



INSTITUTO TECNOLÓGICO
DE ZACATEPEC



Novasitz

REVISTA DE INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA Y TECNOLÓGICA

**UNA EXPERIENCIA PEDAGÓGICA
INTERESANTE CON EL USO DE LAS NTIC.**

**CONCRETO POLIMÉRICO REFORZADO
CON FIBRAS: EFECTO DE LA RADIACIÓN GAMMA**

**ANÁLISIS TEÓRICO-EXPERIMENTAL
DE UN DESTILADOR SOLAR
DE DOBLE CASETA CON
CONVECCIÓN FORZADA**



**EXPERIMENTAL AND THEORETICAL STUDY
OF HEAT CONDUCTION IN ROCK SPHERES**

ESTUDIO EXPERIMENTAL EN TUBOS DE COMBUSTIÓN

MATHEMATICAL MODEL FOR PIPELINE LEAK SIMULATION

**DISEÑO DE UNA ESPECIFICACIÓN ESTÁNDAR
PARA SIMULAR SISTEMAS DE MANUFACTURA**

**No. 49
Diciembre
2011**

ISSN No. 1405-9967
Certificado de Licitud de Título No. 11163
Certificado de Licitud de Contenido No. 7794
Que otorga la comisión calificadora de publicaciones
y revistas ilustradas de la Secretaría de Gobernación.
Reserva 04-2005-091915321800-102

DIRECTORIO

Ing. Jorge Aceves Jiménez.
DIRECTOR.

MC. Yolanda Figueroa Ocampo.
SUBDIRECTORA DE PLANEACIÓN.

MEM. Ramiro Rodríguez Salgado.
SUBDIRECTOR ACADÉMICO.

MARH. Rogaciano Velázquez Vázquez.
SUBDIRECTOR DE SERVICIOS ADMINISTRATIVOS.

Ing. Alma Lilly Nava Sedano.
JEFA DEL DEPARTAMENTO DE
COMUNICACIÓN Y DIFUSIÓN.

Eduardo Vázquez Aranda.
JEFE DE LA OFICINA DE DIFUSIÓN ESCRITA.

Eduardo Sidarta Arriaga Ambriz
JEFE DE LA OFICINA DE DIFUSIÓN AUDIOVISUAL

Susana Castro Martínez.
SECRETARIA.

Arturo Fernández Ortiz
Jesús Basilio Castrejón Cortez
IMPRESIÓN EDITORIAL DEL ITZ

COORDINADOR TÉCNICO DE
LA REVISTA NOUSITZ
Dr. René Salgado Delgado

Tiraje 250 ejemplares Distribución Gratuita.

CONSEJO EDITORIAL

ING. JORGE ACEVES JIMÉNEZ
PRESIDENTE DEL CONSEJO DE EDITORIAL

MEM. RAMIRO RODRÍGUEZ SALGADO
SECRETARIO ACADÉMICO

ING. VIRIDIANA GARCÍA NAVARRO
SECRETARIO OPERATIVO DEL CONSEJO DE EDITORIAL

ING. ALMA LILLY NAVA SEDANO
SECRETARIO TÉCNICO DEL CONSEJO DE EDITORIAL

ASESORES

DR. EDGAR GARCÍA HERNÁNDEZ
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

DR. FRANCISCO JAVIER HERNÁNDEZ CAMPOS
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

DR. FRANCISCO JAVIER CARTUJANO ESCOBAR
DEPTO DE SISTEMAS Y COMPUTACIÓN

ING. RICARDO RODRÍGUEZ ROBLEDO
DEPTO. DE METAL-MECANICA

DR. JOSÉ LUIS CORONEL TRUJILLO
DEPTO. DE INGENIERÍA INDUSTRIAL

DR. RENE SALGADO DELGADO
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

ING. RODOLFO LÓPEZ BAILÓN
DEPTO. DE QUÍMICA - BIOQUÍMICA

DRA. ANA CELIA CAMPOS HERNÁNDEZ
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

M.C. ÁNGEL SANDOVAL JACOBO
DEPTO. CIENCIAS BÁSICAS

DRA. MINERVA GUADALUPE VARGAS VEGA
POSGRADO DE METAL-MECANICA

ING. CLAUDIA BARRETO CABRERA
DEPTO. DE ING. INDUSTRIAL

ING. CLAUDIA NOGUERÓN GONZÁLEZ
INFORMÁTICA Y COMPUTACIÓN

MARH. ROBERTO YÁÑEZ HERNÁNDEZ
CIENCIAS ECONÓMICO ADMINISTRATIVAS

LIC. BLANCA NIEVES CABRERA LÓPEZ
CIENCIAS ECONÓMICO ADMINISTRATIVAS

UNA EXPERIENCIA PEDAGÓGICA INTERESANTE CON EL USO DE LAS NTIC. ————— Página (4-10)

**MTI. Claudia Gabriela Bustillos Gaytán¹, Dra. Ana Celia Campos Hdez.²
Dra. Clara Regina Moncada Andino²**

1) Instituto Tecnológico de Zacatepec, Departamento de Sistemas y Computación.
Calzada Tecnológico No. 27 Zacatepec Morelos, C.P. 62780, clayhab@yahoo.com.mx

2) Instituto Tecnológico de Zacatepec, Departamento de Ciencias Básicas.
Calzada Tecnológico No. 27 Zacatepec Morelos, C.P. 62780.

CONCRETO POLIMÉRICO REFORZADO CON FIBRAS: EFECTO DE LA RADIACIÓN GAMMA ————— Página (11-20)

Gonzalo Martínez Barrera*, Elisa Martínez Cruz, Miguel Martínez López
Laboratorio de Investigación y Desarrollo de Materiales Avanzados (LIDMA), Facultad de Química,
Universidad Autónoma del Estado de México, Km.12 de la carretera Toluca-Atlaconulco,
San Cayetano 50200, Mexico; e-mail: gonzomartinez02@yahoo.com.mx

ANÁLISIS TEÓRICO-EXPERIMENTAL DE UN DESTILADOR SOLAR DE DOBLE CASETA CON CONVECCIÓN FORZADA ————— Página (21-44)

M. Castillo-Téllez¹, O. Cazarez-Candia², A. Sánchez-Juárez¹, J. Campos-Álvarez¹

1) Universidad Nacional Autónoma de México, Materiales Solares, Temixco, Morelos, 62580, México.
macat@cie.unam.mx

2) Instituto Mexicano del Petróleo, Eje Central Lázaro Cárdenas No. 152 Col. San Bartolo Atepehuacan,
07730 México D. F.

3) Instituto Tecnológico de Zacatepec. Calzada del Tecnológico No. 27. Zacatepec, Morelos, 62780 México.

EXPERIMENTAL AND THEORETICAL STUDY OF HEAT CONDUCTION IN ROCK SPHERES ————— Página (45-50)

**Contreras-Palacios A.¹, Cazarez-Candia O.^{1,2*}, Torres-Tapia I.G.¹, Ovando-Castelar R.¹,
Campos-Álvarez J.¹**

1) Instituto Tecnológico de Zacatepec, Calzada Tecnológico No. 27, Zacatepec, Morelos, C.P. 62780,
cazarezoct@hotmail.com

2) Instituto Mexicano del Petróleo, Eje Central Lázaro Cárdenas Norte 152, col. San Bartolo Atepehuacan,
México D.F., C.P. 07730

ESTUDIO EXPERIMENTAL EN TUBOS DE COMBUSTIÓN ————— Página (51-68)

Pedro Valentín Verazaluze-Barragán¹, Octavio Cazarez-Candia^{1,2}, Juana Cruz-Hernández²

¹Instituto Tecnológico de Zacatepec, Departamento de metalmecánica, Calzada Tecnológico No. 27
Zacatepec Morelos, C.P. 62780.

² Instituto Mexicano del Petróleo, Recuperación de hidrocarburos, Eje Central Lázaro Cárdenas
Norte 152, San Bartolo Atepehuacan, Del. Gustavo A. Madero, Distrito Federal, C.P. 07730,
ocazarez@imp.mx

MATHEMATICAL MODEL FOR PIPELINE LEAK SIMULATION ————— Página (69-79)

Lazaro Molina-Espinosa^{1*}, Cristina Verde-Rodarte², Octavio Cazarez-Candia³

1) Instituto Mexicano del Petróleo, México, D.F. C.P. 07730, Imespino@imp.mx,

2) Instituto de ingeniería, UNAM, México, D.F. C.P. 04510, cverder@ingen.unam.mx

3) Instituto Tecnológico de Zacatepec, Calzada del Tecnológico No. 27. Zacatepec, Morelos,
CP. 62780, Mexico, ocazarez@imp.mx

DISEÑO DE UNA ESPECIFICACIÓN ESTÁNDAR PARA SIMULAR SISTEMAS DE MANUFACTURA ————— Página (80-96)

Dr. José Luis Coronel Trujillo¹, Guadalupe Gómez Ortiz¹, Luis Alberto Medina Juárez¹, Óscar Román Rosales¹,
Nelsón Alfredo Mariaca Cárdenas, Elías Estrada Gonzaga¹.

1) Instituto Tecnológico de Zacatepec, Departamento de Ingeniería Industrial, Departamento de posgrado e
investigación. Calzada Tecnológico No. 27 Zacatepec, Morelos, C.P. 62780, zacatepecjct@hotmail.com

Una experiencia pedagógica interesante con el uso de las NTIC.

MTI. Claudia Gabriela Bustillos Gaytán^{1*}, Dra. Ana Celia Campos Hdez.²
Dra. Clara Regina Moncada Andino²

- 1) Instituto Tecnológico de Zacatepec, Departamento de Sistemas y Computación. Calzada Tecnológico No. 27 Zacatepec Morelos, C.P. 62780, clayhab@yahoo.com.mx
- 2) Instituto Tecnológico de Zacatepec, Departamento de Ciencias Básicas. Calzada Tecnológico No. 27 Zacatepec Morelos, C.P. 62780.

RESUMEN

Como el uso de las nuevas tecnologías de la información y las comunicaciones resultan ser importantes en la actualidad para enriquecer el proceso de aprendizaje, siempre que se apliquen con una verdadera intensión pedagógica, en el presente trabajo se describe a grandes rasgos una experiencia tenida en la impartición de la asignatura Fundamentos de Desarrollo de Software con el uso de algunos recursos computacionales libres, resaltándose las vivencias de dicha experiencia y sobretodo los resultados obtenidos con la misma.

Palabras clave: Nuevas Tecnologías de la Información y las comunicaciones, Proceso Docente, Fundamentos de Ingeniería de Software.

ABSTRACT

As the use of new information technologies and communications turn out to be important today to enrich the learning process, provided they are implemented with a real pedagogical intent, this paper outlines an experience held in the teach the subject Fundamentals of Software Development with the use of some free computer resources, highlighting the experiences of this experience and especially the results obtained with it.

Keywords: New information technologies and communications, teaching process, Foundations of software engineering.

1. Introducción

Está claro que a todos nos interesa la educación, tanto como la religión, la política y el dinero, porque son las cosas que más les impacta en las personas. Pero en particular hay un interés muy puntual en la educación a nivel mundial y en nuestro país, porque se tienen muchas esperanzas en que México avance exitosamente y para ello la educación resulta ser el pilar fundamental, pues serán los jóvenes que hoy se formen, los actores claves que trabajen incansablemente en el desarrollo futuro mexicano y por tanto tienen que formarse lo mejor posible, con calidad, integralmente.

Luego entonces, no se puede ni debe desaprovecharse oportunidad alguna, ni escatimarse esfuerzo en la formación de las nuevas generaciones y por supuesto, el empleo de las nuevas tecnologías de la información y las comunicaciones (NTIC) no puede obviarse, si con ello se logran resultados mejores. No pocos trabajos actualmente abordan la utilización de la tecnología para facilitar el aprendizaje: algunos abordan netamente el aspecto teórico que encierra dicha utilización, otros muestran determinadas experiencias y es en dicho grupo que se enmarca el presente trabajo, que pretende exponer las vivencias de una experiencia pedagógica interesante de

utilización de las NTIC como apoyo para la impartición de una materia específica del área de Ingeniería en Sistemas Computacionales.

Aunque indudablemente se hablará de la concreción de las NTIC en la impartición de la materia y se discutirán los resultados obtenidos, la intención de las autoras es, además, lograr una reflexión importante en torno al por qué se selecciona cada herramienta en función de las competencias que se requiere desarrollar en los aprendices pero sobre todo, ponderar la necesidad que tienen los docentes de propiciar una formación integral, independientemente de la materia de que se trate, lo cual se facilita con el empleo de la tecnología.

2. El contexto de la experiencia.

Para poder entenderse perfectamente la experiencia y los factores que potenciaron o no dicha experiencia, se hace necesario primero delimitar el contexto de la misma y en ese sentido se impartió la materia Fundamentos de Desarrollo de Software, perteneciente a la curricula de Ingeniería en Sistemas en modalidad presencial, del Sistema de Educación Tecnológica del país, en una institución tecnológica estándar, es decir, con determinada experiencia acumulada en dicha área y con limitantes de recursos como cualquier institución pública del país.

Es una asignatura que se cursa en los primeros semestres de la carrera y brinda el soporte teórico básicamente para el desarrollo de las competencias que debe adquirir el futuro ingeniero, por cuanto se abordan los conceptos fundamentales de la Ingeniería de Software. En específico, la asignatura tiene por objetivo “Proporcionar los conocimientos y el desarrollo de habilidades que le permitan proponer y analizar los elementos básicos del desarrollo de un producto de software”. Por lo anterior y sin demeritar los aspectos prácticos que involucra, ésta materia tiene un peso teórico importante y como regla práctica, los alumnos de dicha área no siempre se motivan por esa base teórica, quizás porque muchos arrastran algunas malas prácticas de programación aprendidas en su formación tecnológica media o autodidacta. [1]

Independientemente de las particularidades de la asignatura en cuestión, existen otros objetivos a alcanzar por parte de los alumnos, como pueden ser: tener una actitud de protección al medio ambiente o mejorar la comunicación con sus semejantes, porque son competencias que los alumnos necesitan como profesionales y deben adquirir en su formación profesional, por tanto, fomentar el desarrollo de tales competencias resulta ser también un problema a solventar por el profesor en cuanto a buscar la forma pedagógica adecuada que propicie el desarrollo de las mismas.

Finalmente debe puntualizarse el hecho de que, al tratarse de alumnos del área de Sistemas

Computacionales implica el trabajar con alumnos que sienten gusto por las tecnologías computacionales y las comunicaciones y tienen alguna experiencia en su empleo, adicional, al que todos los jóvenes de la era digital ya tienen por el simple hecho de haber nacido en un período de profundos cambios tecnológicos y de informatización de la sociedad.

3. El reto pedagógico a vencer

En la literatura se refleja que un objeto de aprendizaje (OA) es una entidad informativa digital desarrollada para la generación de conocimiento, habilidades y actitudes, que tiene sentido en función de las necesidades del sujeto y que se corresponde con una realidad concreta. Su importancia no radica en quien lo diseñe o lo desarrolle, sino en quién lo va a recibir para promover aprendizajes que sean significativos para él. [2]

También existen determinados repositorios de diferentes instituciones prestigiosas que cuentan con objetos de aprendizajes ya probados y con un alto nivel de realización. Por otro lado, ya se ha expresado la idea que el uso del software libre y los recursos de fácil acceso pueden contribuir a la innovación didáctica en la enseñanza si se emplean con una verdadera intención didáctica. [3]

Partiendo de las premisas anteriores y tomando en cuenta que los alumnos de esta área cuentan con determinadas habilidades ya desarrolladas en el uso de los medios computacionales, se llegó a la conclusión de que independientemente de que se trata de una materia que se imparte presencialmente, se puede enriquecer el proceso docente si se combina el uso de las nuevas tecnologías tanto en el aula como fuera de esta, con una serie de actividades a desarrollar en tiempo extra-clases que contribuya a:

- Aumentar la motivación de los temas.
- Propiciar el intercambio de ideas entre alumnos y alumnos-profesor.
- Incentivar la creatividad de los alumnos.
- Ayudar a fomentar valores y actitudes en otros rubros como: cuidado del medio ambiente, amor a la patria, etc.
- Potenciar el trabajo grupal.
- Apoyar el aprendizaje de los alumnos independientemente de las peculiaridades particulares de aprendizaje de cada uno, por cuanto se pueden emplear sin gran complicación diferentes maneras de facilitar el aprendizaje.

En resumen, la estrategia docente se desarrolló con una combinación de actividades

presenciales y no presenciales, de tal forma que las no presenciales complementaran las primeras, reafirmando conceptos y haciendo que los aprendizajes fueran verdaderamente significativos.

Otros trabajos ya han expresado que existen herramientas libres que pueden ser empleadas con estos fines, por ejemplo: los grupos en Google, videos que se encuentren en plataformas gratuitas (TED o YouTube), la creación de Blogs, Sites, Wikis, Foros, etc. [3], y tales recursos fueron básicamente los que se emplearon para concretar la experiencia en cuestión.

4. Estrategia pedagógica

El diseño pedagógico se concibió a partir de un profundo tratamiento temático, es decir, partiendo del temario de la materia y de una clasificación inicial de la naturaleza de todos los temas a tratar, se concibieron las actividades más adecuadas en cada caso para facilitar el aprendizaje de dichos temas, lógicamente eso implicó:

- Elaborar algunos materiales en diapositivas tanto textuales como gráficos, que pudieran ser mostrados y que sirvieran de base para la explicación que diera la profesora en la actividad presencial.
- Buscar diferentes artículos y textos relacionados con los temas a tratar que con rigor y conveniencia fueran base para el curso.
- Diseñar actividades de presentación del curso que facilitaran el desarrollo de las competencias: disposición para trabajar en grupo o equipo, e interactuar, habilidad de comunicación en forma oral y escrita, asumir la responsabilidad de aprender, habilidades de lecto-escritura y razonamiento abstracto.
- Diseñar actividades relacionadas con los temas que permitieran el desarrollo de las competencias:
 - **Instrumentales:** Comunicarse en forma oral y escrita, potenciar las habilidades para el uso de tecnologías de la información, representar e interpretar conceptos en diferentes formas, pensamiento lógico, algorítmico, heurístico, analítico y sintético.
 - **Interpersonales:** Reconocimiento de conceptos o principios integradores, capacidad crítica y autocrítica, disposición para trabajar en equipo, habilidades interpersonales.
 - **Sistémicas:** Procesar e interpretar datos, modelar fenómenos y situaciones, resolución de problemas, trabajar en forma autónoma.

- Hacer una búsqueda de videos en la plataforma gratuita YouTube, que permitieran ilustrar algunas ideas básicas, transmitir los conceptos y hacer significativos determinados modelos.
- Diseñar los instrumentos de evaluación adecuados a cada tema a partir de una combinación de la evaluación con la co-evaluación y la autoevaluación.

5. Implementación de las NTIC en la impartición del curso.

El curso se montó en una página Web que se crea a tales efectos, con un diseño amigable y ergonómico, dividida en diferentes secciones delimitadas, en las que el alumno pudiera encontrar en forma permanente:

- El temario del curso
- Las formas de evaluación
- La planeación de actividades
- Las actividades a realizar individual y en equipos en el momento en particular de las consulta.
- Registro de las calificaciones que va obteniendo.
- Espacio de intercambio con el profesor y los restantes alumnos para intercambio de ideas y aclaración de dudas.

Para poder realizar lo anterior se hizo uso de las herramientas o servicios siguientes:

Google: Buscador de páginas web, correo electrónico (Gmail).

Grupos en Google: Servicio que facilita la comunicación y colaboración real con los miembros del grupo.

YouTube: Repositorio gratuito de materiales educativos y sitio web en el cual los usuarios pueden subir y compartir vídeos.

Slideshare: Aplicación de web que permite administrar una cuenta donde archivar, publicar y difundir las presentaciones.

Blogger de Google: Marco que permite en forma sencilla compartir ideas.

Thatquiz: Sitio web que facilita la generación de pruebas y ver los resultados de manera muy rápida.

Rubistar: Herramienta gratuita que ayuda a crear rúbricas o matrices de evaluación.

Calaméo: Programa que crea publicaciones Web interactivas. Ofrece un nuevo método de

publicación que tiene una amplia gama de opciones y es de fácil uso.

6. Reflexiones importantes derivadas de la experiencia.

- I. El uso de videos y materiales gráficos encontrados en YouTube permitió ilustrar conceptos y valores de forma mucho más elocuente de lo que en forma verbal pudiera hacer cualquier facilitador en forma verbal, por ejemplo, un video sobre el calentamiento global resulta ser más educativo en materia de protección del medio ambiente que cualquier frase que se pueda decir por parte del profesor en el aula.
- II. La estimulación de la comunicación oral y escrita por medio del análisis de materiales de lectura y el intercambio de ideas entre alumnos y entre alumnos y profesores resultó ser un elemento clave desde el punto de vista pedagógico.
- III. La utilización intensiva de los mapas conceptuales y mentales tanto en el aula como en la Web constituyo un elemento importante para el entendimiento de conceptos y el desarrollo de habilidades de síntesis.
- IV. El no acotar rígidamente el horario de trabajo resultó de agrado en muchos alumnos y facilitó que el espacio de aprendizaje no se limitara al aula, sino que se expandiera a cualquier espacio en que se trabajara.
- V. Fue mucho más fácil la aclaración de dudas, la que no se limito a facilitador alumno, pues entre los propios alumnos se presentó de forma natural y dinámica.
- VI. Los trabajos que se crearon producto de las actividades orientadas además de contar con calidad demostraron que hubo una elevada creatividad, por ejemplo, se diseñaron videos por partes de los alumnos de alta calidad en los cuales ellos mismos resultaban ser los actores que exponían ideas.
- VII. Se facilitó colateralmente el aprendizaje de diferentes herramientas por partes de los alumnos, contribuyéndose con su formación como futuros profesionistas de la computación.
- VIII. Fácilmente se pudo implementar las diferentes formas de evaluación que existen permitiendo que los propios alumnos fueran jueces de sus propios avances y se desarrollaran valores como la honestidad, la ética y la colaboración humana.

7. Conclusiones.

Independientemente de que ya se acumula determinada experiencia en materia del uso de

las nuevas tecnologías en la educación, como resultó ésta ser una primera experiencia de las autoras en esta asignatura en particular y en el tema en general y creyendo firmemente de cualquier trabajo es susceptible de ser mejorado, se solicitó una retroalimentación constante a los alumnos acerca de la forma de trabajar.

Al respecto puede expresarse que hubo aspectos criticados a lo largo del semestre y dinámicamente se corrigieron en aras de lograr un resultado positivo en el aprendizaje de los alumnos, sin embargo, en términos generales hubo aceptación por parte de ellos de la forma empleada, lo cual evidenciaron explícitamente a partir de comentarios recibidos.

Finalmente y como elemento decisivo, las calificaciones finales del curso fueron altas dando muestra del nivel de aprendizaje logrado, lo que unido a la satisfacción constatada permite afirmar que resultó ser una experiencia interesante, digna de trabajarse más en busca de mayor calidad y que pudiera ser una forma más integral de impartir las materias, al menos, del área de Sistemas Computacionales, aunque indudablemente puede resultar más trabajosa para el docente y requerirá de éste, además del dominio de la materia, el dominio de las nuevas tecnologías.

8. Bibliografía.

- [1] DGEST: “*Curricula asignatura Fundamentos de Ingeniería de Software*”, 2011, México.
- [2] Chiappe, A.; C. Parra: “*Riesgos pedagógicos de los Objetos de Aprendizaje: Retos y Limitaciones*”, Revista Educación-Comunicación-Tecnología, Vol 3, No. 5, Jul-Dic. 2008, Pag. 1-10, Colombia, ISSN-1909-2814.
- [3] Campos, A.C.; C. Bustillos; C. Moncada; M.G. Botello: “*El uso de las nuevas tecnologías de la información y las comunicaciones en el proceso de aprendizaje: un reto pedagógico*”, Revista NOUSITZ, En proceso de publicación, 2011, México, ISBN.

CONCRETO POLIMERICO REFORZADO CON FIBRAS: EFECTO DE LA RADIACION GAMMA

Gonzalo Martínez Barrera*, Elisa Martínez Cruz, Miguel Martínez López

Laboratorio de Investigación y Desarrollo de Materiales Avanzados (LIDMA), Facultad de Química, Universidad Autónoma del Estado de México, Km.12 de la carretera Toluca-Atzacmulco, San Cayetano 50200, Mexico; e-mail: gonzomartinez02@yahoo.com.mx

RESUMEN

El concreto polimérico (PC) es un material compuesto muy versátil debido a su uso, en: Construcción y reparación de estructuras, pavimentos de carreteras y puentes, tuberías de aguas residuales y estructurales, así como en paneles decorativos de la construcción. Estos composites presentan valores más altos en propiedades como resistencia mecánica, rigidez, rendimiento a altas temperaturas, resistencia a la corrosión, dureza o conductividad. La ventaja de utilizar polímeros en los PCs es la gran sensibilidad a cambios en los enlaces químicos; que provocan valores diferentes en cristalinidad, densidad, coeficiente de expansión térmica, módulo de elasticidad, permeabilidad, así como la resistencia a la corrosión, a la abrasión y a disolventes. Esta modificación se puede realizar mediante radiación gamma. En este trabajo se estudiaron los efectos de la radiación gamma en las propiedades de deformación mecánica de PCs a base de resina poliéster insaturada, mármol y fibras de polipropileno (PP). Se utilizaron diferentes tamaños de partícula de mármol (0.71, 1.40 y 2.36 mm) y dosis de 200, 250 y 300 kGy.

