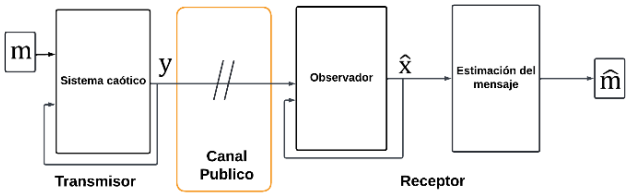


Figura 1. Esquema de comunicación.

DESARROLLO

Representación Takagi-Sugeno del sistema caótico

En la Ecuación (1) se observan las ecuaciones del sistema de Lorenz [15]:

$$\begin{aligned} \dot{x_1}(t) &= -ax_1(t) + ax_2(t), \\ \dot{x_2}(t) &= -x_1(t)x_3(t) + bx_1(t) - x_2(t), \\ \dot{x_3}(t) &= x_1(t)x_2(t) - cx_3(t). \end{aligned} \qquad \text{Ec. (1)}$$

donde $x_1(t), x_2(t)$ y $x_3(t)$ son variables de estado del sistema de Lorenz, $a = 10, b = 28$ y $c = 8/3$ parámetros constantes del sistema.

La representación del modelo no lineal (1) se puede expresar:

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= A(x)x(t), \\ y(t) &= Cx(t). \end{aligned} \qquad \text{Ec. (2)}$$

donde $x(t)$ es el vector de estado

$x(t) = [x_1(t) \quad x_2(t) \quad x_3(t)]^T$ y $A(x)$, C son matrices de dimensiones apropiadas.

En la matriz $A(x)$ se incluye un termino no lineal dependiente de las variables de estado, el cual se destaca de color rojo en la siguiente Ecuación:

$$\begin{pmatrix} \dot{x_1}(t) \\ \dot{x_2}(t) \\ \dot{x_3}(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -a & a & 0 \\ b & -1 & -x_1(t) \\ 0 & x_1(t) & -c \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ x_3(t) \end{pmatrix} \qquad \text{Ec. (3)}$$

La determinación de los valores límite de la no linealidad requiere establecer las condiciones iniciales del modelo (1). Al asignar $x\ (0) = [1;\ 1;\ 1]$ en el sistema autónomo, se obtienen los limites $-30 \leq x_1(t) \leq 30$.

El sistema de Lorenz cuenta con dos funciones de pertenencia, dadas por $r = 2^1 = 2$, las cuales son:

$$\begin{aligned} \mu_1(x_1(t)) &= \frac{1}{2}\left(1 + \frac{x_1(t)}{\overline{x_1}}\right), \\ \mu_2(x_1(t)) &= \frac{1}{2}\left(1 - \frac{x_1(t)}{\underline{x_1}}\right). \end{aligned} \qquad \text{Ec. (4)}$$

Considerando estos conjuntos difusos, el modelo T-S cuenta con dos reglas. Para cada una de ellas, se asocia un modelo matemático lineal local con la siguiente forma:

$$\dot{x}(t) = A_i x(t); \quad i = 1, 2. \qquad \text{Ec. (5)}$$

El modelo T-S que representa de manera precisa la dinámica del sistema no lineal original es:

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= (\mu_1(x_1(t))A_1 + \mu_2(x_1(t))A_2)x(t), \\ y(t) &= Cx(t). \end{aligned} \qquad \text{Ec. (6)}$$

$$\text{donde} A_1 = \begin{pmatrix} -a & a & 0 \\ b & -1 & \underline{x_1} \\ 0 & \overline{x_1} & -c \end{pmatrix}, A_2 = \begin{pmatrix} -a & a & 0 \\ b & -1 & \overline{x_1} \\ 0 & \underline{x_1} & -c \end{pmatrix},$$
$$C = (0 \quad 1 \quad 0).$$

El modelo matemático del sistema caótico en la forma T-S, puede expresarse como:

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= \sum_{i=1}^{2} \mu_i(x_1(t))(A_i)x(t), \\ y(t) &= Cx(t). \end{aligned} \qquad \text{Ec. (7)}$$

donde $x(t)$ representa el vector de estado del sistema caótico, y $y(t)$ es la salida. Las funciones de pertenencia cumplen con las siguientes condiciones.

$$0 \leq \mu_i(x_1(t)) \leq 1, \sum_{i=1}^{2} \mu_i(x_1(t)) = 1. \qquad \text{Ec. (8)}$$

En las Figuras 2-4 se muestra la validación del sistema Takagi-Sugeno junto con la comparación del desempeño del sistema no lineal. Estas Figuras ilustra cómo el método T-S logra aproximar la dinámica del sistema no lineal, proporcionando una validación visual de la efectividad del enfoque propuesto.

Es importante destacar que los sistemas caóticos son autónomos, lo que significa que su evolución temporal está determinada únicamente por su estado actual, sin depender explícitamente del tiempo. Una característica fundamental de estos sistemas es su sensibilidad a las condiciones iniciales, lo que implica que pequeñas variaciones en los valores iniciales pueden generar trayectorias distintas en el espacio de estado.

Al considerar las condiciones iniciales se permite analizar cómo el sistema responde desde este punto de partida específico. A medida que la simulación avanza, se puede observar cómo la dinámica del sistema cambia debido a esta sensibilidad, lo que refuerza la importancia de un modelado preciso y de técnicas de control adecuadas para garantizar un desempeño estable y predecible.

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

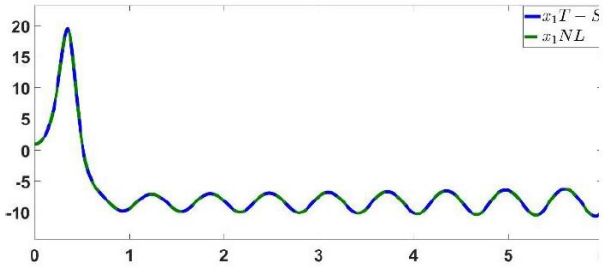


Figura 2. Comparación del estado x_1 entre el modelo no lineal y el modelo T-S.

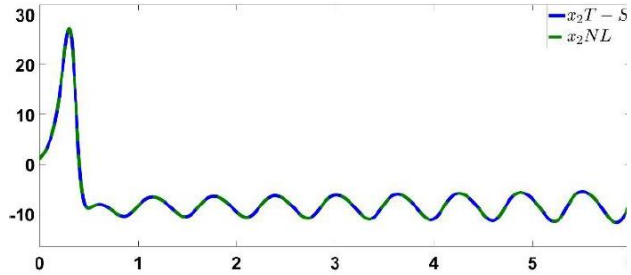


Figura 3. Comparación del estado x_2 entre el modelo no lineal y el modelo T-S.

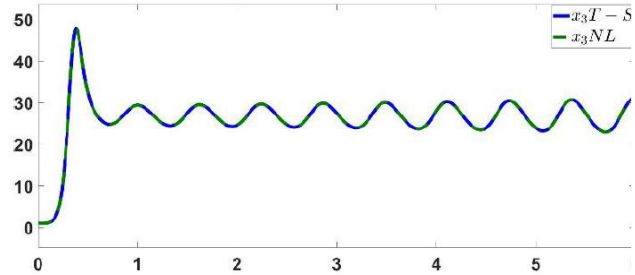


Figura 4. Comparación del estado x_3 entre el modelo no lineal y el modelo T-S.

El modelo Takagi-Sugeno (T-S) es fundamental en el diseño del observador, ya que permite representar sistemas no lineales mediante modelos locales lineales, facilitando su análisis y control. Esta aproximación posibilita el uso de herramientas de estabilidad basadas en el método de Lyapunov y desigualdades matriciales lineales (LMI) para garantizar la convergencia del observador. Entre sus ventajas se encuentra su capacidad de manejar dinámicas no lineales complejas, su flexibilidad en el diseño y su aplicabilidad en diversas áreas de la ingeniería.

Sistema transmisor

La representación Takagi-Sugeno (T-S) del sistema caótico se convierte en un canal a través del cual el mensaje se transmite enmascarado dentro de la variable $m(t)$, que afecta a en la salida $y(t)$ dada por la matriz C=[010]. Todo esto está influenciado por E=[1] como se muestra en la Ecuación (9):

$$\dot{x}(t) = \sum_{i=i}^{2} \mu_i\big(x_1(t)\big)\big(A_i x(t)\big), \qquad \text{Ec. (9)}$$
$$y(t) = Cx(t) + Em(t).$$

donde $x(t) \in \mathbb{R}^n$ es el vector de estados, $y(t) \in \mathbb{R}^p$ representa la salida medida, $m(t) \in \mathbb{R}^r$ es la señal que encripta el mensaje. $A_i \in \mathbb{R}^{n\times n}, C \in \mathbb{R}^{p\times n}, E \in \mathbb{R}^{p\times r}$ son matrices conocidas de dimensiones apropiadas. $\mu_i(x_1(t))$ corresponde a las funciones de pertenencia que dependen de cada regla difusa i, donde $i = [1,2]$.

Diseño del observador

Para lograr la estimación del estado del sistema caótico con el mensaje encriptado, se considera el siguiente observador proporcional (PO).

$$\dot{\zeta}(t) = \sum_{i=1}^{2} \mu_i\big(x_1(t)\big)\big(N_i\zeta(t) + F_i y(t)\big), \qquad \text{Ec. (10)}$$
$$\hat{x}(t) = \zeta(t) + Qy(t).$$

donde $N_i \in \mathbb{R}^{n\times n}, F_i \in \mathbb{R}^{n\times p}, Q \in \mathbb{R}^{n\times p}$ son las ganancias del observador. Para asegurar la convergencia del estado estimado, es fundamental calcular estas matrices de manera adecuada. Con este propósito, se define el error de estimación del estado de la siguiente forma:

$$e(t) = x(t) - x(t) \qquad \text{Ec. (11)}$$

Sustituyendo la expresión de $\hat{x}(t)$, se obtiene:

$$e(t) = \zeta(t) + Qy(t) - x(t) \qquad \text{Ec. (12)}$$

A continuación, se remplaza $y(t)$ utilizando la ecuación del sistema, lo que da como resultado:

$$e(t) = \zeta(t) + Q(Cx(t) + Em(t)) - x(t) \qquad \text{Ec. (13)}$$

Agrupando los términos que dependen de $x(t)$, se obtiene:

$$e(t) = \zeta(t) - (I - QC)x(t) + QEm(t) \qquad \text{Ec. (14)}$$

Finalmente, definiendo una matriz auxiliar $T = (I - QC)$, la ecuación del error de estimación toma la forma:

$$e(t) = \zeta(t) - Tx(t) + QEm(t) \qquad \text{Ec. (15)}$$

Esta ecuación describe la dinámica del error de estimación en función de los parámetros del sistema y las ganancias del observador.

Así, la dinámica del error en la estimación del estado se puede describir de la siguiente manera:

$$\dot{e}(t) = \sum_{i=1}^{2} \mu_i\big(x_1(t)\big)(\dot{\zeta}(t) \qquad \text{Ec. (16)}$$
$$-T\dot{x}(t) + QE\dot{m}(t)$$

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

Sustituyendo $\zeta(t)$ y $\dot{x}(t)$

$$\dot{e}(t) = \sum_{i=1}^{2} \mu_i\big(x_1(t)\big)\big(\big(N_i\zeta(t) + F_i y(t)\big) - T(A_i x(t)) + QE\dot{m}(t) \qquad \text{Ec. (17)}$$

Ahora remplazando $\zeta(t)$ y $y(t)$

$$\dot{e}(t) = \sum_{i=1}^{2} \mu_i\big(x_1(t)\big)(N_i\big(e + Tx(t)\big) + F_i\big(Cx(t) + Em(t)\big) - T\big(A_i x(t)\big) + QE\dot{m}(t)) \qquad \text{Ec. (18)}$$

Reorganizando los términos, se obtiene:

$$\dot{e}(t) = \sum_{i=1}^{2} \mu_i\big(x_1(t)\big)\,(N_i e(t) + N_i Tx(t) - N_i QEm(t) + F_i Cx(t) + F_i Em(t) - TA_i x(t) + QE\dot{m}(t)) \qquad \text{Ec. (19)}$$

Agrupando los términos que dependen de $x(t)$ y $m(t)$ se tiene:

$$\dot{e}(t) = \sum_{i=1}^{2} \mu_i\big(x_1(t)\big)\,(N_i e(t) + (N_i T + F_i C - TA_i)x(t) + (F_i E - N_i QE)m(t) + QE\dot{m}(t) \qquad \text{Ec. (20)}$$

Usando la expresión de $\hat{x}(t)$ y sustituyendo $\zeta(t)$ y $y(t)$, se puede obtener:

$$\hat{x}(t) = \sum_{i=1}^{2} \mu_i\big(x_1(t)\big)\,(e(t) + Tx(t) - QEm(t) + Q(Cx(t) + Em)) \qquad \text{Ec. (21)}$$

Reorganizando los términos se obtiene:

$$\hat{x}(t) = \sum_{i=1}^{2} \mu_i\big(x_1(t)\big)(e(t) + (T + QC)x(t) + QEm(t)) \qquad \text{Ec. (22)}$$

para simplificar la dinámica del error de estimación, se consideran las siguientes restricciones:

$$\begin{aligned} &(a) N_i T + F_i C - TA_i = 0 \\ &(b) N_i QE = F_i E \\ &(c) T + QC = I \\ &(d) QE = 0 \end{aligned} \qquad \text{Ec. (23)}$$

Entonces la Ecuación (20) y (21) se puede rescribir como:

$$\dot{e}(t) = \sum_{i=1}^{2} \mu_i\big(x_1(t)\big)\big(N_i e(t)\big) \qquad \text{Ec. (24)}$$
$$\hat{x}(t) = e(t) + (T + QC)x(t)$$

Parametrización del observador

Antes de presentar la solución al problema de diseño de PO, se proporcionará la parametrización de todas las soluciones que satisfacen las restricciones algebraicas (a) a (d) de la Ecuación (23).

Las condiciones (c) y (d) pueden expresarse como

$$[T \quad Q]\Sigma = \Omega \qquad \text{Ec. (25)}$$

donde $\Sigma = \begin{bmatrix} I & 0 \\ C & E \end{bmatrix}$ y $\Omega = \begin{bmatrix} I \\ 0 \end{bmatrix}$.

La solución particular de la Ecuación (25) es:

$$[T \quad Q] = \Omega\Sigma^{+} \qquad \text{Ec. (26)}$$

o equivalente

$$T = \Omega\Sigma^{+}\begin{bmatrix} I \\ 0 \end{bmatrix}, \quad Q = \Omega\Sigma^{+}\begin{bmatrix} 0 \\ I \end{bmatrix}. \qquad \text{Ec. (27)}$$

donde Σ^{+} es la inversa generalizada de Σ, tal que satisface $\Sigma\Sigma^{+}\Sigma=\Sigma$.

De la condición (a), se obtiene:

$$N_i T + F_i = TA_i \qquad \text{Ec. (28)}$$

A continuación, se remplaza T de la condición (b), lo que da como resultado:

$$N_i - N_i QC + F_i C = TA_i \qquad \text{Ec. (29)}$$

Agrupando los términos que dependen de C, se obtiene:

$$N_i - (N_i Q - F_i)C = TA_i \qquad \text{Ec. (30)}$$

Se define una matriz auxiliar $K_i = N_i Q - F_i$, para obtener:

$$N_i - K_i C = TA_i \qquad \text{Ec. (31)}$$

Utilizando la matriz K_i se puede obtener la matriz F_i, como:

$$F_i = N_i Q - K_i \qquad \text{Ec. (32)}$$

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

Análisis de estabilidad del observador

En esta sección se introduce un método para el diseño del OP.

El siguiente teorema establece las condiciones LMI que aseguran la existencia de todas las matrices del observador.

Teorema. Existe una matriz de parámetros N_i tal que el modelo (24) es asintóticamente estable si existe una matriz $X = X^T > 0$ tal que se verifican las siguientes LMIs.

$$A_i^T T^T X + C^T W_i^T + X A_i + W_i C < 0 \qquad \text{Ec. (33)}$$

donde $W_i = X K_i$

Demostración. Se considera la función candidata de Lyapunov

$$V(e(t)) = e^T(t) X e(t) > 0, \qquad \text{Ec. (34)}$$

con $X = X^T > 0$. Su derivada a lo largo de la trayectoria (24) está dada por:

$$V(e(t)) = e^T(t)[(TA_i + K_i C)^T X + X(TA_i + K_i C)]e(t) < 0 \qquad \text{Ec. (35)}$$

La estabilidad asintótica del sistema (24) está garantizada si y solo si $V(e(t))<0$ lo que conduce a la siguiente LMI.

La condición LMI puede resolverse fácilmente utilizando el software Matlab y la caja de herramientas YALMIP [14].

$$A_i^T T^T X + C^T W^T{}_i + X A_i + W_i C < 0 \qquad \text{Ec. (36)}$$

Estimación del mensaje

Cuando el error en la estimación del estado es cero, se puede considerar que $\hat{x}(t) = x(t)$ en la Ecuación (9), lo que permite obtener la siguiente aproximación.

$$y(t) = Cx(t) + Em(t) \qquad \text{Ec. (37)}$$

debido a que la matriz E posee un rango de columna completo, es posible llevar a cabo la estimación del mensaje de la siguiente manera:

$$m(t) = E^+(y(t) - y(t)) \qquad \text{Ec. (38)}$$

donde E^+ es cualquier inversa generalizada de E tal que $EE^+E=E$.

DISCUSIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Las matrices de ganancia del observador proporcional de (10) se derivan resolviendo las desigualdades (36), lo que garantizan el rendimiento deseado del sistema de la siguiente manera. Los números marcados en rojo en las matrices corresponden a las ganancias de cada modelo local.

$$N_1 = \begin{bmatrix} -10 & -525.73 & 0 \\ 28 & -0.11 & -30 \\ 0 & 148.85 & -2.66 \end{bmatrix},$$

$$N_2 = \begin{bmatrix} -10 & -525.73 & 0 \\ 28 & -0.11 & 30 \\ 0 & -148.85 & -2.66 \end{bmatrix}$$

$$F_1 = \begin{bmatrix} 535.73 \\ -0.88 \\ -118.85 \end{bmatrix},$$

$$F_1 = \begin{bmatrix} 535.73 \\ -0.88 \\ 118.85 \end{bmatrix}$$

$$T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$Q = \begin{bmatrix} 0 \\ -0.16 \\ 0 \end{bmatrix}.$$

Para comprobar la efectividad del diseño del observador en la estimación de las variables de estado y el mensaje cifrado dentro del sistema caótico de Lorenz, se utilizaron dos tipos de señales cifradas: una senoidal y otra cuadrada. La elección de estas señales se basó en su diversidad en cuanto a complejidad y características, lo que permitió evaluar el rendimiento del sistema en diferentes contextos.

Mensaje señal senoidal

Se evaluó el sistema utilizando una señal senoidal como mensaje cifrado. Este tipo de señal presenta periodicidad y suavidad. Las condiciones iniciales del sistema son $x(0)$=[1; 1;1] y las del observador son $\hat{x}(0)$=[0; 0;0]. En las Figuras 5-7 se observa la estimación de los estados con las condiciones iniciales mencionadas.

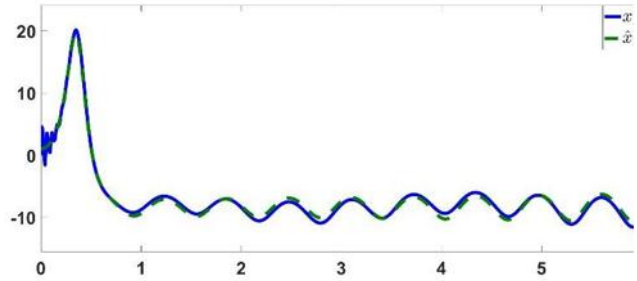


Figura 5. Comparación del estado x_1 con su estimación.

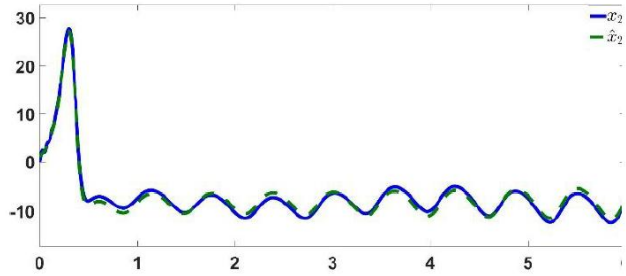


Figura 6. Comparación del estado x_2 con su estimación.

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

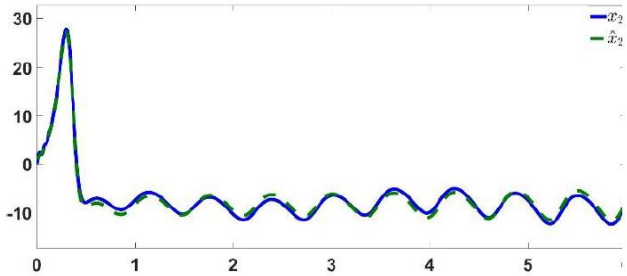


Figura 7. Comparación del estado x_3 con su estimación.

Los resultados muestran que la estimación sigue con una correcta precisión la forma de la señal original, presentando solo una pequeña fase de estabilización inicial antes de converger. Esto indica que el observador es capaz de recuperar con exactitud la señal cifrada, manteniendo una correcta precisión en amplitud y fase. En la Figura 8 se muestra la estimación del mensaje transmitido.

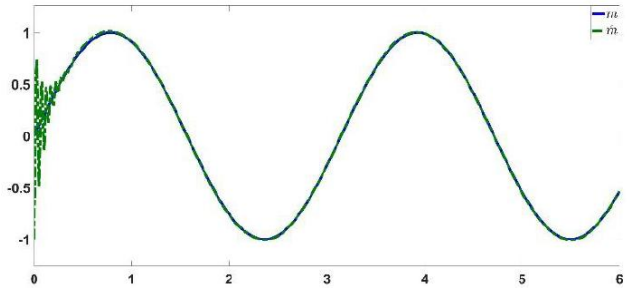


Figura 8. Comparación del mensaje transmitido: original m y el estimado $\hat{m}$.

Mensaje señal cuadrada

Se utilizó una señal cuadrada como mensaje cifrado, la cual se caracteriza por alternar entre dos valores fijos con transiciones abruptas. Las condiciones iniciales del sistema son $x(0)$ = [1; 1; 1], mientras que las del observador son $\hat{x}(0)$ = [0; 0; 0]. En las Figuras 9-11, se muestra la estimación de los estados con las condiciones iniciales mencionadas.

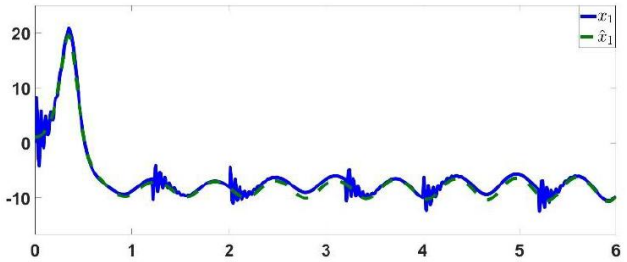


Figura 9. Comparación del estado x_1 con su estimación.

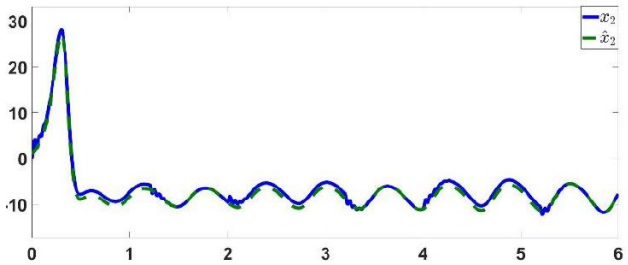


Figura 10. Comparación del estado x_2 con su estimación.

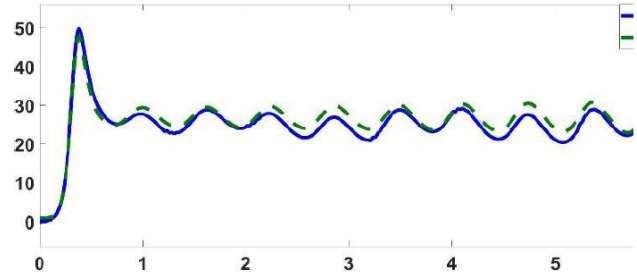


Figura 11. Comparación del estado x_3 con su estimación.

La estimación del observador logra seguir de manera adecuada la señal original, aunque se presentan oscilaciones y picos en los instantes de transición. Este comportamiento es esperable debido a la alta concentración de armónicos en la señal cuadrada y a la respuesta del observador ante los cambios bruscos. En la Figura 12, se muestra la estimación del mensaje transmitido.