ABSTRACT

Polymer Concrete (PC) is a composite material which having a variety of applications: Building and repair structures, in highway or bridges pavements; as underground wastewater pipes, or as precast components for bridge panels. Some advantages compared to PCC such as: increase bond strength; increase freeze/thaw resistance, abrasion resistance, flexural, compressive and tensile strengths. Such advantages are due to the chemical modifications which provoking changes on crystallinity, density, thermal expansion, elastic modulus, permeability as well as corrosion and wear resistance. Such modifications can be carried out by gamma radiation. In the present work, we have studied the gamma irradiation effects on the young modulus of polyester-based PCs with marble and polypropylene fibers (PP). Several size marble particles were used (0.71, 1.40 and 2.36 mm), and 200, 250 and 300 kGy of gamma doses.

Keywords: Polymer concrete, polypropylene fibers, marble, strength, gamma radiation.

1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad se ha puesto de manifiesto la necesidad de producir materiales con propiedades mejoradas que superen las limitaciones existentes, tala es el caso de materiales compuestos (composites). Los cuales son la combinación de dos o más materiales, y constituidos por una matriz (fase continua) y por algun refuerzo (fase discreta); la matriz (metálica, polimérica o cerámica) es el material mayoritario y contiene al refuerzo, el cual puede estar en forma de partículas, láminas o fibras. Con los materiales compuestos se mejoran propiedades como resistencia mecánica, rigidez, rendimiento a altas temperaturas, resistencia a la corrosión, dureza o conductividad con valores mayores que los materiales originales.

El concreto polimérico (PC: por su siglas en inglés) es un material compuesto formado por la combinación de agregados minerales (arena, grava entre otros) y una resina polimérica. Debido a su rápido secado (dos horas), a valores altos en propiedades mecánicas y a su capacidad para soportar ambientes corrosivos, se ha incrementado el uso de PC en muchas aplicaciones, como una alternativa al concreto hidráulico. Por ejemplo, en construcción y reparación de estructuras, pavimentos de carreteras, puentes, tuberías de aguas residuales y estructurales, paneles decorativos de construcción entre otros.

Debido a su bajo costo, las matrices poliméricas más utilizadas en PC son a base de poliéster insaturado. La resina poliéster tiene una buena resistencia mecánica, adhesión relativamente buena con otros materiales, y buena resistencia química a la congelación y descongelación [1]. La elección de los agregados minerales es muy importante en la elaboración de los PCs, es conveniente tener el volumen más bajo posible de espacios vacíos [2, 3], se han utilizado bentonita cálcica, arena sílice, carbonato de calcio, mármol, entre otros. En algunos trabajos se han añadido fibras orgánicas o sintéticas a los PCs; dentro de estas últimas se encuentran fibras de polipropileno (PP) que ofrecen un menor costo comparado con las fibras de nylon, poliéster o de poliacrilato [4 - 6]. Poco es el efecto sobre el comportamiento mecánico de los PCs de estos refuerzos antes de sufrir alguna fractura, sin embargo mejoran sustancialmente la respuesta post-agrietamiento: mejora de dureza y ductilidad, así como resistencia a la tracción, flexión, y resistencia al impacto [7 - 11].

Cuando se somete material polimérico a la acción de radiación ionizante, se producen efectos físicos y químicos que dependen de la dosis aplicada y de la naturaleza de los polímeros en cuestión. Es bien conocido que la radiación gamma provoca tres tipos de modificación en los polímeros: degradación (scission), entrecruzamiento (cross-linking) e injerto (grafting), los cuales pueden ser controlados mediante una adecuada dosis de radiación [12, 13]. La ventaja de trabajar con polímeros es la gran sensibilidad a cambios en los enlaces químicos, obteniéndose materiales con propiedades diferentes en: cristalinidad, densidad, coeficiente de expansión térmica, módulo de elasticidad, permeabilidad, así como la resistencia a la corrosión, a la abrasión y a disolventes. Los cambios en las propiedades de un polímero después de la irradiación, se deben primeramente a la reordenación geométrica de su estructura de enlace. Algunas propiedades mecánicas se

pueden explicar en función de la rigidez de las cadenas que tiende a evitar que estas se deslicen sobre otras como consecuencia de la orientación de las cadenas laterales, induciendo un cierto grado de cristalinidad.

La radiación gamma se ha utilizado en PCs para mejorar la compatibilidad entre la matriz polimérica y los agregados por medio de modificaciones estructurales y superficiales de los componentes [3]. En el presente estudio se investigó el efecto de la energía ionizante (radiación gamma) sobre las propiedades de compresión y deformación mecánica de composites elaborados con resina poliéster insaturado, mármol y fibras de polipropileno.

2. PARTE EXPERIMENTAL

2.1 Material. Para la elaboración de los PCs se empleo: Como matriz, resina de poliéster insaturada comercializada con el nombre PolyLite 32493-00. Sus propiedades y características se muestran en la Tabla 1. Como carga se empleo mármol de diferentes tamaños de partícula: malla 25 (0.71 mm); malla 14 (1.40 mm); y malla 8 (2.36 mm), cuyas propiedades se muestran en la Tabla 2. Se adicionaron fibras de polipropileno, las propiedades se muestran en la Tabla 3. Como iniciador, se utilizó peróxido de metil etil cetona (MEKP) diluido en metil ftalato.

Tabla 1. Propiedades de resina poliéster insaturado.

Nombre	POLYLITE
Clave	32493-00
Aplicación	Concreto Polimérico
Química	Orto
Reactividad	Media
Gel (minutos)	6-8
Exotermia (°C)	145-163
Curado (minutos)	120
Viscosidad (cps)	100-200
No. Ácido en sólidos	12-26 en solución

Tabla 2. Propiedades mecánicas del mármol.

Propiedad	Valor
Densidad (g/cm ³)	2.38 – 3.10
Resistencia a la compresión (MPa)	58- 98
Resistencia a la flexión (MPa)	9.8 -19.6
Resistencia al impacto (cm)	30 - 45
Coefficiente de absorción (%)	0.2
Dureza	3- 4
Porosidad aparente (%)	0.2- 1.2

Tabla 3. Propiedades de la fibra de polipropileno.

Propiedad	Valor
Fuerza a la tracción	0.67 MPa
Módulo de elasticidad	4 MPa
Punto de derretir	165 °C
Punto de ignición	600 °C
Gravedad específica	0.91

2.2. Equipo. Radiación gamma: Los concretos poliméricos y las fibras de polipropileno fueron irradiados con rayos gamma en un irradiador Gammabeam 651 PT de la compañía NORDION, el cual funciona con lápices de cobalto 60 (^{60}Co) con vida media de 5.261 años. La tasa promedio de dosis fue de 8.5 kGy/h. **Ensayo de compresión:** La evaluación de la resistencia mecánica a la compresión de las probetas de concreto polimérico se realizó en una Máquina Universal de Pruebas marca Controls^{MR} con capacidad de 30 toneladas. La Tabla 4 muestra las condiciones del ensayo de compresión. **Difracción de rayos X:** Las fibras de polipropileno fueron estudiadas por difracción de rayos X en un difractómetro marca BRUKER D8 ADVANCE. Las condiciones de prueba fueron: potencia de tubo de 30 kV, ventana de 5-80°, tamaño de paso de 0.03° y tiempo de 0.3 s/paso.

Tabla 4. Condiciones de trabajo de la Máquina Universal de pruebas.

Condiciones	Valor
Tipo de ensayo	Control
Velocidad (en fuerza)	25 kgf/s
Velocidad (en posición)	0.30 mm/min
Límite superior de fuerza	25 t
Límite superior de posición	20 mm

2.3. Metodología.

2.3.1 Diseño de formulaciones. El concreto polimérico fue elaborado usando un 30 % de resina y 70 % de mármol en volumen. La formulación base (para tres probetas de CP) se muestra en la Tabla 5.

Tabla 5. Cantidad en peso y volumen de los componentes de los concretos poliméricos.

Componente	Peso (g)	Densidad (g/cm ³)	Volumen (cm ³)
Resina	124.02	1.1	112.5
Mármol	682.5	2.6	262.5
Catalizador	2.48	1.18	2.92

La concentración del mármol tuvo diferentes composiciones, de acuerdo al tamaño de las

partículas (0.7, 1.4 y 2.36 mm). Es decir, se elaboraron concretos con un tamaño, con dos tamaños o bien con tres tamaños de partícula.

Para el diseño de las formulaciones de concretos con fibras de polipropileno (al 0.1; 0.2 y 0.3 % en volumen), solo se sustituyó parcialmente el volumen original de mármol, tal y como se muestra en la Tabla 6.

Tabla 6. Cantidad en peso y volumen de los componentes de los concretos poliméricos con 0.1 % en volumen de fibras de polipropileno.

Componente	Peso (g)	Densidad (g/cm ³)	Volumen (cm ³)
Resina	124.02	1.1	112.5
Mármol	682.5	2.6	262.5
Fibra	0.342	0.913	0.375
Catalizador	2.48	1.18	2.92

2.3.2. Preparación de muestras. Para la determinación de la resistencia a la compresión, deformación y módulo de elasticidad estático de los PCs, se elaboraron cubos de 5x5x5 cm (Volumen de cada probeta, 125 cm³). El proceso de preparación se realizó de acuerdo a los siguientes pasos: 1. Pesar las cantidades de mármol, resina, fibra de PP y catalizador requeridas para cada formulación; 2. Mezclar el mármol y la resina hasta obtener una mezcla homogénea; 3. Para concretos con fibra, adicionar el PP de forma gradual para evitar aglomeraciones; 4. Adicionar el catalizador y mezclar (debe realizarse en un periodo no mayor a 4 minutos), 5. Vaciar la mezcla en los moldes correspondientes de manera gradual, esto es, agregar una cantidad suficiente para cubrir una tercera parte de la altura del cubo, apisonar esta cantidad, agregar otra tercera parte, apisonar y agregar el resto del material para llenar el molde y volver a apisonar; 6. El material, aunque cura en un par de horas, es desmoldado a las 24 horas (Figura 1).

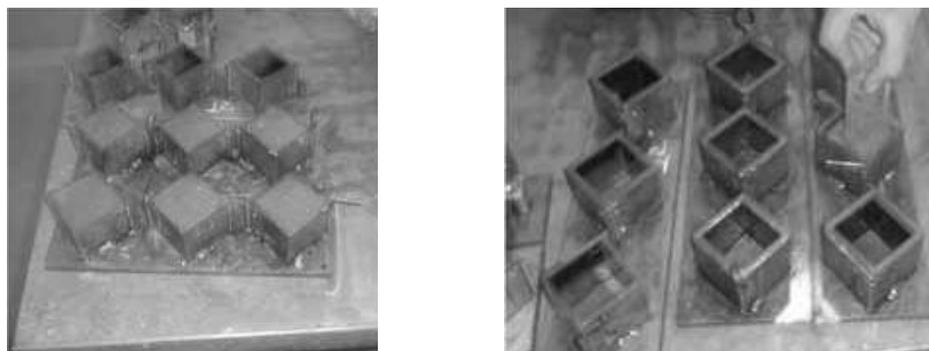


Figura 1. Elaboración de las probetas de concreto polimérico

3. RESULTADOS

Módulo de elasticidad estático: Considerando a todos los concretos poliméricos, se obtuvieron los máximos valores del módulo de Young cuando se adicionó 0.1 % de fibra de PP e irradiando con 250 kGy (para cualquier combinación de tamaños de partícula).

Para concretos con un solo tamaño de partícula los mayores valores se alcanzan con mármol Malla 14 e irradiando con 250 kGy. Estos valores son 27% mayores en relación a concretos sin fibra (Figura 2).

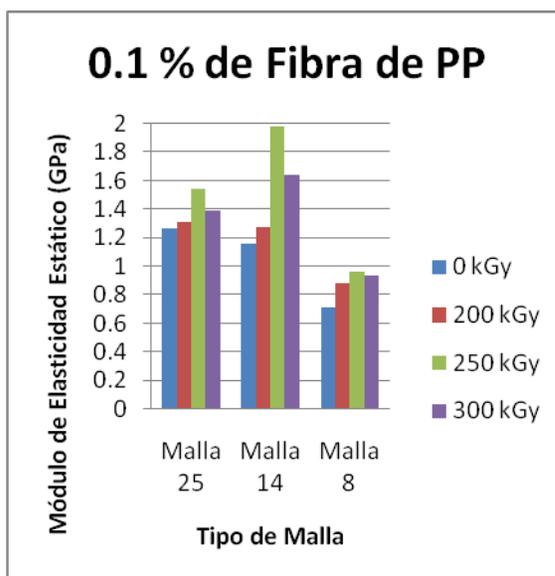


Figura 2. Módulo de elasticidad estático de concretos con un sólo tamaño de partícula de mármol y 0.1 % de fibra de polipropileno.

Si se combinan dos tamaños de partículas, los máximos valores del módulo elástico se alcanza mezclando mármol Malla 25 y Malla 14 (para concretos con 0.1 % de fibra) y aplicando una dosis de 250 kGy (Figura 3),

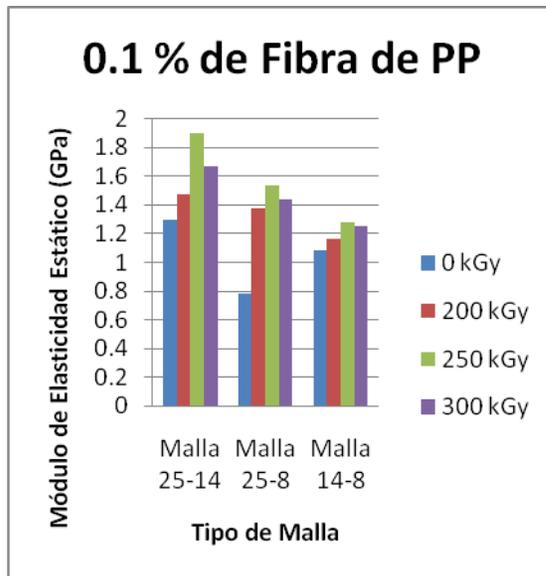


Figura 3. Módulo de elasticidad estático de concretos con dos diferentes tamaños de partícula de mármol y 0.1 % de fibra de polipropileno.

Para los concretos con tres tamaños de partícula, de acuerdo a la Figura 4, se observa un ligero aumento en los mayores valores del módulo de Young (no mayor al 8 %) para concretos con 0.1 y 0.2 % de fibras, respecto al concreto sin fibra; pero una disminución para concretos con 0.3 % de fibra de PP. Respecto al efecto de la energía ionizante, se observa un comportamiento característico: al irradiar con 250 kGy el módulo elástico presenta los mayores valores, siendo el más alto el del concreto elaborado con 0.1 % de fibra de PP.

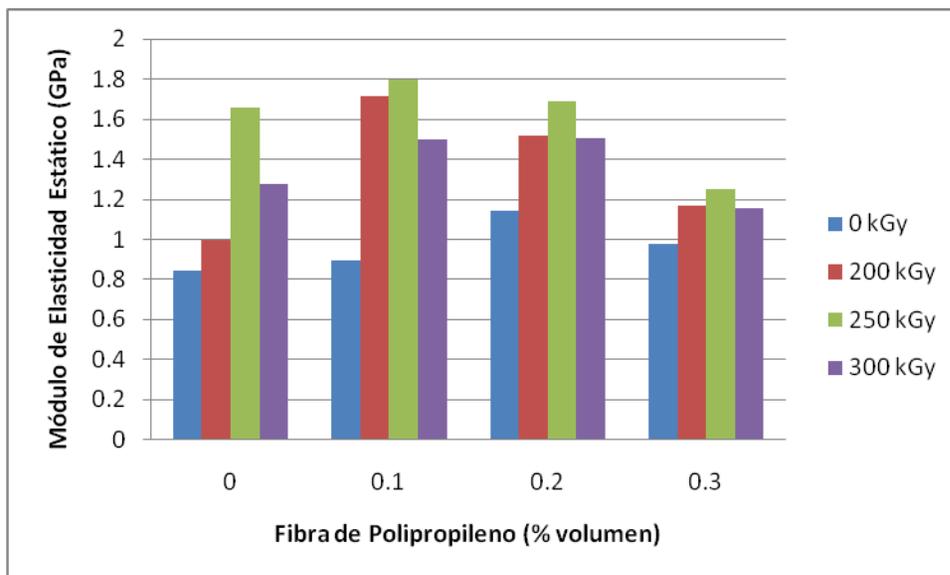


Figura 4. Módulo de elasticidad estático de concretos con tres diferentes tamaños de partícula de mármol.

El módulo de elasticidad estático presenta incrementos al adicionar 0.1 % de fibra de polipropileno debido a que las fibras interrumpen y estabilizan las microfisuras provocadas por la fuerza aplicada. Al ser estabilizadas las fisuras por la fibras, se incrementa la resistencia a la compresión lo cual se ve reflejado en el incremento de los valores del módulo de elasticidad estático.

Al adicionar 0.2 y 0.3 % de fibra a los concretos elaborados con uno, o dos tamaños de partícula, disminuyen los mayores valores del módulo elástico (valores menores a 1.3 GPa) respecto a los que contienen 0.1 % de fibra (2 GPa). Lo anterior se debe a la mala distribución de la fibra en el proceso de mezclado provocada por la cantidad de polipropileno. Se estima que hay un contenido óptimo de fibras (basados en la máxima fuerza) para cada contenido de resina.

El módulo elástico de los concretos se incrementa al someterlos a radiación gamma debido a que la energía ionizante produce efectos en las cadenas poliméricas que los constituyen, como la formación de enlaces entre cadenas y reticulado. Los mayores valores se obtienen al irradiar con 250 kGy, pero disminuyen al alcanzar 300 kGy. Este comportamiento es constante para cualquier combinación de tamaños de partícula. Los incrementos se deben a que los concretos poliméricos se vuelven más resistentes a la compresión, por lo que disminuye la deformación, es decir, se obtienen concretos con mayor rigidez. Lo anterior se atribuye a la reordenación geométrica de la estructura de enlace de la matriz polimérica y de las fibras de polipropileno, así como al incremento en el grado de polimerización de la resina, lo cual mejora el comportamiento mecánico del concreto.

Al someter el concreto a 300 kGy disminuyen los valores de resistencia a la compresión, por lo que módulo elástico es menor. Esto se debe al efecto de la radiación gamma en las cadenas poliméricas del concreto (se presenta ruptura de cadenas).

Difracción de rayos X

En la Figura 5 se muestran los difractogramas de las fibras de polipropileno sin irradiar e irradiadas a 200, 250 y 300 kGy.

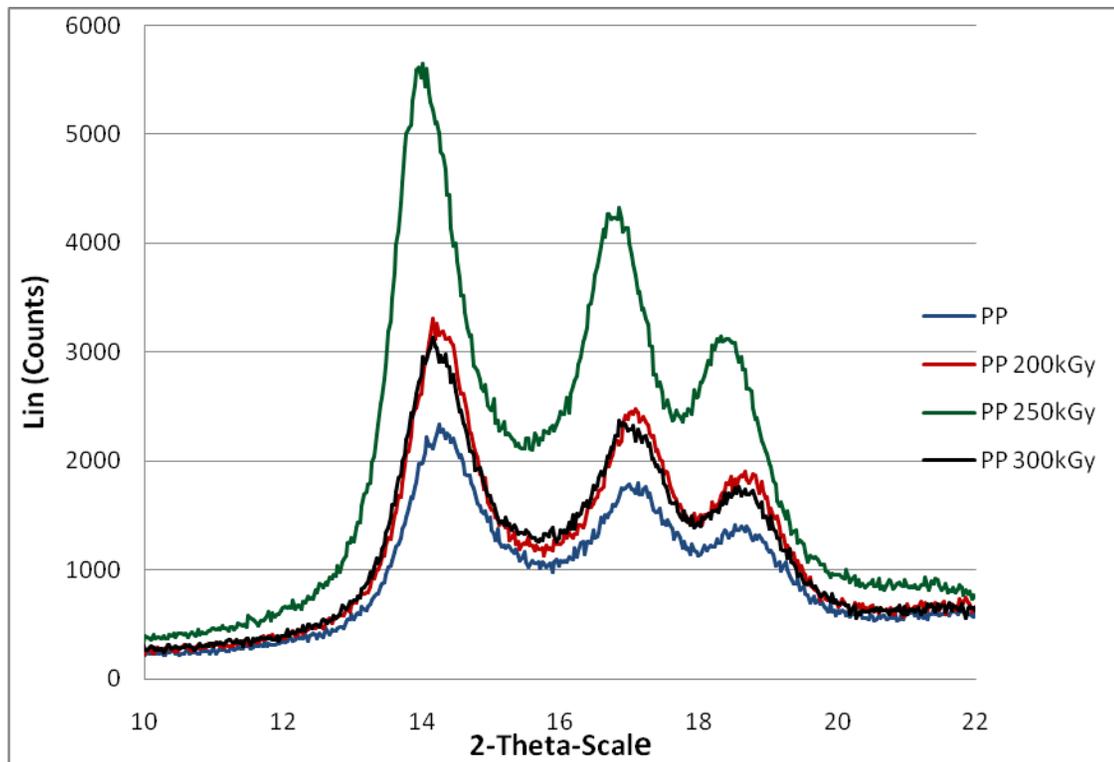


Figura 5. Diffractograma de las fibras de polipropileno sin irradiar e irradiadas a 200, 250 y 300 kGy.

Al someter las fibras de polipropileno a radiación gamma se incrementa su cristalinidad lo cual mejora sus propiedades mecánicas. Al relacionar los valores en el cambio de intensidad de las fibras irradiadas con los resultados de las pruebas mecánicas, se observa que dichos cambios concuerdan con los valores máximos de resistencia a la compresión de los concretos poliméricos. Es decir, a 250 kGy de radiación gamma, se obtiene la mayor resistencia a la compresión por lo que se incrementan los módulos de elasticidad.

4. CONCLUSIONES

Con base en las pruebas mecánicas se estableció que: a) el tamaño de partícula y la concentración de los agregados minerales influyen en las propiedades mecánicas de los concretos poliméricos debido al grado de compactación, además de su adherencia a la matriz polimérica; b) En términos generales, los módulos de Young aumentan al incrementar la dosis de radiación gamma hasta 250 kGy debido a un mayor grado de polimerización de la resina y al entrecruzamiento de las cadenas poliméricas; lo que genera concretos más rígidos; c) Al adicionar fibras de polipropileno en relación adecuada con la resina, los concretos poliméricos presentan incrementos notables en la resistencia a la compresión y por consecuencia los módulos elásticos son mayores debido a que

las fibras proporcionan soporte al concreto por su distribución homogénea; d) El uso de radiación gamma como tratamiento de post-curado de concretos poliméricos es una alternativa adecuada para mejorar su comportamiento mecánico.

Agradecimientos: Al CONACYT por el financiamiento del proyecto 49899.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Tavares C.M.L., Ribeiro M.C.S., Ferreira A.J.M., Guedes R.M., *Compos. & Structures* **57**, 47 (2002).
- [2] Reis J.M.L., Ferreira A.J.M. *Constr. & Building Mater.* **18**, 523 (2004).
- [3] Martínez-Barrera G., Brostow W., Fiber-reinforced polymer concrete: Property improvement by gamma irradiation, en “*Gamma radiation effects on polymeric materials and its applications*” Research Signpost, Kerala India, 27 – 44 (2009).
- [4] Czarnecki L., Lukowski P., Nejman R., *Cement & Concrete Compos.* **18**, 417 (1996).
- [5] Martinez-Ramirez S., Zamarad A., Thompson G.E., B. Moore, *Building and Environment* **37**, 933 (2002).
- [6] Ribeiro M.C.S., Reis J.M.L., Ferreira A.J.M., Marques A.T., *Polym. Testing* **22**, 849 (2003).
- [7] Ahn N., *J. Appl. Polym. Sci.* **90**, 991 (2003).
- [8] Martínez-Barrera G., Giraldo L.F., López B., Brostow W. *Polym. Compos.* **29**, 1244 (2008).
- [9] Martínez-Barrera G., Espinosa-Pesqueira M.E., Brostow W., *e-Polymers* **083**, 1 (2007).
- [10] Martínez-Barrera G., Texcalpa-Villarruel U., Viguéras-Santiago E., Hernández-López S., Brostow W., *Polym. Compos.* **29**, 1210 (2008).
- [11] Martínez-Barrera G., Martínez-Hernández A.L., Velasco-Santos C., Brostow W., *e-Polymers* **103**, 1 (2009).
- [12] Martínez-Barrera G., Brostow W., *e-Polymers* **061**, 1 (2010).
- [13] Bobadilla-Sánchez E.A., Martínez-Barrera G., Brostow W., Datashvili T., *eXPRESS Polymer Letters* **3**, 615 (2009).

ANÁLISIS TEÓRICO-EXPERIMENTAL DE UN DESTILADOR SOLAR DE DOBLE CASETA CON CONVECCIÓN FORZADA

M. Castillo-Téllez¹, O. Cazarez-Candia², A. Sánchez-Juárez¹, J. Campos-Álvarez¹

1) Universidad Nacional Autónoma de México, Materiales Solares, Temixco, Morelos, 62580, México. macat@cie.unam.mx

2) Instituto Mexicano del Petróleo, Eje Central Lázaro Cárdenas No. 152 Col. San Bartolo Atepehuacan, 07730 México D. F.

3) Instituto Tecnológico de Zacatepec. Calzada del Tecnológico No. 27. Zacatepec, Morelos, 62780 México.

RESUMEN

Durante la presente investigación todos los esfuerzos fueron enfocados en el análisis de las condiciones que tienen efecto sobre el funcionamiento de un destilador solar de doble caseta. La primera parte del trabajo consistió en construir un destilador tomando en consideración el estado del arte en este campo, así como las características termodinámicas y ópticas de los materiales. Durante esta parte del trabajo, se lograron desarrollar 2 contribuciones muy importantes: 1) establecer un sistema de alimentación continua para el destilador, que logrará mantener el nivel constante del agua y de esta manera optimizar el resultado de la producción, y 2) desarrollo de un sistema computacional que permite medir en tiempo real el agua producida, esto mediante el uso de una báscula conectada a una computadora personal.

En la segunda parte del trabajo se desarrolló un modelo matemático para simular las condiciones existentes dentro del destilador. Este modelo fue validado comparando las temperaturas del agua, la cubierta, el aislante y el absolvedor, contra los datos físicos obtenidos con el destilador construido. El modelo permitirá la simulación de las condiciones de operación, para encontrar las mejores condiciones de trabajo.

Palabras clave: aislamiento térmico, comportamiento térmico, parámetros de frontera, propiedades térmicas.

ABSTRACT

In the present investigation efforts have been devoted towards developing an analysis of the conditions that effect the operation of a double slope solar still. The first part of the job was to construct a still, taking on consideration the state of the art about distillation and the thermodynamic and optical characteristics of the materials. In this part of the job, two interesting contributions has been develop: 1) a way to maintain a continuous water alimentation to the still, this in order to have a continuous water level that increases the water production, and 2) to develop a computer program which can collect on real time, the water produced by the still, this was made using a weight meter connect to a personal computer.

The second part of the job was to develop a mathematical model that simulated the operating conditions that occur inside the still. The model was validated by comparing the temperatures for the water, cover, insulation and basin against data obtained from the still constructed in this work. The model will allow simulating other operating conditions to find the best conditions to work.

1. INTRODUCCIÓN

El objetivo primordial en un proceso de destilación es eliminar los sólidos disueltos en el líquido

para obtener un producto de mayor pureza. Esto significa que la técnica de destilación es una alternativa para producir agua potable para el ser humano independientemente del tipo de calidad de agua que se suministre para tal efecto; es decir, podrían ser aguas salobres, corredizas o subterráneas.

En un proceso de destilación se requiere de energía que se suministra al líquido para que este cambie de fase. Generalmente lo que se suministra es energía calorífica. Una técnica que sin quemar combustibles permite la destilación que se basa en el ciclo natural del agua gracias a la radiación y que el ingenio humano ha usado para desarrollar dispositivos que mejoran el rendimiento de este proceso son los destiladores solares. La destilación solar es una tecnología muy bien conocida. El primer uso de los destiladores data de 1551 cuando era usada por los alquimistas árabes. Otros científicos utilizaron destiladores en los siguientes siglos, incluyendo a Della Porta (1589), Lavoisier (1862) y Mauchot (1869).

En cuanto a los aspectos geométricos del destilador, hay varios parámetros que se deben estudiar: 1) de una ó dos caídas, 2) los materiales utilizados, 3) el ángulo de la cubierta con respecto al absolvedor, 4) la profundidad del espejo de agua en el absolvedor, 5) el tipo de aislante, y 6) el espesor del vidrio y del aislante.

Respecto al número de caídas a considerar, realmente ningún autor menciona el porqué eligió una o dos caída, probablemente por simplicidad sea más fácil tomar el de una caída, sin embargo no se menciona un aspecto importante, que no se aprovecha en su totalidad la incidencia de la luz solar; ya que al tener una sola caída se debe orientar al norte o al sur, para aprovechar el recorrido del sol durante el día, pero siempre hay una pequeña sombra.

En el caso de destiladores de doble caída, las caras se colocan en dirección oriente-occidente, con lo cual se aprovecha la luz solar durante todo el día, aunque como lo menciona Rubio-Cerda et al (2001) no se tienen resultados concluyentes respecto a que la orientación Este-Oeste pueda ser más productiva que la Norte-Sur. En cualquier caso lo que se busca es optimizar el aprovechamiento de la incidencia de la luz y como lo mencionan Safwet (1999) y Muafag (2007), la productividad aumenta cuando aumenta la radiación solar incidente.

En el desarrollo de los diferentes modelos experimentales hay gran variedad de ángulos utilizados para las cubiertas del destilador, la más extrema es la propuesta de Porta et al. (1997) que trabajan con destiladores cuya cubierta apenas tiene 4° respecto a la horizontal. Algunos

otros ángulos utilizados son: 15° (Kumar y Tiwari, 1996), 16° (Toure y Meukam, 1996), 10° (El-Sebaili, 2003), y 40° (Muafag, 2007). Todos los autores mencionados se han usado sin que los correspondientes autores indiquen una razón por su uso. Cabe mencionar que El-Sebaili (2003) adiciona el uso de espejos reflejantes, por lo que el ángulo sugerido puede estar en función también de esta variable. Sin embargo Al-Hinai et al. (2001) concluyó que el ángulo óptimo es de 23°, argumentando que es el ángulo que permite una productividad más uniforme durante el año, ya que en invierno a mayor ángulo, mayor rendimiento y en verano a mayor ángulo, menor rendimiento. Por su parte Safwat et al. (1999) concluyó que para junio el ángulo ideal sería de 23°, mientras que para enero, el ángulo ideal sería de -23°.

Por otro lado, Al-Hinai (2001) hace mención a algún estudio sobre el uso de los materiales utilizados, gran cantidad de autores son específicos al describir los materiales con que está construido su modelo experimental, incluso algunos de ellos resaltan el hecho de que el absolvedor sea de color negro (Muafag 2007), pero ninguno especifica el porqué de su elección. Puede ser que lo consideren obvio, en el sentido de que se requiere un buen conductor en el absolvedor, un material traslúcido en la cubierta y preferentemente algún tipo de aislamiento, para evitar disipar el calor. Al Hinai (2001) menciona que para el absorbedor es conveniente el uso de asfalto, en función a la productividad obtenida analizando diversos materiales, pero en el caso del aislante no indica que material utilizó.

Muafag (2007) menciona el uso de aluminio de 3 mm en el absorbedor, argumentando que este es un material buen conductor, pero no menciona ningún análisis sobre espesores alternativos. Al-Hinai (2001) menciona que el espesor óptimo para el aislamiento debe ser entre 0.09 y 0.13 m, sin indicar cuál fue el material que se utilizó, basado únicamente en la productividad de agua destilada obtenida. Respecto al espesor de la cubierta, Toure y Meukan (1996) concluyeron a través de sus modelos matemático y experimental que “el espesor de la cubierta de vidrio no tiene ningún efecto sobre la productividad del destilador”.

Se sabe que a menor profundidad del espejo de agua, mayor productividad del destilador, sin embargo hay discrepancia en la profundidad máxima que debe medir el espejo de agua, o bien, cuál es la repercusión real del aumento o disminución de la profundidad. Safwat et al. (1999) menciona que la productividad disminuye hasta en un 14% si la profundidad aumenta de 2 a 7 cm. Al-Hinai et al (2001) sugiere un rango óptimo entre 0.02 y 0.06 m. Toure y Meukam (1996)

encontró que si la profundidad disminuye de 60 mm a 5 mm, la productividad mejora en un 19%. Muafag (2007) realizó estudios experimentales con profundidades de 0.5, 2, 3 y 4 cm, concluyendo que la menor profundidad mejora sustancialmente la productividad, sin embargo no da una medida exacta o un rango recomendado. Tripathi y Tiwari (2004) realizan experimentaciones en un destilador activo (con dispositivos para precalentar el agua) con diferentes profundidades (0.05, 0.10 y 0.15 m), encontrando que hay una importante variación del coeficiente de transferencia de calor convectivo debido a la profundidad del agua.

En la literatura especializada se encuentran trabajos de investigación para mejorar el rendimiento de los destiladores. Por ejemplo, Romero et al.(1997) experimentó con el uso de espejos en un destilador de caída sencilla, colocándolos en la parte frontal y posterior del destilador, obteniendo una mejora en la productividad del 45.45% con una radiación promedio de 505.8 W/m²-día. Ho-Ming en Taiwan ROC, en sus trabajos de 1991, 1993 y 1999; estudia el efecto de colocar un ventilador externo a un destilador multietapas, cuyo flujo pasa por la última etapa del destilador, obteniendo sensibles mejoras en la condensación, aunque sacrificando la temperatura en el absolvedor y consecuentemente la evaporación. Porta et al. (1997) sugieren la recirculación de agua sobre la parte exterior de la cubierta para disminuir la temperatura y mejorar la condensación. Tiwari y Sinla (1992) sugieren todo un sistema de alimentación de agua precalentada, con el uso de un “calentador externo”, así como la circulación de agua sobre la cubierta para mejorar la condensación, la cual bautizan con el nombre de “destilación activa”. Khalifa et al. (1999) confirman parte de lo anterior, afirmando que el uso de precalentadores del agua, condensadores internos y externos, así como variando la alimentación del agua se mejora la productividad en destiladores de una y dos caídas. Muafag (2007) utilizó dos aspersores que coloca sobre las cubiertas de un destilador de doble caída, accionándolos cada 15 minutos, con lo que logra disminuir la temperatura en las cubiertas de 8 a 10°C. Cerda et al. (2001) analizan el girar el destilador en diferentes posiciones, tanto Norte-Sur y Este-Oeste, en este sentido, encuentran lecturas muy interesantes respecto al efecto que tiene la irradiancia en cada cubierta cuando se varía la posición.

La mayoría de los investigadores busca mejorar la productividad del destilador y todos lo logran, sin embargo lo importante a considerar es que estos dispositivos alternos sean autónomos energéticamente, sencillos y de fácil operación.

Otro gran rubro, dentro de los aspectos que más interesan a los investigadores, es el desarrollo de modelos matemáticos, aquí la mayoría se centra en intentar plantear ecuaciones que representen los fenómenos térmicos y termodinámicos que se desarrollan en el proceso de destilación, especialmente con el fin de poder predecir cuál será el volumen de agua a destilar. La mayoría de estos modelos son comparados contra resultados experimentales, llevados a cabo bajo ciertas condiciones constantes, de ubicación geográfica, época del año, etc., aunque hay algunos otros que intentan plantear nuevas ecuaciones para poder tener mejores elementos de análisis.

En el presente trabajo se diseñó y construyó un destilador con base en las investigaciones mencionadas anteriormente en donde estudiaron ángulos de inclinación de la cubierta, profundidad del espejo de agua y uso de sistema de doble caída, para las cuales se tenía un mejor rendimiento del destilador. Los materiales utilizados para su fabricación se seleccionaron en función de sus características térmicas y ópticas. También se desarrolló un modelo matemático que permite simular el comportamiento del destilador. La validación del modelo es fundamental para poder continuar desarrollando futuras hipótesis sobre alternativas en cuanto a geometría, materiales, etc.

2. EQUIPO EXPERIMENTAL

Se utilizaron dos destiladores solares de caseta experimentales (figura 1), en donde se destiló agua potable en uno y agua salina preparada en laboratorio en el segundo.

Especificaciones geométricas de los destiladores.

Los destiladores constan de 0.25 m^2 de área de captación, con dimensiones internas efectivas de 0.5 m por 0.5 m. Se utilizó una charola ó vasija de cobre como absolvedor (calibre 16, 1.61 mm de espesor) y se pintó en el fondo con pintura de color negro mate resistente a altas temperaturas con el propósito de proporcionarle alta absorción de radiación solar. La inclinación de la cubierta es de 23.5° y el material usado para la caseta (cubierta) es vidrio común de 3 mm de espesor.

Se garantizó el aislamiento térmico del sistema al eliminar todas las fugas de vapor de agua que pudiera tener el dispositivo sellándolo con silicón para evitar así pérdidas en la destilación de

agua. En la parte en la que se recarga la caseta en el absolvedor se ubicaron dos canales de aluminio a los que se les maquinó una ligera pendiente y un orificio de $\frac{1}{4}$ de pulgada los cuales son el medio captador y de transporte de condensado.

Se encuentra además un orificio a un costado del destilador reservado para alimentar el destilador con agua ya sea potable o de mar el cual cuenta con una manguera de $\frac{1}{4}$ de pulgada. En la base del destilador, en una esquina se ubicó otro orificio de $\frac{1}{2}$ pulgada el cual se destinó para desaguar. Con la intención de evitar que el calor ganado por el absolvedor se pierda mediante los fenómenos de conducción y convección cada uno de los lados y base de ambos destiladores se recubrieron con espuma de poliuretano con un espesor de 10 cm.



Figura 1. Destiladores solares de agua de doble caída en operación instrumentados con termopares tipo K.

Se adquirieron datos diariamente mediante un Data Logger marca Campbell. El beneficio de utilizar este sistema de adquisición de datos es que se obtuvieron datos precisos y confiables al medir diariamente el comportamiento térmico de cada destilador (parámetros de temperatura en la caseta, absolvedor, agua a destilar, espacio entre caseta y superficie del agua y aislante).

El destilador se instrumentó con termopares tipo K, ubicados en el interior del vidrio (cubierta del destilador), en el pico alto interno de la cubierta de vidrio, en la superficie del agua, en la base del colector, en una pared externa lateral del aislante, en la base externa del aislante y 4 termopares distribuidos a lo largo del destilador y en medio del mismo.

3. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Ambos destiladores se encuentran instrumentados con termopares tipo K, colocados estratégicamente dentro y fuera del dispositivo de acuerdo a las temperaturas necesarias para la solución de las ecuaciones que constituyen el modelo matemático; mediante estos termopares y un sistema de adquisición de datos marca Campbell modelo CR10, se están obteniendo diariamente dichas temperaturas; se cuenta además con un software para programar y extraer datos a través de la interface serial que se conecta a una computadora, este programa tiene considerado el lapso de tiempo en el que envía las lecturas durante el día, en este caso, cada diez minutos; asimismo, considera una temperatura de referencia y se especifica el uso de un multiplexor modelo AM410.

Para los propósitos de comparación entre los resultados teóricos y experimentales en la corrida del simulador se adquirieron datos de parámetros de frontera (temperatura ambiente, velocidad del aire y humedad relativa). En la tabla siguiente se proporciona la exactitud de operación en los instrumentos de medición.

Tabla 1 Porcentaje de error de acuerdo al fabricante de los instrumentos de medición.

SENSOR	ERROR MÁXIMO (Fabricante)
Radiación solar	±5.0%
Temperatura ambiente	±0.3 C
Humedad relativa	±3.0%
Velocidad del viento	±10.0%

En las tablas 2 y 3 se detalla la información obtenida de manera experimental tanto por el data logger como por la estación solarimétrica del CIE. Los datos presentados en las tablas corresponden a los datos con los que inician las mediciones del 8 de enero, este día será tomado como referencia para la comparación de datos obtenidos de manera experimental y teóricamente.

Tabla 2 Parámetros ambientales proporcionados por la estación solarimétrica del CIE el día 8 de enero del 2010.

Parámetro ambiental	Dato medido
Radiación solar	0.01 W/m ²
Temperatura ambiente	19.5 C
Humedad relativa	81.4%
Velocidad del viento	0.078 m/s

Tabla 3 Temperaturas iniciales medidas por el data logger el día 8 de enero del 2010.

Temperaturas	Dato medido (C)
--------------	-----------------

Vidrio exterior de la caseta	15.53 C
Agua	15.82 C
Absorbedor	15.95 C
Aislante	15.0 C

El agua a destilar se encuentra dentro de una bureta de nivel constante y se está alimentando el destilador con esta agua a medida que se destila la ya contenida en el absorbedor. A su vez, el agua condensada que se adhiere a la caseta de vidrio cae directamente a dos canales ubicados en la parte baja de la caseta, estos canales conducen el agua destilada a dos colectores de agua destilada. Esta agua se está pesando durante todo el día con una báscula electrónica misma que está conectada a una PC; se están obteniendo los datos de estos pesos cada diez minutos mediante un programa realizado en lenguaje visual basic. Las mediciones de agua producida se realizaron con una probeta graduada con un margen de error de acuerdo a datos del fabricante del 5%.

Composición del agua salina preparada en laboratorio

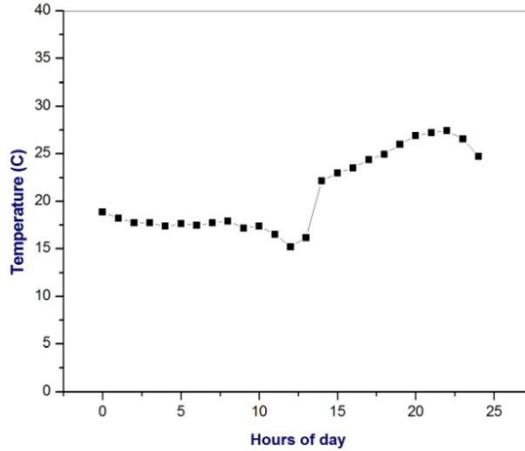
Se preparó en laboratorio el agua de mar con las concentraciones mostradas en la tabla 4.

Tabla 4 Componentes y cantidades de compuestos de agua preparada en laboratorio.

Cantidades de compuestos para la preparación de agua de mar en laboratorio	
Compuesto (gr)	Cantidad para 1lt de agua de mar
Cloruro de sodio	24
Cloruro de magnesio	5
Sulfato neutro de sodio	4
Cloruro de calcio	0.1
Cloruro de potasio	0.7

4. RESULTADOS EXPERIMENTALES

En las figuras 2, 3 y 4 se muestran la temperatura ambiente, irradiancia recibida y velocidad del viento, respectivamente del día 8 de enero del 2011.



Gráfica 1 Temperatura ambiente medida por la estación solarímetro del CIE. Tanto el efecto de la temperatura ambiente como la velocidad del viento y la irradiancia tienden a aumentar la eficiencia del destilador solar; se ha encontrado que es más fuerte el efecto de aumentar la velocidad del viento que el efecto de aumentar la temperatura ambiente, este hecho se puede explicar porque al aumentar la velocidad del viento significa un alto coeficiente de transferencia de calor, con lo que se consigue un mayor enfriamiento de la cubierta del destilador y por lo tanto una mayor tasa de condensación en el interior del destilador, por lo tanto, un mayor rendimiento. La irradiancia máxima recibida medida es un poco más de 700 W/m² y se presenta entre las 12:00 y 13:00 pm.

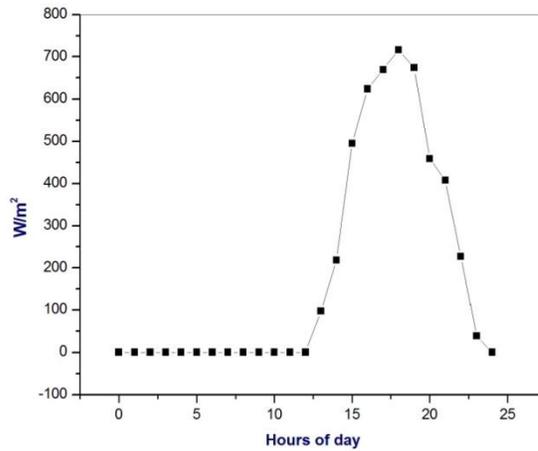


Figura 3. Irradiancia de un día completo.

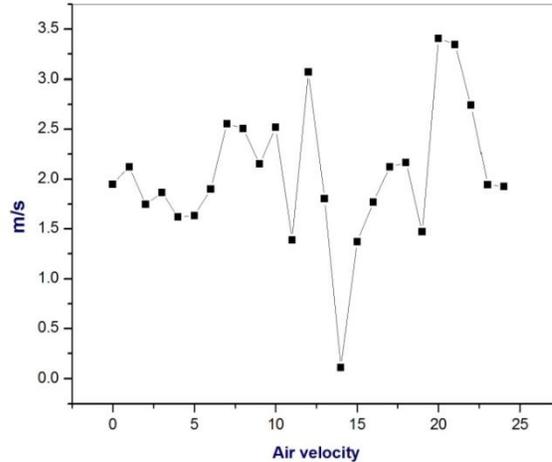


Figura 4. Velocidad del aire medida.

Comportamiento térmico de los destiladores solares.

En la figura 5 se puede observar el comportamiento térmico del destilador solar que se encuentra trabajando con agua potable.

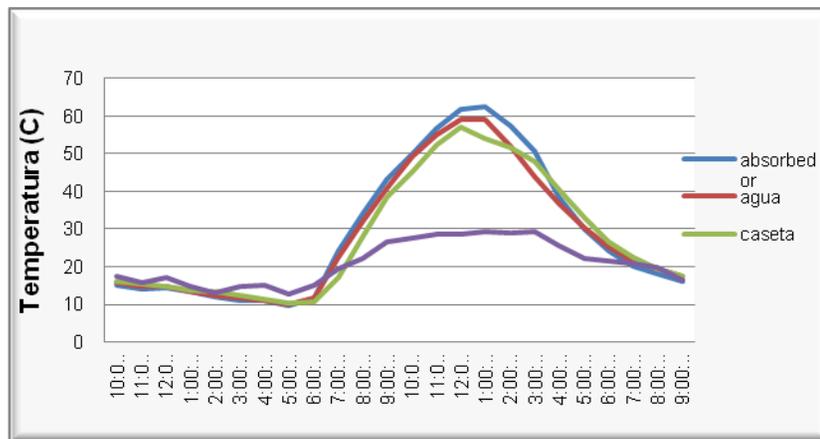


Figura 5. Temperaturas medidas dentro del destilador que contiene agua preparada en laboratorio.

Como puede observarse las temperaturas máximas se obtienen alrededor de las 12 p.m. La temperatura máxima que se alcanza llega hasta los 63 C en el absorbedor y 59 en el agua; por otra parte en la caseta se alcanzan 55 C, mientras que en el aislante la temperatura máxima es de 30 C. Se puede ver que las temperaturas están muy constantes en los picos y muy uniformes en toda la curva. A medida que las temperaturas en cada región dentro del destilador van en aumento, aumenta la producción de agua destilada diaria.

Si no se estuviera manteniendo el nivel constante de agua dentro del destilador este hecho se vería todavía más marcado puesto que a medida que se destile más agua, bajaría su nivel dentro

del absorbedor y por ende, con menor agua por calentar y mayor irradiancia recibida la destilación se daría más rápida en un solo intervalo de tiempo, es decir, sería menos uniforme. La profundidad de agua con la que se está trabajando es de 0.02 cm.

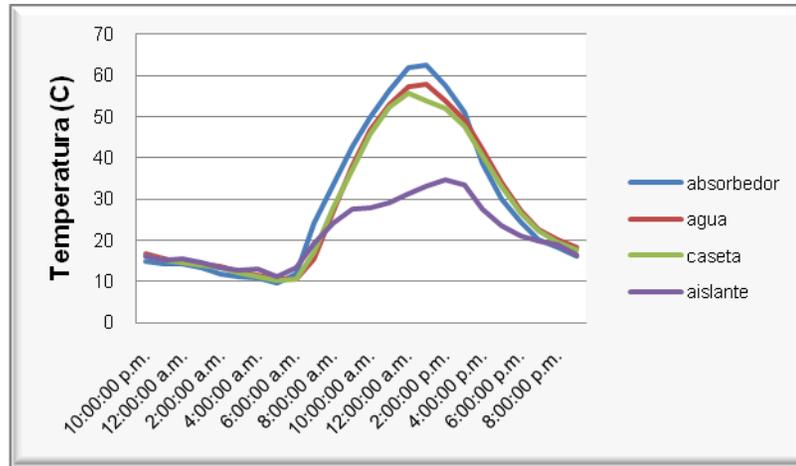


Figura 6. Temperaturas registradas en el destilador que contiene agua salina. Las temperaturas máximas (figura 6) medidas en el destilador que trabaja con agua salina, se obtienen alrededor de las 12 p.m. La temperatura máxima que se alcanza llega hasta los 62.9 C en el absorbedor y 58 en el agua; por otra parte en la caseta se alcanzan 58 C, mientras que en el aislante la temperatura máxima es de 33 C. En ambos destiladores las temperaturas están muy constantes y existe escasa diferencia entre los principales componentes (caseta, agua, aislante y absorbedor).