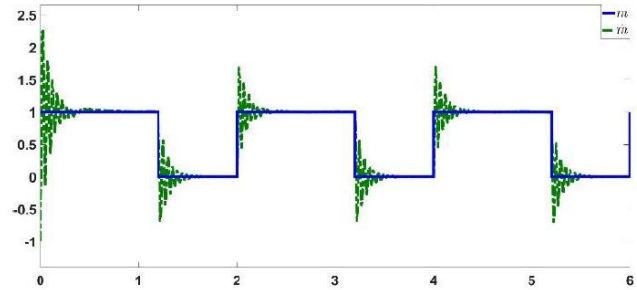


Figura 12. Comparación del mensaje transmitido: original m y el estimado $\hat{m}$.

CONCLUSIONES

En este trabajo, se busca lograr una comunicación segura mediante el sistema caótico de Lorenz, donde un mensaje es enmascarado para luego ser recuperado mediante un observador proporcional basado en la sincronización caótica.

Aprovechando las propiedades de los sistemas Takagi-Sugeno y el enfoque de estabilidad de Lyapunov, el método propuesto garantiza un enmascaramiento eficaz y una recuperación confiable del mensaje. Sin embargo, debido a las oscilaciones presentes en el diseño del observador, la precisión de la estimación se ve afectada, como se

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

evidenció en la simulación realizada. A pesar de esta variabilidad, el mensaje es recuperado con suficiente detalle, asegurando que la información original pueda ser interpretada correctamente y manteniendo la integridad de los datos transmitidos.

AGRADECIMIENTOS

Expresamos nuestro más sincero reconocimiento y gratitud al Dr. Luis Gerardo Vela Valdés, cuya destacada trayectoria y contribuciones en el área de electrónica del Tecnológico Nacional de México/CENIDET dejaron una huella invaluable. Su dedicación, conocimiento y pasión por la enseñanza y la investigación han sido una inspiración para colegas y estudiantes. En su memoria, dedicamos este trabajo con profundo respeto y admiración.

BIBLIOGRAFÍA

[1] Bonilla, S.J. (2021) Algoritmo de cifrado de audio digital mediante atractores caóticos. [Tesis de licenciatura]. Universidad Distrital Francisco José de Caldas.

[2] Alenezi, M., Alabdulrazzaq, H., and Mohammad, N. (2020). Symmetric encryption algorithms: Review and evaluation study. International Journal of Communication Networks and Information Security.

[3] N. Augustine, S.N. George, D.P. (2015). An audio encryption technique through compressive sensing and Arnold transform. International Journal of Trust Managementin Computing and Communications.

[4] Carroll, T. L.; Pecora, L. M. (1995). Synchronizing chaotic circuits. Nonlinear dynamics in circuits, pp. 215-248.

[5] Dimassi, H.; Loría, A. (2010). Adaptive unknown-input observers-based synchronization of chaotic systems for telecommunication. T IEEE Transactions on Circuits and Systems I (58)4, pp.800-812.

[6] Youssef, T.; Chadli, M.; Karimi, H. R.; Zelmat, M. (2013). Chaos synchronization based on unknown input proportional multiple-integral fuzzy observer. Abstract and Applied Analysis.

[7] Jiang, G. P., Chen, G., & Tang, W. K. S. (2004). Stabilizing unstable equilibria of chaotic systems from a state observer approach. *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, *51*(6), pp. 281-288.

[8] Albahrani, E.A. (2017). A new audio encryption algorithm based on chaotic block cipher. Annual Conference on New Trends in Information Communications Technology Applications (NTICT).

[9] Cai, J.; Lin, M.; Yuan, Z. (2010). Secure communication using practical synchronization between two different chaotic systems with uncertainties. Mathematical and Computational Applications. (15) 2, pp. 166-175.

[10] Al-Hadithi, B. M.; Jiménez, A.; Matía, F. (2012). A new approach to fuzzy estimation of Takagi–Sugeno model and its applications to optimal control for nonlinear systems. Applied Soft Computing 2, 12 (1), pp. 280-290.

[11] P. P. Angelov and D. P. (2004). An approach to online identification of Takagi-Sugeno fuzzy models. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics,34, (1), pp. 484-498.

[12] López-Estrada, F. R.; Rotondo, D.; Valencia-Palomo, G. (2019). A review of convex approaches for control, observation and safety of linear parameters and Takagi-Sugeno systems. Processes, (7) 11, pp. 814.

[13] Sastry, S., & Sastry, S. (1999). Lyapunov stability theory. Nonlinear systems: analysis, stability, and control. pp. 182-234.

[14] Löfberg, J. YALMIP (2004) A Toolbox for Modeling and Optimization in MATLAB. In Proceedings of the CACSD Conference. pp. 222.

[15] Lorenz, E. N. (1963). Deterministic nonperiodic flow. Journal of atmospheric sciences, 20 (2), pp. 130-141.

AUTORIZACIÓN Y RENUNCIA.

Los autores del presente artículo autorizan al TecNM/Instituto Tecnológico de Zacatepec para publicar el escrito en el libro electrónico del CITID 2025. El TecNM/ITZ o los editores no son responsables ni por el contenido ni por las implicaciones de lo que está expresado en el escrito.

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

DE LA NECESIDAD A LA MEJORA CONTINUA: EL DESARROLLO DEL SISTEMA DE EVALUACIÓN DOCENTE EN LA UTSEM.

J. Casimiro [1], B. Manjarrez [2], T.A. Antonio [3]

[1] Maestría en Dirección Estratégica en Ingeniería de Software. Universidad Tecnológica del Sur del Estado de Morelos Tecnologías de la Información. javiercasimiro@utsem-morelos.edu.mx, 7771894836, Alpuyeca Xochitepec Morelos, 62790.
[2] Ingeniería en Sistemas Computacionales. Universidad Tecnológica del Sur del Estado de Morelos Tecnologías de la Información. benjaminmanjarrez @utsem-morelos.edu.mx, 7345241893, Puente de Ixtla Morelos,62660.
[3] Ingeniería en Entornos Virtuales y Negocios Digitales. Universidad Tecnológica del Sur del Estado de Morelos Tecnologías de la Información. ta.a.izaguirre@gmail.com, 7771079788, Alpuyeca Xochitepec Morelos, 62790.

Resumen – La Universidad Tecnológica del Sur del Estado de Morelos (UTSEM) trabaja constantemente en mejorar sus procesos, para esto trabaja estrechamente con la carrera de Tecnologías de la Información (TI) donde se desarrollan proyectos tecnológicos de optimización de procesos, una de las áreas en que se trabaja es el área administrativa donde con la finalidad de mejorar la calidad educativa, cada cuatrimestre se realiza la evaluación docente, misma que se realiza mediante una encuesta a los alumnos. Como innovación a este proceso de ayuda a la calidad se creó un sistema web.

El Sistema de Evaluación Docente (SED) es una plataforma diseñada para mejorar y tener un referente sobre la calidad educativa en la UTSEM. A través de este sistema, los alumnos evalúan a sus docentes cada cuatro meses, respondiendo un cuestionario de 21 preguntas que analizan diversos aspectos del desempeño académico.

Esta busca obtener áreas de mejora y conocer las fortalezas en cada uno los docentes, las evaluaciones son realizadas de manera anónima y los datos obtenidos son tratados y publicados dentro de la universidad. Los resultados obtenidos permiten a la institución identificar fortalezas y áreas de mejora en la labor docente, facilitando la toma de decisiones en la asignación de carga de trabajo y el desarrollo profesional del profesorado.

Para la recopilación de estas evaluaciones, gestión y análisis de los datos se desarrolló el sistema de evaluación docente, buscando innovación y un mejor control en el tratamiento y seguridad de los datos.

Palabras Clave: Calidad educativa, evaluación docente, innovación, tratamiento de datos.

Abstract -- The Technological University of the South of the State of Morelos (UTSEM) constantly works to improve its processes, for this it works closely with the Information Technology (IT) career where technological projects to optimize processes are developed, one of the areas in which it works is the administrative area where, with the purpose of improving educational quality, the teaching evaluation is carried out every quarter, which is carried out through a survey of students. As an innovation to this quality support process, a web system was created.

The Teaching Evaluation System (SED) is a platform designed to improve and have a reference for educational quality at UTSEM. Through this system, students evaluate their teachers every four months, answering a questionnaire of 21 questions that analyze various aspects of academic performance.

This seeks to obtain areas of improvement and to know the strengths of each teacher. The evaluations are carried out anonymously and the data obtained is processed and published within the university. The results obtained allow the institution to identify strengths and areas of improvement in teaching work, facilitating decision-making in the assignment of workload and the professional development of teachers.

For the collection of these evaluations, management and analysis of the data, the teaching evaluation system was developed, seeking innovation and better control in the processing and security of the data.

Key words – Educational quality, teaching evaluation, innovation, data processing.

INTRODUCCIÓN

La educación de calidad es un pilar fundamental en la formación de los estudiantes y la evaluación docente es una herramienta clave para garantizar un proceso de enseñanza-aprendizaje efectivo. En este contexto, el SED de la UTSEM proporciona una solución tecnológica que permite recopilar, analizar y presentar información relevante sobre el desempeño de los docentes, basado en la percepción de los alumnos. Con este sistema, la institución puede fortalecer sus estrategias académicas y mejorar la experiencia educativa.

1.1 ISO 9001

La página oficial (ISO, 2015) la describe de la siguiente manera: “Norma para la gestión de calidad reconocida mundialmente. Ayuda a organizaciones de todos los tamaños y sectores a mejorar su desempeño, cumplir con las expectativas de los clientes y demostrar su compromiso

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

con la calidad. Sus requisitos definen cómo establecer, implementar, mantener y mejorar constantemente un sistema de gestión de calidad (SGC).

Con la implementación de ISO 9001, su organización ha implantado procesos eficaces y ha capacitado a su personal para brindar productos o servicios impecables una y otra vez." (ISO, 2015) [1]

Por lo tanto, la UTSEM al brindar un servicio, se debe conocer la opinión de nuestros clientes, es decir, los estudiantes y como es su experiencia dentro de la misma para mejorar la calidad de enseñanza y aprendizaje.

1.2 La evaluación de desempeño docente

En la UTSEM como se mencionó anteriormente la evaluación es realizada cada cuatrimestre, donde los alumnos evalúan a los docentes que tuvieron asignados durante ese periodo. La encuesta incluye preguntas que abarcan diversos ámbitos: conocimiento y manejo de los temas, la disponibilidad y responsabilidad del docente, etc.

De acuerdo con el artículo: Evaluación de desempeño docente; la evaluación docente." No debe generar en los profesores, sentimientos de temor ni rechazo. Tampoco debe tener como objetivo vigilar, controlar, castigar ni excluir, sino favorecer el perfeccionamiento del profesorado a través de la identificación de aquellas cualidades que conforman a un buen docente. " (DE CHAPARRO, ROMERO F., RINCÓN C., & JAIME G., 2008) [2]

1.3 Antecedentes

Como lo indica (Graciela Cordero Arroyo, 2013): "La evaluación de la docencia en educación básica inició en México desde 1992 como una estrategia de promoción horizontal y pago al mérito. A partir de 2011, se registran planteamientos y acciones que ponen al docente en el centro de la atención de otros esfuerzos evaluativos." [3]

De acuerdo con lo anterior instituciones educativas han implementado diversas estrategias para evaluar a los docentes, desde encuestas impresas hasta plataformas digitales. La UTSEM, en su búsqueda de innovación y mejora continua, ha desarrollado el SED para optimizar este proceso. Anteriormente, la evaluación se realizaba de manera manual mediante copias que eran entregadas a los alumnos y contestadas, después debían ser revisadas por un encargado y registradas para tener un control de los mismos lo que dificultaba el análisis oportuno de los resultados y la toma de decisiones basada en datos confiables. Debido a que estos datos podían ser manipulados.

1.4 Objetivo

Optimizar el proceso de la evaluación docente en la UTSEM mediante la reducción de tiempos y una mejor gestión de datos.

1.5 La evaluación docente en la UTSEM

Para la UTSEM la manera de realizar la evaluación es mediante un test de 21 preguntas, donde 2 preguntas no son medibles y 19 preguntas donde las respuestas se evalúan mediante una métrica de 10, donde 6 es el nivel más bajo y 10 el más alto, sin embargo, el alumno no observa este puntaje de manera numérica, sino que lo observa en escala desde el peor hasta excelente. Dicha evaluación se realiza en todos los grupos evaluando a cada uno de los docentes (entre seis y ocho docentes por grupo), las evaluaciones son revisadas y los datos se tratan de manera que al obtener los primeros lugares en el desempeño el resultado es exhibido dentro de la universidad, mientras que los lugares más bajos son revisados para mejorar en dichos aspectos del docente.

El test evalúa desde puntualidad, asistencia, manejo de los temas, resolución de dudas, atención al alumnado, etc.; donde los resultados indican la preparación del docente para las materias impartidas, la comunicación efectiva con los alumnos, la responsabilidad y compromiso, entre otros aspectos.

La universidad en su página oficial describe el SED de la siguiente manera: "El Sistema de Evaluación Docente (SED) es una herramienta que permite que el estudiante pueda evaluar el desempeño de cada uno de sus docentes de asignatura, en forma cuatrimestral, a través de una serie de preguntas que permiten evaluar diferentes categorías como responsabilidad docente, comunicación educativa, didáctica, evaluación del aprendizaje, dominio del tema y metacognitiva a través de indicadores clave dentro de las citadas categorías." (UTSEM, 2025) [4]

1.6 Importancia de la evaluación docente en la educación superior

La UNIR enfoca la importancia a: "El proceso de enseñanza-aprendizaje requiere un seguimiento continuo de sus avances con el objetivo de detectar a tiempo aquellas iniciativas o metodologías que no están teniendo el resultado deseado y corregir aquellas fallas o errores que se encuentren. La evaluación de los maestros y profesores, lejos de pretender ser una crítica a su trabajo o limitar su libertad de cátedra, se configura como un proceso para mejorar el desempeño de su labor y garantizar que se alcanzan los objetivos educativos que se ha marcado un centro educativo. El alumno, su bienestar y su aprendizaje, está en el centro de esta concepción." (UNIR, 2025) [5]

La Nueva Escuela Mexicana (NEM) se encarga de brindar calidad en la enseñanza desde el nivel básico hasta medio superior, busca lograr "Que todas las y los estudiantes tengan derecho a recibir una educación de excelencia, inclusiva, pluricultural, colaborativa y equitativa a lo largo de su trayecto formativo." (María Elena Pérez Campuzano, 2023) [6], donde la misma realiza evaluaciones a los docentes cada cuatro años para cualificar sus conocimientos. Sin embargo, al tratarse de educación superior, esta institución no tiene ese poder. En cambio,

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

cada universidad debe cumplir con las normas de calidad incluyendo la evaluación docente como medida de apoyo.

1.7 ¿Cómo apoya la evaluación docente en el cumplimiento de la ISO 9001?

Como lo indica la norma 9001:2015 la calidad se mide con la finalidad de mejorar. Para esto la UTSEM implementa la evaluación docente como medio para conocer la experiencia de los alumnos dentro del aula y tomar acciones para mejorar el nivel de aprendizaje de la institución. Ya que, al contar con docentes mejor preparados, los alumnos resuelven mejor sus dudas, aprenden de mejor manera y el enfoque brindado no es solo dentro del aula si no que se puede enfocar al mundo laboral. Así como los docentes pueden conocer sus debilidades convirtiéndolas en oportunidades y a su vez trabajar en ellas para su mejora contante.

1.8 Tecnología utilizada

PHP

Según el manual de (PHP, 2001) [7]: "PHP, acrónimo de "PHP: Hypertext Preprocessor", es un lenguaje de 'scripting' de propósito general y de código abierto que está especialmente pensado para el desarrollo web y que puede ser embebido en páginas HTML. Su sintaxis recurre a C, Java y Perl, siendo así sencillo de aprender. El objetivo principal de este lenguaje es permitir a los desarrolladores web escribir dinámica y rápidamente páginas web generadas; aunque se puede hacer mucho más con PHP."

SQL

(Data Science, 2021) [8]

(Data Science, 2021) [8] "SQL o «Structured Query Language» es un lenguaje de programación que permite manipular los datos y los sistemas de bases de datos relacionales. Este lenguaje se utiliza principalmente para comunicarse con las bases de datos con el fin de gestionar los datos que contienen.

En particular, permite almacenar, manipular y encontrar estos datos. También es posible realizar consultas, actualizar datos, reorganizarlos o incluso crear y modificar el esquema y la estructura de un sistema de base de datos y controlar el acceso a sus datos." (Data Science, 2021) [8]

Java Script

(EBAC, 2023) [9] "JavaScript o JS es un lenguaje de programación diseñado para escribir las partes Front End (de la parte del cliente) y Back End (de la parte del servidor) de sitios web y aplicaciones móviles. Es un lenguaje de alto nivel, legible para los humanos, pero no requiere un compilador para traducirlo al lenguaje de máquina. El código se interpreta y se ejecuta directamente en un navegador web, lo que facilita y acelera la interacción con el usuario.

JavaScript es un lenguaje de scripts, es decir, de secuencias de comandos. Permite agregar muchas funcionalidades a las páginas web haciéndolas más interactivas, útiles y atractivas para el usuario. Algunos ejemplos de contenido dinámico son menús desplegables, formularios, galerías de fotos, gráficos animados y más." (EBAC, 2023) [9]

HTML

"HTML5 es la última versión de HyperText Markup Language (Lenguaje de Marcado de Hipertexto). Combina tres tecnologías web: HTML, para construir la estructura de la página; CSS, para mejorar la presentación; y JavaScript, para agregar funcionalidad a los elementos HTML. Sus etiquetas o marcas hacen que textos, imágenes y elementos multimedia se visualicen correctamente en la pantalla, y que las páginas web tengan un formato unificado, estandarizado y sean compatibles con distintos navegadores, como Chrome, Edge, Firefox y Safari." (EBAC, 2023) [10]

CSS

"Cascading Style Sheets (CSS) es un lenguaje de programación que sirve para determinar el diseño de los documentos electrónicos. Con la ayuda de unas sencillas instrucciones -presentadas en forma de código fuente claro-, los elementos del sitio web, como el diseño, el color y la tipografía, pueden adaptarse como se desee. Gracias a las hojas de estilo en cascada, la estructura semántica y el contenido del documento no se ven afectados. CSS surgió a mediados de la década de 1990 y ahora se considera el lenguaje de hojas de estilo estándar en Internet." (IONOS, 2022) [11]

Bootstrap

"Bootstrap es un framework que permite a los desarrolladores web construir páginas web responsives de una forma más rápida y sencilla. En este sentido, proporciona un conjunto de componentes y plantillas CSS, HTML y JavaScript que cualquiera puede utilizar o modificar de manera gratuita." (Santander Universidades, 2023) [12]

Diseño responsivo

De acuerdo con (Universidad Europea, 2024) [13]: "El diseño responsive es un enfoque de programación que facilita la adaptación automática de un sitio web al tamaño y la disposición de los dispositivos que utilizan los usuarios. Los sitios web responsivos pueden transformarse para proporcionar una experiencia óptima a los visitantes que acceden a las webs desde sus smartphones, tabletas y ordenadores de escritorio."

Gestión de base de datos

"Un sistema de gestión de bases de datos o DBMS permite a los usuarios controlar, actualizar, crear y eliminar datos en una base de datos conforme a sus necesidades. Algunos ejemplos son Microsoft Access o FileMaker Pro. Su comportamiento es similar al de una interfaz por lo que

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

resulta muy sencillo trabajar con este tipo de sistemas de gestión.” (Facultad de Ciencias y Tecnología, 2023) [14]

MySQL
“MySQL es un sistema de administración de bases de datos relacionales. Como sistema de administración de bases de datos relacionales, puede usar MySQL para almacenar y administrar datos mediante tablas. Puede crear tablas y definir relaciones entre ellas. También puede utilizar varias técnicas, como índices, transacciones y normalización, para almacenar y recuperar datos con coherencia y precisión.” (AWS, 2025) [15]

DESARROLLO

2.1 Proyectos en la UTSEM - TI

Dentro de la UTSEM, la carrera de Tecnologías de la Información (TI) ha desarrollado múltiples proyectos orientados a la mejora de los procesos administrativos y académicos. Entre estos, destacan plataformas de gestión escolar, aplicaciones para el seguimiento del desempeño estudiantil y herramientas de aprendizaje en línea.

El SED se suma a esta lista como una solución que optimiza la evaluación docente y aporta valor a la comunidad académica brindando seguridad a la información recopilada y facilitando la consulta de la misma.

2.2 Proyecto Evaluación Docente

El proyecto de Evaluación Docente en la UTSEM busca proporcionar un mecanismo objetivo y confiable para medir la calidad de la enseñanza. Los alumnos, a través del SED, califican a sus docentes en aspectos como metodología de enseñanza, claridad en la exposición de los temas, puntualidad y capacidad para resolver dudas.

Los resultados de estas evaluaciones se promedian y analizan, permitiendo generar informes que contribuyen a la toma de decisiones institucionales.

2.3 Sistema de Evaluación Docente

Como se mencionó anteriormente, el sistema se desarrolló con la intención de innovar el proceso de evaluación docente, incluyendo tecnología en los procesos de calidad, por esta razón estudiantes de estadía de la carrera de Tecnologías de la Información en conjunto con un docente responsable se diseñó el SED.

El SED está diseñado con una interfaz amigable y accesible para los estudiantes. Sus principales funcionalidades incluyen:
• Registro y autenticación de alumnos.
• Acceso a la lista de docentes que impartieron clases en el periodo evaluado.
• Cuestionario de 21 preguntas estructuradas para medir distintos aspectos del desempeño docente.
• Generación de reportes individuales y grupales de evaluación.
• Identificación del docente mejor evaluado y análisis de comentarios adicionales de los alumnos.

2.4 Presentación del SED

El sistema consta de cuatro tipos de usuario (director académico, jefe de carrera, administrador y alumno)., los cuales tienen los siguientes permisos:

Vista alumno
Cuenta con un inicio de sesión como medida de seguridad para limitar el acceso a estudiantes únicamente. Después de iniciar sesión inicia de manera directa el cuestionario de la evaluación docente. Mismo donde aparecen todos los docentes que tuvo en ese cuatrimestre con la rúbrica de evaluación.

Figura 24. Formulario evaluación - Referencia: SED UTSEM, 2025

Vista administrador
Todos los perfiles tienen una validación mediante inicio de sesión, brindando seguridad en el acceso a los datos y modificaciones del sistema. Sus funciones son: dar de alta las materias y profesores, asigna las materias a los docentes responsables, abre el ciclo de evaluación y genera reportes de los alumnos pendientes de realizar la evaluación y alumnos que ya realizaron la misma.

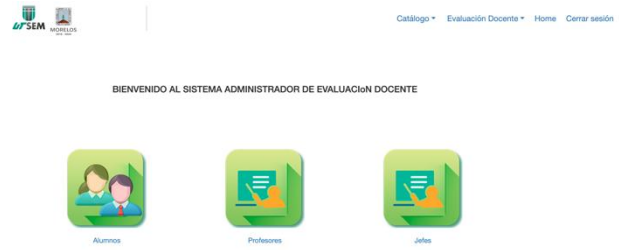


Figura 25. Reporte de administrador- Referencia: SED UTSEM, 2025

Vista jefe de carrera
Puede ver que docentes han consultado sus resultados de la evaluación, ve los comentarios que colocan los alumnos sobre cada uno los docentes, genera reportes por promedio de cada docente y por materia, puede ver una descripción detallada de la calificación obtenida en cada pregunta por docente.