En la figura 7 se puede observar la irradiación recibida en función del área del destilador.

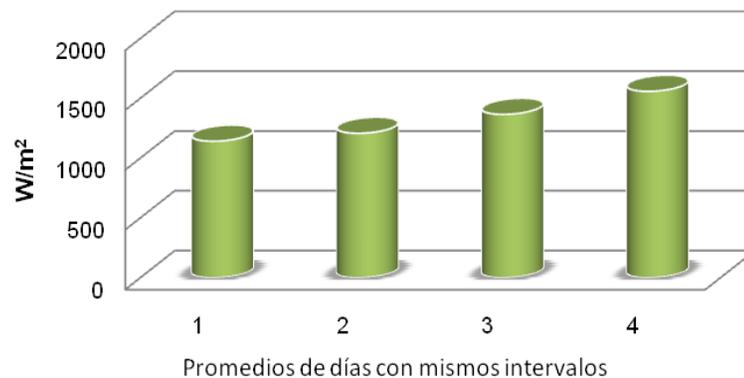


Figura 7. Recurso solar recibido involucrando el área del destilador

En la Figura 8 se muestra la producción de agua obtenida durante 11 días consecutivos.

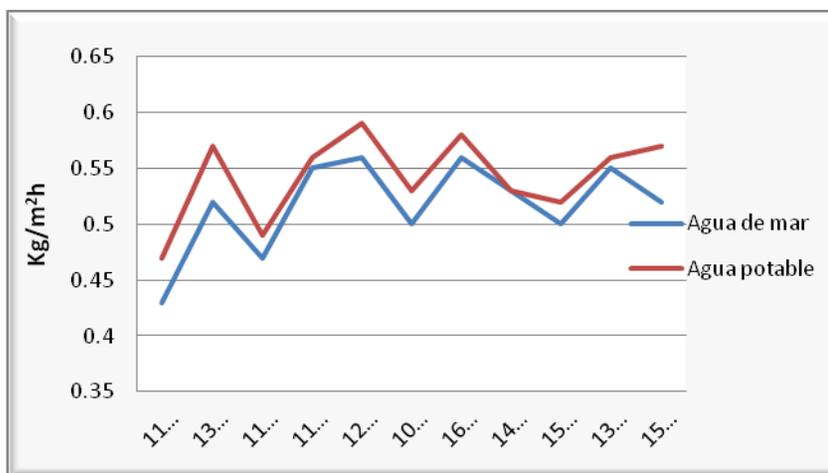


Figura 8. Producción de agua diaria de ambos destiladores en función de la irradiación.

Como se puede observar la producción de agua es muy uniforme y constante en ambos destiladores: en el destilador de agua salina la más alta producción se obtuvo los días 8 y 10 de enero (0.560 lt) mientras que en el destilador de agua potable fue el 5 y 6 de enero con 0.590 y 0.558 lt respectivamente.

Mediciones continuas de producción de agua destilada.

El proceso de destilación se llevó a cabo mediante un sistema de alimentación continua de agua a destilar, asegurando dicho proceso mediante una bureta de nivel constante que alimenta al destilador que contiene agua salina; en el segundo destilador se llevó a cabo bajo el mismo principio pero utilizando un garrafón de agua y base para éste de tipo comercial.

Se realizó un programa en Visual Basic mediante el cual se estableció comunicación con una báscula electrónica marca Tor-Rey serie L-EQ 5/10, con una capacidad mínima de medición de 0.001 Kg. La báscula estuvo permanentemente conectada a una computadora que recabó la información en períodos cortos de tiempo, logrando con esto tener un parámetro de comparación entre producción e irradiancia.

Mediante el pesaje continuo del líquido destilado que se obtiene en las botellas de recolección se logró establecer de manera puntual la producción de agua de forma constante (ver figura 9).



Figura 9. Mediciones continuas de agua destilada

Las mediciones de agua producida se realizaron con una probeta graduada con un margen de error de acuerdo a datos del fabricante del 5%. En la figura 10 se tiene la producción acumulada durante un día en donde se aprecia que los incrementos más sustanciales en la producción de agua destilada se dan entre la 1 pm y las 5 pm obteniendo un total de agua producida de 0.554 lt, lo cual concuerda con la recolección obtenida en ese mismo período.

Por otro lado, en la figura 11 se observa la destilación de agua llevada a cabo de manera puntual (en intervalos de 10 minutos) de acuerdo a las lecturas proporcionadas por la báscula, las variaciones en los rangos entre 0 y 0.02 litros que se presentan al inicio de cada día se atribuyen a errores de medición de peso por ser cantidades de masa muy pequeños (se pesa cada gota que se está destilando); se llegan a destilar hasta 55 ml al final del día lo cual coincide con la tendencia de la producción calculada teóricamente a partir de las lecturas de temperaturas e irradiancias en campo.



Figura 10. Producción de agua destilada acumulada durante un día.

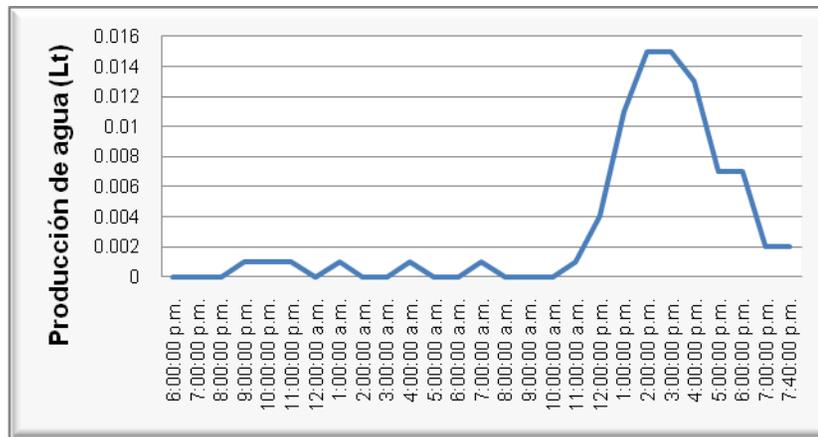


Figura 11. Producción de agua destilada en intervalos de 10 minutos durante un día.

5. PLANTEAMIENTO DEL MODELO MATEMÁTICO

El balance de energía para el destilador requiere que toda la radiación solar absorbida debe ser igual a la energía transferida de la cubierta al aire, las pérdidas del fondo y las paredes del dispositivo y la cantidad de energía almacenada en el sistema.

Las ecuaciones que rigen cada segmento del destilador son las siguientes:

- La ecuación diferencial para la caseta está dada por la ecuación 1:

$$m_{cst} C_{cst} \frac{dT_{cst}}{dt} = (\alpha_{cst} I_{abs} + \alpha_{cst} I_d) + (q_{ev} + q_{r,agua-cst} + q_{c,agua-cst}) - q_{r,cst-aire} + q_{c,cst-aire} \quad (1)$$

El primer término de la ecuación anterior se conoce como término de acumulación de energía, el primer término del lado derecho representa la ganancia de energía solar; el segundo término del lado derecho representa el calor transferido por evaporación, el tercero constituye el calor transferido por radiación del agua hacia la cubierta de vidrio, el cuarto término constituye el calor transferido por convección entre el absorbedor y la caseta; los términos que forman parte

de la pérdida de calor en el sistema son el penúltimo término que representa el calor perdido por la caseta por radiación y el calor perdido por convección hacia la atmósfera respectivamente.

El calor transferido por evaporación entre el agua y la cubierta (q_{ev}) está basado en [2]:

$$q_{ev} = 16.28(P_{agua} - P_{cst}) \quad (2)$$

Donde P_{agua} y P_{cst} son la presión de vapor del agua y la presión en la cara interna de la cubierta de vidrio, respectivamente; h_c representa el coeficiente de convección.

P_{agua} y P_{cst} se pueden calcular con las ecuaciones (3) y (4).

$$P_{agua} = e^{(25.317-5144)/T_{agua}} \quad (3)$$

$$P_{cst} = e^{(25.317-5144)/T_{cst}} \quad (4)$$

T_{agua}^4 y T_{cst}^4 representan la temperatura del agua y la temperatura de la caseta, respectivamente.

El calor transferido por radiación del agua hacia la cubierta de vidrio está dado por Dunkle [2]:

$$q_{r,agua-cst} = 0.9\sigma(T_{agua}^4 - T_{cst}^4) \quad (5)$$

Este calor se origina debido al intercambio radiante entre la superficie del agua y la cubierta de vidrio.

El calor transferido por convección entre el absorbedor y la cubierta, Este fenómeno consiste en la convección del aire encerrado entre la superficie evaporadora y condensadora y se le llama convección interna. La cantidad de calor trasferida mediante este fenómeno se puede calcular mediante la siguiente expresión:

$$q_{c,agua-cst} = h_c(T_{agua} - T_{cst}) \quad (6)$$

El calor perdido por la cubierta hacia la atmosfera por radiación, se calcula:

$$q_{r,cst_aire} = 0.9\sigma(T_{cst}^4 - T_{cielo}^4) \quad (7)$$

El calor ganado durante los procesos de convección interna por la caseta se pierde hacia la atmósfera por esta emisión radiativa. En la ecuación (7) T_{cielo}^4 representa la temperatura del cielo, mientras que σ es la constante de Stefan Boltzman, cuyo valor es:

$$5.67 * 10^{-8} \frac{W}{m^2 * K^4}$$

La temperatura del cielo es mucho muy dependiente de la cantidad de vapor de agua y polvo en la atmósfera, lo que se verá manifestado en un incremento en la reflectancia de calor del suelo.

Yellot [10] y Clark and Berhal [11] proponen la siguiente relación para la temperatura del cielo:

$$T_{cielo} = T_{aire} (0.74 + (0.006T_{dp}))^{0.25} \quad (8)$$

Donde T_{dp} es la temperatura de punto de rocío del aire del ambiente y puede ser calculado por:

$$T_{dp} = \frac{[237.3](\ln \phi + \frac{17.27T_{amb}}{T_{aire} + 237.3})}{17.27 - \ln \phi + \frac{17.27T_{amb}}{T_{amb} + 237.3}} \quad (9)$$

En la ecuación (9) T_{amb} es la temperatura ambiente.

La transferencia de calor por convección entre la caseta y el aire está dado por:

$$q_{c,cst_aire} = h_{cst} (T_{cst} - T_{aire}) \quad (10)$$

El coeficiente de transferencia de calor por convección entre la caseta y el aire está representado por h_{cst} en la ecuación 10.

La convección externa es uno de los modos principales de enfriamiento de las paredes y cubierta del destilador: el aire exterior al destilador al estar en contacto con las superficies calientes asciende de forma natural, extrayendo calor de las paredes.

Donde el coeficiente de transferencia de calor por convección entre la caseta y el aire está calculado por las siguientes relaciones [2]:

$$h_{cst} = ((Nu_L + Nu_f))^{1/3} K / L_{cst} \quad (11)$$

En la ecuación (11) K representa la conductividad y depende del material con el que esté fabricada la caseta del destilador; L_{cst} es la longitud característica de la caseta.

$$Nu_L = 0.288 Re^{0.731} Pr^{1/3} \quad (12)$$

$$Nu_{th} = 0.037 Re^{4/5} Pr^{1/3} \quad (13)$$

$$Nu_L = 0.288 Re^{0.731} Pr^{1/3} \quad (14)$$

$$Nu_f = Nu \cos^2 \phi + (1 - \cos^2) Nu_{th} \quad (15)$$

El número de Nusselt da una idea de que tan grande es la convección con respecto a la conducción. En Nu_L La L significa que se está evaluando usando la longitud total de la placa. Los subíndices en los otros Nu no tienen significado, son solo para diferenciarlos

El número de Reynolds sirve para caracterizar el tipo de flujo, laminar o turbulento. El tipo de

flujo está caracterizado por el valor del cociente entre las fuerzas de inercia debidas al movimiento del fluido y las fuerzas disipativas viscosas que se oponen al movimiento:

$$Re = \frac{\rho v L_c}{\mu} \quad (16)$$

En la ecuación (16): ρ = densidad, v = viscosidad dinámica y μ = viscosidad cinemática.

El número de Prandtl, expresa la relación entre la difusión del momento, efecto mecánico de la fricción del fluido sobre la superficie, y la difusión del calor debido a este proceso:

$$Pr = \frac{\mu C_p}{K} \quad (17)$$

En donde C_p es el calor específico y K , la conductividad térmica.

$$Ra = \frac{g\beta}{\nu\alpha}(T_p - T_\infty)L^3 \quad (18)$$

El número de Rayleigh (ecuación 16) en un fluido es la relación entre la conducción y convección en su interior. g =gravedad, β = coeficiente de expansión y α = difusividad térmica.

- La ecuación del balance de energía para el absorbedor por unidad de área está calculado por:

$$m_{abs} C_{abs} \frac{dT_{abs}}{dt} = q_{r,abs} + q_{c,agua-abs} - (q_k + q_x) \quad (19)$$

Donde $q_{r,abs}$, $q_{c,agua-abs}$ y $(q_k + q_x)$, son el calor por radiación absorbido por el absorbedor, la transferencia de calor por convección entre el agua y el absorbedor y la pérdida de calor del absorbedor hacia el aislante por conducción, respectivamente, y están dados por:

$$q_{r,abs} = \alpha_{abs}(I_{abs}\tau_{agua-abs} + I_d\tau_{agua-d}) \quad (20)$$

En cuanto al coeficiente de transferencia de calor para la ecuación de que modela dicha convección se calcula de acuerdo a la referencia [3]:

$$q_{c,agua-cst} = h_{abs}(T_{agua} - T_{abs}) \quad (21)$$

T_{abs} es la temperatura del absorbedor

$$(q_k + q_x) = K_{abs}/L_{abs}(T_{abs} - T_{amb}) \quad (22)$$

- La ecuación de balance de energía para el aislante por unidad de área del absorbedor, es:

$$m_{aisl} C_{aisl} \frac{dT_{aisl}}{dt} = (q_k + q_x) - q_{perdido} \quad (23)$$

Donde $(q_k + q_x)$ es el calor por conducción ganado por el aislante del forro del absorbedor.

La pérdida de calor por el aislante puede ser escrita:

$$q_{perdido} = U_{aisl} (T_{aisl} - T_{aire}) \quad (24)$$

T_{aisl} es la temperatura del aislante.

El coeficiente de transferencia de calor total está calculado por:

$$U_{aisl} = (L_{aisl} / K_{aisl} + 1 / h_{aisl})^{-1} \quad (25)$$

De igual forma que en las dos ecuaciones anteriores el coeficiente de convección (h_{aisl}) se calcula por la referencia [3]:

El hecho de conocer los valores medidos de las variables que componen el proceso de destilación permitirá predecir los resultados del rendimiento del destilador solar y así poder comparar su precisión con respecto a los resultados prácticos obtenidos dando como consecuencia el poder optimizar el modelo en cuestión.

6. SOLUCIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO.

Las ecuaciones que representan el sistema de ganancia y pérdida de energía en el destilador solar y que ha sido resuelto son dependientes de la irradiancia solar, de las temperaturas del agua, de la temperatura de la caseta de vidrio, de la temperatura del absorbedor y de la temperatura del aislante, además de la temperatura ambiente, humedad relativa y velocidad del aire, las que a su vez dependen directamente del tiempo a lo largo del día.

El proceso comienza con un valor inicial propuesto que debe ser supuesto de cada una de las temperaturas de la caseta, absorbedor y aislante $T_{cst,t}$, $T_{abs,t}$, y $T_{aisl,t}$, respectivamente, de igual forma, se debe suponer un valor inicial para la temperatura del agua $T_{agua,t}$.

Para poder evaluar cada una de estas ecuaciones se deben determinar los valores de los calores, mismos que dependen de las temperaturas antes mencionadas, en este punto es válido tomar como punto de partida el valor de la temperatura ambiente en todas las correlaciones que la consideren en sus respectivas ecuaciones.

Debido a que tanto la dirección como la magnitud de la radiación solar que llega al destilador están continuamente cambiando, como también sucede con las demás condiciones ambientales es necesario estimar la operación del destilador solar como un sistema dinámico en el tiempo por lo que resulta de suma importancia observar los efectos que algunas de estas variables producen sobre el proceso de destilación.

El método utilizado para la solución de ecuaciones es el de Euler. Se discretizaron las ecuaciones 1, 17 y 21; una vez discretizadas se introdujeron a un programa en visual basic, cada simulación que hace el programa y se lleva a cabo una simulación mediante un delta de tiempo (cada 10 minutos).

Se introduce además en el programa una tabla con datos de un día completo de temperaturas reales obtenidas para la caseta, absorbedor, aislante y agua. El programa “jala” para cada uno de estos componentes del destilador sus temperaturas iniciales y con estas temperaturas se comienzan a resolver las fórmulas de cada calor (radiación, convección, evaporativo), mismas que el programa utiliza para cada simulación. Estos resultados de cada calor son los que se van utilizando en cada nueva ecuación discretizada.

- La ecuación de balance de energía discretizada para la caseta es:

$$T_{cst,t+\Delta t} = \frac{\Delta t[(\alpha_{cst} I_{abs} \alpha_{cst,d} I_d)_t + (q_{ev,t} + q_{rad,agua-cst,t} + q_{c,agua-cst,t}) - q_{c,cst-amb,t} - q_{rad,cst-amb,t}] + T_{cst,t}}{m_{cst} + C_{cst}} \quad (26)$$

- La ecuación de balance de energía discretizada para el absorbedor es:

$$T_{abs,t+\Delta t} = \frac{\Delta t[(q_{abs}) + (q_{c,agua-abs,t}) - (q_k + q_x)_t] + T_{abs,t}}{m_{abs} + C_{abs}} \quad (27)$$

- La ecuación de balance de energía discretizada para el aislante es:

$$T_{aisl,t+\Delta t} = \frac{\Delta t[(q_k + q_x)_t - q_{perdidat}] + T_{aisl,t}}{m_{aisl} + C_{aisl}} \quad (28)$$

- La ecuación de balance de energía discretizada para el agua es:

$$T_{agua,t+\Delta t} = \frac{\Delta t[(\alpha_{agua} \tau_{cst} I_d)_t + q_{c,agua-abs,t}) - (q_{ev,t} + q_{c,agua-cst,t} - q_{rad,agua-cst,t})] + T_{agua,t}}{\rho_{agua} * C_{agua} * \gamma_{agua}} \quad (29)$$

Donde γ representa la profundidad del agua.

Se debe calcular la productividad instantánea para el tiempo t con la ecuación:

$$PrO = \frac{q_{ev}}{h_{fg}} \quad (30)$$

La productividad instantánea está dada en Kg/m²s; el dividendo q_{ev} es el calor de evaporación y el divisor h_{fg} es el calor latente de vaporización.

La productividad diaria es la integral de la fórmula anterior. Finalmente la eficiencia del destilador está dada por:

$$\eta = \frac{\int_0^{24*60*60} q_{ev}}{H} \quad (31)$$

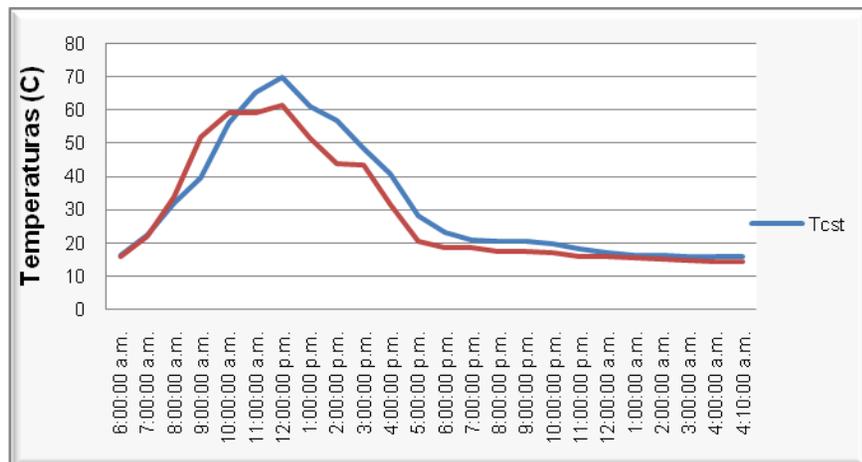
Donde H es la irradiancia total recibida a lo largo del día.

Comparación de resultados experimentales y simulados.

Para llevar a cabo el análisis sobre la confiabilidad de los resultados obtenidos hasta el momento por el programa de simulación se realizó una comparación entre los resultados experimentales y los obtenidos por la simulación del sistema.

La comparación que se presenta consiste en analizar los resultados correspondientes a un día en particular; se eligió el 8 de enero del 2011 por ser éste el día más soleado y despejado de los días en los que se logró obtener la información. Se tomó como caso de estudio el destilador que se encuentra operando con agua de llave. La destilación total de agua destilada medida en este día fue de 0.560 litros en dicho destilador. En la figura 12 se observa la información proporcionada en campo y la información que arroja el modelo matemático en el área de la caseta; de igual forma, se muestra en la Figura 13 el comportamiento que sigue la simulación y las temperaturas experimentales del agua contenida en el absorbedor.

Figura 12.
Comparación de los datos y la simulación la temperatura de la caseta.



de

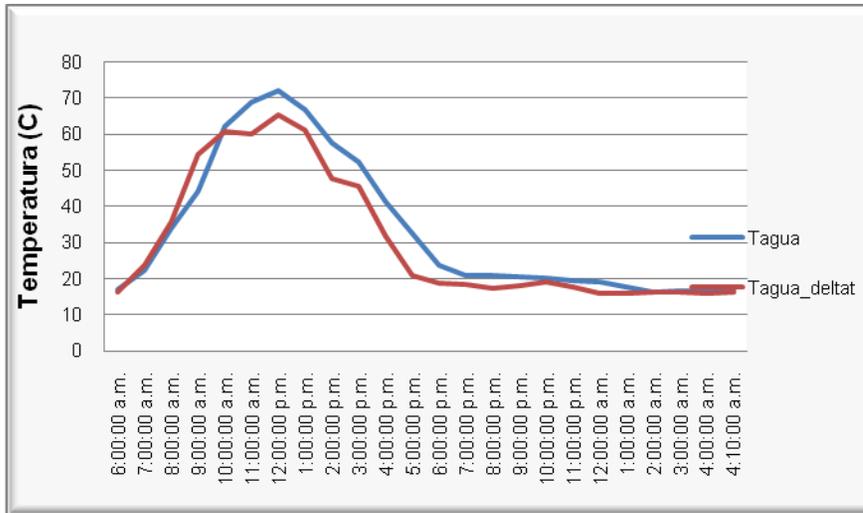


Figura 13 Comparación de los datos y la simulación de la temperara del agua.

En la figura 14 se puede analizar el comportamiento de la producción de agua, proporcionada por la simulación.

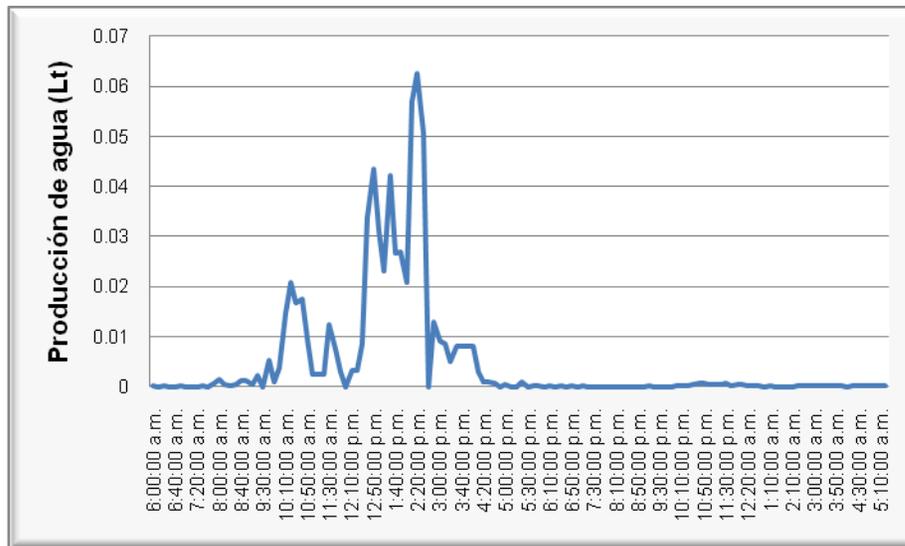


Figura 2. Producción de agua destilada calculada teóricamente.

En la figura 14 se puede apreciar que tanto esta curva como la de la figura 11 tienen el mismo comportamiento.