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

REPORTE DOCENTE: JOSE LUIS ARROYO ANICA
PERIODO: SEPTIEMBRE - DICIEMBRE , AÑO: 2024 PE: TSU Tecnologías de la Información y Comunicación

Exportar a PDF

NÚMERO	PREGUNTA	Fundamentos de Redes (1° A)	Promedio numérico	Promedio letra
1	¿Asistió regularmente a clases y fue puntual?	93.64	93.64	DE
2	¿Exploró mis conocimientos previos al iniciar un tema?	91.82	91.82	DE
3	Al inicio del curso, ¿Dio a conocer y explicó las políticas a seguir relacionadas con la evaluación, tareas, exámenes, proyectos, disciplina, etc. del curso, y las cumplió?	93.64	93.64	DE
4	¿Su forma de explicar proporciono una idea clara de los conocimientos y sirvio para vincular nuevos temas?	90.91	90.91	DE
5	¿Abordó los temas estableciendo ejemplos prácticos o basados en situaciones reales que me permitieron aprender y desarrollar mi creatividad?	91.82	91.82	DE
6	¿Utilizó material educativo que apoyó el proceso de enseñanza-aprendizaje?	93.64	93.64	DE
7	Las actividades realizadas durante el curso en relación con el programa, ¿Mostraron organización y orden?	93.64	93.64	DE
8	¿Se mostró dispuesto a mantener una comunicación y un intercambio académico con el grupo?	95.45	95.45	DE
9	¿Trató a los estudiantes con ética y respeto, propiciando un ambiente adecuado para el aprendizaje?	97.27	97.27	AU
10	¿Estimuló mi interés por investigar y profundizar en conocimientos nuevos promoviendo la consulta de material bibliográfico (libros, revistas, bases de datos) como apoyo a las actividades del aprendizaje?	90.00	90.00	DE
11	¿Mostró disposición para aclarar dudas y otorgar asesor?as individuales y/o colaborativas?	95.45	95.45	DE

Figura 26. Reporte general- Referencia: SED UTSEM, 2025

Vista director académico
Su función principal es la generación de reportes. Puede realizarlos de resultados generales de todos los programas educativos, generales por docentes, observa los promedios altos y bajos de toda la institución y puede ver todos los detalles de los docentes, materias, resultados, etc.

VER REPORTES POR PROMEDIO

PERIODO: MAYO - AGOSTO AÑO: 2025 GENERAR / BUSCAR REPORTE

Exportar a PDF

PERIODO: MAYO - AGOSTO | AÑO: 2024

Show 10 entries Search:

NÚMERO	PROFESOR	PROMEDIO
Buscar por...NÚMERO	Buscar por...PROFESOR	Buscar por...PROMEDIO
1	JAIME ACOSTA YARA	98.41
2	MANSO ESPÃ□N JOSEFA	98.40
3	RODRIGUEZ DOMINGUEZ DIEGO ALEJANDRO	98.21
4	RUIZ FUENTES ALVARO	98.03
5	MALDONADO VALDEZ MANUEL ANTONIO	97.42
6	MANJARREZ BRITO BENJAMIN	97.23
7	SOTELO ALEMAN RICARDO ITZCOATL	97.14
8	CASTILLO JIMENEZ SANTIAGO	97.06

Figura 27. Reportes generales- Referencia: SED UTSEM, 2025

Durante el periodo de evaluación se pueden realizar reportes constantemente en tiempo real. Como forma de apoyo al seguimiento durante la realización de la misma con la finalidad de que ningún alumno se quede sin realizar la evaluación.

2.5 Método de recolección de datos
Principalmente se ocupa la encuesta realizada cada cuatrimestre. Pero para realizar el sistema es necesario contar con la plantilla docente misma que es brindadas por los jefes de carrera al administrador y la plantilla estudiantil brindada por servicios escolares.

2.6 Enfoque de la investigación
Mixto. Debido a que las preguntas evaluadas son en cualidad, pero se reflejan en cantidades numéricas para su análisis.

2.7 Diseño de la investigación
La evaluación realizada en diciembre del 2024 fue con una población de 47 docentes evaluados.

Las carreras analizadas y con las que cuenta la universidad son cinco:

- Agricultura Sustentable y Protegida (ASP)
- Logística Internacional (ILI)
- Tecnologías de la Información (TIC)
- Gastronomía (GAST)
- Turismo (TUR)

Estas carreras a su vez se dividen en dos niveles, Técnico Superior Universitario y Licenciaturas o Ingenierías. Quedando un total de diez:

- Técnico Superior Universitario
  - Agricultura Sustentable y Protegida
  - Operaciones Comerciales Internacionales área Negocios Internacionales
  - Tecnologías de la Información Área Entornos Virtuales y Negocios Digitales
  - Gastronomía
  - Turismo área Hotelería

- Ingeniería / Licenciatura
  - Agricultura Sustentable y Protegida
  - Logística Internacional
  - Tecnologías de la Información e Innovación Digital
  - Gastronomía
  - Gestión y Desarrollo Turístico

Procedimiento de análisis de datos
Los datos se analizan mediante aritmética en general. Previamente se asigna una calificación numérica a las repuestas y el total de preguntas evaluadas con el mayor puntaje dan como resultado una calificación de 100.

Se utilizan operaciones básicas como lo son: suma, multiplicación y división para obtener un promedio. Las preguntas en las que el docente obtenga promedios bajos son detectadas como áreas de oportunidad y mejora.

DISCUSIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

3.1 Impacto de la evaluación docente
El lanzamiento del SED ha permitido mejorar el proceso de evaluación docente dentro de la UTSEM. Su implementación ha facilitado la recopilación de datos y su análisis en tiempo real, brindando información valiosa para el seguimiento y la mejora continua en la calidad educativa. Con este sistema, la UTSEM fortalece su compromiso con la excelencia académica y la transparencia en la evaluación de su personal docente.

Las medidas tomadas de acuerdo a los resultados son los siguientes.

A los mejores evaluados:

- Incentivar con reconocimientos.
- Se les asignan cursos de capacitación.
- Se toma en cuenta para la asignación de materias el siguiente cuatrimestre.

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

- Se hacen públicos a la comunidad estudiantil mediante un cuadro de honor interno.

Los promedios bajos:

- Son canalizados con el director académico y en su defecto se mandan a capacitaciones o cursos.

3.2 Comparaciones

La comparación más significante es el tiempo de obtención de datos. Debido a que, al tener una base de datos ligada al sistema, se ahorra el paso de la captura de las evaluaciones. En la que se detectó que al menos el tiempo se duplicaba cuando se realizaba de manera manual.

Por otra parte, los reportes son generados cada que se requieran y se tiene un histórico de las evaluaciones realizadas en periodos anteriores para consulta de los mismos.

También se mejoró la seguridad de los datos al contar con usuarios y poder detectar las modificaciones realizadas. Al garantizar que todos los estudiantes cumplan con dicha evaluación se obtiene un panorama completo de la percepción docente.

Se obtuvo una gran cantidad en el ahorro de papel, ya que al usar el sistema este se elimina por completo en los alumnos, únicamente se utiliza en caso de ser necesaria la entrega de reportes impresos.

3.3 Análisis muestra

En la figura 5 se analizaron los docentes con mejores promedios por carrera donde se observa que la carrera con mejores promedios es Técnico Superior Universitario (TSU) en TI con sus dos grupos, seguido de Ingeniería en TI con un grupo y Licenciatura en turismo con un grupo. Es decir que el docente evaluado solo brinda clases en un grupo y no en ambos. Con lo que se puede concluir que los docentes mejor evaluados están en el plan educativo de tecnologías. Y solo siete de las diez carreras entran con los docentes mejor promediados, por lo tanto, se puede realizar un análisis con los tres grupos restantes para conocer la causa de sus evaluaciones docentes.

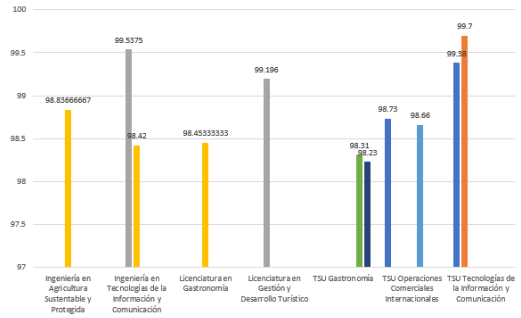


Figura 28. Promedios por carrera- Referencia: Elaboración propia, 2025

En la Figura 6, se analizan los docentes con los promedios más bajos. Donde se puede observar que Ingeniería en logística en un grupo (decimo) es el que tiene a los docentes más bajos seguido de licenciatura en gastronomía con el grupo de decimo y turismo con el grupo de séptimo. Por lo tanto, se puede concluir que las ingenierías y licenciaturas tienen un margen de diferencia comparado con los TSU. El nivel de ingenierías y licenciaturas comienza a partir del séptimo cuatrimestre mientras que los anteriores pertenecen al nivel de TSU. Diferenciados en la imagen por ser escritos con número y letra.

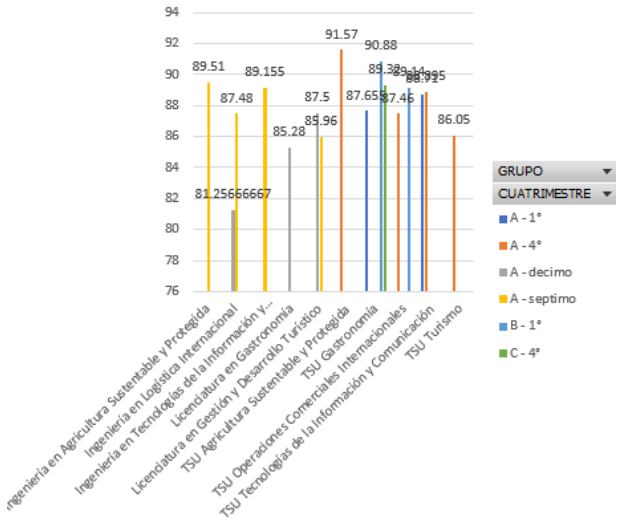


Figura 29. Docentes con promedios bajos por carrera- Referencia: Elaboración propia, 2025

La materia mejor evaluada de toda la institución fue la de gestión de proyectos, donde el cien por ciento de los docentes obtuvo el cien de promedio en la evaluación. En esta se evaluó a un solo docente que es el responsable de impartir esta materia. Figura7.

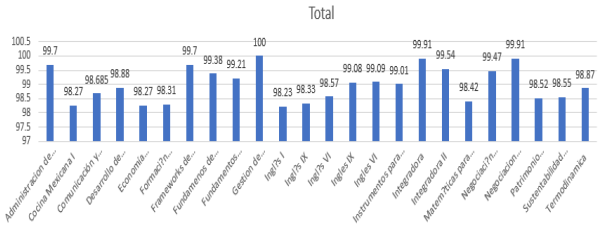


Figura 30. Materia mejor evaluada- Referencia: Elaboración propia, 2025

La materia con docentes de promedios más bajos se encuentra en integradora II, dicha materia es impartida en todos los programas educativos con diferentes docentes en cada grupo, por lo tanto, esa materia tiene áreas de oportunidad y se puede atender la situación con cada uno de los docentes que la imparten para tomar acciones de acuerdo a los comentarios estudiantiles.

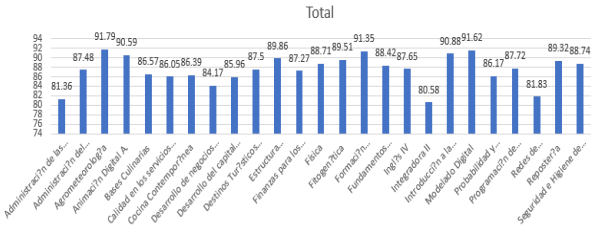


Figura 31. Materia con peor promedio en docentes. Referencia: Elaboración propia, 2025

3.4. Obtención de resultados
Fórmulas utilizadas:

Promedio por materia

Total de preguntas / número de preguntas = resultado /número de alumnos = promedio por materia.

Ec. (1)

Promedio general.
Suma de promedio por materia / carga académica = promedio general.

Ec. (2)

Promedio por profesor en programa educativo.
Suma de promedio por materia / carga académica del PE = promedio general en programa educativo

Ec. (3)

Promedio por TSU en programa educativo
Suma del promedio general en programa educativo/número de docentes

Ec. (4)

Promedio por Ingeniería/licenciatura en programa educativo
Suma del promedio general en programa educativo/número de docentes

Ec. (5)

Reconocimiento general por ciclo general.
Para ser partícipe a este reconocimiento el profesor debió a ver participado en el ciclo completo los siguientes cuatrimestres:

Enero-abril, mayo-agosto y septiembre-diciembre del año anterior inmediato

Fórmula:
Promedio general por cuatrimestre / 3 = promedio general.

Ec. (6)

3.5. Obtención de comentarios

Los comentarios proporcionados por los alumnos ofrecen una perspectiva directa sobre la experiencia educativa, convirtiéndose en un recurso invaluable para la retroalimentación y la mejora continua.

Comentarios en la Evaluación Docente como Oportunidad.

Los comentarios cualitativos permiten a los docentes reflexionar sobre su desempeño y detectar aspectos específicos que pueden ser optimizados. A diferencia de las valoraciones cuantitativas, los comentarios detallan situaciones concretas, promoviendo el autoconocimiento y la adaptabilidad pedagógica. Además, constituyen una oportunidad para fortalecer la comunicación entre docentes y estudiantes, fomentando un ambiente de confianza y colaboración.

Los comentarios como **fortaleza** en el proceso educativo desde una perspectiva institucional, la recopilación y análisis de los comentarios pueden ser utilizados para diseñar programas de capacitación docente enfocados en las necesidades reales del alumnado. Asimismo, permiten reconocer y potenciar las buenas prácticas educativas, fortaleciendo la calidad de la enseñanza y promoviendo una cultura de mejora continua.

Los comentarios en la evaluación docente son una herramienta poderosa para la transformación educativa. Su análisis y utilización efectiva pueden convertir la retroalimentación en una ventaja competitiva para las instituciones académicas, mejorando la experiencia de aprendizaje de los estudiantes y el desarrollo profesional del profesorado. Figura 9

Figura 32. Comentarios de los estudiantes- Referencia: SED UTSEM, 2025

3.6 valoración para repetir curso con el docente.

La percepción estudiantil sobre la calidad docente es un factor determinante en la experiencia educativa. Dentro de la evaluación docente, uno de los indicadores clave es la disposición de los alumnos a repetir un curso con el mismo profesor. Se analiza los resultados de dicha valoración, explorando su impacto en la mejora de la enseñanza y el fortalecimiento del vínculo pedagógico.

La evaluación docente busca medir la efectividad del profesorado en el aula y mejorar la calidad de la enseñanza. Entre los diversos indicadores, la pregunta sobre si los estudiantes desean repetir curso con el mismo docente

proporciona una perspectiva directa sobre la aceptabilidad y eficacia de su metodología de enseñanza.

La recopilación de estos datos permite identificar patrones de preferencia y elementos de mejora en la docencia.

Análisis de los Resultados

Los resultados de esta valoración pueden dividirse en tres categorías principales:

Alta preferencia: Indica que los estudiantes consideran que el docente tiene un impacto positivo en su aprendizaje, destacando su metodología, actitud y claridad en la enseñanza.

Neutralidad: Sugiere que el docente cumple con los objetivos básicos, pero no genera un impacto significativo en la experiencia educativa del estudiante.

Baja preferencia: Señala que existen áreas de oportunidad en la práctica docente, que pueden estar relacionadas con la metodología utilizada, la comunicación o el nivel de exigencia en el curso.

Oportunidades de Mejora y Fortalezas

La valoración de repetir curso con el docente proporciona información valiosa para el desarrollo profesional del profesorado. Identificar patrones en la respuesta estudiantil permite a los docentes adaptar sus estrategias pedagógicas para mejorar la satisfacción y el rendimiento académico.

Desde una perspectiva institucional, estos datos pueden ser utilizados para diseñar programas de formación docente orientados a mejorar la calidad educativa. Asimismo, reconocer a los docentes con alta preferencia ayuda a fortalecer el prestigio académico y la motivación dentro del entorno educativo.

La evaluación de la disposición de los estudiantes a repetir un curso con el mismo docente es un indicador relevante en la medición del impacto educativo. Su análisis permite identificar fortalezas y oportunidades de mejora en la enseñanza, contribuyendo al desarrollo profesional del docente y a la optimización de la experiencia de aprendizaje de los estudiantes.

VER REPORTES POR RESPUESTA SI / NO

PERIODO: SEPTIEMBRE - DICIEMBRE AÑO: 2024 GENERAR / BUSCAR REPORTE

Exportar a PDF

PERIODO: SEPTIEMBRE - DICIEMBRE | AÑO: 2024

#	PROFESOR	GRADO	GRUPO	PE	MATERIA	SI %	NO %	SI	NO
1	PEREZ GONZALEZ JESUS ORLANDO	4°	A	TSU Agricultura Sustentable y Protegida	Agricultura Protegida	98	2	65.1	
2	PEREZ GONZALEZ JESUS ORLANDO	4°	A	TSU Agricultura Sustentable y Protegida	Fitopatologia	98	2	65.1	
3	ARELLANO ORHUELA ARTURO	4°	A	TSU Agricultura Sustentable y Protegida	Calculo integral	92	8	61.5	
4	ARIOS CARO LILIANA	4°	A	TSU Agricultura Sustentable y Protegida	Fruticultura Sustentable	92	8	60.5	
5	CASTILLO JIMENEZ SANTIAGO	decimo	A	Licenciatura en Gastronomia	Analisis e interpretación financiera	97	3	60.2	
6	ESPINOSA MARTINEZ JOSE ARTURO	4°	A	TSU Agricultura Sustentable y Protegida	Fisica Aplicada	91	9	59.6	
7	GALINDO RODRIGUEZ GERARDO	4°	A	TSU Agricultura Sustentable y Protegida	Ingles IV	89	11	58.7	
8	REUL PINEDA ISRAEL	4°	C	TSU Gastronomia	Fundamentos de Vitivinicultura	96	4	54.2	
9	REUL PINEDA ISRAEL	4°	B	TSU Gastronomia	Fundamentos de Vitivinicultura	100	0	53.0	
10	MALDONADO VALDEZ MANUEL ANTONIO	4°	B	TSU Gastronomia	Mercadotecnia de Servicios Gastronómicos	100	0	53.0	
11	ALVEAR SALAZAR FERNANDO ISAEL	4°	A	TSU Agricultura Sustentable y Protegida	Agrometeorologia	80	20	52.13	
12	SALAZAR JOAQUIN ALEJANDRO	4°	C	TSU Gastronomia	Frances I	93	7	52.4	
13	MENDOZA VARGAS ADRIANA GUADALUPE	4°	B	TSU Gastronomia	Repostería	96	4	51.2	
14	CADENA HERNANDEZ CRISTIAN	1°	B	TSU Gastronomia	Bases Culinarias	100	0	49.0	
15	RUIZ FUENTES ALVARO	septimo	A	Licenciatura en Gastronomia	Bebidas destiladas Mexicanas	94	6	49.3	
16	LANDA MARACA LAURA	4°	A	TSU Operaciones Comerciales Internacionales	Derecho Fiscal	92	8	49.4	

Figura 33 Valoración.- Referencia: SED UTSEM, 2025

.

Limitaciones

El sistema solo permite la gestión de los datos ingresados por los alumnos, sin embargo, no puede controlar que lo que el alumno ingresa sea correcto o si se tiene alguna preferencia hacia algún docente fuera del desempeño en el aula.

CONCLUSIONES

El SED se posiciona como una herramienta clave para la evolución educativa de la UTSEM, promoviendo una cultura de mejora continua basada en la retroalimentación de los alumnos. Su uso eficiente permite a la institución tomar decisiones informadas y fortalecer el desarrollo profesional de sus docentes, mejorando la experiencia de los alumnos dentro del aula y reduciendo los tiempos en el análisis y captura de datos.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece la colaboración del Ing. Benjamin Manjarrez Brito, quien fue el responsable de recopilar los requisitos del sistema y fungir como asesor en el desarrollo del mismo. También agradecemos a la estudiante Tania Ailin Antonio Izaguirre de la carrera de tecnologías de la información por realizar el sistema.

BIBLIOGRAFÍA

[1] AWS. (20 de febrero de 2025). *¿Cuál es la diferencia entre SQL y MySQL?* Obtenido de Amazon Web Services: https://aws.amazon.com/es/compare/the-difference-between-sql-and-mysql/

[2] Data Science. (03 de diciembre de 2021). *SQL: todo lo que necesitas saber sobre el lenguaje de programación de bases de datos*. Obtenido de Data Science: https://datascientest.com/es/sql-todo-lo-que-necesitas-saber-sobre-el-lenguaje-de-programacion-de-bases-de-datos

[3] DE CHAPARRO, G. J., ROMERO F., L. J., RINCÓN C., E., & JAIME G., L. H. (2008). Evaluación de desempeño docente. *Cuadernos de Lingüística Hispánica, núm. 11*, 172.

[4] EBAC. (01 de junio de 2023). *¿Qué es HTML5 y para qué sirve?* Obtenido de Escuela Británica de Artes Creativas y Tecnología: https://ebac.mx/blog/que-es-html5

[5] EBAC. (12 de septiembre de 2023). *¿Qué es JavaScript y cómo funciona?* Obtenido de Escuela Británica de Artes Creativas y Tecnologia: https://ebac.mx/blog/que-es-javascript

[6] Facultad de Ciencias y Tecnología. (12 de mayo de 2023). *¿Qué es la Gestión de bases de datos?* Obtenido de Universidad Isabel I: https://www.ui1.es/blog-ui1/que-es-la-gestion-de-bases-de-datos

[7] Graciela Cordero Arroyo, E. L. (diciembre de 2013). *La evaluación docente en educación básica en México: panorama y agenda pendiente.* Obtenido de Sinéctica: https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_artt

ext&pid=S1665-109X2013000200008#:~:text=La%20evaluaci%C3%B3n%20de%20la%20docencia,atenci%C3%B3n%20de%20otros%20esfuerzos%20evaluativos

[8] IONOS. (21 de junio de 2022). *¿Qué es CSS? Definición y aplicación*. Obtenido de IONOS: https://www.ionos.mx/digitalguide/paginas-web/diseno-web/que-es-css/

[9] ISO. (septiembre de 2015). *ISO 9001:2015*. Obtenido de ISO: https://www.iso.org/es/contents/data/standard/06/20/62085.html#:~:text=%C2%BFQu%C3%A9%20es%20ISO%209001?,impecables%20una%20y%20otra%20vez.

[10] María Elena Pérez Campuzano, R. M. (2023). La Nueva Escuela Mexicana (NEM): orientaciones para padres y comunidad en general. En S. d. Media. Ciudad de México (CDMX): Secretaria de educación pública.

[11] PHP. (2001). *Manual de PHP*. Obtenido de PHP: https://www.php.net/manual/es/preface.php

[12] Santander Universidades. (26 de junio de 2023). *¿Qué es Bootstrap y cómo funciona este framework?* Obtenido de Santander Open Academy: https://www.santanderopenacademy.com/es/blog/que-es-bootstrap.html

[13] UNIR. (2025). *La evaluación de la práctica docente: importancia y cómo implementarla*. Obtenido de Universidad Internacional de La Rioja: https://mexico.unir.net/noticias/educacion/evaluacion-practica-docente/

[14] Universidad Europea. (20 de febrero de 2024). *¿Qué es el diseño responsive?* Obtenido de Universidad Europea: https://creativecampus.universidadeuropea.com/blog/que-es-diseno-responsive/#:~:text=El%20dise%C3%B1o%20responsive%20es%20un,dispositivos%20que%20utilizan%20los%20usuarios.

[15] UTSEM. (2025). *Evaluación Docente*. Obtenido de UTSEM: https://www.utsem-morelos.edu.mx/index.php/es/alumnos/evaluacion-docente

AUTORIZACIÓN Y RENUNCIA.

Los autores del presente artículo autorizan al TecNM/Instituto Tecnológico de Zacatepec para publicar el escrito en el libro electrónico del CITID 2025. El TecNM/ITZ o los editores no son responsables ni por el contenido ni por las implicaciones de lo que está expresado en el escrito.

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

DISEÑO DE UNA ESTRATEGIA DE CONTROL PARA UN MOTOR RECIPROCANTE MAGNÉTICO

Raúl Alegría-Gómez[1], Arturo D. Espinosa Pedroza[2], Jarniel García-Morales[3], Gerardo Vicente Guerrero-Ramírez[4], Manuel Adam-Medina[5]

[1] Ing. Electrónico Tecnológico Nacional de México/CENIDET, Interior Internado Palmira S/N, Col. Palmira, Cuernavaca, Mor. México. E-mail: m24ce018@cenidet.tecnm.mx, 62490.
[2] MC. en Ciencias Tecnológico Nacional de México/CENIDET, Interior Internado Palmira S/N, Col. Palmira, Cuernavaca, Mor. México. E-mail: d22ce059@cenidet.tecnm.mx, 62490.
[3] Dr. en Ciencias Tecnológico Nacional de México/CENIDET, Interior Internado Palmira S/N, Col. Palmira, Cuernavaca, Mor. México. E-mail: jarniel.gm@cenidet.tecnm.mx, 62490.
[4] Dr. en Ciencias Tecnológico Nacional de México/CENIDET, Interior Internado Palmira S/N, Col. Palmira, Cuernavaca, Mor. México. E-mail: gerardo.gr@cenidet.tecnm.mx, 62490.
[5] Dr. en Ciencias Tecnológico Nacional de México/CENIDET, Interior Internado Palmira S/N, Col. Palmira, Cuernavaca, Mor. México. E-mail: manuel.am@cenidet.tecnm.mx, 62490.

Resumen– Este artículo destaca la importancia de la regulación de la velocidad en los motores alternativos magnéticos (MRM), que se están convirtiendo en una alternativa viable a los motores convencionales de combustión interna para reducir las emisiones contaminantes. El estudio compara dos estrategias de control diferentes para lograr una regulación eficiente de la velocidad. El primer método emplea un controlador neuronal que ajusta dinámicamente los ángulos de energización manteniendo una tensión de alimentación constante, lo que permite un rendimiento adaptativo. El segundo método utiliza un controlador PID que regula la tensión de alimentación manteniendo fijos los ángulos de energización, basándose en técnicas de control clásicas. Analizando el comportamiento de cada método, esta investigación pretende determinar la estrategia de control más adecuada para las aplicaciones prácticas. Los resultados contribuyen al avance de los MRM como solución respetuosa con el medio ambiente y energéticamente eficiente para diversas aplicaciones industriales y tecnológicas.
Palabras Clave:*Control PID, Control Neuronal, MRM, Euler-lagrange.*

Abstract--This paper highlights the importance of speed control in magnetic reciprocating engines (MRM), which are becoming a viable alternative to conventional internal combustion engines for reducing pollutant emissions. The study compares two different control strategies to achieve efficient speed regulation. The first method employs a neural controller that dynamically adjusts energization angles while maintaining a constant supply voltage, enabling adaptive performance. The second approach uses a PID controller that regulates the supply voltage while keeping the energization angles fixed, based on classical control techniques. By analyzing the behavior of each method, this research aims to determine the most suitable control strategy for practical applications. The findings contribute to the advancement of MRMs as an environmentally friendly and energy efficient solution for various industrial and technological applications.
Key words – *PID Control,Neural Control,MRM,Euler-Lagrange.*

INTRODUCCIÓN

A lo largo de la historia, los motores de combustión interna (MCI) han desempeñado un papel vital en el desarrollo de la humanidad, satisfaciendo necesidades esenciales en el transporte, la agricultura y la industria. Desde su invención en el siglo XIX hasta la actualidad, el parque vehicular mundial ha crecido exponencialmente. En México, se estima que existen 40.59 millones de vehículos en circulación, de los cuales el 99.5% corresponde a modelos con MCI y el resto a vehículos eléctricos y/o híbridos. Es evidente que los MCI dominan el mercado actual, y su principio de funcionamiento se basa en la combustión de hidrocarburos como la gasolina y el diésel. Sin embargo, esta combustión es una de las principales fuentes de emisiones contaminantes, ya que produce subproductos como el dióxido de carbono (CO_2), óxidos de nitrógeno (NO_x) [1] e hidrocarburos no quemados (HC), los cuales afectan la calidad del aire, causan problemas respiratorios y contribuyen al cambio climático.

En respuesta a la creciente preocupación ambiental y a la necesidad de reducir las emisiones contaminantes, se han desarrollado diversas alternativas tecnológicas. Entre ellas, destacan los vehículos eléctricos e híbridos, que utilizan motores eléctricos alimentados por baterías, así como motores térmicos en el caso de los híbridos para lograr una simbiosis tecnológica. Otras estrategias incluyen el uso de combustibles alternativos como el hidrógeno [2], el etanol [3] y el biodiésel. Adicionalmente, estudios recientes han explorado la posibilidad de mejorar la eficiencia de los MCI mediante la adición de ciclos térmicos adicionales, como el aprovechamiento del calor residual y los gases de escape para generar energía mediante un ciclo de vapor [4].

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

Una propuesta innovadora dentro de este contexto es el desarrollo de los motores reciprocantes magnéticos (MRMs), los cuales emplean componentes de los motores tradicionales, promoviendo así la reutilización de materiales. Estos motores reemplazan el uso de hidrocarburos con actuadores magnéticos para generar la fuerza necesaria para el movimiento lineal del cilindro, el cual se transforma en un movimiento rotatorio mediante el mecanismo de biela-manivela-corredera. Investigaciones previas han explorado el potencial de los motores reciprocantes magnéticos (MRMs) como alternativa a los motores de combustión interna (MCI). Ríos et al. [5] se enfocaron en la formulación del modelo matemático y validación experimental de un MRE, destacando la importancia de los ángulos de energización para optimizar la velocidad del motor, mientras que ONF [6] investigó el uso de la repulsión magnética para generar potencia mecánica en un motor de pistón, subrayando el potencial de esta tecnología para reemplazar los motores tradicionales y reducir las emisiones contaminantes.

El control de los MRMs representa un desafío técnico fundamental, ya que su dinámica electromagnética introduce comportamientos no lineales y variaciones en la fuerza generada por los actuadores magnéticos. A diferencia de los motores de combustión interna, donde la combustión sigue ciclos térmicos bien definidos [7], en los MRMs la interacción de los campos magnéticos con los elementos mecánicos exige una regulación precisa para garantizar un desempeño eficiente. La selección del controlador influye no solo en la estabilidad del sistema, sino también en su eficiencia energética, lo que puede determinar la viabilidad de los MRMs como una alternativa real a los motores convencionales.

Para mejorar el desempeño de los MRMs, es crucial el desarrollo de estrategias avanzadas de control. Entre las metodologías más prometedoras se encuentran los controladores PID (Proporcional-Integral-Derivativo) y los controladores neuronales. Los controladores PID han sido ampliamente utilizados en sistemas industriales [8] debido a su simplicidad y efectividad en la regulación de variables como velocidad y posición. No obstante, en sistemas complejos y no lineales como los MRMs, los controladores neuronales ofrecen una alternativa más flexible y adaptativa [9], permitiendo la optimización del desempeño en tiempo real mediante técnicas de aprendizaje automático. En este trabajo, se comparará el desempeño de dos estrategias de control aplicadas a los MRMs: el controlador PID y el controlador neuronal. Se analizarán sus ventajas y limitaciones en la regulación del sistema, evaluando aspectos como estabilidad, precisión y capacidad de adaptación a perturbaciones. Dado que la eficiencia del control influye directamente en el aprovechamiento de la energía en los MRMs, su optimización permitirá minimizar pérdidas y mejorar su desempeño en aplicaciones industriales y de movilidad sustentable [10].

- Análisis y Modelado del MRM:
El motor reciprocante magnético es utilizado en este trabajo aprovechando la estructura fabricada para los motores de combustión Interna. Para su representación matemática se llevará a cabo el desarrollo de la parte mecánica que empieza desarrollándose desde el mecanismo manivela-biela-corredera y su geometría de diseño.

Para desarrollar el modelo dinámico del mecanismo, se utiliza el método de Euler-Lagrange. Sea:

$$T - U = L \qquad \text{Ec. (1)}$$

Donde T y U son la energía cinética y potencial del sistema, respectivamente, y L es el lagrangiano [5].

-Ecuación Euler-Lagrange:
El método de Euler--Lagrange está basado en el intercambio de energía dentro de un sistema.
El método se basa en el Lagrangiano , que es la diferencia de la energía cinética menos la energía potencial.

$$L(q,\dot{q}) \triangleq K(q,\dot{q}) - P(q) \qquad \text{Ec. (2)}$$

Donde: $K(q,\dot{q})$es la energía cinética, $q \in \mathbb{R}^{n}$ son las llamadas coordenadas generalizadas del sistema. Una vez expresado el Lagrangiano en términos de las coordenadas generalizadas y sus derivadas con respecto al tiempo, se aplican las ecuaciones de Euler--Lagrange.

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{q}}\right) - \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial q} = \tau - \tau_f \qquad \text{Ec. (3)}$$

Donde τ son las fuerzas generalizadas y τ_f son las fuerzas disipativas (e.g., fricción) [11].

-Control PID
La combinación de una acción de control proporcional, una acción de control integral y una acción de control derivativa se denomina acción de control proporcional-integral-derivativa (PID). Esta acción combinada tiene las ventajas de cada una de las tres acciones de control individuales. La ecuación de un controlador con esta acción combinada se obtiene mediante:

$$u(t) = K_p e(t) + \frac{K_p}{T_i}\int_0^t e(t)dt + K_p T_d \frac{de(t)}{dt} \qquad \text{Ec. (4)}$$

La función de transferencia es:

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p\left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s\right) \qquad \text{Ec. (5)}$$

Donde: K_p es la ganancia proporcional, T_i es el tiempo integral y T_d es el tiempo derivativo [12].

-Neurona Artificial.
Una neurona es una función no lineal acotada:

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_n;\ w_1, w_2, \dots, w_n) \qquad \text{Ec. (6)}$$

Donde: $\{x_i\}$ son las variables y $\{w_n\}$ son los parámetros o pesos de la neurona.

Las variables de la neurona son usualmente conocidas como entradas. Una neurona artificial está compuesta por un vector de entrada, pesos sinápticos, un valor de umbral, un operador matemático de suma y una función de activación.

El primer modelo matemático de una neurona biológica fue desarrollado por McCulloch y Pitt [13], el cual es el siguiente:

$$y_j = \phi(v_j + \theta_j) \qquad \text{Ec. (7)}$$

$$v_j = \sum_{i=1}^{m} w_{ji} x_i \qquad \text{Ec. (8)}$$

DESARROLLO

En este trabajo se aborda el problema de determinar cuál es el mejor método para controlar la velocidad en el MRM. Comparando la manipulación de ángulos de energización utilizando un controlador neuronal con la manipulación de corriente con un controlador PID.

A) Modelo en Euler lagrange

La formulación Euler-Lagrange del sistema es la siguiente:

$$\frac{d}{dt}\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{\theta}} - \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \theta} + \frac{\partial \mathrm{G}}{\partial \dot{\theta}} = \tau_m \qquad \text{Ec. (9)}$$

- Energía cinética del sistema

$$\begin{aligned} T = {} & \left(\frac{1}{2}\right)(I_C + I_V)\dot{\theta}^2 + \frac{1}{2} m_c h^2 R^2 \dot{\theta}^2 \\ & + \left(\frac{1}{2}\right) I_B \left(\frac{R^2 \cos^{2(\theta)}}{\ell^2 \cos^2(\beta)}\right) \dot{\theta}^2 \left(\frac{1}{2}\right) m_b R^2 \dot{\theta}^2 \\ & \left(k^2 \cos^2(\theta)\sin^2(\theta) + \frac{jR\sin(\theta)\sin(2\theta)}{\ell\cos(\beta)} + \left(\frac{jR}{2\ell}\right)^2 \frac{\sin^2(2\theta)}{\cos^2(\beta)}\right) \\ & + \frac{1}{2} m_p R^2 \dot{\theta}^2 \left(\sin^2(\theta) + \frac{R\sin(\theta)\sin(2\theta)}{\ell\cos(\beta)} + \left(\frac{R}{2\ell}\right)^2 \frac{\sin^2(2\theta)}{\cos^2(\beta)}\right). \end{aligned} \qquad \text{Ec. (10)}$$

- Energía potencial del sistema

$$\begin{aligned} U = {} & -m_c g\, h\, R\cos(\theta) \\ & + m_b g\left(R\cos(\theta) + j\ell\cos(\beta)\right) \\ & + m_p g\left(R\cos(\theta) + \ell\cos(\beta)\right). \end{aligned} \qquad \text{Ec. (11)}$$

- Disipación Lagrangiana.

$$\mathcal{G} = \left(\frac{1}{2}\right)\dot{\theta}^2\left(\mu_1 + \mu_2 R\frac{\cos(\theta)}{\ell\cos(\beta)}\right). \qquad \text{Ec. (12)}$$

Ahora, utilizando las ecuaciones (10), (11), (12) y resolviendo las derivadas lagrangianas y de fricción de la ecuación (9), se obtiene la ecuación dinámica de la parte mecánica del MRM y se expresa mediante la ecuación (13): [5]

$$\begin{aligned} \tau_m & = \ddot{\theta}\Bigg[(I_C + I_V + m_c h^2 R^2) + I_B\left(\frac{R^2\cos^2(\theta)}{l^2\cos^2(\beta)}\right) \\ & + m_b R^2\Bigg(k^2\cos^2(\theta) + \sin^2(\theta) + \frac{jR\sin(\theta)\sin(2\theta)}{l\cos(\beta)} \\ & + \left(\frac{jR}{2l}\right)^2 \frac{\sin^2(2\theta)}{\cos^2(\beta)}\Bigg) \\ & + m_p R^2\Bigg(\sin^2(\theta) + \frac{R\sin(\theta)\sin(2\theta)}{l\cos(\beta)} \\ & + \left(\frac{R}{2l}\right)^2 \frac{\sin^2(2\theta)}{\cos^2(\beta)}\Bigg)\Bigg] \\ & + \dot{\theta}^2\Bigg\{\frac{1}{2} I_B \frac{R^2}{l^2}\left(-\frac{\sin(2\theta)}{\cos^2(\beta)} + \frac{\cos^2(\beta)}{\cos^4(\beta)}\frac{R^2}{l^2}\sin(2\theta)\right) \\ & + \frac{1}{2} R^2 m_b\Bigg[\frac{jR}{l}\Bigg(\frac{2\sin(\theta)\cos(2\theta) + \sin(2\theta)\cos(\theta)}{\cos(\beta)} \\ & + \frac{\sin(\theta)\sin^2(2\theta)}{\cos^3(\beta)}\frac{R^2}{2l^2}\Bigg) \\ & + \left(\frac{jR}{2l}\right)^2\left(\frac{4\sin(\theta)\cos(2\theta)}{\cos^2(\beta)} + \frac{\sin^3(2\theta)R^2}{\cos^4(\beta)l^2}\right) \\ & - k^2\sin(2\theta) + \sin(2\theta)\Bigg] \\ & + \frac{1}{2} R^2 m_p\Bigg[\sin(2\theta) \\ & + \frac{R}{l}\Bigg(\frac{2\sin(\theta)\cos(2\theta) + \sin(2\theta)\cos(\theta)}{\cos(\beta)} \\ & + \frac{\sin(\theta)\sin^2(2\theta)}{\cos\ ^\wedge 3(\beta)}\frac{R^2}{2l^2}\Bigg) \\ & + \left(\frac{R}{2l}\right)^2\left(\frac{4\sin(2\theta)\cos(2\theta)}{\cos^2(\beta)} + \frac{\sin^3(2\theta)}{\cos^4(\beta)}\frac{R^2}{l^2}\right)\Bigg]\Bigg\} \\ & + \dot{\theta}\left(\mu_1 + \mu_2\frac{R\cos(\theta)}{l\cos(\beta)}\right) - m_c g h R\sin(\theta) \\ & + m_b g\left(R\sin(\theta) + \frac{jR^2}{2}\frac{\sin(2\theta)}{\cos(\beta)}\right) \\ & + m_p g\left(R\sin(\theta) + \frac{R^2}{2l}\frac{\sin(2\theta)}{\cos(\beta)}\right). \end{aligned} \qquad \text{Ec. (13)}$$

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

En la Tabla 1 se encuentran los parámetros para poder resolver la ecuación con valores numéricos específicos, es decir para el caso particular del MRM con el que se cuenta en el laboratorio [14].

Tabla 1. Parámetros de la parte mecánica del MRM.

Parámetro	Descripción	Valor
l	Longitud de la biela	$0.06272\ m$
R	Longitud del cigüeñal	$0.012\ m$
j	Proporción entre la longitud de la biela entre BG y BA $(0 < j < 1)$	$0.5\ uds$
h	Proporción entre la longitud del cigüeñal entre OG a OB $(0 < h < 1)$	$0.1\ uds$
m_p	Masa del pistón	$0.025\ kg$
m_b	Masa de la biela	$0.023\ kg$
m_c	Masa del cigüeñal	$0.015\ kg$
I_B	Momento de inercia de la biela	$3.0159x10^{-5}\ kg \cdot m^2$
I_C	Momento de inercia del cigüeñal	$6.6707x10^{-6}\ kg \cdot m^2$
I_V	Momento de inercia del volante	$3.0782x10^{-4}\ kg \cdot m^2$
μ_2	Fricción viscosa generalizada de la biela	$0.009\ N \cdot m \cdot s/rad$
g	Gravedad	$9.81\ m/s^2$

B) Control Neuronal de Ángulos de energización

Se utilizó una estructura de RNA tipo 3-2-1 como controlador que utiliza una función de activación sigmoide y su representación matemática es la siguiente:

$$\begin{aligned} u_{ne}(k) &= \tanh\,(Z_1 \tanh\,(w_{b1} \tanh\,(\ldots \\ & ref(k)w_{a1} + \theta) + w_{b2}\tanh\,(y(k \\ & -1)w_{a2} + \theta)) \ldots \\ & + w_{b3} \tanh\,(u_{ne}(k-1)w_{a3} + \theta_a) \\ & + \theta) \ldots \\ & + Z_2 \tanh(w_{c1} \tanh(ref(k)\, w_{a1} \\ & + \theta) \ldots \\ & + w_{c2} \tanh(y(k-1)w_{a2} + \theta)) \ldots \\ & + w_{c3} \tanh(u_{ne}(k-1)w_{a3} + \theta_a) \\ & + \theta). \end{aligned} \qquad \text{Ec. (14)}$$

El algoritmo de aprendizaje, para el controlador neuronal recurrente de la ecuación (14) se rige por la siguiente función de costo:

$$E(Z_1, Z_2, w_{a1}, w_{a2}, w_{a3}, w_{b1}, w_{b2}, w_{b3}, w_{c1}, w_{c2}, w_{c3}) = \left(\frac{1}{2}\right) e^2(k), \qquad \text{Ec.(15)}$$

Donde:

$$e(k) = ref(k) - y(k) \qquad \text{Ec.(16)}$$

Del cual, la minimización del algoritmo del gradiente descendente discreto para los pesos sinápticos queda representado de la siguiente forma:

$$Z_m(k+1) = Z_m(k) - \eta \left(\frac{\partial E}{\partial Z_m}\right), \qquad \text{Ec.(17)}$$

$$w_{ai}(k+1) = w_{ai}(k) - \eta \left(\frac{\partial E}{\partial w_{ai}}\right), \qquad \text{Ec.(18)}$$

$$w_{bi}(k+1) = w_{bi}(k) - \eta \left(\frac{\partial E}{\partial w_{bi}}\right), \qquad \text{Ec.(19)}$$

$$w_{ci}(k+1) = w_{ci}(k) - \eta \left(\frac{\partial E}{\partial w_{ci}}\right), \qquad \text{Ec.(20)}$$

Donde:

$$k = 0, 1, 2, \ldots, \quad m = 1, 2, \quad i = 1, 2, 3. \qquad \text{Ec.(21)}$$

El esquema general de la implementación de este controlador se muestra en la Figura 1:

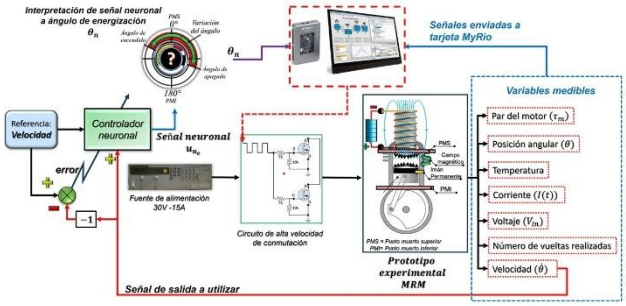


Figura 1. Esquema para el control del MRM manipulando ángulos de energización.

El problema principal es la incertidumbre de cuál tipo de control es mejor, dicha incertidumbre surge debido a la etapa temprana en la que se encuentra el área de investigación de los MRM. Ya que, al manipular los ángulos y tener la fuente de voltaje constante y a máxima capacidad se considera que ocurre un desperdicio de energía que influye directamente en el porcentaje de eficiencia del MRM.

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

C) Alternativa de solución (Control de corriente)

A diferencia de las pruebas realizadas con el controlador neuronal donde la fuente de voltaje y el electroimán se encuentran conectadas de forma directa y se manipulan los ángulos de energización. Lo que se plantea ahora es lo opuesto, es decir primeramente que los ángulos sean fijos y seguidamente manipular el voltaje que entra a el electroimán para indirectamente manipular la corriente, ya que la velocidad en el MRM depende del ángulo de energización y de la corriente en el electroimán.

El propósito de manipular el voltaje es prevenir que el sistema funcione constantemente a su máxima potencia, asegurando que se logren las mismas velocidades que con el control de ángulos. Esto conlleva la optimización del voltaje para alcanzar un balance entre el rendimiento y la eficiencia energética. Al no requerir que el sistema opere continuamente a su máxima capacidad, surge la oportunidad de incrementar un poco la eficiencia energética sin afectar el rendimiento. Para realizar una comparativa es necesario implementar ambos esquemas de control en el prototipo experimental.

Al simplificar el circuito Resistor-Electroimán como un circuito RL de primer orden y de la consideración de que el valor de Resistencia total del circuito es la suma de la resistencia del resistor y
la resistencia interna del solenoide, la corriente $i(t)$ en el electroimán para la fase de carga es:

$$i(t) = \left(\frac{V_{in}}{R}\right)\left(1 - e^{-\frac{R}{L}t}\right); \qquad \text{Ec.(22)}$$
$$R = R_{resistor} + R_{solenoide}.$$

Donde:

- $i(t)$: Corriente en funcion del tiempo
- V_{in}: Voltaje de entrada
- R: Resistencia total (2.5Ω)
- $R_{resistor}$:Resistencia del resistor (1.2Ω 300W)
- $R_{solenoide}$: Resistencia del solenoide (1.3Ω)
- L: Inductancia (31mH)
- t: Tiempo

Al modificar el voltaje que entra en el electroimán estamos indirectamente modificando la corriente que circula por él. Y esta variación en el valor de corriente influye a su vez en el valor de la Fuerza del campo magnético generado. Esta relación podemos observarla en la siguiente ecuación [15]:

$$\vec{B} = \frac{(\mu_0 N_t I)}{\ell_E}\vec{a}_z \qquad \text{Ec.(23)}$$

Donde:

- $\vec{B}$: Campo magnético
- μ_0: Permeabilidad magnética en el vacío ($4\pi * 10^{-7} H/m$)
- N_t: Numero de vueltas (714)
- I: Corriente eléctrica
- ℓ_E: Longitud del solenoide (0.09m)
- $\vec{a}_z$: Vector unitario en la dirección z

Por esta razón se propone el uso de un convertidor Buck el cual permitirá tener un voltaje variable y continuo en la entrada del circuito de conmutación, el esquema de control propuesto se muestra de forma detallada en la Figura 2, en la cual observamos $V_o(1)$ el cual será el V_{in} de la ecuación (22).

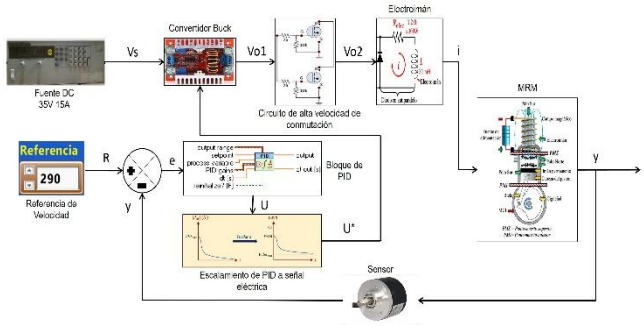


Figura 2. Propuesta de solución para el control del MRM manipulando la corriente.

Debido a que el sistema completo es altamente no lineal se realizó una sintonización de ganancias de forma heurística, y como se observa en la sección de resultados se encontraron ganancias las cuales permiten un buen control de la velocidad el MRM en un rango de operación aceptable.

D) Pruebas del controlador neuronal en el prototipo

Condiciones de inicio de pruebas para el controlador:

- Encendido de actuador:45° (315°) antes del PMS.
- Apagado de actuador:120° después del PMS
- Pesos sinápticos iniciales: Aleatorios en un rango de [-1,1].
- Umbrales:$\theta_a = 0.5$ y $\theta = 0$.
- Velocidad de convergencia: $\eta = 0.0028962$.
- Media de muestreo (Tarjeta myRIO):0.56628ms

-Control neuronal con entrada tipo rampa

En esta prueba se arranca el motor en lazo abierto y al llegar a una velocidad de 350 RPM se activa el controlador neuronal y se activa la rampa para llegar a las 620 RPM. Se observa en la Figura 3 que de 300 a 400

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

segundos no logra seguir la referencia debido a que el controlador tarda en poder salir del cálculo del ángulo cero, esto se observa en la Figura 4, y debido a ese retraso en el cálculo ocurre ese efecto de desfasamiento del segundo 300 a 400.