7. CONCLUSIONES

Se tienen en operación dos destiladores, ambos con las mismas medidas y materiales. Se analizó el funcionamiento del dispositivo con agua de diferente salinidad y se obtuvieron mediciones y análisis de resultados del comportamiento térmico de los destiladores. Las pruebas preliminares indican que no hay diferencias significativas, por lo que se puede asumir que la operación no se ve influenciada por el tipo de agua a destilar, aunque sin duda la limpieza del dispositivo si se ve afectada cuando se utiliza agua con sólidos disueltos.

Resulta muy importante para lograr el funcionamiento eficiente de los destiladores la alimentación continua del dispositivo, ya que el mantener el nivel constante en el espejo de agua dentro del destilador, garantiza una operación uniforme del mismo, la productividad está directamente relacionada con la profundidad del nivel de agua dentro del absolvedor, este problema se resolvió utilizando una bureta de nivel constante, utilizando el principio de vasos comunicantes.

Se obtuvieron mediciones de temperatura puntuales en diferentes zonas dentro y fuera del destilador del destilador. Estas mediciones fueron realizadas con termopares tipo K, que garantizan una mayor confiabilidad en la toma de lecturas.

Se desarrolló un sistema de comunicación con una báscula electrónica y una computadora personal mediante un programa realizado en el lenguaje Visual Basic que está permitiendo obtener lecturas cada 30 segundos. Dicho programa está siendo de mucha utilidad para verificar la producción de agua destilada durante todo el día.

Se llevó a cabo la validación de un modelo matemático que permite simular los valores térmicos y de eficiencia productiva obtenidos de la destilación solar. Al hacer un comparativo con los resultados experimentales y los arrojados por el modelo matemático se observa que las curvas teóricas de producción de agua concuerdan con resultados experimentales. La curva de productividad tiene una relación directa con la curva de irradiancia recibida. Al realizar un análisis con herramientas estadísticas, se pudo comprobar la cercanía de los resultados arrojados por el modelo con los datos obtenidos en campo.

8. SIMBOLOGÍA

Tabla 5 Simbología utilizada en el documento.

SÍMBOLO	SIGNIFICADO	UNIDADES
τ_{cst}	Transmitancia de la caseta	%
τ_{agua}	Transmitancia del agua	%
α_{abs}	Absorbancia del absorbedor	%
α_{cst}	Absorbancia de la caseta	%
G	Radiación solar	W
T_{abs}	Temperatura del absorbedor	C
T_{amb}	Temperatura ambiente	C
T_{cst}	Temperatura de la caseta	C
T_{aisl}	Temperatura aislante	C
T_{agua}	Temperatura del agua	C
h_c	Coficiente de transferencia de calor convectivo	W/m ² K
P_{agua}	Presión de vapor a Tagua	Pa
P_{cst}	Presión de vapor a Tcst	Pa
M_{agua}	Masa del evaporador	Kg
M_{cst}	Masa del condensador	Kg
Pro	Productividad de condensado	Kg/m ² s
Cp_{agua}	Calor específico del agua	J/(kg·K)
Cp_{cst}	Calor específico de la caseta	J/(kg·K)
Cp_{abs}	Calor específico del absorbedor	J/(kg·K)
K	Conductividad térmica	W/(m·K)
α	Difusividad térmica	m ² /s
Nu	Número de Nusselt	adimensional
Ra	Número de Rayleigh	adimensional
Re	Número de Reynolds	adimensional
Pr	Número de Prandtl	adimensional
HR	Humedad relativa	
ν	Viscosidad cinemática	m ² /s
μ	Viscosidad dinámica	N*s/m ²
Lc	Longitud característica	m
θ	Ángulo entre la dirección del flujo de aire y la superficie normal	grados

9. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

- [1] H. Al-Hinai, M.S. Al-Nassri, B.A. Jubran, 2001. "Effect of climatic, design and operational parameters on the yield of a simple solar still". *Rev. Energy conversion & Management*, 43, p. 1639-1650.

- [2] Dunkle RV, 1961, "Solar water distillation: the roof type still and multiple effect diffusion still". Fifth International, Conference of Development in Heat Transfer, U. Colorado, p. 206.
- [3] Incropera FP, Dewitt DP., 1990; "Introduction to heat transfer". Prentice Hall, 2^a edición. New York (Estados Unidos).
- [4] Eduardo Rubio, Miguel A. Porta, José L. Fernández.2000; "Cavity geometry influence on mass flow rate for single and double slope solar stills". *Rev. Applied Thermal Engineering*, Volume 20, p. 1105-1111.
- [5] Miller, J.C. y Miller, J.N.; 2005. "Statics and Chemometrics for Analytical Chemistry". 5a. edición. Prentice Hall, p. 320.
- [6] Verma, S.P. 2005. "Estadística básica para el manejo de datos experimentales: aplicación en la geoquímica. UNAM, México, D.F., p. 186.
- [7] J.C. Torchia-Núñez, M.A. Porta-Gándara, J.G. Cervantes-de Gortari. 2010. "Análisis de exergía en estado permanente de un destilador solar simple". UNAM, México, D.F., Vol. 11. Núm.1. p. 25-34.
- [8] G. N. Tiwari, et al. 2007. "Comparative termal performance evaluation of an active solar distillation system". 31,1465-1482.
- [9] Shruti Aggarwal, 2000. "Estimation of convective mass transfer in active single slope solar still". World renewable energy congress VI.
- [10] Clark E, Berhal P. Radiative cooling: resources and applications. Proceedings of the Passive-Cooling Workshop, Amherst, MA; 1980. p. 177–212.
- Yellott JI. Passive and hybrid cooling research. *Rev. Advances in solar energy*, vol. 1.

EXPERIMENTAL AND THEORETICAL STUDY OF HEAT CONDUCTION IN ROCK SPHERES

Contreras-Palacios A.¹, Cazarez-Candia O.^{1,2*}, Torres-Tapia I.G.¹, Ovando-Castelar R.¹, Campos-Álvarez J.¹

- 1) Instituto Tecnológico de Zacatepec, Calzada Tecnológico No. 27, Zacatepec, Morelos, C.P. 62780, cazarez_oct@hotmail.com
- 2) Instituto Mexicano del Petróleo, Eje Central Lázaro Cárdenas Norte 152, col. San Bartolo Atepehuacan, México D.F., C.P. 07730

RESUMEN

Una de las técnicas para la producción de petróleo es la combustión in-situ. Esta técnica involucra fenómenos hidrodinámicos, químicos y térmicos. Cuando dicha técnica se aplica en yacimientos naturalmente fracturados, en la matriz de roca principalmente se presenta el flujo de calor por conducción, mientras que en las fracturas se presenta el flujo de calor por convección. Durante el planteamiento de las ecuaciones de conservación para simular la combustión in-situ es necesario saber si se puede hacer la suposición de equilibrio térmico entre las fases fluidas y la matriz de roca. Para lo anterior se debe conocer la velocidad del frente de combustión, la velocidad a la que viaja el calor por conducción y la velocidad a la que viaja el calor por convección.

Debido a lo anterior, en el presente trabajo se hace un estudio experimental y teórico del flujo de calor por conducción a través de esferas de roca representativas de yacimientos mexicanos. Se realizaron experimentos con dos tipos de roca aplicando una condición de frontera de Dirichlet y se midió la temperatura en el centro de la esfera. También se simuló numéricamente los experimentos para determinar el perfil de temperatura desde la superficie hasta el centro de la esfera. Las simulaciones se validaron con los datos experimentales observándose excelente concordancia. La información de las simulaciones permitió determinar la velocidad del flujo de calor por conducción a través de las esferas. La información obtenida permitirá determinar la pertinencia de aplicar equilibrio térmico en el modelado de la combustión in-situ.

Palabras clave: Conducción de calor, simulación numérica, combustión in-situ.

ABSTRACT

One of the techniques used for the oil recovery is the in-situ combustion. This technique involves hydrodynamic, chemical and thermal phenomena. When such technique is applied in natural fractured reservoirs, in the rock matrix principally occur conduction heat transfer, whereas in fractures the convection heat transfer is presented. When the conservation equations, for the simulation of in-situ combustion, are formulated it is necessary to know if the supposition of thermal equilibrium among the fluid phases and rock can be applied. For the above, the combustion front velocity, conduction heat transfer velocity and convection heat transfer velocity must be known.

Then, in this work an experimental and theoretical study on the heat transfer through rock spheres representative of Mexican reservoirs, was done. Experiments were done using two kinds of rock applying a Dirichlet boundary condition and the temperature was measured in the sphere center. The simulations were validated using the experimental data obtaining an excellent agreement. The simulations information allowed determining the conduction heat transfer velocity through the spheres. The obtained information will allow determining the applicability of thermal equilibrium in the modeling of in-situ combustion.

Keywords: Heat conduction, numerical simulation, in-situ combustion

1. INTRODUCTION

Approximately one third of global heavy oil resources can be found in fractured reservoirs. In spite of its strategic importance, recovery of heavy crudes from fractured reservoirs has found few applications due to the complexity of such reservoirs. In situ combustion is a candidate process for such reservoirs, and especially for those where steam injection is not feasible. However, for in situ combustion applied to fractured reservoirs, we have to deal with a multi-scale, multi-process, problem, and many unknowns are still remaining. The recovery mechanism, and reservoir and operational conditions at which the combustion can propagate in fractured systems are not clearly understood. Particularly the process of energy transport at the boundary between a porous medium and a fluid represents a technological challenge. Alasmi and Vafai (2001) analyzed different types of interfacial conditions between a porous medium and fluid layer. The main objective of their study was to assess the differences among different models and to examine the effect of using them on heat transfer and fluid flow at a interface region. These authors showed that, in general, the differences have a more pronounced effect on the velocity field and a substantially smaller effect on the temperature field and even a smaller effect on the Nusselt number distribution. On the other hand, the heat transfer jump condition that applies at the boundary between a porous medium and a homogeneous fluid when the condition of local thermal equilibrium is *not valid* was developed by Ochoa-Tapia and Whitaker (1997). These authors applied separate transport equations to describe the behavior for each phase and found that the jump condition contained an excess surface heat exchange term that controls the manner in which the total flux is distributed between the two phases. Ochoa-Tapia and Whitaker (1998b) developed the jump condition when local thermal equilibrium is imposed and found that the non-local form can be simplified to the classic one-equation model for thermal energy transport.

With the idea of to understand the conduction heat transfer between a porous medium and a fluid, in this work an experimental and theoretical study on the heat transfer through rock spheres representative of Mexican reservoirs, was done. Experiments were done using two kinds of rock applying a Dirichlet boundary condition and the temperature was measured in the sphere center.

2. EXPERIMENTAL WORK

The experimental equipment consists of a deposit that contains water which is heated until 98 °C at 1 atm. One rock sphere, at ambient temperature, is put into the water and then conduction heat transfer occurs through the sphere. The deposit dimensions are large enough so that water has a constant temperature. A LM35 temperature sensor is used to measure the water temperature and a T type thermocouple was used to measure the temperature at the center of the rock sphere. The temperature measurement was done until the steady state condition is reached. A data logging system was built to get temperatures as function of time. A schematic representation of the experimental equipment and the material used in the experiments are shown in Figure 1 and Table 1, respectively.

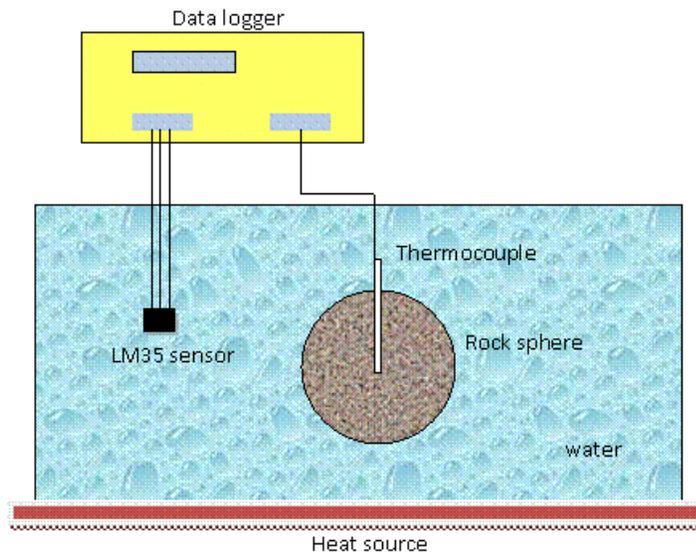


Figure 1. Experimental equipment.

Table 1. Material used in experiments.

Material	Dimensions	Characteristics
Rock 1	0.0762 m	Calcite, thermal conductivity, 1 w/mK, density 2500 kg/m ³ , heat capacity 900 J/kg-K
Rock 2	0.0762 m	Calcite, thermal conductivity 2.1 w/mK, density 2500 kg/m ³ , heat capacity 850 J/kg-K
Thermocouple		T type
Temperature sensors		LM35
Operational amplifier		LM324N
Resistances		100k and 1k
Data logger system		

Figure 2 shows the water temperature and the temperature at the center of a sphere form by

rock 1 (see Table 1). The water temperature is practically constant (98 °C) while the rock temperature has a parabolic behavior. At the beginning of the experiment (< 180 s) the temperature at the rock sphere center is constant because the conduction heat transfer does not affect it yet. After this, the conduction heat transfer presents almost a linear behavior and then its velocity is smaller than at the beginning.

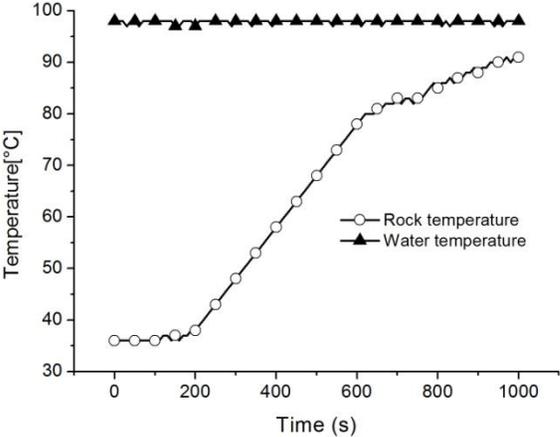


Figure 2. Temperature profile for rock 1

Figure 3 shows the water temperature and the temperature at the center of a sphere form by rock 2 (see Table 1). The temperature behaviors are similar than for rock 1 (Figure 2), however in this case the temperature at the rock sphere center is constant only until 80 s. This means that in rock 2 the heat transfer by conduction moves faster than in rock 1. This may be due to the higher thermal conductivity of the rock 2. Rock 1 and rock 2 do not contain any fluid in their pore-space then it is possible that the porosity could be smaller in rock 2 than in rock 1.

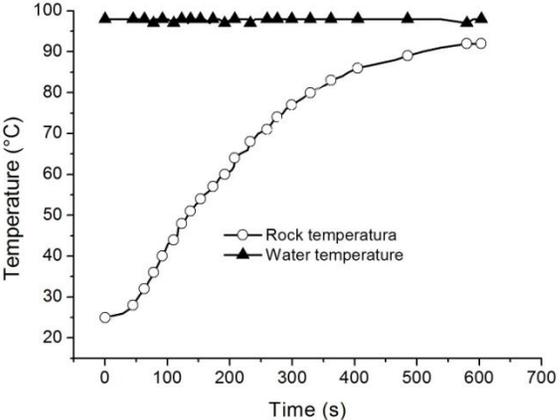


Figure 3. Temperature profile for rock 2.

3. THEORETICAL WORK

Many heat transfer problems are time dependent. Such unsteady or transient problems typically

arise when the boundary conditions for a system is changed. For example in this work the rock spheres are initially at ambient temperature and their surfaces are suddenly at 98°C, then the temperature at each point in the sphere will also begin to change. The changes will continue to occur until a steady-state temperature distribution is reached. In this case conduction heat transfer occurs from the surface to the sphere center. The aim of this section is to present the simulation of the experiments shown in section 2 by using a simulator (quick field 5.8) that uses the next heat transfer diffusion equation.

$$\frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(kr^2 \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2 \sin^2 \theta} \frac{\partial}{\partial \phi} \left(k \frac{\partial T}{\partial \phi} \right) + \frac{1}{r^2 \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(k \sin \theta \frac{\partial T}{\partial \theta} \right) + \dot{q} = \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

Where k is thermal conductivity, T is temperature, ρ is density, C_p is heat capacity, and r, θ, ϕ are the spherical coordinates.

In this work the next suppositions were done: 1) heat flows only in the r coordinate, 2) there is not heat generation, and 3) the thermal conductivity is constant. Then Eq. (1) can be written as

$$\frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial T}{\partial r} \right) = \frac{\rho C_p}{k} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2)$$

Where α is the thermal diffusivity.

Accordingly to the experiment (Fig. 1) the next boundary conditions must be applied to resolve Eq. (2).

$$r = 0; \quad \frac{\partial T}{\partial r} = 0 \quad (3)$$

$$r = R; \quad T = T_\infty \quad (4)$$

Where R is the sphere radius and T_∞ is the surface sphere temperature.

Eqs. (2)-(4) are solve numerically into the software QuikField 5.8 were the data given in Table 1 are used to simulated the experiments presented in section 2.

Figure 4 shows the comparison between data obtained from the experiment with the Rock 1 (see Table 1). The simulation presents an excellent fit with experimental data, this although the values for the rock properties used in the simulation were representative values, i.e. the rock needs be characterized.

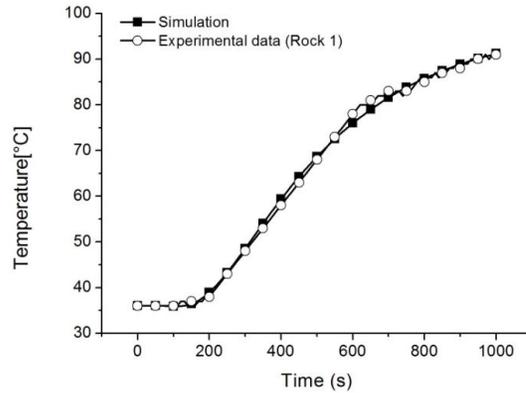


Figure 4. Comparison between simulation and experimental data for rock 1.

Figure 5 shows the comparison between data obtained from the experiment with the Rock 2 (see Table 1). The simulation presents a good fit with experimental data. The disagreement may be attributed to the representative values use for the rock properties. However, from Figs. 3 and 4, we can say that the simulations may be used to do predictions under other experimental conditions without the necessity of doing more experiments. This provided the boundary conditions, given by Eqs. (3) and (4), be applied.

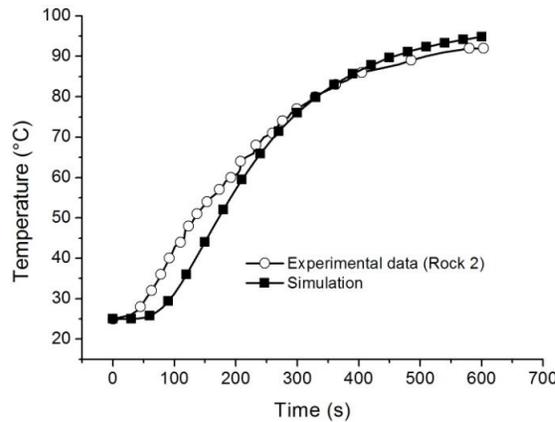


Figure 5. Comparison between simulation and experimental data for rock 2.

4. CONCLUSIONS

Experimental and theoretical study on the heat transfer through rock spheres representative of Mexican reservoirs was done. Experiments were done using two kinds of rock representative from Mexican reservoirs. The obtained information will allow determining the applicability of thermal equilibrium in the modeling of in-situ combustion.

REFERENCES

- Alazmi, B. And Vafai, K., *Int. J. Heat Mass Trans.*, **44**,1735-1749 (2001)
 Ochoa-Tapia, J. A. and Whitaker, S., *Int. J. Heat Mass Trans.*, **40**, 2691-2707 (1997).
 Ochoa-Tapia, J. A. ad Whitaker, S., 1998., *Journal of Porous Media*, **1**, 31-46.

ESTUDIO EXPERIMENTAL EN TUBOS DE COMBUSTIÓN

Pedro Valentín Verazaluze-Barragán¹, Octavio Cazarez-Candia^{1,2}, Juana Cruz-Hernández²

¹Instituto Tecnológico de Zacatepec, Departamento de metalmecánica, Calzada Tecnológico No. 27 Zacatepec Morelos, C.P. 62780.

² Instituto Mexicano del Petróleo, Recuperación de hidrocarburos, Eje Central Lázaro Cárdenas Norte 152, San Bartolo Atepehuacan, Del. Gustavo A. Madero, Distrito Federal, C.P. 07730, ocazare@imp.mx

RESUMEN

En México existen yacimientos de aceite intermedio que por sus condiciones no pueden ser explotados de forma convencional, enfocándonos en el proceso de recuperación terciaria y específicamente, en la técnica de combustión in-situ, se han realizado intentos de mejorar la recuperación de yacimientos de petróleo mediante dicha técnica.

En este trabajo se realizaron experimentos en un tubo de combustión con la finalidad de conocer el efecto de diferentes saturaciones de aceite y maneras de operar la cinta de ignición sobre: 1) perfiles de temperatura, 2) frentes de combustión, 3) velocidades del frente de combustión, 4) saturaciones, etc., lo que nos permite contar con mayor información sobre el fenómeno de combustión in-situ.

Palabras clave: Tubos de combustión, saturación de aceite, proceso de ignición.

ABSTRACT

In Mexico there are reservoirs of intermediate oil that due their conditions cannot be exploited using a conventional technique. Focusing our attention in tertiary recovery processes and specifically in the in-situ combustion technology, there have been attempts to increase the oil recovery by means of such technology.

In this work experiments were carry out in a combustion tube in order to know the effect of oil saturations and operating modes of the electric igniter, on: 1) temperature profiles, 2) combustion front, 3) combustion front velocities, 4) saturations, 5) etc. these will allow us to know better the in-situ combustion phenomenon.

Keywords: Combustion tube, oil saturation, ignition process

1. INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas las reservas de aceites crudos, ligero e intermedio han caído de manera importante a nivel mundial. Por lo anterior, en los últimos años se han realizado esfuerzos importantes sobre el desarrollo de técnicas para la extracción de hidrocarburos de campos petroleros abandonados o bien de campos nuevos, cuyas características no permiten que se exploten por medios convencionales. Enfocándonos en el proceso de recuperación conocida

como combustión in-situ, se han realizado intentos de mejorar la recuperación de yacimientos de petróleo mediante dicha técnica. Sin embargo, a pesar de su larga historia y el éxito comercial de muchos proyectos en tierra, el proceso no ha encontrado una aceptación debido al excesivo número de fracasos de muchos de los primeros proyectos experimentales (prueba piloto) [2]. La mayoría de estos fracasos pueden atribuirse a la aplicación inadecuada del proceso. Analizando los resultados de dichos proyectos, se encontró que el proceso es aplicable a ciertos yacimientos y las posibilidades de fracasos pueden minimizarse mediante una cuidadosa selección del yacimiento y adoptar prácticas de ingeniería [5]. Es por ello que el Instituto Mexicano del Petróleo (IMP), recientemente ha realizado experimentos utilizando un tubo de combustión para evaluar el efecto, sobre la combustión en medios porosos, de diversos parámetros tales como saturaciones de aceite y agua, porosidad, y tipo de roca. La información obtenida de dichos experimentos permite determinar parámetros como producción de aceite, producción de agua, perfiles de temperatura, velocidad del frente de combustión, volumen de gases producidos (CO, CO₂, H₂O, etc.). Ejemplos de investigaciones sobre combustión in situ son las realizadas por Penberthy y Ramey (1965), Mamora (1993), Rodríguez (2004), Cazarez-Candia et al. (2009), etc. a pesar de los esfuerzos realizados en busca del entendimiento de los fenómenos que se presentan durante la combustión in-situ, hace falta mucho trabajo experimental. Es por esto que en el presente trabajo se realizaron experimentos en un tubo de combustión variando la saturación de aceite y la manera de operar la cinta de ignición para estudiar su efecto sobre los parámetros más importantes que gobiernan la combustión.

2. PARTE EXPERIMENTAL

2.1 Aparato experimental

Para la realización de los experimentos se utilizó el equipo experimental del IMP (Instituto Mexicano del Petróleo). El aparato experimental (*Figura 1*) consta de un tubo de combustión de acero inoxidable con una longitud de 39 in, con un diámetro exterior de 3 in y con un espesor de 0.016 in. El tubo cuenta con: 1) 10 termopares espaciados aproximadamente 10 cm, y 2) tanques de nitrógeno y aire, para proveer la cantidad de inyección al tubo de combustión [1].

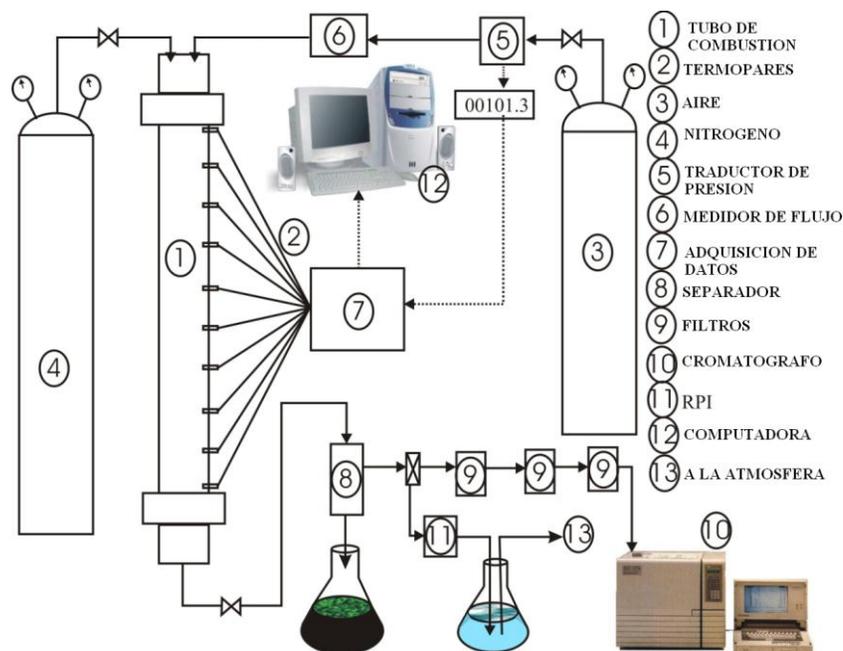


Figura 1. Diagrama esquemático del tubo de combustión del IMP [1].

2.2 Condiciones para la experimentación

En todos los experimentos se utilizó aceite intermedio (20°-30° API) del Golfo de México, con una inyección de aire normal (oxígeno 21%), con un flujo de inyección de 3 L/min, una temperatura de yacimiento de 100° C y una presión de 60 psi. Los parámetros de los 3 experimentos variando la saturación de aceite y los 2 experimentos variando el procedimiento de ignición se presentan en la *Tabla 1*.

Tabla 1. Parámetros iniciales de los experimentos.

Parámetros iniciales	Experimentos con diferente					Unidades
	saturación de aceite			procesos de ignición		
	1	2	3	A	B	
Aceite	12.36	12.37	13.24	12.36	12.36	% Vol.
Agua	8.85	8.87	8.39	8.85	8.86	% Vol.
Arena	78.79	78.76	78.36	78.79	78.78	% Vol.
So	32.5	58	60.6	32.5	38.3	%
Sw	23	42	39.4	23	27.5	%
Sg	44.5	0	0	44.5	34.2	%
Φ	41	41	41	41	41	%
Aceite	27	23	23	27	27	°API

2.3 Metodología

La siguiente metodología se aplicó durante el desarrollo del presente trabajo:

Paso 1. Se prepara una mezcla (*Figura 2*) con arena (dependiendo las condiciones del yacimiento) agua y aceite con especial cuidado en las saturaciones previamente calculadas, las cuales corresponden a las saturaciones del yacimiento bajo estudio.



Paso 3. *Figura 2. Mezcla de arena, agua y aceite.* Se mantiene la temperatura constante a lo largo del tubo, posteriormente, se presuriza el tubo (usando valores conocidos del yacimiento antes de comenzar la ignición).

Paso 4. Se coloca una resistencia eléctrica al inicio del tubo variando la entrada de corriente eléctrica gracias a un variac (transformador de energía variable) de corriente para incrementar la temperatura con el fin de crear la ignición de la mezcla de aceite y arena que se encuentra en el interior del tubo. En esta etapa tenemos la inyección de gases dentro del tubo. Aire es el término usado para la mezcla de oxígeno y nitrógeno en diferentes proporciones.

Paso 5. Para presurizar el tubo se utiliza nitrógeno o aire comprimido pudiéndose utilizar helio (gas inerte). Cuando la temperatura alcanza los 340° C aproximadamente (la temperatura varía de acuerdo al aceite) comienza la inyección de aire para crear y mantener el frente de combustión hasta el final del tubo. El tiempo de inyección de aire fue de 8-10 hr, dependiendo directamente del avance del frente de combustión, el flujo de inyección de aire es controlado por un controlador de flujo másico manteniendo un flujo de inyección constante de 3 L/min.

Paso 6. Cuando se logra la ignición, se toman muestras de aceite producidos cada 0.5 hrs para realizar un análisis de sus propiedades físicas.

Paso 6. El experimento se termina cuando el frente de combustión llega al extremo inferior del tubo (el tiempo aproximado de experimentación es de 10 hrs).

2.3.1 Procedimiento de ignición

El proceso de ignición se refiere a la acción de elevar la temperatura del aceite con la ayuda de

una resistencia eléctrica para hacerlo reaccionar con el aire inyectado (combustión) originando el desplazamiento del aceite depositado hacia el sistema productor. Un proceso de ignición comúnmente utilizado se inicia encendiendo el variador de potencia de una resistencia eléctrica para lograr un incremento constante en la temperatura, cuando se alcanza una temperatura de 300 °C o mas (dependiendo del aceite utilizado) comienza la inyección de aire para lograr la ignición, para después apagar la resistencia cuando se muestre un movimiento del frente de combustión en el termopar 2 [2].

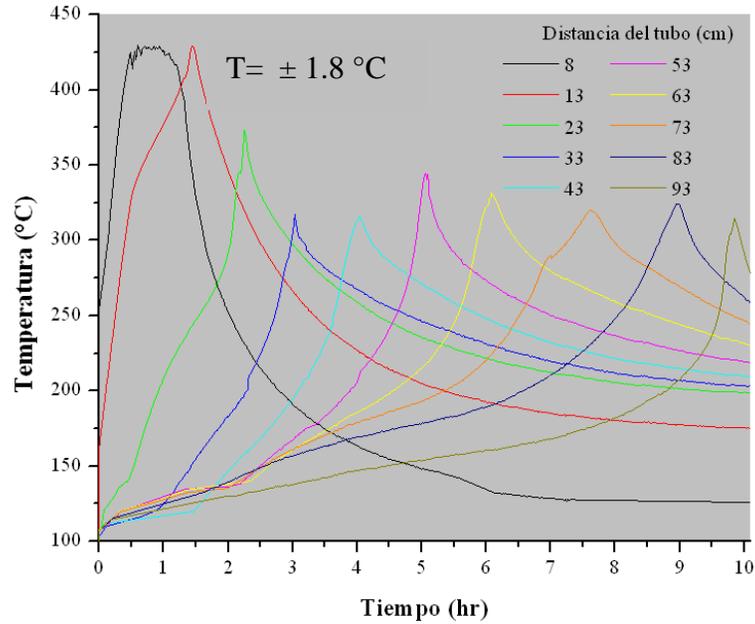
3. RESULTADOS

3.1 Experimentos con diferentes saturaciones de aceite

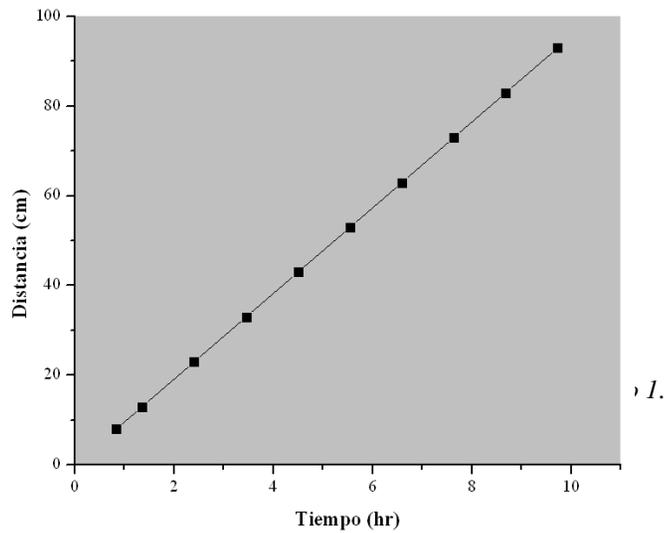
Algunos datos a revisar en los experimentos son: a) perfiles de temperaturas producidos por el experimento, b) la velocidad promedio del frente de combustión con la cual podemos revisar el avance del frente de combustión [4].

3.1.1 Experimento 1

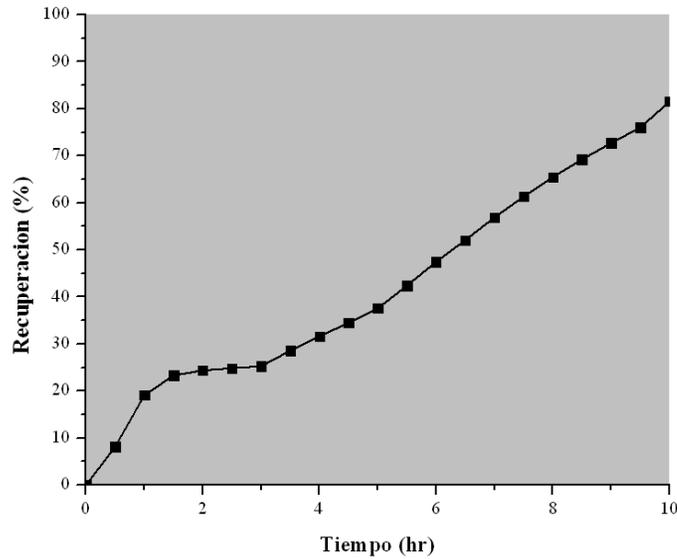
El frente de combustión presenta una temperatura promedio de 324 ° C como lo observamos en la *Figura 3*, el cual comienza a extinguirse después de 600 min de haber iniciado el experimento. Los perfiles de temperaturas muestran valores elevados para los primeros 3 termopares, el frente de combustión generó temperaturas más constantes a partir del cuarto hasta llegar al decimo termopar.



El frente de combustión avanzó con una velocidad promedio de 9.54 cm / hr (Figura 4) y su comportamiento fue lineal.



La producción de fluidos se muestra en la Figura 5. Como se puede observar, la producción al inicio del experimento fue mayor que en el resto del experimento. Esto se debe a que ocurre segregación gravitacional durante el calentamiento del tubo y durante el periodo de ignición, provocando que se forme una saturación de agua y aceite mayor a la original en la zona de producción. El volumen de aceite recuperado en la prueba fue 383 ml lo que equivale al 84.18 % del total de aceite depositado inicialmente.



El consumo de combustible calculado fue 50 kg de combustible por cada m³ del yacimiento. A continuación se muestra en resumen los resultados obtenidos (*Tabla 2*), los cuales analizan los resultados experimentales para obtener resultados efectivos y por lo tanto poder aplicar esta técnica con una mayor eficiencia.

Tabla 2. Resultados obtenidos en el experimento 1.

Resultados	Valor	Unidades
Temperatura del frente de combustión	324	°C
Velocidad del frente de combustión	9.54	cm/hr
Recuperación de aceite	84.18	% Vol.
Consumo de combustible	50	kg/m ³

3.1.2 Experimento 2

El frente de combustión presenta una temperatura promedio de 333.89 °C mostrando un ligero incremento en la temperatura promedio en comparación con la obtenida en el experimento 1 (*Figura 6*).

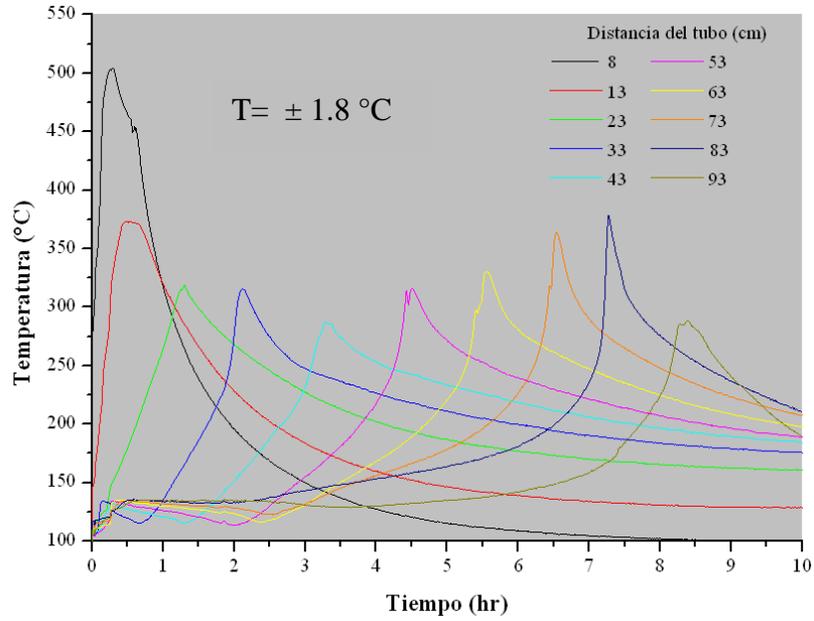


Figura 6. Perfiles de temperaturas producidos en el experimento 2

La velocidad se mantuvo constante en un promedio de 13.42 cm / hr (Figura 7). Se observa un incremento en la velocidad promedio en comparación con la reportada en el experimento 1.

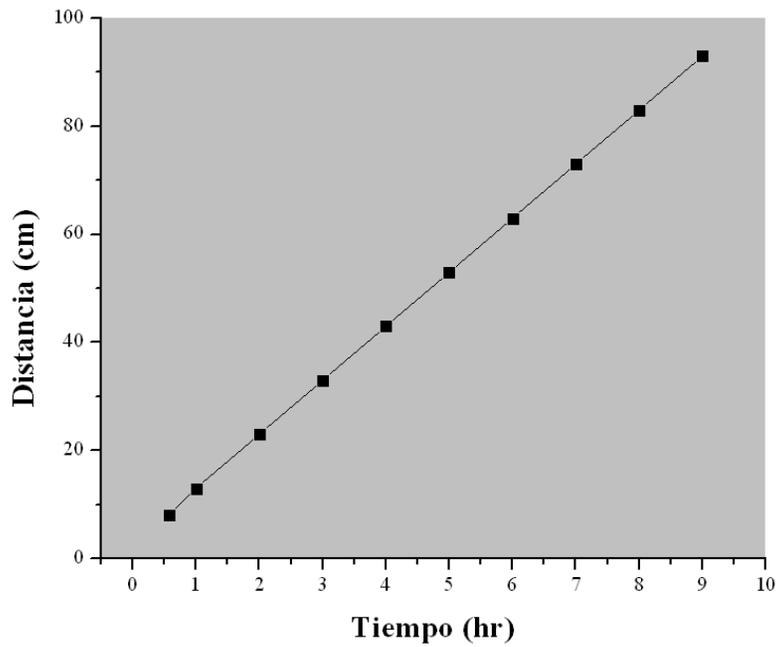


Figura 7. Avance del frente de combustión, experimento 2.

El volumen de aceite recuperado en esta prueba fue 435 ml que equivale al 90.4 % (Figura 8) del total de aceite depositado inicialmente.

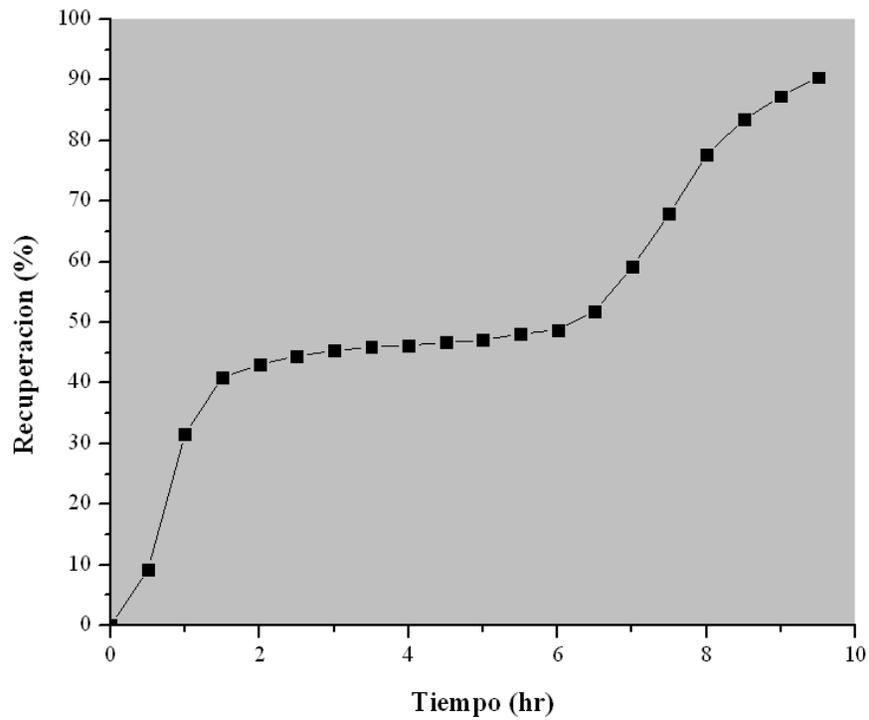


Figura 8. Recuperación total de aceite, experimento 2.

El consumo de combustible calculado fue 26.58 kg de combustible por cada m³ del yacimiento. En la tabla 3 se muestran los resultados obtenidos, los cuales ayudan a entender y analizar las diferentes metodologías existentes y así determinar cuál es la más idónea para obtener resultados más efectivos y por lo tanto poder aplicar en campo.

Tabla 3. Resultados obtenidos en el experimento 2

Resultados	Valor	Unidades
Temperatura del frente de combustión	333.89	°C
Velocidad del frente de combustión	13.42	cm/hr
Recuperación de aceite	90.4	% Vol.
Consumo de combustible	26.58	kg/m ³

3.1.3 Experimento 3

El frente de combustión presenta una temperatura promedio de 417.5 °C (Figura 9). Como se observa en esta prueba se obtuvo una temperatura promedio mayor a las obtenidas en los experimentos 1 y 2.

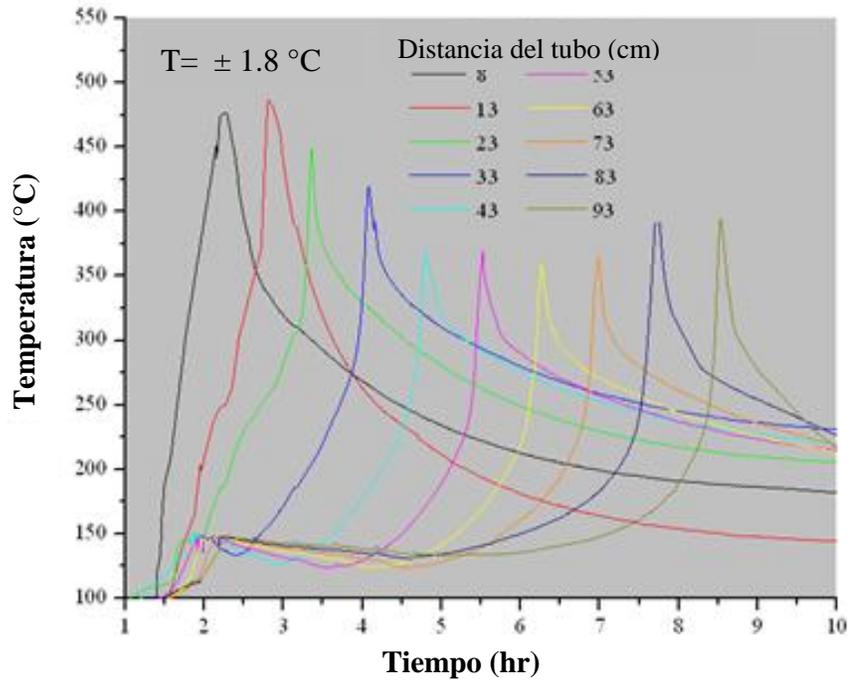


Figura 9. Perfiles de temperaturas del experimento 3.

La velocidad promedio del frente de combustión se mantuvo constante, con un valor de 14.38 cm / hr (Figura 10).

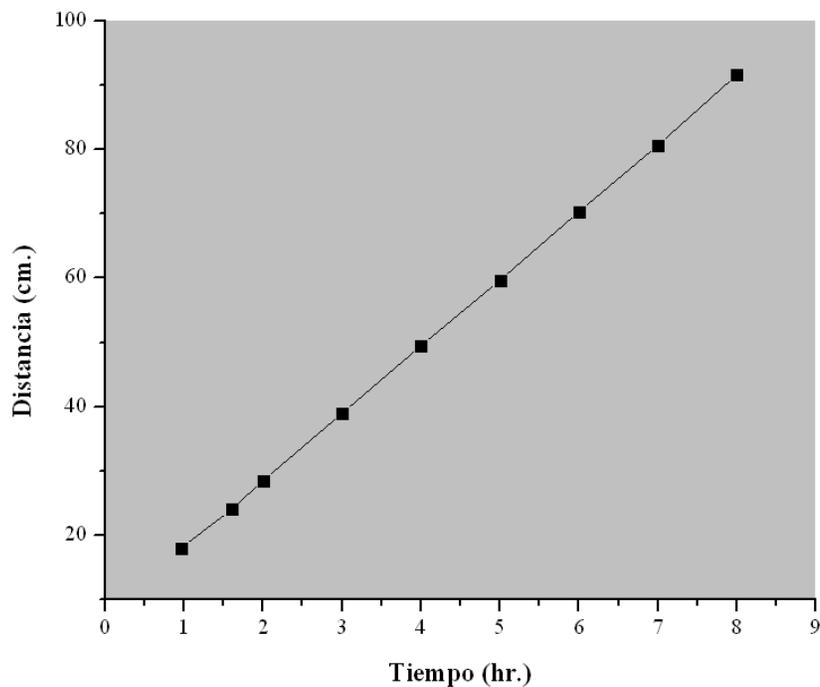


Figura 10. Avance del frente de combustión, experimento 3.

El volumen de aceite recuperado en la prueba fue 490 ml lo que equivale al 82.8 % del total de aceite depositado (*Figura 11*).

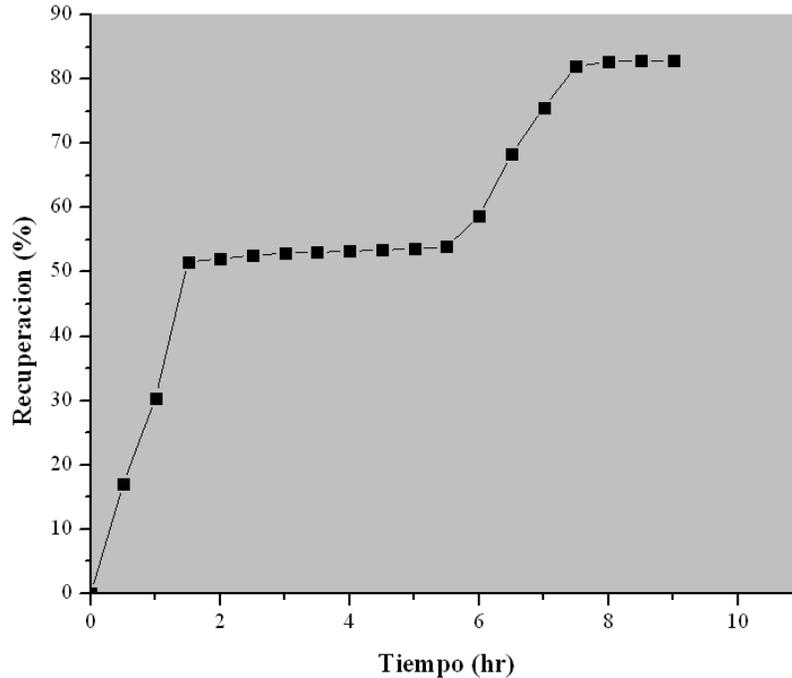


Figura 11. Recuperación total de aceite durante la prueba, experimento 3.

El consumo de combustible calculado fue 37.02 kg de combustible por cada m³ del yacimiento.

A continuación se muestran los resultados obtenidos (*Tabla 4*).

Tabla 4. Resultados obtenidos en la prueba, experimento 3.

Resultados	Valor	Unidades
Temperatura del frente de combustión	417.5	°C
Velocidad del frente de combustión	14.38	cm/hr
Recuperación de aceite	82.84	% Vol.
Consumo de combustible	37.02	kg/m ³

3.2 Experimentos con diferentes procesos de ignición

El proceso de ignición dentro de una prueba en tubos de combustión se refiere a la acción de elevar la temperatura del aceite con la ayuda de una resistencia eléctrica para hacerlo reaccionar con el aire inyectado (combustión) originando el desplazamiento del aceite depositado hacia el sistema productor. Un proceso de ignición comúnmente utilizado se inicia encendiendo el variador de potencia de una resistencia eléctrica para lograr un incremento constante en la

temperatura, cuando se alcanza una temperatura de 300 °C o mas (dependiendo del aceite utilizado) comienza la inyección de aire para lograr la ignición, para después apagar la resistencia cuando se muestre un movimiento del frente de combustión en el termopar 2.

3.2.1 Experimento A

Para el experimento A, las condiciones de calentamiento e ignición son presentadas en la *Figura 12*.