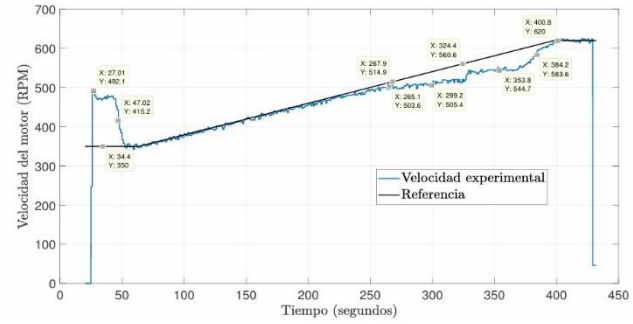


Figura 3. Comportamiento de velocidad con entrada rampa.

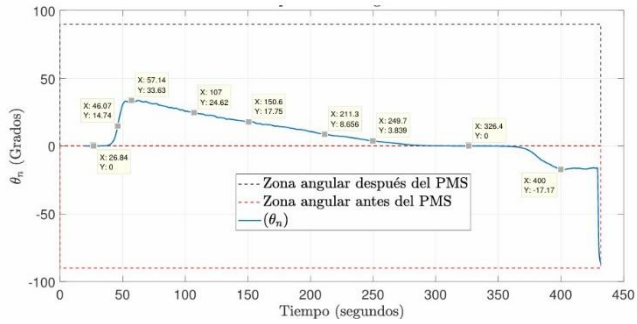


Figura 4. Comportamiento de la ley de control (Ángulos) con entrada rampa.

-Control neuronal con entradas tipo escalón
En la Figura 5 se observa que se arranca el motor en lazo cerrado con una referencia inicial de 600 RPM. Después se realiza un cambio a 400 RPM y en la en la Figura 6 se observa que nuevamente al controlador le toma un poco más de tiempo salir del cálculo del ángulo cero, sin embargo, en los siguientes cambios el controlador es veloz.

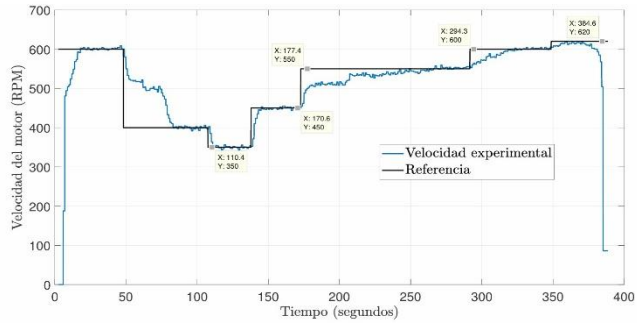


Figura 5. Comportamiento de velocidad con entrada escalón.

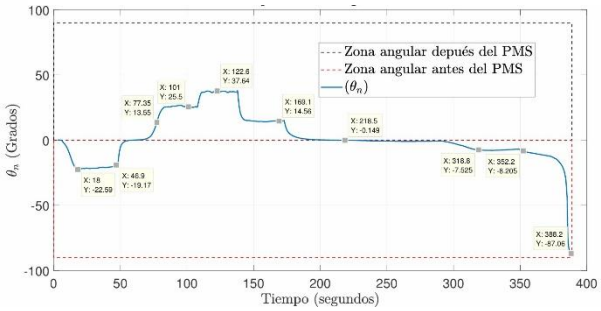


Figura 6. Comportamiento de la ley de control (Ángulos) con entrada escalón.

E) Pruebas del controlador PID en el modelo

Condiciones de inicio de pruebas para el controlador:

- Encendido de actuador: PMS_{on}= 324.95°.
- Apagado de actuador: PMS_{off}= 90°.
- Angulo de energización: 5°.
- Umbrales:$\theta_a = 0.5$ y $\theta = 0$.
- Ganancias del controlador PID:
- - P= 0.06.
- - I= 0.1.
- - D= 0.0001.
- Filtro derivativo: N=100.
- Voltaje de salida del Buck: 0 a 30V.
- Frecuencia de operación del Buck: 50kHz.
- Fixed-step size en Simulink: $1 * 10^{-6}$.

-Control PID con entrada tipo escalón
En la Figura 7 se observa que se arranca el motor en lazo cerrado con una referencia de 500 RPM y se observa que el tiempo de establecimiento es bastante rápido.

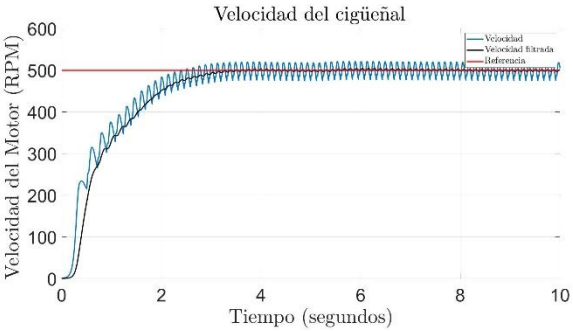


Figura 7. Comportamiento de velocidad con entrada escalón.

En la Figura 8 se observa el voltaje de salida en el Buck, se aprecia así por el Fixed-step size ya que se requeriría un valor aún más pequeño para apreciar de mejor forma la señal, sin embargo, esto no es posible por el límite del equipo computacional con el que se cuenta.

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

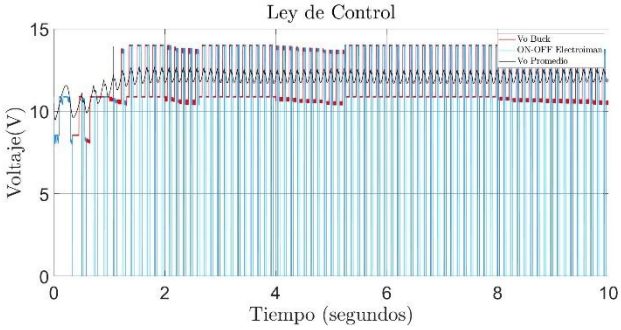


Figura 8. Comportamiento de la ley de control (Voltaje) con entrada escalón.

-Control PID con entrada tipo rampa

En la Figura 9 se observa que se arranca el motor en lazo abierto dejando pasar directo 30V al electroimán para llegar a las 820 RPM, posteriormente se activa la rampa para llegar a una referencia de 500 RPM. De forma simultánea en la Figura 10 se observa que al iniciar la rampa ahora el voltaje que pasa al electroimán va cambiando su valor.

Para esta prueba las ganancias del controlador PID cambiaron por las siguientes:

- P= 0.2.
- I= 0.15.
- D= 0.0001.

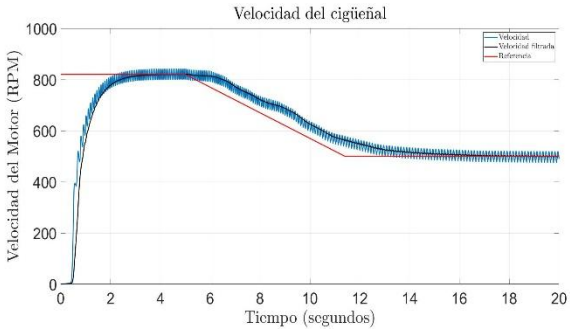


Figura 9. Comportamiento de velocidad con entrada rampa.

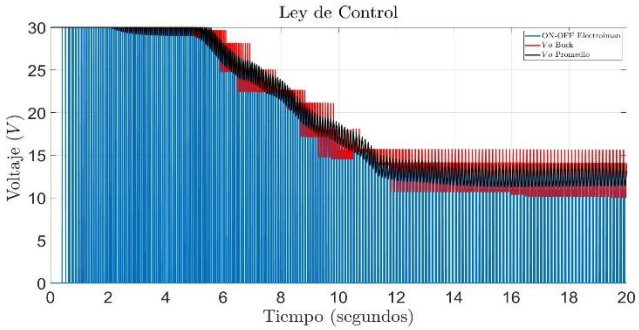


Figura 10. Comportamiento de la ley de control (Voltaje) con entrada rampa.

DISCUSIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Ambos tipos de control demostraron la capacidad de llevar al motor reciprocante magnético (MRM) a la velocidad deseada. Sin embargo, el control neuronal basado en ángulos de energización presentó desventajas significativas. Una de ellas es la baja eficiencia energética (3.58%) observada al relacionar la potencia mecánica con la potencia eléctrica, debido a que la fuente de voltaje se mantiene siempre a su máxima capacidad (30V), lo cual incrementa la potencia eléctrica. Adicionalmente, el controlador neuronal muestra dificultades al pasar por el ángulo 0°, lo que se traduce en un período en el que la velocidad del MRM tiene problemas para seguir la referencia. Esto se evidencia en las Figuras 3 y 5, que coinciden con el cruce por el ángulo 0° mostrado en las Figuras 4 y 6.

Por otro lado, el controlador PID, implementado en el modelo, pero no en el prototipo, no permite realizar una comparación directa de eficiencia energética. No obstante, es razonable suponer que, al alcanzar las mismas velocidades con un voltaje de entrada menor al electroimán, podría lograrse un mayor porcentaje de eficiencia. En las Figuras 8 y 10 se aprecia que el voltaje de entrada al electroimán puede ser menor a 30V y, aun así, se alcanzan las mismas velocidades, como se muestra en las Figuras 7 y 9. A pesar de esto, el PID muestra limitaciones fuera de la región de operación para la cual fueron optimizadas las ganancias, lo que afecta su comportamiento general.

Es importante señalar que, para el PID, fue necesario utilizar diferentes ganancias dependiendo de la entrada (escalón o rampa). Las ganancias ajustadas para una respuesta escalón no se comportaron adecuadamente ante una entrada tipo rampa, lo que obligó a determinar nuevos valores heurísticamente. En este aspecto, el controlador neuronal basado en ángulos tiene una ventaja, ya que puede manejar ambos tipos de entrada, aunque con algunas dificultades en su comportamiento.

Finalmente, al comparar los controladores, se observa que el PID de corriente presenta una mejor respuesta ante entradas tipo escalón, mientras que el controlador neuronal basado en ángulos muestra un mejor desempeño con entradas tipo rampa.

CONCLUSIONES

Ante un sistema no lineal y complejo como el motor reciprocante magnético (MRM), el control neuronal basado en los ángulos de energización ha demostrado ser efectivo para regular la velocidad. Sin embargo, presenta dificultades en el cálculo cuando los ángulos se acercan a los 0°, lo que limita su desempeño en ciertos puntos de operación.

Por otro lado, el control PID aplicado a la corriente muestra un buen desempeño en la regulación de la velocidad. Sin embargo, al tratarse de un controlador lineal aplicado a un sistema inherentemente no lineal, su rango de operación se ve más restringido en comparación

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

con el control neuronal basado en ángulos de energización. A partir de estas observaciones, se plantea que un controlador más robusto, como un controlador neuronal de corriente o un PID neuronal, podría superar las limitaciones del PID lineal y ofrecer un rendimiento superior frente al control neuronal de ángulos de energización.

Finalmente, es importante destacar que el control de corriente podría ofrecer beneficios adicionales, como una mejora en la eficiencia energética del sistema, en comparación con los porcentajes obtenidos mediante el control de ángulos de energización. Este aspecto resulta especialmente relevante en el contexto de la optimización de recursos y el desarrollo de tecnologías más sostenibles.

BIBLIOGRAFÍA

[1] N. Khoa and O. Lim, "A review of the external and internal residual exhaust gas in the internal combustion engine," Energies, 2022.

[2] J. G. Morales, M. C. Bobadilla, R. F. Escobar-Jiménez, J. F. Gómez-Aguilar, C. D. García-Beltrán, and V. H. Olivares-Peregrino, "Control scheme formulation for the production of hydrogen on demand to feed an internal combustion engine," Sustainability, vol. 9, no. 1, 2017. [Online]. Available: https://www.mdpi.com/2071-1050/9/1/7.

[3] M. Assad, I. Kucharchuk, O. Penyazkov, A. Rusetskii, and A. Chornyi, "Influence of ethanol on the operating parameters of an internal-combustion engine," Journal of Engineering Physics and Thermophysics, vol. 84, pp. 1311–1317, 2011.

[4] Conklin and J. Szybist, "A highly efficient six-stroke internal combustion engine cycle with water injection for in-cylinder exhaust heat recovery," Energy, vol. 35, pp. 1658–1664, 2010.

[5] C. Rios-Enriquez, M. Adam-Medina, J. García-Morales,G. V. Guerrero-Ramírez, and M. Cervantes-Bobadilla, "Modeling and simulation of a magnetic reciprocating engine," IEEE Access, 2024.

[6] P. Hota, M. Rathore, and D. Shaikh, "Magnetic repulsion piston engine," International Journal of Science and Research, vol. 4, no. 12, pp. 338–344, 2015.

[7] T. Quazi, C. Mhatre, S. Khanolkar, P. Patil, and S. Pawar, "A review on internal combustion engines," 2018.

[8] R. Rajamani, R. Rajamani, R. Rajamani, and R. Rajamani, "Pid control," 2014. [Online]. Available: https://api.semanticscholar.org/CorpusID:28010986

[9] M. Hagan, H. Demuth, and O. Jesus, "An introduction to the use of neural networks in control systems," International Journal of Robust and Nonlinear Control, vol. 12, 2002.

[10] S. Jin and X. Wang, "Rotating electromagnetic actuator with magnetic fluid," Journal of Physics: Conference Series, vol. 2183, 2022.

[11] A. Gutiérrez-Giles, "Dinámica parte i: Método de euler-lagrange," Notas de curso, Robótica Industrial, Departamento de Control, Facultad de Ingeniería- UNAM, 2020.

[12] K. Ogata, Ingeniería de control moderna, 3rd ed. México: Prentice Hall, 1997.

[13] J. R. Moreno Cruz, "Control neuronal con término integral para sistemas no lineales con oscilaciones," Master's thesis, Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del IPN, Departamento de Control Automático, 2012, tesis (MC).

[14] Ríos Enríquez, C. (2024). Modelado y control de un motor reciprocante magnético [Tesis doctoral, Tecnológico Nacional de México - Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico].

[15] Yang, Z., Song, J., Cai, W., Lu, G., & Zhang, Z. (2021). Analysis of the influence of a solenoid magnetic field in the azimuth transmission system. *Scientific Reports*, *11*(1), 16242.

AUTORIZACIÓN Y RENUNCIA.

Los autores del presente artículo autorizan al TecNM/Instituto Tecnológico de Zacatepec para publicar el escrito en el libro electrónico del CITID 2025. El TecNM/ITZ o los editores no son responsables ni por el contenido ni por las implicaciones de lo que está expresado en el escrito.

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

LOCALIZACIÓN DE HOJAS Y FRUTOS EN PLANTAS DE JITOMATE MEDIANTE YOLONV8

Jose Luis Carranza Flores[1], Andrea Magadan Salazar[2], Jairo Cristóbal Alejo[3], Raúl Pinto Elías[4], Jorge Fuentes-Pacheco[5]

[1]Maestro en sistemas computacionales, Tecnológico Nacional de México / CENIDET, d23ce167@cenidet.tecnm.mx [2]Doctora en ciencias de la computación, Tecnológico Nacional de México / CENIDET, andrea.ms@cenidet.tecnm.mx [3]Doctor en ciencias de fitopatología, Tecnológico Nacional de México / CONKAL, Jairo.ca@conkal.tecnm.mx
[4]Doctor en ciencias de la computación, Tecnológico Nacional de México / CENIDET, raul.pe@cenidet.tecnm.mx
[5]Doctor en ciencias de la computación, Tecnológico Nacional de México / CENIDET, Jorge.fp@cenidet.tecnm.mx

Resumen -- La localización de objetos de interés con aprendizaje profundo es un área de la visión por computadora que se enfoca en identificar y delimitar la ubicación de objetos específicos dentro de una imagen. En este artículo se presenta una propuesta de localizar el rectángulo mínimo de hojas y frutos de jitomate de manera automática, mediante el análisis de imágenes con Yolonv8. Los resultados obtenidos muestran un buen desempeño aún frente a factores como la presencia de cambios en la perspectiva, escala, iluminación, presencia de polvo, patologías, etc.

Palabras Clave: aprendizaje profundo, CNN, YOLOnv8, hojas de tomate.

Abstract -- Locating objects of interest with deep learning is an area of computer vision that focuses on identifying and delineating the location of specific objects within an image. This article presents a proposal to locate the minimum rectangle of tomato leaves and fruits automatically, through image analysis with Yolonv8. The results obtained show good performance even in the face of factors such as the presence of changes in perspective, scale, lighting, presence of dust, pathologies, etc.

Key words – deep learning, CNN, YOLOnv8, tomato leaf, tomato fruit.

INTRODUCCIÓN

De acuerdo con la Organización de las Naciones Unidas, para el 2050 habrá 9,700 millones de personas habitando el planeta [1], esto significa que la demanda de alimentos aumentará drásticamente, por lo que, el sector agrícola debe hacer uso de tecnologías como apoyo para tomar decisiones en el cuidado de los cultivos agrícolas, surgiendo una nueva área denominada agricultura de precisión [2]. La agricultura de precisión se apoya del avance de la inteligencia artificial en las áreas de visión artificial, aprendizaje de máquinas y aprendizaje profundo, a través de las cuales se lleva a cabo el diseño y desarrollo de sistemas inteligentes que automatizan procesos que, para el ser humano implican mucho tiempo. El jitomate es la hortaliza más consumida en todo el mundo. En México constituye una de las hortalizas más importantes debido a la cantidad de empleos directos e indirectos que genera su cultivo y al número de divisas que ingresan al país por concepto de su comercialización [3]. Además de su importancia económica, el jitomate es también fuente de vitaminas, minerales y antioxidantes, los cuales son fundamentales para la nutrición y la salud humana. La presencia de enfermedades en su cultivo provoca grandes pérdidas o malformaciones de los frutos. Es por ello por lo que, se propone agilizar el proceso de reconocimiento de las patologías, desde etapas tempranas para apoyar a los agricultores en la toma de decisiones para evitar su propagación y el uso indiscriminado de pesticidas y fungicidas.

En la literatura del área, se observa que hay un interés especial por el cultivo de jitomate debido a su importancia en el mercado mundial. Las actividades principales que se llevan a cabo son la identificación de los síntomas en la hoja para determinar la enfermedad y/o el patógeno causante (virus, bacteria, hongos) como en [4-13]. Es notorio que pocos trabajos consideran el reconocimiento de patologías en el fruto como [14-17]. Esto porque los virus, bacterias, hongos y plagas afectan primeramente las hojas de las plantas y una vez que han ocasionados daños se presentan también en tallos y frutos.

También se observa que, los sistemas reportados realizan la detección de diversas enfermedades en los cultivos agrícolas, mejorando su rendimiento mediante el uso de arquitecturas de aprendizaje profundo: AlexNet [18], GoogleNet [19-20], ResNet50 [21], ResNet18 [22], Xception [23], VGG16 [24-27]. En la mayoría de ellos lleva a cabo la detección de agentes patógenos mediante el análisis de imágenes en condiciones controladas con nivel de daño avanzado. Es decir, son imágenes de una hoja recortada (segmentada), alineada y que contrasta con respecto al fondo como en [22], [24], [28-32]. Sin embargo, estas condiciones no siempre se presentan en un ambiente real, donde lo importante es realizar la identificación de los síntomas en una etapa temprana, lo que permitirá se tomen medidas en la eliminación de los patógenos. Para el reconocimiento de la presencia de los primeros síntomas en las plantas, lo primero que se necesita es contar con un sistema que realice la

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

localización o segmentación de las hojas y frutos de las plantas de jitomate en condiciones reales.

El presente trabajo describe la metodología para localizar las hojas y el fruto del jitomate; considerando que la imagen adquirida en condiciones no controladas puede contener la presencia de varias hojas al mismo tiempo con diferentes perspectivas y tamaños, oclusión entre ellas, sombras, presencia de polvo, agua; además de cambios en la intensidad luminosa, presencia de cambios en la tonalidad de las hojas por los síntomas de patologías, etc. Factores que aumentan la complejidad del proceso de segmentación y que por ello pocas veces son considerados. Para su desarrollo, el sistema propuesto utiliza el enfoque de aprendizaje profundo, mediante la implementación, entrenamiento y optimización de la red YOLOnv8 [34].

El artículo está organizado de la siguiente forma: se presenta el marco teórico de la arquitectura YOLOnV8 y las métricas utilizadas para evaluar el rendimiento del sistema. Se detalla la metodología seguida para el desarrollo el sistema propuesto. Además, se presenta la experimentación realizada y se discuten los resultados y, finalmente se dan las conclusiones del trabajo.

ARQUITECTURA YOLO

Desde su creación en 2015, la variante YOLO (*You Only Look Once*) de detectores de objetos ha crecido rápidamente, YOLOnv8 fue lanzado en enero de 2023. Las variantes YOLO se basan en el principio de rendimiento en tiempo real y de alta clasificación, basado en parámetros computacionales limitados pero eficientes [35]. Este principio se ha encontrado en el ADN de todas las versiones de YOLO con creciente intensidad, a medida que las variantes evolucionan para abordar los requisitos de la inspección de calidad automatizada dentro del dominio de detección de defectos de superficies industriales, como la necesidad de una detección rápida, alta precisión y despliegue en áreas restringidas.

En la literatura se observa que la familia de YOLO reporta buenos resultados en la localización de objetos diversos. Sin embargo, dichas arquitecturas se han considerado para la localización de hojas en distintos cultivos como se puede ver en [6], [11], [27], [33], [34]. Sin embargo, es notorio que, la mayoría de los artículos señalan llevar a cabo la localización mediante el análisis de imágenes en condiciones controladas. Por ejemplo, en los trabajos [4-26], reportan un desempeño satisfactorio en condiciones controladas; es decir, se requiere contar con imágenes cuyo objeto principal (hoja o fruto) se encuentre recortado, alineado, localizado e incluso el fondo sea contrastante. YOLOnv8 [36] es un modelo de visión artificial de última generación creado por *ultralytics*. Diseñado específicamente para ser ligera y eficiente, ideal para dispositivos con recursos limitados como teléfonos móviles, dispositivos de IoT, y otras aplicaciones embebidas. Además, esta optimizado para ser mucho más pequeño en comparación con sus predecesores. El modelo contiene soporte listo para usar en tareas de detección, clasificación y segmentación de objetos. YOLOnv8 viene con mejoras tanto arquitectónicas como de experiencia para desarrolladores. En comparación con las versiones anteriores a YOLOnv8 viene con:

1. Nuevo sistema de detección de anclajes
2. Cambios en los bloques convoluciones utilizados en el modelo
3. Aumento de mosaico aplicado durante el entrenamiento, desactivado antes de las ultimas 10 épocas

Además, YOLOnv8 viene con cambios para mejorar la experiencia del desarrollador con el modelo, y el modelo se encuentra empaquetado como una biblioteca que puede instalar en código Python.

Métricas

Las métricas de evaluación permiten medir el rendimiento de un modelo predictivo. Es decir, su objetivo es proporcionar de manera objetiva cómo el modelo está funcionando. Las métricas clásicas para evaluar el desempeño del modelo son:

a) Recall (Sensibilidad o tasa de verdaderos positivos); es la proporción de verdaderos positivos entre todos los casos que realmente son positivos. Mide la proporción de instancias positivas que fueron correctamente identificadas por el modelo, ver la expresión 1.

$$Recall = \frac{TP}{TP+FN} \qquad \text{Ec. (1)}$$

b) Precision; Es la proporción de verdaderos positivos entre todas las instancias que han sido predichas como positivas. La expresión 2 muestra el cálculo de *precisión*.

$$Precision = \frac{TP}{TP+FP} \qquad \text{Ec. (2)}$$

c) F1 Score: es la media armónica de la *precisión* y *recall*. Proporciona un balance entre ambas métricas y es útil cuando hay un desbalance en las clases. La expresión 3 muestra el cálculo de la métrica antes mencionada.

$$F1\ Score = 2 * \frac{Precision * Recall}{Precision+Recall} \qquad \text{Ec. (3)}$$

DESARROLLO

Metodología

De manera general, la propuesta para llevar a cabo la localización de hojas y frutos, en imágenes de plantas de jitomate adquiridas en condiciones reales, mediante la

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

red YOLOnv8, se integra de los siguientes pasos que son detallados, posteriormente, en las siguientes subsecciones, ver la figura 1.

a) Se adquiere y define el conjunto de imágenes que se utilizan para llevar a cabo el entrenamiento y validación del sistema.
b) Las imágenes se normalizan a un formato y tamaño.
c) Para el entrenamiento se requiere contar con el *ground truth*, que se crea mediante un proceso de etiquetado.
d) Se definen y aplican las operaciones para realizar un aumento de datos.
e) Se distribuyen de manera aleatoria las imágenes en 80:10:10 para los subconjuntos a utilizarse en el entrenamiento, validación y pruebas.
f) En el entrenamiento de la red, se optimizan los parámetros y como resultado se obtienen las predicciones de cuadros delimitadores en diferentes escalas y posiciones.
g) Posteriormente, se aplica un umbral de confianza para refinar los cuadros delimitadores. Para ello, el modelo es entrenado con los parámetros que se describen en la sección de entrenamiento, ver tabla 4.
h) Finalmente, la red proporciona los cuadros delimitadores finales con etiquetas y las puntuaciones, ver la sección de experimentación.