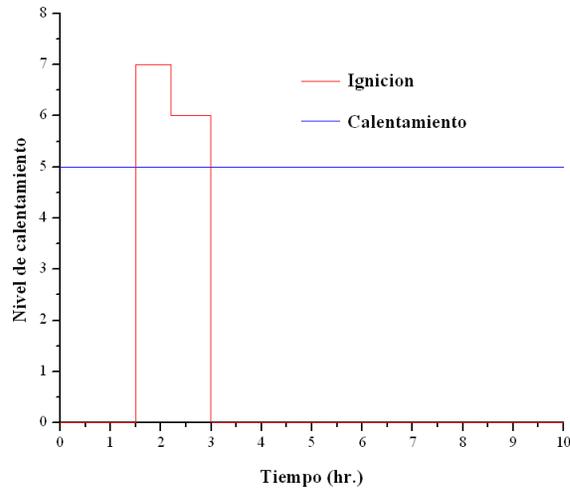


Figura 12. Procedimiento de calentamiento e ignición, experimento A

Los perfiles de temperatura obtenidos con este procedimiento de ignición se presentan en la *Figura 13*. Se muestran únicamente los perfiles de los termopares 1, 2 y 3 dado que estos son directamente afectados por la cinta de ignición. Como resultado de mantener encendida la cinta de calentamiento a un nivel máximo por un intervalo de 1.5 hrs, la temperatura en el termopar 1 muestra una curva con un valor máximo de 450 °C.

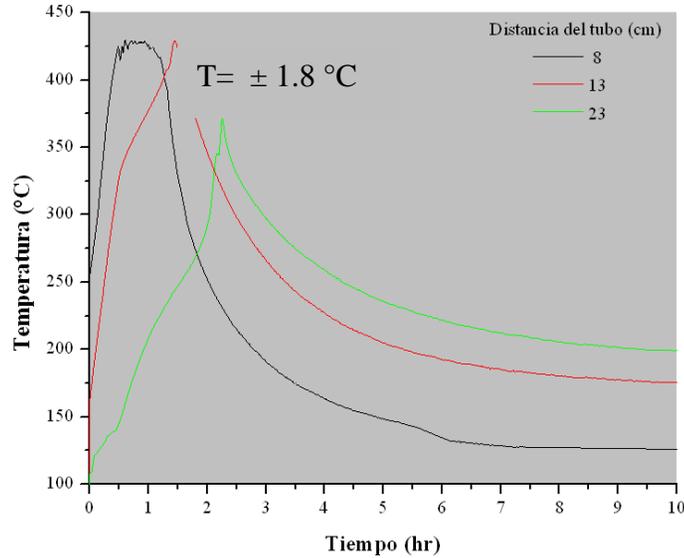


Figura 13. Perfiles de temperatura obtenidos en el experimento A.

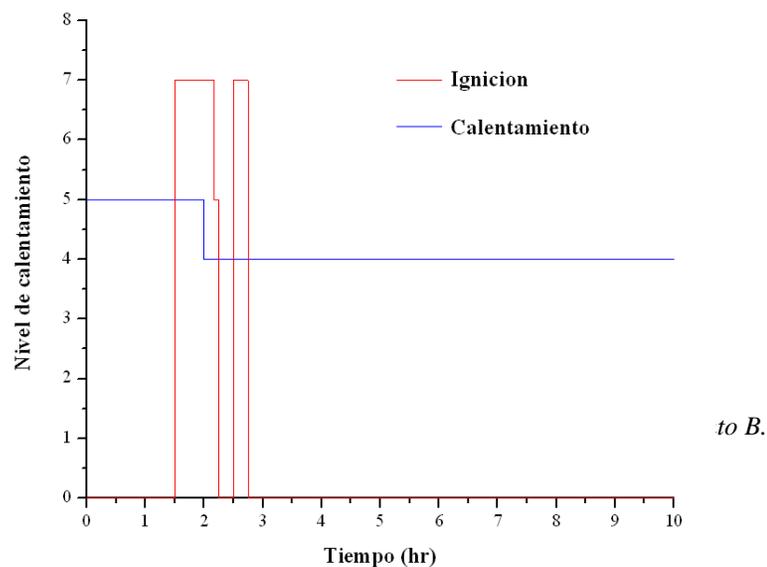
En esta prueba no se utilizó cromatografía por lo tanto no se realizaron cálculos dependientes de la composición de los gases producidos (relaciones atómicas H/C, $(\text{CO}_2+\text{CO})/\text{CO}$, $(\text{CO}_2+\text{CO})/\text{N}_2$, aire requerido, la relación aire/combustible, la fracción de oxígeno consumido, la utilización de oxígeno y el exceso de aire). De esta manera solo se presenta la temperatura promedio del frente de combustión, velocidad promedio del frente de combustión, la recuperación total de aceite y el consumo de combustible (Tabla 5).

Tabla 5. Resultados del experimento A.

Resultados	Valor	Unidades
Temperatura del frente de combustión	349.9	°C
Velocidad del frente de combustión	9.5	cm/hr
Recuperación de aceite	84.17	% Vol.
Consumo de combustible	50	kg/m ³

3.2.2 Experimento B

En el experimento B se utilizó una operación distinta al experimento A. Durante los 630 min que duró la prueba, la *Figura 14* muestra el cambio en los niveles de calentamiento e ignición.



Los perfiles de temperatura obtenidos en este experimento se muestran en la *Figura 15*. En esta prueba los perfiles originados por este procedimiento de ignición fueron diferentes a los mostrados en el experimento A, todo ocasionado por las variaciones en el nivel de encendido de la cinta de ignición.

Dentro de los resultados que se obtuvieron se encuentran el promedio del frente de combustión, la velocidad promedio del frente de combustión, la recuperación de aceite y el consumo de combustible (*Tabla 6*).

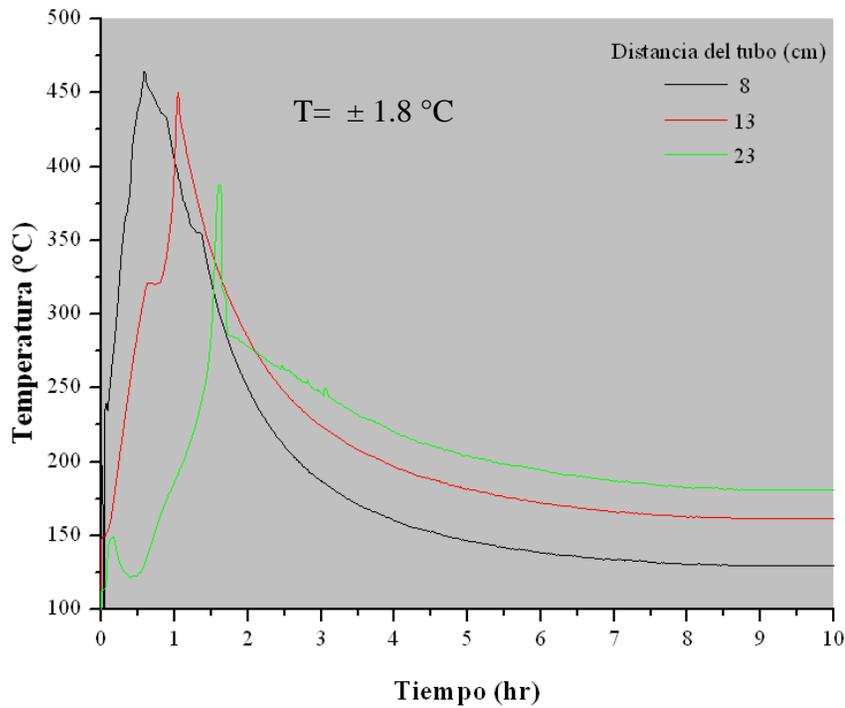


Figura 15. Perfiles de temperatura del experimento B.

Tabla 6. Resultados obtenidos en el experimento B

Resultados	Valor	Unidades
Temperatura de frente de combustión	355.35	°C
Velocidad del frente de combustión	12.28	cm/hr
Recuperación de aceite	73.09	% Vol.
Consumo de combustible	36.55	kg/m ³

4. CONCLUSIONES

4.1 Resultados de los experimentos con diferentes saturaciones de aceite

Un incremento en la saturación inicial de aceite causó en los experimentos un incremento en la velocidad del frente de combustión ocasionado por una mayor presencia de combustible en el medio, lo que acelera la combustión.

El pico en la temperatura del frente de combustión fue alto causado por el incremento en las saturaciones de aceite, debido a que existe más aceite en el medio, el calor generado será mayor [2].

La reducción en la velocidad del frente de combustión es causada por un alto consumo de combustible como se puede observar en el resultado del experimento 1 [4]. Ya que la velocidad es pequeña, el frente de combustión se encuentra más tiempo en contacto con el aceite depositado dando como resultado una cantidad elevada de combustible consumido. La *Tabla 7* muestra en resumen los resultados obtenidos en los experimentos variando la saturación de aceite.

Tabla 7. Parámetros iniciales y resultados de los experimentos variando la saturación de aceite.

Parámetros iniciales	Experimentos			Unidades
	1	2	3	
Flujo de aire inyectado	1.9	1.9	1.9	L/min
Temperatura de yacimiento	100	100	100	°C
Presión de yacimiento	60	60	60	Psi
O ₂	21	21	21	% Mol
N ₂	79	79	79	% Mol
Vol. Total de la mezcla	4442	3819	4466	ml
Aceite	12.36	12.37	13.24	% Vol.
Agua	8.85	8.87	8.39	% Vol.
Arena	78.79	78.76	78.36	% Vol.
S _o	32.5	58	60.6	%
S _w	23	42	39.4	%
S _g	44.5	0	0	%
Φ	41	41	41	%
Aceite	27	23	23	°API
Resultados				
Temperatura del frente de combustión	324	333.89	417.5	°C
Velocidad del frente de combustión	9.54	13.42	14.38	cm/hr
Recuperación de aceite	84.18	90.4	82.84	% Vol.
Consumo de combustible	50	26.58	23.02	kg/m ³

4.2 Resultados de los experimentos con diferentes procesos de ignición

Después de haber realizado 2 experimentos con diferentes procesos de ignición se concluye lo siguiente:

Manteniendo encendida la resistencia eléctrica de ignición por un tiempo prolongado, se nota un incremento en la velocidad del frente de combustión durante la ignición.

Existió un incremento en la velocidad del frente de combustión en el experimento A en el tiempo que se controló la ignición, para después arrojar una velocidad promedio baja con respecto a la recuperación de aceite en el experimento B.

En el proceso de ignición para el experimento A, se origino en los perfiles de temperaturas una curva para el primer termopar y no un pico como se esperaba, ocasionada por el excesivo tiempo

de ignición.

Al incrementar el tiempo de ignición el calor agregado afecta directamente a los primeros 2 termopares reduciendo la eficacia en los resultados de la prueba ya que se nota el efecto del calor agregado a los primeros termopares que equivalen el 20% de la longitud total del tubo combustión.

En ambas pruebas se notó que el calor agregado tiene efectos en el volumen inicial de recuperación de aceite en los cuales los valores mostrados indicaron que la recuperación inicial es la de mayor volumen en comparación con cualquier otra tomada durante toda la prueba.

Un proceso de ignición prolongado afecta el volumen de recuperación siendo un volumen de recuperación más grande cuando el tiempo es más prolongado [6].

Al tener un desplazamiento mayor de aceite debido a un tiempo de ignición prolongado el pico de temperatura promedio se redujo, existiendo diversas posibles razones, una de las cuales pudiese ser que al existir una cantidad mayor de aceite en el medio poroso el oxígeno no es suficiente para reaccionar y por ende no se incrementara la temperatura del frente de combustión, como lo muestra el experimento A.

5. BIBLIOGRAFIA

1. Cazarez-Candia O., Cruz-Hernandez J., Islás-Juarez R. y Márquez-Ramírez E., 2010, Theroretical and experimental study of combustion tubes, Petroleum Science and Technology, In press in.
2. Mamora, D.D., 1993, Kinetics of in-situ Combustion, PhD Dissertation, Standford University, Standford, CA.
3. Penberthy, W.L. y Ramey, H.J., 1965, Desing and Operation of Laboratory Combustion Tubes, paper SPE 1290, SPE Annual Fall Meeting, Denver Colo., Oct. 3-6.
4. Rodriguez, J. R., 2004, “Experimental and Analytical Study to Model Temperature Profiles and Stoichiometry in Oxygen-Enriched In-situ Combustion”, Ph. D. Thesis, Texas A&M University, UMI Number: 3132120, pp. 1-164.
5. Sarathi Partha, 1999, In-situ combustion handbook-principles and practices, performed Under Contract No. DE-AC22-94PC91 008 *Report Number IVIPER/BDM-0374*) BDM Petroleum Technologies, BDM-Oklahoma, Inc. Bartlesville, Oklahoma

6. Suat Bagci, Mustafa Versan Kok, 2001, In Situ Combustion studies of Turkish heavy oil reservoir, Department of petroleum and natural gas engineering, Middle East Technical University, 06531, Ankara, Turkey.
7. Verma, V.B., Reynolds, A.C., and Thomas, G.W. 1978. A Theoretical Investigation of Forward Combustion in a One-Dimensional System. Paper SPE 7526. SPE-AIME 53rd Annual Fall Technical Conference and Exhibition. Houston, Tx, Oct. 1.
8. Gottfried, B.S. 1965. A Mathematical Model of Thermal Oil recovery in Linear Systems. paper SPE 1117. SPE Production Research Symposium. Tulsa Ok. May 3.
9. Moore, R.G., Laureshen, C.J., Belgrave, J.D.M, Ursenbach, M.G., Mehta, S.A., "In-Situ Combustion: New Ideas for an Old Process," Presented at the 11th Annual Canadian Heavy Oil and Oil Sands Symposium. Calgary, Alberta, Canada, 1994.

MATHEMATICAL MODEL FOR PIPELINE LEAK SIMULATION

Lazaro Molina-Espinosa^{1*}, Cristina Verde-Rodarte², Octavio Cazarez-Candia³

1) Instituto Mexicano del Petróleo, México, D.F. C.P. 07730, lmespino@imp.mx,

2) Instituto de ingeniería, UNAM, México, D.F. C.P. 04510, cverder@iingen.unam.mx

3) Instituto Tecnológico de Zacatepec, Calzada del Tecnológico No. 27. Zacatepec, Morelos, CP. 62780, Mexica, ocazare@imp.mx

ABSTRACT

In this work a transient, isothermal, mixture model for one and two fluid flows through pipes is presented. The model is formed by mass, momentum and energy conservation equations, which include leak term. The model is solved numerically using the finite difference technique and allows to simulate pressure and flow rate in steady and transient state. The Hydraulic Grade Line (HGL) is experimentally obtained and compared against predictions from the model. The result shows a good agreement with experimental data. It was found that 1) leaks induce inlet pressure changes, which are directly proportional to the leak location and magnitude, and 2) the outlet flow rate diminishes directly with the leak magnitude.

RESUMEN

En este trabajo se presenta un modelo isotérmico de mezcla para flujo monofásico y bifásico a través de tuberías. El modelo está constituido por la ecuación de conservación de masa, momento y energía, las cuales incluyen términos de fuga. El Modelo se resolvió usando el método de diferencias finitas y permite simular la presión y flujo volumétrico en estado estable y transitorio. La Línea de Altura Motriz (LAM) se obtuvo experimentalmente y se compara con las predicciones del modelo. Los resultados obtenidos muestran que 1) las fugas inducen cambios en la presión de entrada, los cuales son directamente proporcionales a la ubicación y tamaño de ésta, y 2) el flujo volumétrico de salida disminuye directamente con la magnitud de la fuga.

Keywords: Leak, model, pipeline, pressure, flow rate, profile, HGL

1. Introduction

The aim of this study is to develop a more reliable mathematical leak model for water pipelines and for the further use of the model in new leak detection methodologies. Also the HGL caused by a leak is experimentally verified. Finally the effect of the boundary condition in the experimental data and simulated model is investigated.

Pipeline systems are essential in the transportation of water, chemical products and many other fluids. However pipelines networks coming from the upstream and downstream oil and gas industry are especially risky because they are very large assets, and when a leak happens, a great amount of hydrocarbons can be spilled, causing not only significant monetary loss but also environmental disasters and even fires.

A great amount of work has been done in order to solve the leak detection and location issue. As a consequence, a great variety of proposals from different areas of knowledge have been issued (Geiger [11]). In order to model the hydrodynamics of leak in pipes some studies have proposed only the use of mass and momentum conservation equations to develop the mathematical model (Billman and Isermann [4], Verde et al. [14]). However some other researchers have included the energy equation in their model (Belsito et al. [3], Cazarez and Vasquez [6]). The models that include the energy equation are considered more complete since the gas phase compressibility effect is taken into account.

In the leak detection area, not all the studies agree about how leak affect the hydraulic profiles of the pipeline. Since some leak detection and location methodologies are based on these leak changes this topic becomes important issue.

It is well known from fundamental fluid mechanics (White [17]) that in a horizontal straight pipeline with constant transversal area, the hydraulic grade line (HGL) or pressure profile, shows a linear behavior due to friction losses. In this sense, all studies reported in literature, are in agreement among them.

However when a leak is present in a pipeline discrepancies have been found in literature, about the behavior of HGL in presence of leaks.

Studies where inlet and outlet pressures were chosen as the system boundary conditions (Emara et al. [9], Verde et al. [14]) report a leak pressure profile which is formed by two segments (Fig. 1a). The segment ahead the leak shows smaller slope than the segment behind. Moreover the flow rate profile reported is divided in two segments too. The segment behind the leak shows a flow rate larger than the segment ahead of the leak (Fig. 1b).

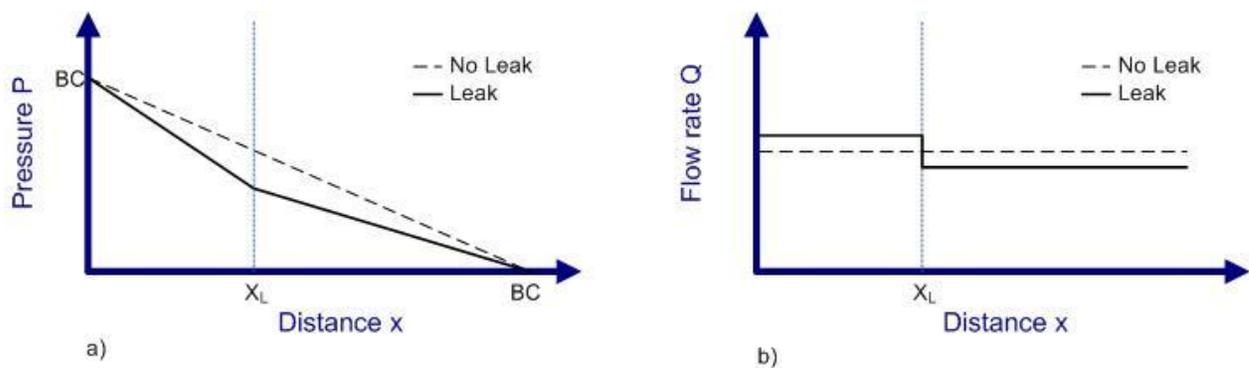


Fig. 1. Steady state schematics: a) Pressure profile and b) Flow rate profile. x_L is the leak location.

Other studies which chose the inlet flow rate and outlet pressure as the system boundary conditions (Dinis et al. [8], Kam [12]) report different pressure profiles. Again the pressure profile reported for a leak case is formed by two segments. The segment behind the leak is reported with a very similar slope than no-leak condition, but with a negative offset. The segment ahead the leak shows a smaller slope (Fig. 2a). Additionally the flow rate profile shows a drop after the leak location (Fig. 2b).

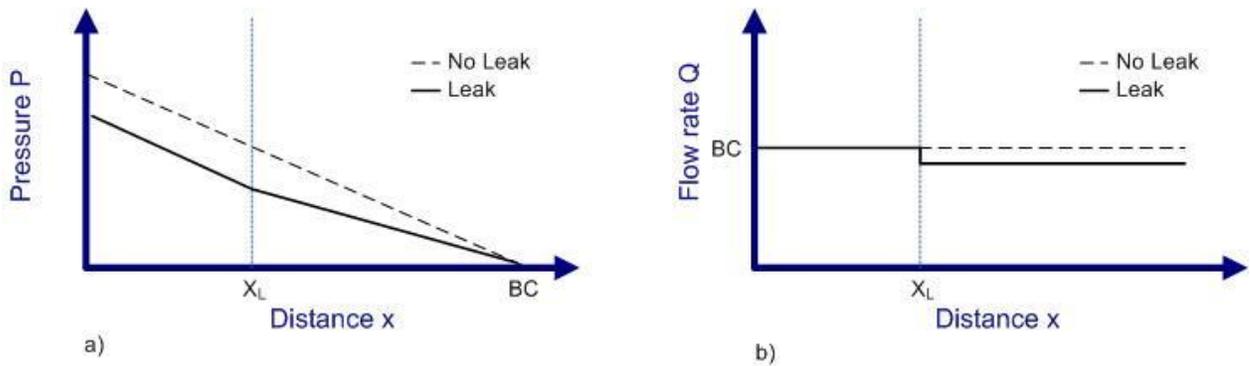


Fig. 2. Steady state schematics. a) Pressure profile and b) Flow rate profile. X_L is the leak location.

Due to the different boundary conditions used in the literature. In this study pressure profiles are experimentally investigated and results are compared against simulated result.

In this study a one-dimensional homogenous model is also proposed to simulate the effect of a leak on pressure and flow rate through a straight pipeline. The model considers two kinds of boundary conditions: 1) inlet and outlet pressures and 2) constant inlet flow rate and outlet pressure

2. Theoretical developments

2.1 Mathematical Model

The mathematical model is formed by mass, momentum and energy conservation equations (Eqs.(1)-(3)). These equations form a hyperbolic partial differential equation system. Some studies on which the leak term (Γ_L) is included within the conservation equations just consider mass and momentum analysis (Dinis et al. [8], Emara et al. [9], Abhulimen and Susu [1], Bratland [5], Kam [12]). However the inclusion of the energy equation allows taking into account the effect of the temperature in the leak process.

$$\frac{\partial \rho_m}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_m v)}{\partial x} = -\Gamma_L \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho_m v)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_m v^2)}{\partial x} + \frac{\partial P}{\partial x} = -\rho_m g \sin \phi - \tau_w \frac{S}{A} - V_L \Gamma_L \quad (2)$$

$$\frac{\partial(\rho_m e)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_m v e)}{\partial x} - \frac{\partial P}{\partial t} = -\rho_m g \sin \phi - e \Gamma_L \quad (3)$$

In Eqs. (1)-(3) v is the one-dimensional velocity, P is the static pressure, e is the total specific convected energy (Yadigaroglu and Lahey **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**), V_L is the leak velocity, ϕ is the inclination angle from the horizontal, A is the pipe cross-sectional area, S is the wet perimeter, g is the acceleration due to gravity, and τ_w is the wall friction shear stress, which is defined as:

$$\tau_w = \frac{1}{2} F \rho_m v^2 \quad (4)$$

where F is the Fanning friction factor, which was calculated with the Blasius correlation (Taitel and Dukler [13]):

$$F = 0.0578 / (Re)^{0.2} \quad (5)$$

where Re is the Reynolds number. The gas and liquid phases (air and water respectively) were treated as a pseudo-single phase. Consequently the mixture density ρ_m is defined as follows:

$$\rho_m = \varepsilon_l \rho_l + \varepsilon_g \rho_g \quad (6)$$

where subscripts g and l represent air and liquid phase respectively. And ε is the volumetric fraction, defined as:

$$\varepsilon_n = \frac{q_n}{q_t} = \frac{q_n}{q_l + q_g} \quad (7)$$

where n represents gas (g) or liquid (l) and q_t is the total volumetric flow rate. Fluids properties are calculated according to the international association of properties of water and steam (IAPWS) (Wagner et al. [15]).

In this work the following assumptions and considerations were made: 1) constant cross-sectional pipe area, 2) adiabatic flow, 3) the flow pattern is dispersed-bubble in which velocity, pressure and temperature for gas and liquid phases are equal, 4) one-dimensional flow, 5) no chemical reactions and 6) no mass exchange between phases.

The set of hyperbolic partial differential equations (Eqs. 1 - 3) was discretized by the finite difference method. First-order downstream implicit schemes are used for spatial and time derivatives respectively. This kind of discretization led to a full implicit scheme. The scheme was solved on each time step involving all nodes in the pipeline at once. This task was done using the driver routine LA_GESV from the software package LAPACK95 (Barker et al. [2]).

The determination of the HGL of a straight pipeline with no leak was carried out in the numerical model by making the leak term equal to zero ($\Gamma_L = 0$) in all nodes of the discretized space. By the case of pipeline with a leak, the HGL was carried out by placing in the leak node the leak term different of zero ($\Gamma_L \neq 0$).

3. Experimental work

3.1 Experimental equipment No. 1

One of the experimental equipment used in this work is shown in Fig. 3. The equipment consist of: a) a reservoir, b) a galvanized steel pipeline which is 132.56m long and diameter 0.105m, c) pressure and flow rate sensors, d) a pump and e) four discharge tubes (servo-valves).