Figura 1 Esquema del proceso de localización.

DataSet

Existen diversos conjuntos de datos públicos que se integran de imágenes de hojas sanas y enfermas de diversos cultivos. En especial, aquellos conjuntos que contienen hojas de jitomate y se encuentran entre los más utilizados son: Plantvillage [37], ImageNet [38] y Kaggle [39]. Es importante destacar que, la mayoría de las imágenes de los dos primeros conjuntos, se encuentran en condiciones controladas; es decir, el objeto de interés se muestra en un fondo blanco o en un color uniforme de tal manera que no hay ruido que obstruya los objetos de estudio. Además, dos de los datasets antes mencionados solo contienen imágenes de hojas de diferentes cultivos y no presentan frutos.

El conjunto tomato leaf disease dataset de Kaggle contiene algunas imágenes en fondo blanco, pero la mayoría de las fotografías fueron capturadas en un ambiente no controlado, como se observa en la figura 2. Por esta razón, se optó por usar el conjunto de Kaggle y se seleccionaron las imágenes necesarias para el desarrollo del proyecto. El conjunto contiene 10000 imágenes de diversos tamaños, que presentan diferentes tipos de enfermedades de las plantas, incluidas infecciones bacterianas, enfermedades fúngicas, infestaciones de plagas e infecciones virales.

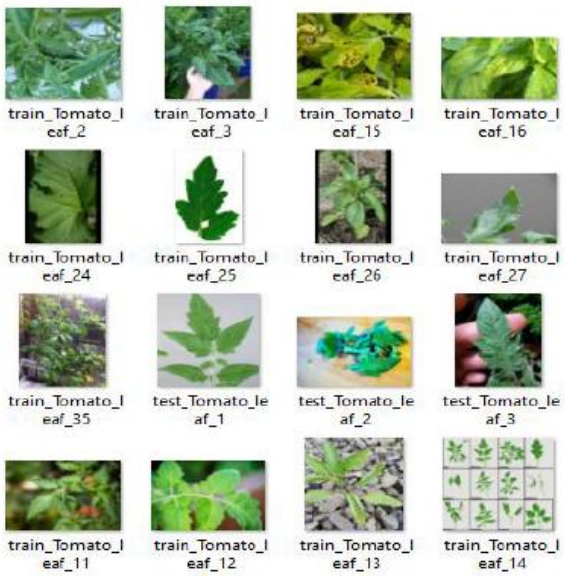


Figura 2 Imágenes del conjunto de datos de Kaggle [4].

Con el objetivo de obtener un conjunto de imágenes más amplio y diverso, se llevó a cabo una visita a invernaderos de jitomate en el Estado de Guerrero, donde se capturaron fotografías (como se muestra en la Figura 3), utilizando tres dispositivos diferentes.

Figura 3 Ejemplo de imágenes adquiridas en la sierra de Guerrero, México.

Finalmente, se complementó el conjunto de datos con imágenes descargadas de internet, tanto de frutos sanos como de aquellos que presentan enfermedades. Algunos ejemplos se presentan en la Figura 4.

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

Figura 4 Imágenes descargadas de internet.

En la tabla 1 se muestra la cantidad de imágenes capturadas en invernaderos de Guerrero, del conjunto de datos kaggle y las descargadas de internet.

Tabla 1 Cantidad de imágenes del dataset creado.

Propio		*Kaggle*		Internet	
Hoja	Fruto	Hoja	Fruto	Hoja	Fruto
400	400	800	-	100	100
Total: 1800 [1300 de hojas y 500 de frutos]					

Preprocesamiento

Normalización:

Debido a que se tienen imágenes de diversas fuentes, es necesario normalizar las imágenes. Para ello, el formato de la imagen establecido es jpg, y se modificó el tamaño de la imagen de entrada. Algunas de ellas tenían el tamaño de 1266 x 1390, otras de 4224 x 5632 y otras de 3468 x 4624. Todas ellas fueron redimensionadas a un tamaño de 640 x 640 pixeles.

Etiquetado:

El proceso de etiquetado consiste localizar el recuadro mínimo que contenga el objeto de interés, es decir, asignar la posición del punto superior izquierdo y del punto inferior derecho para que la red aprenda a identificar los objetos. Este proceso, es indispensable para obtener resultados que aseguren una mayor precisión en la localización de los objetos. Hay diferentes formas de hacerlo. El etiquetado manual implica que los humanos observen las imágenes y asignen las posiciones manualmente. El etiquetado semiautomático implica el uso de algoritmos para sugerir las posiciones, que luego son revisadas y corregidas por humanos. El etiquetado automático utiliza algoritmos de procesamiento de imágenes para localizar los objetos

Para el proceso de etiquetado se utilizó *Roboflow* [40] y de manera manual se hicieron precisiones en algunas imágenes donde le rectángulo mínimo no estaba correcto. Además, se asignan etiquetas a las imágenes de las hojas y frutos, en este caso en particular de la planta de jitomate como se observa en la figura 5. Durante el proceso de asignación se crearon dos categorías: la clase 0 que hace referencia a los frutos y la clase 1 a las hojas. Posteriormente, se generan de manera aleatoria los tres subconjuntos: entrenamiento, validación y prueba.

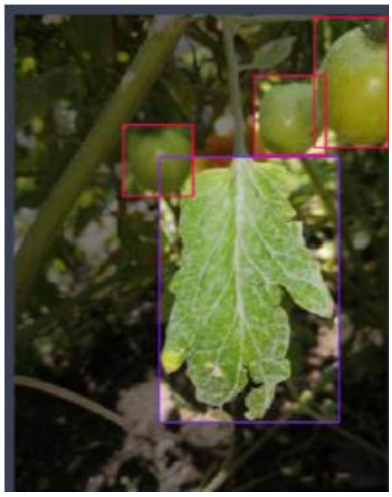


Figura 5 Imagen etiquetada en RoboFlow.

- El primer conjunto proporciona los datos de entrada para el entrenamiento de la red YOLOnv8.
- El segundo grupo de imágenes permite ajustar los parámetros durante cada época del entrenamiento del algoritmo, de tal forma que se optimice la precisión del mismo.
- El tercer grupo permite evaluar el modelo, una vez finalizado el entrenamiento. Con este conjunto se obtienen los resultados finales de la detección automática reportados.

Los datos se exportan para el entrenamiento en tres carpetas que contienen las imágenes y las etiquetas.

Aumento de Datos.

Considerando que las redes neuronales convolucionales necesitan grandes cantidades de imágenes, se decidió aplicar algunas transformaciones para tener una mayor cantidad de información y evitar el sobreajuste, la tabla 2 muestra las técnicas implementadas. Finalmente, se obtuvieron 3119 imágenes.

Tabla 2 Técnicas aplicadas para el aumento de datos.

Técnica	Valor
Rotación	90° upside down
Saturación	34%
Ruido Gaussiano	1.96%
Redimensión	640 x 640

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

Después del aumento de datos. El dataset se distribuye con 80% para entrenamiento, 10% para validación y 10% para las pruebas como se observa en la tabla 3.

Tabla 3 Distribución del conjunto de imágenes.

Cantidad de imágenes	Entrenamiento 80%	Validación 10%	Pruebas 10%
3119	2730	150	150

Entrenamiento

La implementación se llevó a cabo utilizando la herramienta Google Colab para el entrenamiento de la red y Pycharm 2024.2.3 para las pruebas. El proceso de entrenamiento consiste en el aprendizaje y evaluación iterativo, esto debido a que el objetivo del modelo es localizar el objeto de interés dentro de la imagen. Para iniciar con el entrenamiento es necesario configurar algunos parámetros básicos. Después de una serie de entrenamientos se observó que el modelo tenía un buen rendimiento con los siguientes valores, ver tabla 4.

Tabla 4 Hiperparámetros utilizados.

Hiperparametros	valor
Batch size	64
Ephocs	20
Width shape y height shape	640 x 640

ANÁLISIS DE RESULTADOS

El objetivo del experimento fue evaluar el rendimiento del modelo para localizar de manera automática el recuadro mínimo que contenga al objeto de interés, en este caso, clasificando si se trata de una hoja o de un fruto, ya que posteriormente requieren un análisis diferente.

La figura 6 muestra de manera visual los resultados obtenidos al encerrar en un bounding box los objetos de interés; a pesar de que las imágenes al ser adquiridas en ambientes no controlados presentan hojas y frutos sanos y enfermos. Incluso, se observa en dichas imágenes, que el sistema es capaz de segmentar a las hojas y frutos a pesar de la escala, perspectiva, edad de las hojas, traslape entre ellas, aún ante la presencia de polvo, y problemas de tonalidad y forma.

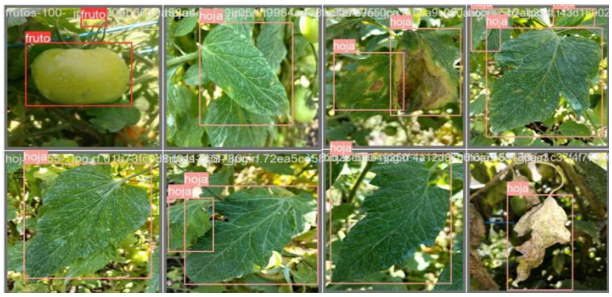


Figura 6 Resultados obtenidos.

El modelo muestra un buen desempeño en la fase de validación, alcanzando una precision de 97.6% (véase Figura 7), un recall de 97% (véase Figura 8) y un F1 de 84.28% (véase Figura 9). Con respecto al valor de precision significa que, de todos los frutos y hojas que el modelo detecta, efectivamente son verdaderos.

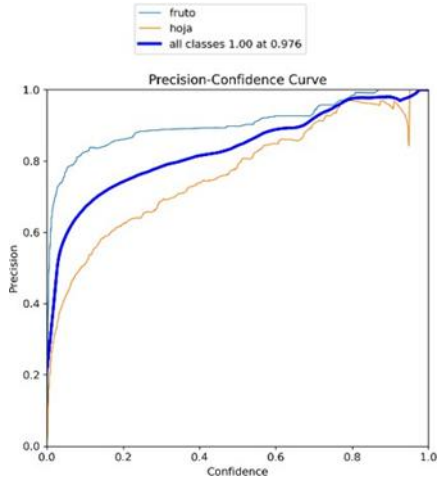


Figura 7 Grafica de la curva de confidencia en la precisión.

Los resultados con recall nos dice que, de todos los frutos y hojas existentes, el modelo identifica la mayor parte de instancias en la imagen.

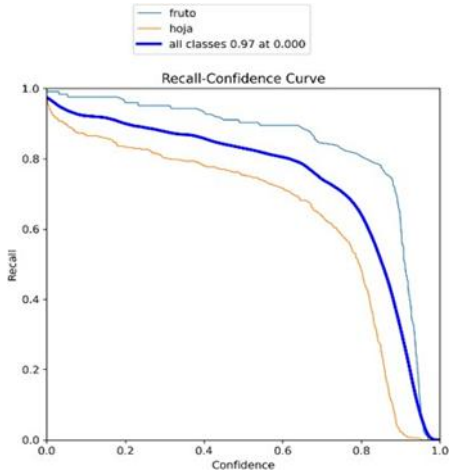


Figura 8 Grafica de la curva de confidencia de recall.

Los resultados de F1 muestran que el modelo clasifica correctamente, pero hay algunos objetos (hojas y frutos) no localizados esto debido a que la mayoría de las imágenes fueron capturadas en ambientes no controlados y algunas de ellas tienen algunas oclusiones.

Como se observa en el aprendizaje de la red se tienen algunos problemas de localización en las imágenes que contienen hojas y frutos en el fondo de la imagen. Además, algunas imágenes del conjunto de prueba estaban desenfocadas.

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

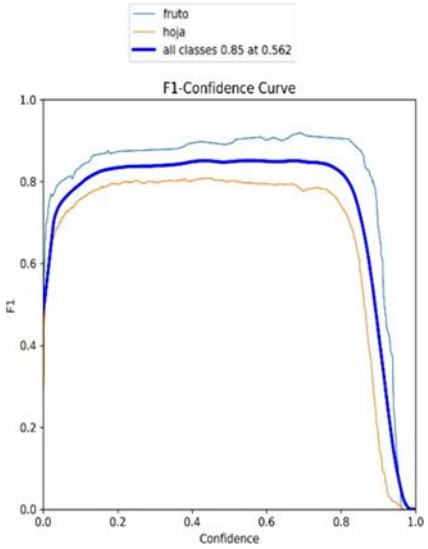


Figura 9 Grafica de la curva de confidencia de F1.

CONCLUSIONES

De acuerdo con los puntajes obtenidos, se concluye que el modelo obtenido con YOLOnv8 permite que la localización sea precisa en imágenes capturas en ambientes no controlados. Además, que el uso de herramientas para el etiquetado es eficaz en este caso en particular debido a que el *bounding box* encierra completamente el objeto de interés. La experimentación muestra que la red YOLOnv8 es una buena opción para llevar a cabo la localización de las hojas y frutos. Además, el aplicar un aumento de datos, permite contar con una mayor cantidad y diversidad de imágenes lo que ayudará a obtener un mejor rendimiento.

En trabajo ha presentado resultados iniciales que demuestran la factibilidad de emplear técnicas de visión por computadora y aprendizaje profundo para la clasificación de frutos y hojas. Sin embargo, los hallazgos obtenidos representan tan solo el primer paso hacia un sistema más completo de reconocimiento de patologías en plantas. Por ello, se propone como trabajo futuro:

1. Ampliar el Conjunto de Datos: Incluir un mayor número de imágenes que abarquen: condiciones de luz y escenarios de campo, así como diversas etapas de desarrollo y niveles de infección.

2. Incorporar Patologías Específicas: Extender la metodología para abordar el diagnóstico de enfermedades comunes en las plantas analizadas, de modo que el modelo pueda diferenciar entre hojas sanas y hojas con patologías específicas.

Estas propuestas buscan no solo mejorar la exactitud y eficiencia del modelo presentado, sino también avanzar hacia aplicaciones prácticas que contribuyan al control y la prevención de patologías en plantas, beneficiando al sector agrícola y la sostenibilidad de los cultivos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] Organización de las Naciones Unidas, 2022. Consultado 08 de agosto de 2024 Disponible en: https://www.un.org/es/global-issues/population.

[2] Hernández, R. R. (2021). La agricultura de precisión. Una necesidad actual. *Revista Ingeniería Agrícola*, *11*(1), 67-74.

[3] Instituto de Investigación y capacitación agropecuaria, acuícola y forestal ICAMEX, (2023). Cultivo de Jitomate.

[4] Jia, W., Xu, Y., Lu, Y., Yin, X., Pan, N., Jiang, R., & Ge, X. (2023). An accurate green fruits detection method based on optimized YOLOX-m. *Frontiers in Plant Science*, *14*, 1187734.

[5] Singh, A. K., Sreenivasu, S. V. N., Mahalaxmi, U. S. B. K., Sharma, H., Patil, D. D., & Asenso, E. (2022). Hybrid feature-based disease detection in plant leaf using convolutional neural network, bayesian optimized SVM, and random forest classifier. *Journal of Food Quality*, *2022*, 1-16.

[6] Jia, W., Xu, Y., Lu, Y., Yin, X., Pan, N., Jiang, R., & Ge, X. (2023). An accurate green fruits detection method based on optimized YOLOX-m. *Frontiers in Plant Science*, *14*, 1187734.

[7] Peng, D., Li, W., Zhao, H., Zhou, G., & Cai, C. (2023). Recognition of tomato leaf diseases based on DIMPCNET. *Agronomy*, *13*(7), 1812.

[8] Liang, J., & Jiang, W. (2023). A ResNet50-DPA model for tomato leaf disease identification. *Frontiers in Plant Science*, *14*, 1258658.

[9] Chen, H., Wang, Y., Jiang, P., Zhang, R., & Peng, J. (2023). LBFNet: A Tomato Leaf Disease Identification Model Based on Three-Channel Attention Mechanism and Quantitative Pruning. *Applied Sciences*, *13*(9), 5589.

[10] Debnath, A., Hasan, M. M., Raihan, M., Samrat, N., Alsulami, M. M., Masud, M., & Bairagi, A. K. (2023). A Smartphone-Based Detection System for Tomato Leaf Disease Using EfficientNetV2B2 and Its Explainability with Artificial Intelligence (AI). *Sensors*, *23*(21), 8685.

[11] Umar, M., Altaf, S., Sattar, K., Somroo, M. W., & Sivakumar, S. (2023). Multi-Disease Recognition in Tomato Plants: Evaluating the Performance of CNN and Improved YOLOv7

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

Models for Accurate Detection and Classification.

[12] Flores Colorado, O. E., Cervantes Canales, J., García-Lamont, F. y Ruiz Castilla, J. S. (2023). Identificación de las principales enfermedades de la planta del café (*Coffea arabica*) a través de visión artificial. CIENCIA ergo-sum, 30(3).

[13] Fadhilla, M., & Suryani, D. (2023). Android Application for Tomato Leaf Disease Prediction Based on MobileNet Fine-tuning. *Jurnal RESTI (Rekayasa Sistem dan Teknologi Informasi)*, *7*(6), 1260-1267.

[14] Islam, M. M., Talukder, M. A., Sarker, M. R. A., Uddin, M. A., Akhter, A., Sharmin, S., ... & Debnath, S. K. (2023). A deep learning model for cotton disease prediction using fine-tuning with smart web application in agriculture. *Intelligent Systems with Applications*, *20*, 200278.

[15] Khatoon, S., Hasan, M. M., Asif, A., Alshmari, M., & Yap, Y. (2021). Image-based automatic diagnostic system for tomato plants using deep learning. *Comput. Mater. Contin*, *67*(1), 595-612.

[16] Khattak, A., Asghar, M. U., Batool, U., Asghar, M. Z., Ullah, H., Al-Rakhami, M., & Gumaei, A. (2021). Automatic detection of citrus fruit and leaves diseases using deep neural network model. *IEEE access*, *9*, 112942-112954.

[17] Zeng, Q., Sun, J., & Wang, S. (2023). DIC-Transformer: interpretation of plant disease classification results using image caption generation technology. *Frontiers in Plant Science*, *14*.

[18] Da Silva Abade, A., de Almeida, A. P. G., & de Barros Vidal, F. (2019). Plant Diseases Recognition from Digital Images using Multichannel Convolutional Neural Networks. In *VISIGRAPP (5: VISAPP)* (pp. 450-458).

[19] López, J. A. M., De la Torre Gutiérrez, H., & López, F. J. H. Detección de antiespacios urbanos usando YOLO: Caso de estudio Mexicali.

[20] Mohanty, S. P., Hughes, D. P., & Salathé, M. (2016). Using deep learning for image-based plant disease detection. *Frontiers in plant science*, *7*, 1419.

[21] Sagar, A., & Dheeba, J. (2020). On using transfer learning for plant disease detection. *BioRxiv*, 2020- 05.

[22] Zhao, S., Peng, Y., Liu, J., & Wu, S. (2021). Tomato leaf disease diagnosis based on improved convolution neural network by attention module. *Agriculture*, *11*(7), 651.

[23] Chipuli, J. P., & Luwemba, G. W. (2023). Tomato Plant Leaf Disease Detection Using Image Recognition: A Case Study of Mlali in Morogoro Region, Tanzania. *European Journal of Information Technologies and Computer Science*, *3*(4), 18-25.

[24] Rangarajan, A. K., Purushothaman, R., & Ramesh, A. (2018). Tomato crop disease classification using pre-trained deep learning algorithm. *Procedia computer science*, *133*, 1040-1047.

[25] Latif, G., Abdelhamid, S. E., Mallouhy, R. E., Alghazo, J., & Kazimi, Z. A. (2022). Deep learning utilization in agriculture: Detection of rice plant diseases using an improved CNN model. *Plants*, *11*(17), 2230.

[26] Jung, M., Song, J. S., Shin, A. Y., Choi, B., Go, S., Kwon, S. Y., ... & Kim, Y. M. (2023). Construction of deep learning-based disease detection model in plants. *Scientific Reports*, *13*(1), 7331.

[27] Liu, Y., & Yu, Q. (2024). Real-time and lightweight detection of grape diseases based on Fusion Transformer YOLO. *Frontiers in Plant Science*, *15*, 1269423.

[28] Fuentes, A., Yoon, S., Kim, S. C., & Park, D. S. (2017). A robust deep-learning-based detector for real-time tomato plant diseases and pests recognition. *Sensors*, *17*(9), 2022.

[29] Fuentes, A. F., Yoon, S., Lee, J., & Park, D. S. (2018). High-performance deep neural network-based tomato plant diseases and pests diagnosis system with refinement filter bank. *Frontiers in plant science*, *9*, 1162.

[30] Gonzalez-Huitron, V., León-Borges, J. A., Rodríguez-Mata, A. E., Amabilis-Sosa, L. E., Ramírez-Pereda, B., & Rodríguez, H. (2021). Disease detection in tomato leaves via CNN with lightweight architectures implemented in Raspberry Pi 4. *Computers and Electronics in Agriculture 181, 105951*.

[31] Bhujel, A., Kim, N. E., Arulmozhi, E., Basak, J. K., & Kim, H. T. (2022). A lightweight Attention-based convolutional neural networks

for tomato leaf disease classification. *Agriculture*, *12*(2), 228.

[32] Ullah, Z., Alsubaie, N., Jamjoom, M., Alajmani, S. H., & Saleem, F. (2023). EffiMob-Net: A Deep Learning-Based Hybrid Model for Detection and Identification of Tomato Diseases Using Leaf Images. *Agriculture*, *13*(3), 737.

[33] Mbouembe, P. L. T., Liu, G., Park, S., & Kim, J. H. (2023). Accurate and fast detection of tomatoes based on improved YOLOv5s in natural environments. *Frontiers in Plant Science*, *14*.

[34] Bochkovskiy, A., Wang, C. Y., & Liao, H. Y. M. (2020). Yolov4: Optimal speed and accuracy of object detection. *arXiv preprint arXiv:2004.10934*.

[35] Yolo. Consultado el 12 de mayo de 2024. Disponible online : https://docs.ultralytics.com/es/models/yolov8/

[36] YoloNv8. Consultado el 12 de mayo de 2024. https://github.com/ultralytics/ultralytics?tab=readm e-ov-file

[37] Plantvillage. Consultado el 12 de octubre de 2024. Disponible online : https://plantvillage.psu.edu/

[38] ImageNet. Consultado el 12 de octubre de 2024. Disponible online : https://www.image-net.org/

[39] Kaggle. Consultado el 12 de mayo de 2024. Disponible online : https://www.kaggle.com/datasets

[40] Roboflow. Consultado el 12 de mayo de 2024.Disponible online: https://roboflow.com/

AUTORIZACIÓN Y RENUNCIA

Los autores del presente artículo autorizan al TecNM/Instituto Tecnológico de Zacatepec para publicar el escrito en el libro electrónico del CITID 2025. El TecNM/ITZ o los editores no son responsables ni por el contenido ni por las implicaciones de lo que está expresado en el escrito.

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

CONTROL POR RETROALIMENTACIÓN DE ESTADOS DE UN UAV

Isay Obet Huicochea Rios [2], Dryden Gilberto Estrada Téllez [1], Jarniel García Morales [3], Marisol Cervantes Bobadilla [3], Manuel Adam Medina [3].

[1]Ingeniería. Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, Departamento de Ciencias en Ingeniería Electrónica. m23ce098@cenidet.tecnm.mx – 7471627668. Interior Internado Palmira S/N, Palmira, Cuernavaca, Mor.

[2]Maestría. Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, Departamento de Ciencias en Ingeniería Electrónica. d21ce081@cenidet.tecnm.mx – 7771076748. Interior Internado Palmira S/N, Palmira, Cuernavaca, Mor.

[3]Doctorado. Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, Departamento de Ciencias en Ingeniería Electrónica. Interior Internado Palmira S/N, Palmira, Cuernavaca, Mor. jarniel.gm@cenidet.tecnm.mx – 7773372220, marisol.cb@cenidet.tecnm.mx – 7774180219, manuel.am@cenidet.tecnm.mx – 7773465450.

Resumen – Este artículo presenta el diseño y la simulación de un control por retroalimentación de estados para un Vehículo Aéreo No Tripulado (UAV). El objetivo es establecer una base para futuros desarrollos en el control por retroalimentación de estados aplicado a UAVs. La estrategia de control propuesta se basa en un modelo dinámico linealizado del UAV, para después, utilizar las ganancias obtenidas para controlar un UAV cuya dinámica sea más representativa con respecto al modelo linealizado. El enfoque proporciona una metodología para comprender e implementar el control por retroalimentación de estados en sistemas aéreos. Los resultados de simulación validan la efectividad de la estrategia de control, demostrando su capacidad para mantener condiciones de vuelo estables. Este trabajo sirve como punto de partida para futuras investigaciones sobre técnicas avanzadas de control de UAVs.
Palabras clave – *Control por retroalimentación de estados, control lineal, Vehículo aéreo no tripulado (UAV).*

Abstract – This paper presents the design and simulation of a state feedback control for an Unmanned Aerial Vehicle (UAV). The objective is to establish a foundation for future developments in state feedback control applied to UAVs. The proposed control strategy is based on a linearized dynamic model of the UAV, and then the obtained gains are used to control a UAV with a more representative dynamic model compared to the linearized one. The approach provides a methodology for understanding and implementing state feedback control in aerial systems. Simulation results validate the effectiveness of the control strategy, demonstrating its ability to maintain stable flight conditions. This work serves as a starting point for further research on advanced UAV control techniques.
Key words – *State feedback control, Unmanned aerial vehicle (UAV), Linear control.*

INTRODUCCIÓN

En décadas recientes, los vehículos aéreos no tripulados (UAVs) han adoptado como objetivo el convertirse en una herramienta la cual requiera de mínima interferencia humana. Por lo tanto, actualmente es preferible utilizar UAVs sobre aeronaves completamente piloteadas por operadores [1]. Los sistemas de control, la automatización, los sistemas embebidos, la visión robótica, la mecánica y la aerodinámica son las áreas de investigación que abordan diferentes aspectos de los UAVs [2]. Las primeras aplicaciones de los UAVs fueron en el campo militar, las cuales estaban enfocadas al combate [3]. Actualmente, los UAVs han sido empleados en múltiples aplicaciones civiles, algunos ejemplos son: agricultura, sensado remoto, fotografía aérea, traslado de paquetes, construcción, mapeo, reconocimiento, búsqueda y rescate [4,5], etc.

Con la finalidad de llevar a cabo las tareas mencionadas, a lo largo de los años se han utilizado distintas técnicas de control para los UAVs, las cuales se clasifican de manera general como: lineales, no lineales y basadas en aprendizaje; dentro de esta clasificación, existen controles como los PID, LQR, modos deslizantes, modelo predictivo, lógica difusa y basados en redes neuronales artificiales, entre otros [6,7]. El fuerte acoplamiento entre diferentes ejes del movimiento de un UAV complica el diseño del control. Los controladores PID suelen ser de única entrada y salida (SISO), por lo que se ven comprometidos a afrontar las dificultades mencionadas. Los controles PID han sido ampliamente utilizados a pesar de sus limitaciones; se propuso un control PID difuso optimizado por un algoritmo genético para seguimiento de trayectoria [8]. Donde las ganancias del control PID son ajustadas indirectamente por un algoritmo genético, el cual modifica las reglas difusas que sintonizan las ganancias del PID, los autores demostraron que el optimizar las reglas difusas utilizando una técnica especifica mejora el rendimiento de los controles PID. Por otro lado, otros autores propusieron un control PID adaptable para un UAV, donde se utilizan los modos deslizantes como mecanismo para adaptar las ganancias del control PID [9]. Otros controles PID utilizados son los basados en calculo fraccionario [10], basados en eventos [11] y no lineales [12].

Dentro de la rama de los controles lineales, uno de los más utilizados es el que emplea al regulador cuadrático lineal (LQR), cuyo objetivo es encontrar una ley de

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

control que minimice una función costo para controlar un sistema lineal representado en espacio de estados [13]. Esta técnica de control facilita el diseño de este, como lo mencionan Khalid et al. y Han et al. en [1] y [13] respectivamente. Sin embargo, en [1], [13] y [14] se menciona que la técnica LQR carece de robustez, además de que presenta limitaciones al utilizar un modelo no lineal. A pesar de sus limitaciones, existe variedad de trabajos que utilizan esta técnica; se implementó un control LQR en un UAV personalizado, utilizando teoría de Lie, tomando en cuenta la dinámica del error del sistema, y utilizando la ecuación algebraica de tiempo continuo de Riccati [15]. El Gaussiano cuadrático lineal (LQG) es una variante del control LQR. Esta técnica se ha utilizado como mecanismo adaptable para un controlador de postura para un UAV bicóptero [16]; esto con la finalidad de combinar las ventajas del control óptimo con capacidad adaptativa para superar la incertidumbre y variación de la dinámica en bicóptero. Las matrices de ponderación de un control LQR pueden calcularse por medio de distintos métodos; se ha propuesto un método para encontrar las matrices de ponderación de un control LQR, el cual consiste en calcular las matrices de ponderación directamente de la matriz de estados utilizando un factor de preferencia [17]. Los autores probaron el método en un control LQR y un control PI-LQR. En conclusión, una técnica capaz de sobreponerse a los comportamientos no lineales acoplados de la dinámica de un UAV tiene mayor robustez a las perturbaciones, sin embargo, los controladores no lineales elevan la complejidad del diseño. Por otro lado, los controladores lineales son utilizados en múltiples sistemas aéreos, su baja complejidad los convierte en una alternativa altamente viable para ser implementados en los UAVs destinados a realizar misiones.

Los controladores PID y LQR-LQG resaltan por su facilidad de diseño, una diferencia entre estos controladores es que el PID no necesariamente depende de un modelo matemático, a diferencia del LQR. Además, se ha demostrado que el control LQR brinda más robustez en comparación con el control PID y presenta poco error en estado estable [18]. Si se busca una opción fundamental del control LQR, el control por retroalimentación de estados es la principal alternativa. En este artículo se presenta un control por retroalimentación de estados para la dinámica traslacional y rotacional de un UAV. Las ganancias del controlador fueron calculadas a partir de los modelos matemáticos que representan la dinámica de un UAV y se analizó la estabilidad del sistema utilizando en teorema de Kalman- Yakubovich-Popov. El objetivo del artículo es plasmar el fundamento del control para un UAV que, a diferencia del control LQR y PID, permite asignar los polos del sistema de acuerdo con las necesidades del control, permite controlar sistemas de múltiples entradas y múltiples salidas (MIMO) y reduce la complejidad al encontrar ganancias adecuadas.

DESARROLLO

Planteamiento del problema

Para un UAV cuya dinámica traslacional esta descrita por:

$$\sum_{\mathcal{T}} \triangleq \quad \begin{aligned} \dot{x}_{\mathcal{T}}(t) &= A_{\mathcal{T}} x_{\mathcal{T}}(t) + B_{\mathcal{T}} u_{\mathcal{T}}(t), \\ y_{\mathcal{T}}(t) &= C_{\mathcal{T}} x_{\mathcal{T}}(t), \end{aligned} \qquad \text{Ec. (1)}$$

donde $\dot{x}_{\mathcal{T}}(t) \in \Re^{n}$ es el vector de estados, $u_{\mathcal{T}}(t) \in \Re^{p}$ es el vector de entradas, $y_{\mathcal{T}}(t) \in \Re^{m}$ es el vector de salidas y $A_{\mathcal{T}} \in \Re^{n\times n}$, $B_{\mathcal{T}} \in \Re^{n\times m}$ y $C_{\mathcal{T}} \in \Re^{m\times n}$ son las matrices que describen al sistema; y cuya dinámica rotacional esta descrita por:

$$\sum_{\mathcal{R}} \triangleq \quad \begin{aligned} \dot{x}_{\mathcal{R}}(t) &= A_{\mathcal{R}} x_{\mathcal{R}}(t) + B_{\mathcal{R}} u_{\mathcal{R}}(t), \\ y_{\mathcal{R}}(t) &= C_{\mathcal{R}} x_{\mathcal{R}}(t), \end{aligned} \qquad \text{Ec. (2)}$$

donde $\dot{x}_{\mathcal{R}}(t) \in \Re^{n}$ es el vector de estados, $u_{\mathcal{R}}(t) \in \Re^{p}$ es el vector de entradas, $y_{\mathcal{R}}(t) \in \Re^{m}$ es el vector de salidas y $A_{\mathcal{R}} \in \Re^{n\times n}$, $B_{\mathcal{R}} \in \Re^{n\times p}$ y $C_{\mathcal{R}} \in \Re^{m\times n}$ son las matrices que describen al sistema, se busca controlar el sistema siguiendo el esquema de control por retroalimentación de estados (Figura 1).

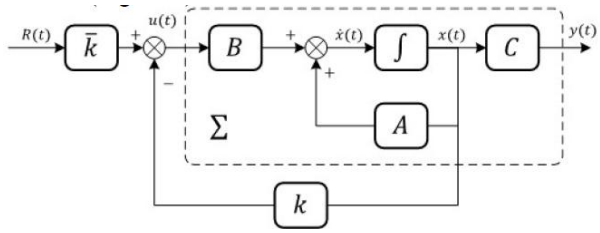


Figura 1. Control por retroalimentación de estados.

Dicho lo anterior, la ley de control para controlar a cada sistema es la siguiente:

$$u(t) = k\ R(t) - kx(t), \qquad \text{Ec. (3)}$$

donde $R(t) \in \Re^{p}$ es el vector de referencias en los ejes x, y y z. Finalmente, el cálculo de las ganancias $k^{-} \in \Re^{p\times p}$ y $k \in \Re^{p\times n}$ es el problema principal de este trabajo.

Control por retroalimentación de estados

Como se mencionó anteriormente, se busca controlar las dinámicas traslacional y rotacional de un UAV. Debido a las no linealidades del sistema a controlar, los modelos utilizados para calcular las ganancias son el doble integrador [19]:

$$\begin{bmatrix} \dot{p}_x \\ \dot{p}_y \\ \dot{p}_z \\ \dot{v}_x \\ \dot{v}_y \\ \dot{v}_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_x \\ p_y \\ p_z \\ v_x \\ v_y \\ v_z \end{bmatrix} + \qquad \text{Ec. (4)}$$

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ \sigma & 0 & 0 \\ 0 & \sigma & 0 \\ 0 & 0 & \sigma \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{\mathcal{T}1} \\ u_{\mathcal{T}2} \\ u_{\mathcal{T}3} \end{bmatrix}.$$

donde el vector de salidas es $y_{\mathcal{T}}(t) = Cx_{\mathcal{T}}(t)$, los estados son $x_{\mathcal{T}}(t) = [p_x, p_y, p_z, v_x, v_y, v_z]^T$, p_x, p_y y p_z son las posiciones y v_x, v_y y v_z son las velocidades traslacionales del UAV y $\sigma = 1/m$; el modelo utilizado para representar al sistema rotacional es el siguiente [20]:

$$\begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \\ \dot{\omega}_\phi \\ \dot{\omega}_\theta \\ \dot{\omega}_\psi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \phi \\ \theta \\ \psi \\ \omega_\phi \\ \omega_\theta \\ \omega_\psi \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1/j_x & 0 & 0 \\ 0 & 1/j_y & 0 \\ 0 & 0 & 1/j_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{\mathcal{R}1} \\ u_{\mathcal{R}2} \\ u_{\mathcal{R}3} \end{bmatrix}. \qquad \text{Ec. (5)}$$

donde el vector de salidas es $y_{\mathcal{R}}(t) = Cx_{\mathcal{R}}(t)$, los estados son $x_{\mathcal{R}}(t) = (\phi, \theta, \psi, \omega_c, \omega_e, \omega_\psi)$, ϕ, θ y ψ son las posiciones angulares y ω_c, ω_e y ω_ψ son las velocidades angulares del UAV y j_x, j_y y j_z son las inercias del UAV. Finalmente, la matriz C es:

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

La ley de control definida en Ec. (3) se sustituye en los sistemas de Ec. (1) y Ec. (2), obteniendo así, los siguientes sistemas:

$$\begin{aligned} \dot{x}_{\mathcal{T}}(t) &= A_{\mathcal{T}} x_{\mathcal{T}}(t) + B_{\mathcal{T}}\left(\bar{k}_{\mathcal{T}} R(t) - k_{\mathcal{T}} x_{\mathcal{T}}(t)\right) \\ &= A_{\mathcal{T}} x_{\mathcal{T}}(t) + B_{\mathcal{T}} \bar{k}_{\mathcal{T}} R(t) - B_{\mathcal{T}} k_{\mathcal{T}} x_{\mathcal{T}}(t), \end{aligned} \qquad \text{Ec. (6)}$$

$$\begin{aligned} \dot{x}_{\mathcal{R}}(t) &= A_{\mathcal{R}} x_{\mathcal{R}}(t) + B_{\mathcal{R}}(\bar{k}_{\mathcal{R}} \Phi(t) - k_{\mathcal{R}} x_{\mathcal{R}}(t)) \\ &= A_{\mathcal{R}} x_{\mathcal{R}}(t) + B_{\mathcal{R}} \bar{k}_{\mathcal{R}} \Phi(t) - B_{\mathcal{R}} k_{\mathcal{R}} x_{\mathcal{R}}(t), \end{aligned} \qquad \text{Ec. (7)}$$

agrupando los términos que contienen a los vectores de estados $x_{\mathcal{T},\mathcal{R}}(t)$ se obtienen los sistemas traslacionales y rotacional de lazo cerrado:

$$\dot{x}_{\mathcal{T}}(t) = \bar{A}_{\mathcal{T}} x_{\mathcal{T}}(t) + B_{\mathcal{T}} \bar{k}_{\mathcal{T}} R(t) \qquad \text{Ec. (8)}$$

$$\dot{x}_{\mathcal{R}}(t) = \bar{A}_{\mathcal{R}} x_{\mathcal{R}}(t) + B_{\mathcal{R}} \bar{k}_{\mathcal{R}} \Phi_d(t) \qquad \text{Ec. (9)}$$

donde $\bar{A}_{\mathcal{T},\mathcal{R}} = (A_{\mathcal{T},\mathcal{R}} - B_{\mathcal{T},\mathcal{R}} k_{\mathcal{T},\mathcal{R}}) \in \Re^{n\times n}$ y $\Phi d(t) \in \Re^{p}$ es el vector de ángulos deseados o referencias angulares.

Las matrices de ganancias $k_{\mathcal{T}}$ y $k_{\mathcal{R}}$ se obtienen colocando los polos de los sistemas utilizando el comando "place" de Matlab, los polos se colocaron en $\lambda_{\mathcal{T}} = [-3, -4.2, -5.4, -6, -7.8, -9]$ y $\lambda_{\mathcal{R}} = [-30, -34, -38, -40, -46, -50]$. Los polos se colocaron de tal manera que el sistema rotacional sea más rápido que el traslacional. Las ganancias se obtuvieron de la siguiente manera:

$$k_{\mathcal{T}} = place(A_{\mathcal{T}}, B_{\mathcal{T}}, \lambda_{\mathcal{T}})$$
$$k_{\mathcal{R}} = place(A_{\mathcal{R}}, B_{\mathcal{R}}, \lambda_{\mathcal{R}})$$

Teniendo la matriz de retroalimentación de estados $\bar{A}$ es necesario asegurar la estabilidad. Con el objetivo de asegurar la estabilidad del sistema se utilizó el siguiente lema:

Lema 1 (Kalman-Yakubovich-Popov) [21]: Sean los sistemas Ec. (6) y Ec. (7) controlables y observables. Los sistemas mencionados descritos por las matrices $\bar{A}_{\mathcal{T},\mathcal{R}} \in \Re^{nxn}$, $B_{\mathcal{T},\mathcal{R}} \in \Re^{nxn}$, $C \in \Re^{mxn}$ y $D \in \Re^{mxm}$ son estables si y solo si existen matrices $P = P^T > 0$, $P \in \Re^{nxn}$, $L \in \Re^{nxm}$ y $W \in \Re^{mxm}$ que cumplen las siguientes igualdades:

$$\begin{aligned} P\bar{A}_{\mathcal{T},\mathcal{R}} + \bar{A}_{\mathcal{T},\mathcal{R}}^T P &= -LL^T \\ PB_{\mathcal{T},\mathcal{R}} - C_{\mathcal{T},\mathcal{R}}^T &= -LW \\ D + D^T &= W^T W \end{aligned} \qquad \text{Ec. (10)}$$

El primer paso es saber si los sistemas que representan la dinámica del UAV son observables y controlables. Se tiene que las matrices de controlabilidad y observabilidad $\mathcal{C}_{\mathcal{T},\mathcal{R}}$ y $\mathcal{O}_{\mathcal{T},\mathcal{R}}$ están dadas por:

$$\begin{aligned} \mathcal{C}_{\mathcal{T},\mathcal{R}} &= [B_{\mathcal{T},\mathcal{R}} \quad \bar{A}_{\mathcal{T},\mathcal{R}}^2 B_{\mathcal{T},\mathcal{R}} \ldots \bar{A}_{\mathcal{T},\mathcal{R}}^{n-1} \; B_{\mathcal{T},\mathcal{R}}] \\ \mathcal{O}_{\mathcal{T},\mathcal{R}} &= [C_{\mathcal{T},\mathcal{R}} \quad C_{\mathcal{T},\mathcal{R}} \bar{A}_{\mathcal{T},\mathcal{R}}^2 \ldots C_{\mathcal{T},\mathcal{R}} \bar{A}_{\mathcal{T},\mathcal{R}}^{n-1}]^T \end{aligned} \qquad \text{Ec. (11)}$$

La controlabilidad y observabilidad de los sistemas se demuestra obteniendo el rango de las matrices de Ec. (11), si el rango es igual a n los sistemas son controlables y observables. Se tiene que:

$$rank(\mathcal{C}_{\mathcal{T},\mathcal{R}}) = 6$$
$$rank(\mathcal{O}_{\mathcal{T},\mathcal{R}}) = 6$$

por lo tanto, el sistema es controlable y observable. Otra condición que debe cumplirse es que la matriz $\bar{A}$ sea Hurwitz, es decir, $Re\,(\lambda_{\mathcal{T}i,\mathcal{R}i}\,(\bar{A}_{\mathcal{T},\mathcal{R}})) < 0$. La cual se cumplió al colocar los polos del sistema.

Finalmente, se utilizó el toolbox Yalmip de Matlab para encontrar las matrices que cumplan con las igualdades del lema 1. Dadas las variables:

$$P = P^T \in \Re^{n\times n},\ P > 0,$$
$$LL^T = (LL^T)^T \in \Re^{n\times n},\ LL^T > 0$$
$$LW \in \Re^{n\times m},$$
$$W^T W \in \Re^{m\times m},$$
$$D + D^T \in \Re^{m\times m},$$

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

se plantean las siguientes igualdades:

$$\bar{A}_{\mathcal{T},\mathcal{R}}P + P\bar{A}_{\mathcal{T},\mathcal{R}} + LL^T = 0,$$
$$PB_{\mathcal{T},\mathcal{R}} - C^T + LW = 0,$$
$$D + D^T - W^TW = 0,$$

Las matrices obtenidas al resolver las igualdades anteriores utilizando las matrices de la parte traslacional son:

$$P = \begin{bmatrix} 0.33 & 0 & 0 & 0.01 & 0 & 0 \\ 0 & 0.31 & 0 & 0 & 0.02 & 0 \\ 0 & 0 & 0.3 & 0 & 0 & 0.02 \\ 0.01 & 0 & 0 & 0.01 & 0 & 0 \\ 0 & 0.02 & 0 & 0 & 0.02 & 0 \\ 0 & 0 & 0.02 & 0 & 0 & 0.03 \end{bmatrix}$$

$$LL^T = \begin{bmatrix} 0.89 & 0 & 0 & 0.29 & 0 & 0 \\ 0 & 0.76 & 0 & 0 & 0.36 & 0 \\ 0 & 0 & 0.68 & 0 & 0 & 0.38 \\ 0.29 & 0 & 0 & 0.23 & 0 & 0 \\ 0 & 0.36 & 0 & 0 & 0.39 & 0 \\ 0 & 0 & 0.38 & 0 & 0 & 0.48 \end{bmatrix}$$

$$LW = \begin{bmatrix} 0.99 & 0 & 0 \\ 0 & 0.98 & 0 \\ 0 & 0 & 0.98 \\ 0.01 & 0 & 0 \\ 0 & 0.02 & 0 \\ 0 & 0 & 0.03 \end{bmatrix}$$

$$W^TW = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Sustituyendo las matrices en las igualdades anteriores se asegura la estabilidad del sistema.

Para obtener las ganancias $\bar{k}_{\mathcal{T}}$ y $\bar{k}_{\mathcal{R}}$ retomamos la Ec. (8):

$$\dot{x}_{\mathcal{T}}(t) = \bar{A}_{\mathcal{T}}x_{\mathcal{T}}(t) + B_{\mathcal{T}}\bar{k}_{\mathcal{T}}R(t) \qquad \text{Ec. (8)}$$

Sí $R(t) \neq 0 \Rightarrow x_{\mathcal{T}}(t) \rightarrow x_{\mathcal{T}e}$ cuando $t \rightarrow \infty$, es decir, si la referencia es diferente de 0, el estado $x_{\mathcal{T}}(t)$ debe converger a un valor estacionario $x_{\mathcal{T}e}$ cuando el tiempo tiende a infinito. Se establece la ecuación de estado estacionario:

$$0 = \bar{A}_{\mathcal{T}}x_{\mathcal{T}e} + B_{\mathcal{T}}\bar{k}_{\mathcal{T}}R(t), \qquad \text{Ec. (12)}$$

cuya salida es $y_{\mathcal{T}}(t) = Cx_{\mathcal{T}e}$.

Despejando $x_{\mathcal{T}e}$ en Ec. (12) y reemplazándolo en la salida $y_{\mathcal{T}}(t)$ se obtiene:

$$y_{\mathcal{T}}(t) = -C\bar{A}_{\mathcal{T}}^{-1}B_{\mathcal{T}}\bar{k}_{\mathcal{T}}R(t)\,. \qquad \text{Ec. (13)}$$

El objetivo es encontrar una $k_{\mathcal{T}} \therefore y(t) \rightarrow R(t)$, para esto, se busca cumplir $-C\bar{A}_{\mathcal{T}}^{-1}\,B_{\mathcal{T}}k_{\mathcal{T}} = 1$. La ganancia $k_{\mathcal{T}}$ se calcula obtiene resolviendo la siguiente ecuación:

$$\bar{k}_{\mathcal{T}} = (-C\bar{A}_{\mathcal{T}}^{-1}B_{\mathcal{T}})^{-1}\,, \qquad \text{Ec. (14)}$$

al ser el mismo método, la ganancia $\bar{k}_{\mathcal{R}}$ se calcula resolviendo

$$\bar{k}_{\mathcal{R}} = (-C\bar{A}_{\mathcal{R}}^{-1}B_{\mathcal{R}})^{-1}\,, \qquad \text{Ec. (15)}$$

En esta sección se comprobó la estabilidad del control y se obtuvieron las ganancias para controlar un UAV, en la siguiente sección se presenta un ejemplo numérico donde se pone a prueba el control diseñado.

Ejemplo numérico

Las ganancias de control se calcularon a partir de sistemas simplificados. Las ganancias obtenidas serán implementadas en un modelo que represente las no linealidades de un UAV. El modelo al que se le aplicará el control diseñado es el Newton-Euler, el cual está dado por el siguiente conjunto de ecuaciones dinámicas [22]:

$$\begin{aligned} \ddot{p}_x &= (c\phi s\theta c\psi + s\phi s\psi)\frac{T}{m}, \\ \ddot{p}_y &= (c\phi s\theta s\psi - s\phi c\psi)\frac{T}{m}, \\ \ddot{p}_z &= -g + (c\phi c\theta)\frac{T}{m}, \\ \ddot{\phi} &= \frac{j_y - j_z}{j_x}\dot{\theta}\dot{\psi} + \frac{u_{\mathcal{R}1}}{j_x}, \\ \ddot{\theta} &= \frac{j_z - j_x}{j_y}\dot{\phi}\dot{\psi} + \frac{u_{\mathcal{R}2}}{j_y}, \\ \ddot{\psi} &= \frac{j_x - j_y}{j_z}\dot{\theta}\dot{\phi} + \frac{u_{\mathcal{R}3}}{j_z}, \end{aligned} \qquad \text{Ec. (16)}$$

donde px, py y pz son las posiciones; ϕ, θ y ψ son las posiciones angulares; jx, jy y jz son las inercias del UAV; T es la fuerza de empuje en el eje z; $u\mathcal{R}1$, $u\mathcal{R}2$ y $u\mathcal{R}3$ son los pares en los ejes x, y y z; g es la fuerza de gravedad; y m es la masa del UAV.

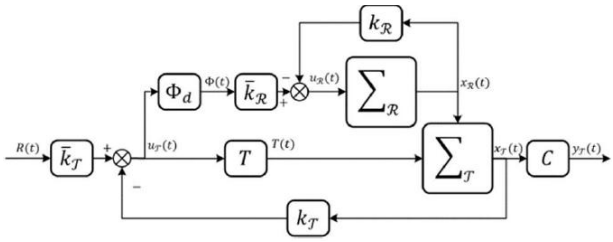


Figura 2. Esquema de control por retroalimentación de estados para un UAV.

En la Figura 2 se muestra el esquema de control que se utilizó. Se observa que los estados del sistema rotacional alimentan al sistema traslacional, ya que los movimientos traslacionales que hace un UAV dependen completamente de la rotación en sus ejes. Además, se convierten las entradas de control $u_{\mathcal{T}}(t)$ a ángulos deseados utilizando las siguientes ecuaciones [23]:

$$\begin{aligned} \phi_d &= \arctan\left(\frac{-u_{\mathcal{T}2}}{\sqrt{u_{\mathcal{T}1}^2 + (u_{\mathcal{T}3} + g)^2}}\right), \\ \theta_d &= arctan\left(\frac{u_{\mathcal{T}1}}{u_{\mathcal{T}3} + g}\right), \\ \psi_d &= 0; \end{aligned} \qquad \text{Ec. (17)}$$

resultando $\Phi_d(t) = [\phi_d,\ \theta_d,\ \psi_d]^T$. De igual manera, las entradas se utilizan para calcular la fuerza de empuje en el eje z [23]:

$$T = m\sqrt{u_{\mathcal{T}1}^2 + u_{\mathcal{T}2}^2 + (u_{\mathcal{T}3} + g)^2}. \qquad \text{Ec. (18)}$$

Las referencias fueron generadas a partir de una función compuesta por valores constantes y una función polinómica de quinto orden, dada por la siguiente ecuación [24]:

$$\begin{aligned} R(t) = R(0) &+ \frac{10}{\bar{T}^3}\big(R(\bar{T}) - R(0)\big)t^3 \\ &- \frac{15}{\bar{T}^4}\big(R(\bar{T}) - R(0)\big)t^4 \qquad \text{Ec. (19)} \\ &+ \frac{6}{\bar{T}^5}\big(R(\bar{T}) - R(0)\big)t^5, \end{aligned}$$

sí $t > \bar{T} \Rightarrow R(t) = R(\bar{T})$.

donde $R(0)$ es el valor inicial de la referencia, $R(T)$ es el valor máximo de la referencia, $\bar{T}$ es el tiempo en que se alcanzará $R(\bar{T})$ y t es el tiempo.

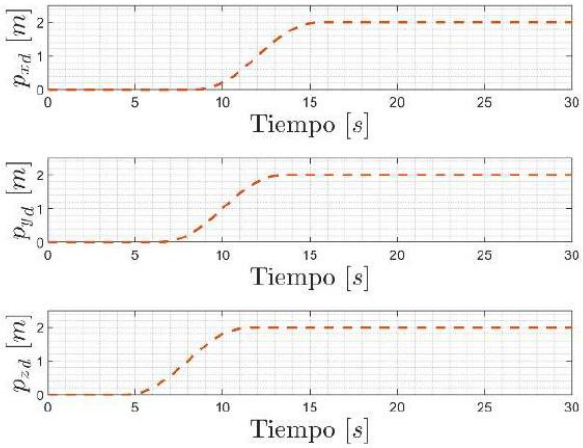


Figura 3. Trayectorias de referencia.

En la Figura 3 se observan el comportamiento de las trayectorias a seguir en cada eje del UAV. Cada movimiento del UAV empieza en un eje distinto, se mueve en x a partir de los 8 segundos y se estabiliza después del segundo 16 en 2 metros, se mueve en y a partir de los 6 segundos y se estabiliza después del segundo 14 en 2 metros, por último, se mueve en z a partir de los 4 segundos y se después del segundo 12 en 2 metros.

$$\begin{aligned} k_{\mathcal{T}} &= \begin{bmatrix} 63.88 & 0 & 0 & 15.29 & 0 & 0 \\ 0 & 22.93 & 0 & 0 & 9.28 & 0 \\ 0 & 0 & 14.74 & 0 & 0 & 7.64 \end{bmatrix}, \\ \bar{k}_{\mathcal{T}} &= \begin{bmatrix} 63.88 & 0 & 0 \\ 0 & 22.93 & 0 \\ 0 & 0 & 14.74 \end{bmatrix}, \\ k_{\mathcal{R}} &= \begin{bmatrix} 23.92 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 13.44 & 0 & 0 & 0.75 & 0 \\ 0 & 0 & 23.52 & 0 & 0 & 1.37 \end{bmatrix}, \\ \bar{k}_{\mathcal{R}} &= \begin{bmatrix} 23.92 & 0 & 0 \\ 0 & 13.44 & 0 \\ 0 & 0 & 23.52 \end{bmatrix}, \end{aligned} \qquad \text{Ec. (20)}$$

Los parámetros utilizados para el UAV simulado se encuentran en la Tabla 1 y las ganancias obtenidas están expresadas en Ec. (20). Los parámetros del vehículo aéreo se obtuvieron del dron FlameWheel 40 [25].

Tabla 1. Parámetros del UAV.

Parámetro	Valor	Unidad
m	0.91	kg
g	9.81	m/s^2
j_x	0.0104	kgm^2
j_y	0.0104	kgm^2
j_z	0.0196	kgm^2

Las simulaciones se llevaron a cabo en el entorno Simulink de Matlab, utilizando el método numérico Dormand-Price (ODE45) con un paso de integración variable durante 30 segundos.

DISCUSIÓN ANÁLISIS DE RESULTADOS

En esta sección se muestran ilustraciones donde se muestra el comportamiento a lo largo del tiempo de los estados del sistema, de las entradas de control y de los errores.

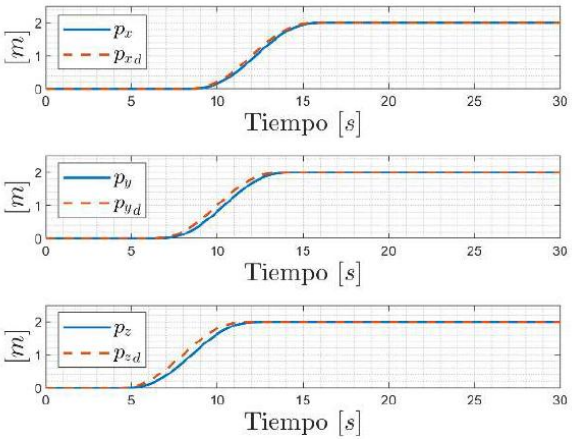


Figura 4. Posiciones del UAV.

En la Figura 4 se observa el comportamiento de cada eje del UAV, donde se observa que el UAV sigue la trayectoria de referencia con un ligero error. La línea azul representa las salidas del UAV, mientras que la línea roja punteada representa la referencia de Ec. (19).

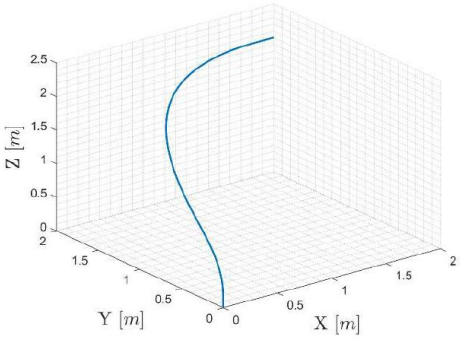


Figura 5. Trayectoria recorrida por el UAV.

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

En la Figura 5 se muestra la trayectoria recorrida por el UAV en el plano xyz, donde se observa que el UAV realiza una trayectoria suave a través del espacio, para estabilizarse a los 2 metros en x.

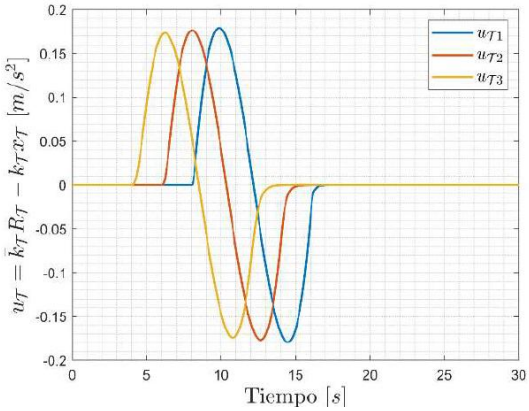


Figura 6. Leyes de control del sistema traslacional.

Para mover el UAV a la posición deseada, se calcularon las entradas de control del doble integrador, las cuales son aceleraciones en x, y y z. Posterior a obtener dichas entradas, es necesario obtener los ángulos deseados, los cuales se calculan debido a que las entradas de control del modelo Newton-Euler no corresponden a las entradas del doble integrador. Los ángulos deseados representan la orientación que debe tener el UAV para realizar los movimientos traslacionales que lleven a este a seguir la trayectoria de referencia. Estos se obtuvieron a partir del conjunto de ecuaciones mostradas en Ec. (17). En la Figura 7 se observan los ángulos deseados obtenidos a partir de las entradas de control traslacionales mostradas en la Figura 6.

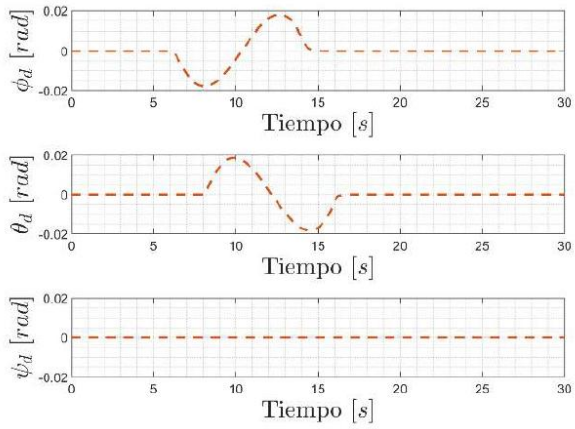


Figura 7. Ángulos deseados.

Además de calcular los ángulos deseados, las leyes de control traslacionales se utilizaron para calcular la fuerza de empuje en el eje z a partir de la Ec. (18). La Figura 8 muestra el comportamiento de la fuerza de empuje.

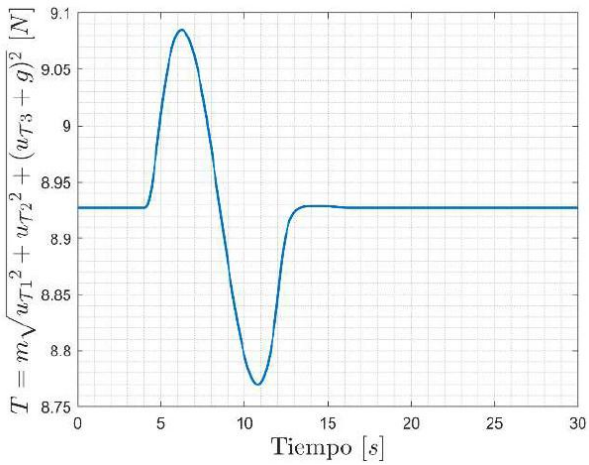


Figura 8. Fuerza de empuje en el eje z.

El modelo Newton-Euler para representar la dinámica de un UAV se observa que la parte traslacional depende de la orientación del UAV, es decir, para que el UAV realice un movimiento en el plano xyz, es necesario rotar el UAV dependiendo del movimiento que se busque realizar. En la Figura 9, se muestra el seguimiento de los ángulos deseados por parte del control de orientación. La línea azul representa la orientación en los ángulos de Euler (ϕ, θ y ψ) y la línea roja son los ángulos deseados o referencias rotacionales. Se observa un seguimiento de referencia con un error no detectable visualmente.

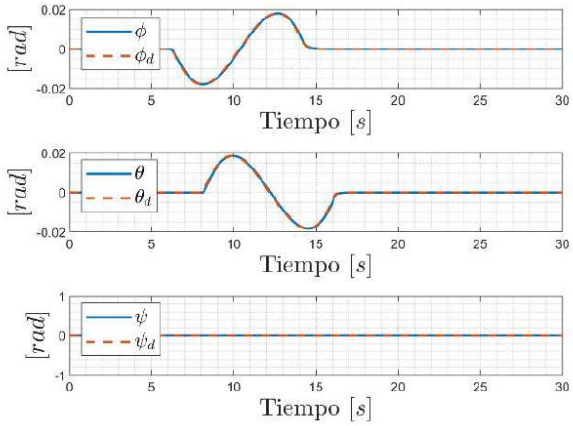


Figura 9. Orientación del UAV.

Las señales de control obtenidas por el controlador de posición se muestran en la Figura 10. Se observa como las leyes de control se ajustan para seguir la trayectoria de referencia, hasta estabilizarse cuando el UAV donde se estabilizan. Siendo la ley de control $u\mathscr{R}1$ la que oscila alrededor de 0 de manera constante.

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

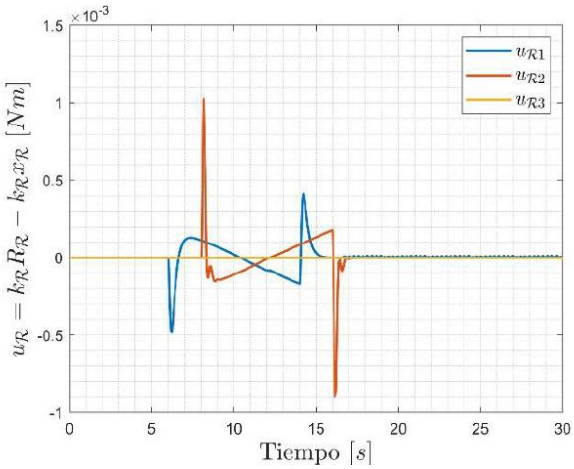


Figura 10. Leyes de control del sistema rotacional.

Con la finalidad de observar la diferencia del seguimiento de trayectoria se graficaron los errores de los controladores para el UAV. En la Figura 11 se observan los errores al seguir la trayectoria y los ángulos deseados. Se observa que los errores traslacionales $e_{\mathcal{T}}$ tienen un error máximo de 0.11, 0.19 y 0.24 metros en x, y y z respectivamente. Por otro lado, los errores rotacionales $e\mathscr{R}$ tienen un error casi 0, los errores máximos son 7.48 × 10^{-4}, 11 × 10^{-4} y 0 radianes en la orientación del UAV en ϕ, θ y ψ respectivamente.

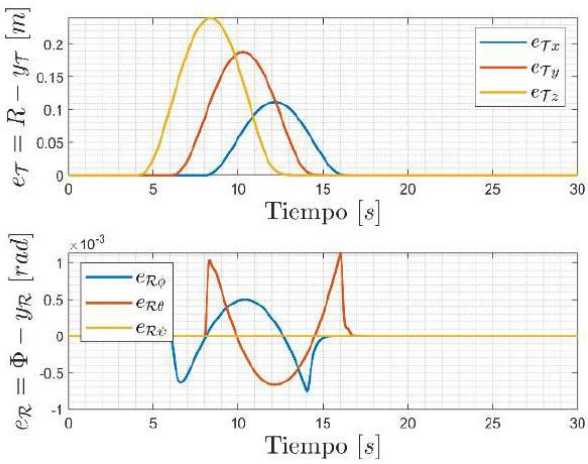


Figura 11. Errores de los subsistemas del UAV.

De esta manera, se puede comprobar la efectividad del control, ya que los errores del control traslacional son de 0.18 metros promediando los errores mencionados anteriormente; los errores del control rotacional promedian 6.29 × 10^{-4} radianes.

CONCLUSIONES

En este trabajo se presentó el diseño y simulación de un control por retroalimentación de estados aplicado a un UAV, estableciendo un marco base para futuros desarrollos en esta área. Se validó la efectividad del control mediante simulaciones, demostrando que la estrategia utilizada permite un seguimiento preciso de trayectorias y estabilidad en vuelo. A diferencia de otros enfoques como PID y LQR, este método ofrece mayor flexibilidad al permitir la asignación de polos y simplificar el cálculo de ganancias en sistemas MIMO.

Los resultados obtenidos confirman que la retroalimentación de estados es una alternativa viable y eficiente para el control de UAVs, aunque futuras investigaciones podrían centrarse en mejorar la robustez ante perturbaciones externas.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco al Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (CENIDET) por su apoyo académico y a la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (Secihti) por su respaldo financiero, lo que hizo posible este trabajo.

BIBLIOGRAFÍA

[1] Khalid, A., Mushtaq, Z., Arif, S., Zeb, K., Khan, M.A., & Bakshi, S. (2023). Control schemes for quadrotor UAV: taxonomy and survey. ACM Computing Surveys, 56(5), pp. 1-32. Recuperado de: https://doi.org/10.1145/3617652

[2] Valavanis, K.P. & Vachtsevanos, G.J. (2014). Handbook of Unmanned Aerial Vehicles. Springer Dordrecht. Recuperado de: https://doi.org/10.1007/978-90-481-9707-1

[3] Jha, A. (2016). Theory, design, and applications of unmanned aerial vehicles. CRC Press. Recuperado de: https://doi.org/10.1201/9781315371191

[4] Elmeseiry, N., Alshaer, N. & Ismail, T. (2021). A detailed survey and future directions of unmanned aerial vehicles (uavs) with potential applications. Aerospace, 8(12), pp. 363. Recuperado de: https://doi.org/10.3390/aerospace8120363

[5] Mohsan, S. A. H., Khan, M. A., Noor, F., Ullah, I., & Alsharif, M. H. (2022). Towards the unmanned aerial vehicles (UAVs): A comprehensive review. Drones, 6(6), pp. 147. Recuperado de: https://doi.org/10.3390/drones6060147

[6] Amin, R., Aijun, L., & Shamshirband, S. (2016). A review of quadrotor UAV: control methodologies and performance evaluation. International Journal of Automation and Control, 10(2), pp. 87-103. Recuperado de: http://dx.doi.org/10.1504/IJAAC.2016.076453

[7] Gu, W., Valavanis, K. P., Rutherford, M. J., & Rizzo, A. (2020). UAV model-based flight control with artificial neural networks: A survey. Journal of Intelligent & Robotic Systems, 100(3), pp. 1469-1491. Recuperado de: https://doi.org/10.1007/s10846-020-01227-8

[8] Madebo, N. W. (2025). Enhancing Intelligent Control Strategies for UAVs: A Comparative Analysis of Fuzzy Logic, Fuzzy PID, and GA-Optimized Fuzzy PID

Controllers. IEEE Access, 13, pp. 16548-16563. Recuperado de: https://doi.org/10.1109/ACCESS.2025.3532743

[9] Noordin, A., Mohd Basri, M. A., Mohamed, Z., & Mat Lazim, I. (2021). Adaptive PID controller using sliding mode control approaches for quadrotor UAV attitude and position stabilization. Arabian Journal for Science and Engineering, 46, pp. 963-981. Recuperado de: https://doi.org/10.1007/s13369-020-04742-w

[10] Luo, Y., Chao, H., Di, L., & Chen, Y. (2011). Lateral directional fractional order (PI) α control of a small fixedwing unmanned aerial vehicles: controller designs and flight tests. IET control theory & applications, 5(18), pp. 2156-2167. Recuperado de: https://doi.org/10.1049/ietcta.2010.0314

[11] Durand, S., Boisseau, B., Marchand, N., & Guerrero-Castellanos, J. F. (2018). Event-based PID control: Application to a mini quadrotor helicopter. Journal of control engineering and applied informatics, 20(1), pp. 36-47. Recuperado de: https://hal.science/hal-01722845v1.

[12] Admas, Y. A., Mitiku, H. M., Salau, A. O., Omeje, C. O., & Braide, S. L. (2024). Control of a fixed wing unmanned aerial vehicle using a higher-order sliding mode controller and non-linear PID controller. Scientific Reports, 14(1), pp. 23139. Recuperado de: https://doi.org/10.1038/s41598-024-73901-y

[13] Han, B., Zhou, Y., Deveerasetty, K. K., & Hu, C. (2018, August). A review of control algorithms for quadrotor. In 2018 IEEE international conference on information and automation (ICIA) (pp. 951-956). IEEE. Recuperado de: https://doi.org/10.1109/ICInfA.2018.8812437

[14] Nguyen, H. T., Quyen, T. V., Nguyen, C. V., Le, A. M., Tran, H. T., & Nguyen, M. T. (2020). Control Algorithms for UAVs: A Comprehensive Survey. EAI Endorsed Trans. Ind. Networks Intell. Syst., 7(23). Recuperado de: http://dx.doi.org/10.4108/eai.18-5-2020.164586

[15] Farrell, M., Jackson, J., Nielsen, J., Bidstrup, C., & McLain, T. (2019, June). Error-state LQR control of a multirotor UAV. In 2019 international conference on unmanned aircraft systems (ICUAS) (pp. 704-711). IEEE. Recuperado de: https://doi.org/10.1109/ICUAS.2019.8798359

[16] Fahmizal, F., Nugroho, H. A., Cahyadi, A. I., & Ardiyanto, I. (2024). Attitude control of UAV bicopter using adaptive LQG. Results in Control and Optimization, 17, pp. 100484. Recuperado de: https://doi.org/10.1016/j.rico.2024.100484\

[17] Elkhatem, A. S., & Engin, S. N. (2022). Robust LQR and LQR-PI control strategies based on adaptive weighting matrix selection for a UAV position and attitude tracking control. Alexandria Engineering Journal, 61(8), pp. 6275-6292. Recuperado de: https://doi.org/10.1016/j.aej.2021.11.057

[18] Smirnova, M. A., & Smirnov, M. N. (2017). Dynamic modeling and hybrid control design with image tracking for a quadrotor UAV. International Journal of Applied Engineering Research, 12(15), pp. 5072-5077. Recuperado de: https://www.ripublication.com/ijaer17/ijaerv12n15_%20(49).pdf

[19] Vazquez Trejo, J. A., Medina, M. A., Trejo, J. A. V., Beltrán, C. D. G., & Morales, J. G. (2021). Robust observer-based leader-following consensus for multiagent systems. IEEE Latin America Transactions, 19(11), pp. 1949-1958. Recuperado de: https://doi.org/10.1109/TLA.2021.9475849

[20] Schacht-Rodríguez, R., Ponsart, J. C., García-Beltrán, C. D., Astorga-Zaragoza, C. M., Theilliol, D., & Zhang, Y. (2018). Path planning generation algorithm for a class of uav multirotor based on state of health of lithium polymer battery. Journal of Intelligent & Robotic Systems, 91, pp. 115-131. Recuperado de: https://doi.org/10.1007/s10846-018-0870-0

[21] Brogliato, B., Lozano, R., Maschke, B., & Egeland, O. (2007). Dissipative systems analysis and control. Theory and Applications, Springer Cham. Recuperado de: https://doi.org/10.1007/978-3-030-19420-8

[22] Bouaiss, O., Mechgoug, R., & Ajgou, R. (2020, May). Modeling, control and simulation of quadrotor UAV. In 2020 1st International Conference on Communications, Control Systems and Signal Processing (CCSSP) (pp. 340-345). IEEE. Recuperado de: https://doi.org/10.1109/CCSSP49278.2020.9151687

[23] Guerrero-Castellanos, J. F., Vega-Alonzo, A., Durand, S., Marchand, N., Gonzalez-Diaz, V. R., Castañeda-Camacho, J., & Guerrero-Sánchez, W. F. (2019). Leader-following consensus and formation control of VTOL-UAVs with event-triggered communications. Sensors, 19(24), pp. 5498. Recuperado de: https://doi.org/10.3390/s19245498

[24] Trejo, J. A. V., Ponsart, J. C., Adam-Medina, M., Valencia-Palomo, G., & Theilliol, D. (2023, June). Distributed observer-based leader-following consensus control for LPV multi-agent systems: Application to multiple VTOL-UAVs formation control. In 2023 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS) (pp. 1316-1323). IEEE. Recuperado de: https://doi.org/10.1109/ICUAS57906.2023.10156012

[25] Vazquez Trejo, J. A., Ponsart, J. C., Adam-Medina, M., & Valencia-Palomo, G. (2024). Fault-tolerant observer-based leader-following consensus control for LPV multi-agent systems using virtual actuators. International Journal of Systems Science, pp. 1-18.

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025

Recuperado de: https://doi.org/10.1080/00207721.2024.2434895

AUTORIZACIÓN Y RENUNCIA.

Los autores del presente artículo autorizan al TecNM/Instituto Tecnológico de Zacatepec para publicar el escrito en el libro electrónico del CITID 2025. El TecNM/ITZ o los editores no son responsables ni por el contenido ni por las implicaciones de lo que está expresado en el escrito.

Fecha de Recepción: 28 de febrero 2025
Fecha de Aceptación: 21 de marzo 2025