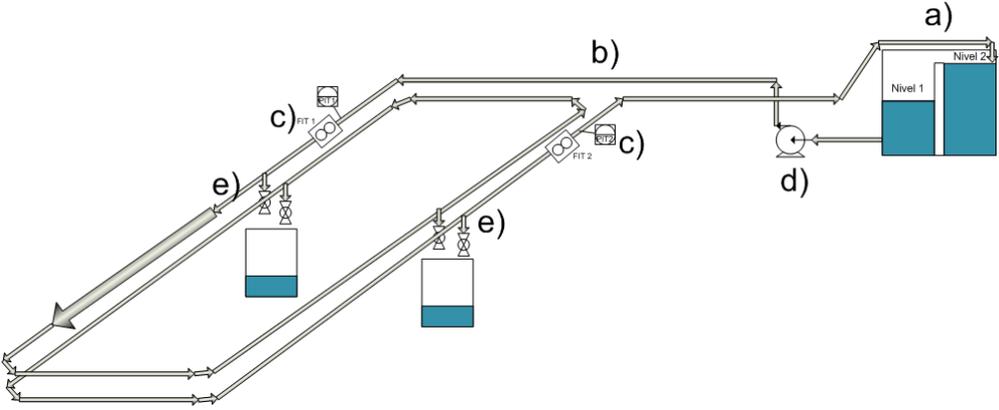


Fig. 3 Experimental equipment No. 1: a) Reservoir, b) Pipeline, c) Pressure and Flow rate transmitters d) Pump and e) Discharge tube (servo-valves)

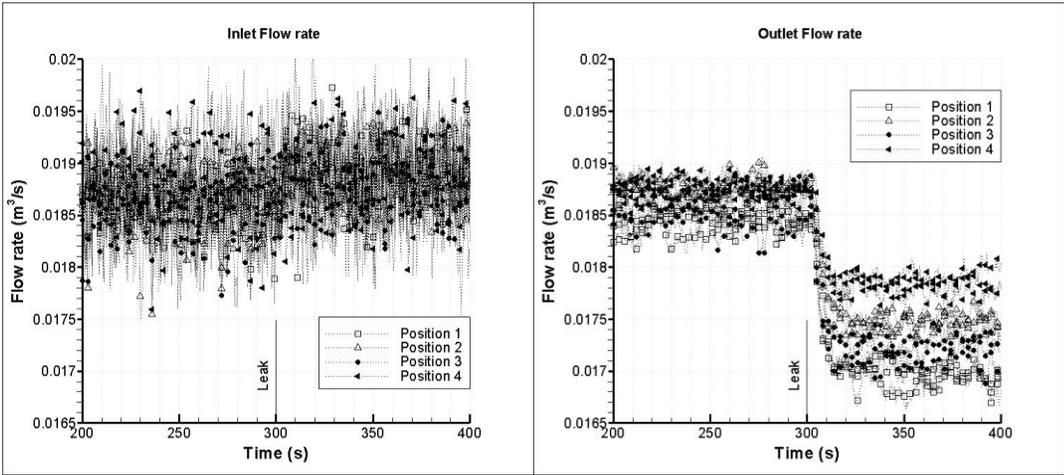
Water is pumped from a reservoir trough the pipeline and finally discharged in the same reservoir. The pipeline is provided with four taped discharges tubes where leak can be performed by opening a servo-valve attached to the discharge tube. The discharges tubes are located at: 15.1

m, 49.46 m, 83.25 m and 117.39 m from the inlet flow rate transmitter respectively. The Fanning friction factor (García et al. [10]) of the pipeline is 0.0585. Also the pipeline is instrumented in order to monitor the inlet and outlet pressure as well as the corresponding flow rates. Pressures are measured with WIKA piezo-resistive transmitters and the flow rates measurements are taken with Signet 2540 paddle wheel sensors.

Pump is started and a wait period of 3600s is taken to let measurement to stabilize. Then flow rate and pressure measurements are logged every 1s and recorded in spreadsheet. At 300s from the beginning of the experiment, the servo-valve is totally open producing a leak. Measurement is recorded for 300s more and at second 600s measurement is over. Finally servo-valve is closed and water is returned to the main reservoir before start another experiment.

Leaks were conducted in the experimental equipment No. 1 on the four predisposed locations given above, with constant leak size $d_L=0.01905$ m. Fig. 4a shows the inlet flow rates against time for the leaks experiment from the locations 1 to 4 (15.1 m, 49.46 m, 83.25 m and 117.39 m, respectively). Fig. 4b shows the outlet flow rates for the same set of experiments.

One can see from the Fig. 4a that leaks does not induce significant changes in the inlet flow rate trends, however the outlet flow rate trends shows important changes (Fig. 4b) due to the presence of leaks. From Fig. 4b it can be seen that the most significant change in the outlet flow rate correspond to the nearest leak to the pipeline entrance. The weakest changes in the outlet flow rate due to the leak correspond to the farthest leak from the pipeline entrance.



a)

b)

Fig. 4 Inlet flow rate trends (a) and outlet flow rate trends (b) at four leak location with constant opening size. Leak started at 300 s.

The outlet flow rate behavior observed in Fig. 4b, is a direct consequence of the leak, since equation (8) has to be accomplished in the leak point.

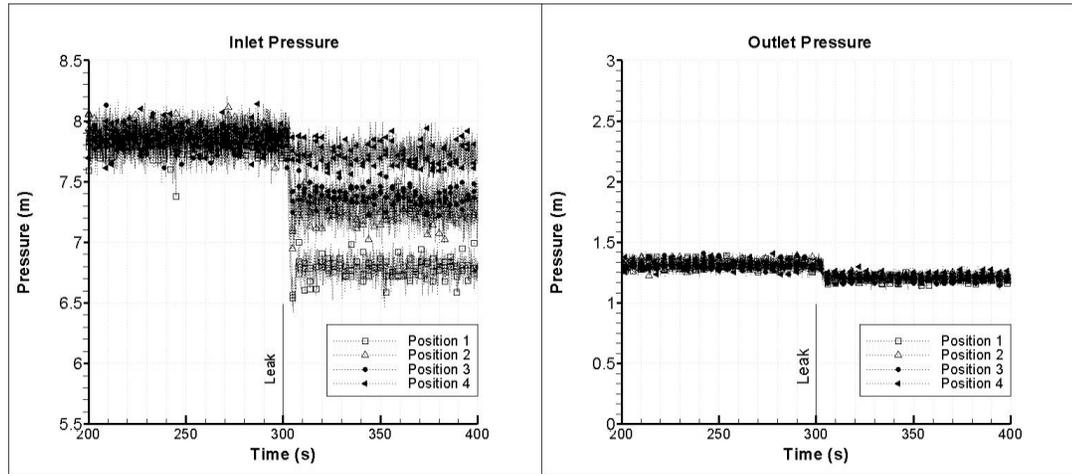
$$q_{in} = q_{tLeak} + q_{tout} \quad (8)$$

Where q_{in} is the total inlet flow rate, q_{tLeak} is the total leak flow rate and q_{tout} is the total flow just after the leak. In the case of just one leak q_{tout} is the outlet flow rate of the pipeline.

From equation (8) it can be directly assumed that the magnitude of the leak is the steady state difference between the inlet flow rate and the outlet flow rate.

$$q_{in} - q_{tout} = q_{tLeak} \quad (9)$$

The pressure data for the same set of experiments are showed in Fig. 5. It can be seen from Fig. 5a that inlet pressure showed large changes due to leaks in all of the four leak locations. However, outlet pressure remains practically unchanged (Fig. 5b). Also from the Fig. 5 it can be seen that the inlet pressure for the nearest leak to the pipeline entrance. The outlet pressure shows weak changes when leak appear far from the entrance.



a)

b)

Fig. 5 Inlet pressure trend (a) and outlet pressure trend (b) at four leak location with constant opening size. Leaks started at 300 s.

The inlet flow rate and outlet pressure are used as the mathematical model boundary conditions due that this measurement showed minor changes during the experiments (Fig. 4 and Fig. 5)

3.2 Experimental equipment No. 2

The second experimental equipment used in this work is shown in Fig. 6. The equipment consist of: a) a reservoir, b) a pipe of 2.40m long whit a diameter of 0.0127m, c) seven piezometer tubes every 0.25m (measurement point of HGL), d) discharged to the atmosphere, e) discharge valves and f) a pump.

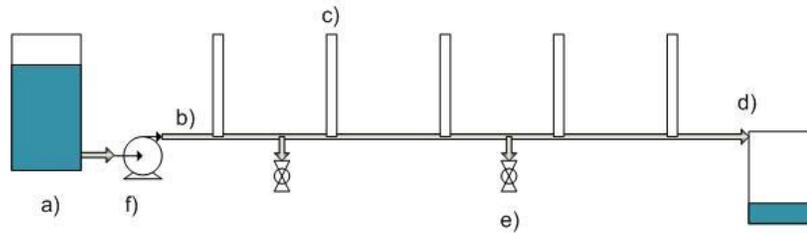


Fig. 6 Experimental equipment No 2. a) Reservoir, b) Pipeline, c) Piezometer tubes (diameter is exaggerated and number of piezometer tubes is diminished to simplify sketch), d) Discharge to the atmosphere, e) Discharge valves and f) Pump.

In the equipment water is pumped from the reservoir and returned to the same reservoir. The discrete measurements of the HGL are obtained from the piezometer tubes. Tow experiments were carried out: 1) HGL of pipe without leak. 2) HGL of pipe with a leak located at 1.02m from the pipe inlet.

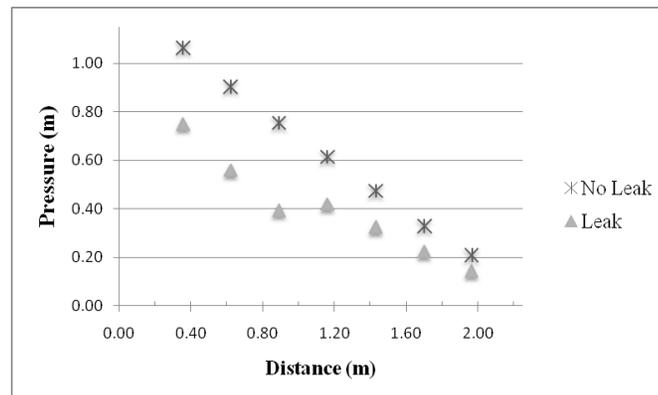


Fig. 7 Experimental HGL of equipment number tow (Pressure profile).

Fig. 7 shows that HGL caused by a leak is formed by two segments similar to the ones shown in Fig. 2a. Several experiments were carried out in all the six leak location getting in all locations similar behavior of the HGL.

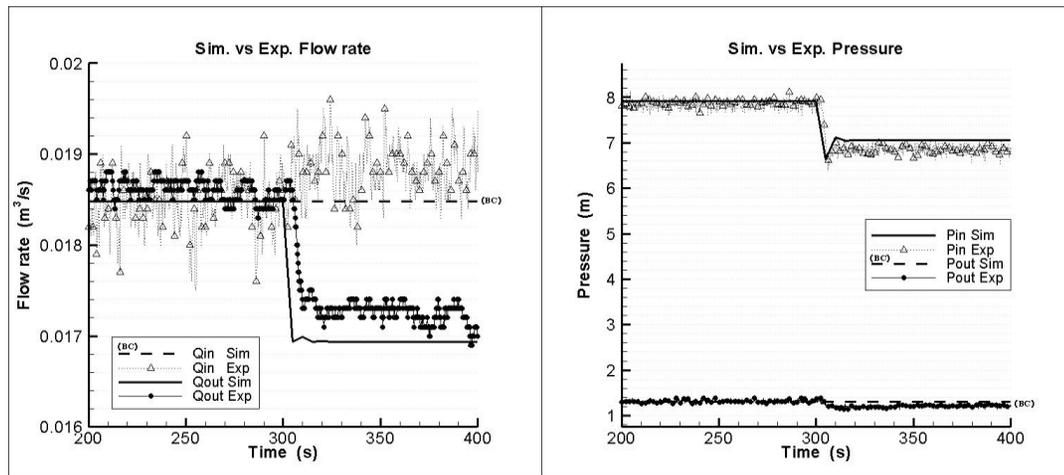
A pressure increment was observed in the HGL caused by a leak at leak location ([8]). Such pressure behavior can be predicted from the water hammer equation (Ec. 10).

$$\Delta H = -\frac{a}{g}\Delta V \quad (10)$$

Where H is the piezometric head, a is the velocity of sound in the fluid and V is the velocity of the fluid. From fundamental transient analysis (Chaudhry [7]) it is well known that a decrease in the velocity produces an increase in pressure and vice versa. Such a situation is exactly what happens at the leak location. This issue is important since the pressure profile is used in some leak detection methodologies.

4. Model Vs experimental data

The mathematical model is compared against experimental data coming from equipment No.1 (Fig. 8). In the model, constant inlet flow rate and constant outlet pressure were used as boundary conditions. Fig. 8a shows the inlet flow rate (Q_{in} Exp) and the outlet flow rate (Q_{out} Exp). A leak is simulated at 300s and located at 15.1m from the pipeline inlet. Fig. 8a shows that simulated flow rates are very similar to the experimental data. Similarly, Fig. 8b shows simulated and experimental pressure data trends. The simulated result follows closely the experimental data.



a)

b)

Fig. 8 Comparison between simulated data (Sim) and experimental measurements (Exp). Leaks started at 300 s. a) Experimental and simulated flow rates and b) Experimental and simulated pressure.

The error between simulated and experimental flow rate is less than 6%. The error for pressure is less than 1%. Simulated results have good agreement with experimental data not only in steady

state but also in transient state. Similar orders of magnitude of errors were obtained by comparing the simulated flow rates and pressures against experimental data for the leak locations 2 to 4. The experimental inlet and outlet pressure observed in Fig. 8b are actually the extreme points of the pressure profile in Fig. 2a.

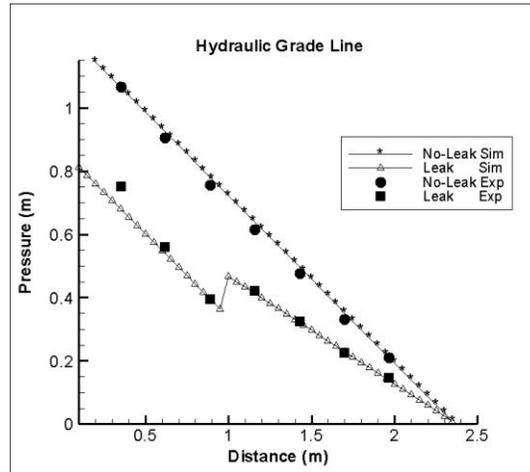


Fig. 9 HGL simulated and experimental data (Equipment No. 2).

The HGL were predicted for a case with and without leak (Fig. 9). The discrete points in Fig. 9 correspond to the measurements of the equipment No. 2 and the continuous lines correspond to the model predictions.

The experimental conditions used into the model were: flow rate of $0.0003458\text{m}^3\text{s}^{-1}$, friction factor $C_n=0.0357$, leak location 1.02m and leak diameter 0.00635m . As a result simulation of pressure profile was obtained (Fig. 9).

5. Conclusions

A leak model for a mixture of water and air has been developed, which shows good agreement with experimental data not only in the steady state but also in the transient state.

In this study it was observed that a leak induce several changes in the hydrodynamic of a pipeline: 1) the inlet pressure changes are directly proportional to the location and magnitude of the leak and 2) the outlet flow rate is diminishes directly with the magnitude of the leak.

According to the experimental result of the present study, the behavior of the HGL in presence of a leak is more closely to the predicted by Dinis et al [8] and Kam [12].

The leak model proposed is considered suitable for the simulation of leaks of different sizes and at different locations, and the model can be used as a tool in leak detection methodologies.

References

- [1] Abhulimen KE, Susu AA (2004) Liquid pipeline leak detection system: model development and numerical simulation, *Chem. Engrg. J.*, 97 (1), 47-67.
- [2] Barker VA, Blackford L S, Dongarra J, Du Croz J, Hammarling S, Marinova M, Wasniewski J, Yalamov P (2001) *LAPACK95 Users' Guide*, Soc. Ind. Appl. Math., Philadelphia, PA, third ed.
- [3] Belsito S, Lombardi P, Andreussi P, Banerjee S (1998). Leak detection in liquefied gas pipelines by artificial neural networks. *AIChE J.*, 44(12), 2675-2688.
- [4] Billman L, Isermann R (1987) Leak detection methods for pipelines, *Automatica*; 23(3):381-5.
- [5] Bratland O (2009) *Pipe Flow 2: Multi-phase Flow Assurance*.
- [6] Cazarez O, Vasquez MA (2005) Prediction of Pressure, Temperature, and Velocity Distribution of Two-Phase Flow in Oil Wells *J. Petrol Sci. and Eng*, 46(3), March 2005, 195-208.
- [7] Chaudhry, MH (1987). *Applied Hydraulic Transients*, Van Nostrand Reinhold Comoany Inc., Ney York
- [8] Dinis, JM, Wojtanowicz AK., Scott SL, (1999). Leak detection in liquid subsea flowlines with no record feed rate. *J. Energy Resour. Technol. (ASME)* 121, 161-166 Sep.
- [9] Emara SHE, Khulief YA, Hussaini I (2002) *Proceedings of the Institution of Mechanical Eng, Part I: J. of Systems and Control Eng.* 216(6), 497- 512.
- [10] García F, García JM, García R, Joseph DD (2007) Friction factor improved correlations for laminar and turbulent gas-liquid flow in horizontal pipelines, *Int. J. of Multiph. Flow*, 33, 12, 1320-1336.
- [11] Geiger G (2006) State-of-the-art in leak detection and localization. *Oil Gas European Magazine*, 32(4), 193-198.
- [12] Kam SI (2010) Mechanistic modeling of pipeline leak detection at fixed inlet rate, *J. Petrol Sci and Eng*, 70(3-4), 145-156.
- [13] Taitel Y and Dukler A E (1976) A Model for Predicting Flow Regime Transitions in Horizontal and Near Horizontal Gas-Liquid Flow, *AIChE*), 22(1), 47 – 55.
- [14] Verde C, Visairo N, Gentil S (2007) Two leaks isolation in a pipeline by transient response, *Advances in Water Resources*, 30(8) 1711-1721.
- [15] Wagner W, Cooper JR, Dittmann A, Kijima J, Kretzschmar HJ, Kruse A, Mares R, Oguchi K, Sato H, Stöcker I, Sifner O, Takaishi Y, Tanishita I, Trübenbach J, Willkommen Th, (2000), *The IAPWS Industrial Formulation 1997 for the Thermodynamic Properties of Water and Steam*, *ASME Journal of Engrg. for Gasturbines and Power*, 122 (1) 150-182.
- [16] Wang XJ, Lambert M F, Simpson AR, Liggett JA, Vítkovský JP (2002) Leak Detection in Pipelines using the Damping of Fluid Transients, *J. Hydr. Engrg*, 128(7), 697-711.
- [17] White FM (2005), *Fluid Mechanics*, McGraw-Hill, 5th Ed.

DISEÑO DE UNA ESPECIFICACIÓN ESTÁNDAR PARA SIMULAR SISTEMAS DE MANUFACTURA

Dr. José Luis Coronel Trujillo^{1*}, Guadalupe Gómez Ortiz¹, Luis Alberto Medina Juárez¹, Oscar Román Rosales¹, Nelson Alfredo Mariaca Cárdenas, Elías Estrada Gonzaga¹.

¹Instituto tecnológico de Zacatepec, Departamento de Ingeniería Industrial, Departamento de posgrado e investigación. Calzada Tecnológico No. 27 Zacatepec, Morelos, C.P. 62780, zacatepecjlt@hotmail.com

Resumen

Uno de los mayores problemas que se presentan en la actualidad al simular sistemas de manufactura, es la dificultad para realizar la simulación mediante un lenguaje de alto nivel (lenguaje Delphi, C, Java, etc.) o a través de un lenguaje de simulación (PACION, FSM, PROMODEL, SIMFACTORY, etc.). El problema se debe a que para poder realizar la simulación, el analista debe conocer completamente el lenguaje de simulación, además de tener amplios conocimientos de estadística y probabilidad, y sobre todo tener un conocimiento de la teoría de la simulación. Mediante el diseño de la especificación estándar para simular sistemas de manufactura, EESM, se elimina el problema anterior (el conocimiento de un lenguaje de alto nivel o el de un lenguaje de simulación), es decir, al usar la EESM, el analista solo debe saber algún procesador de textos como WORD OFFICE, teniendo cuidado solamente de introducir los datos de acuerdo al formato de bloque que se esté simulando. Posteriormente mediante el diseño de una interfase, se realizará la simulación como si se estuviera utilizando en realidad el lenguaje de simulación.

Palabras clave: Especificación estandar, simulación

Abstract

One of the major problems that they present at present on having simulated systems of manufacture, It is the difficulty to realize the simulation by means of a high-level language (language Delphi, C, Java, etc) Or across a language of simulation (PACION, FSM, PROMODEL, SIMFACTORY, etc). The problem owes to that to be able to realize the simulation, The analyst must know completely the language of simulation, Beside having wide knowledge of statistics and probability, And especially to have a knowledge of the theory of the simulation. By means of the design of the standard specification to simulate systems of manufacture, EESM, The previous problem is eliminated (Knowledge of a high-level language or that of a language of simulation), It is to say, On having used the EESM, The alone analyst must know some processor of texts as WORD OFFICE, Having taken care only of introducing the information of agreement to the format of block that is simulated. Later by means of the design of an interface, The simulation will be realized as if the language of simulation was in use actually

Key words: Standard specification, simulation

En este artículo se describe la sintaxis y la interpretación del lenguaje de la EESM (Especificación Estándar para simular Sistemas de Manufactura) en el cual se van a definir tanto la estructura como los parámetros de un sistema de manufactura.

Un sistema cualquiera puede estar representado por todos ó alguno de los niveles siguientes:

Nivel I corporativo, Nivel II planta; Nivel III línea; Nivel IV celda; Nivel V máquina ó estación de trabajo.

1. Descripción de las componentes de los niveles del sistema de manufactura

La Especificación Estándar para Sistemas de Manufactura (EESM) consiste en una descripción de las componentes y sus parámetros, sucesos, políticas y decisiones de flujo de materiales en un sistema de manufactura para los fines de modelado por simulación.

Notación del elemento básico bloque de la EESM

El objeto básico de la EESM es un **bloque**. El elemento **Bloque** además de representar al **nivel V** que es una **máquina ó estación de trabajo**, también representa a un Generador de llegadas, Almacén, Demora, Decidor, Operación, inspección, Operación-Inspección, Transporte, Ensamble y Terminal. Los bloques se identifican por sus nombres.

El **Nombre del bloque es una secuencia alfa-numérica**. Todo el lenguaje EESM no es sensible a las mayúsculas / minúsculas, así que, por ejemplo, los nombres Bloque1, bloque1, BLOQUE1 etc. refieren al mismo bloque.

Dentro de una celda los nombres de bloques tienen que ser únicos. En dos celdas diferentes puede repetirse el nombre del bloque. Para evitar conflictos de nombres, la referencia completa a un bloque se construye como muestra la siguiente regla:

nombre = P-nombre_planta-L-nombre_línea-C-nombre_celda-B-nombre_bloque

Si se omite la parte P, se busca un bloque en la misma planta (según el contexto actual, vea la explicación del contexto más adelante en este texto). Lo mismo refiere a la parte L (línea) y C (celda). Por ejemplo, el bloque "C-C23-B-rectificadora4" es la rectificadora4 de la celda C23 en la línea determinada por el contexto actual.

El nombre de cualquier nivel debe ser continuo, es decir, no se permiten espacios vacíos. Por ejemplo el nombre del bloque **operación 25**, es incorrecto; el nombre correcto es **operación25**.

El contexto actual es la planta, línea ó celda definida en la última definición correspondiente.

Para los fines de este trabajo, en las definiciones siguientes el código EESM no se incluirá al nivel corporativo.

En este código el bloque "P uno L L23 C B B inspección" refiere al bloque inspección de la celda B de la línea L23 de la planta uno. Pero si se está en la parte del código de la celda B, podemos referir al mismo bloque simplemente como "B inspección".

Esta notación hace los códigos de las secciones del modelo "portables", esto quiere decir que, por ejemplo, el código de una celda puede usarse sin o con muy pocos cambios en otros modelos donde se utiliza una celda igual ó similar.

Para hacer el código más claro y bien documentado, se permiten comentarios, que serán ignorados por el traductor de la EESM. Un comentario se identifica con los caracteres // al principio de la línea del código. Para prolongar el comentario a la línea siguiente hay que repetir los caracteres //.

Desde luego las secuencias de líneas, celdas, bloques etc. pueden repetirse dentro de la malla que los incluye. Así, el contexto está definido de manera única. Considere, por ejemplo en la siguiente estructura (es solo un bosquejo del código)

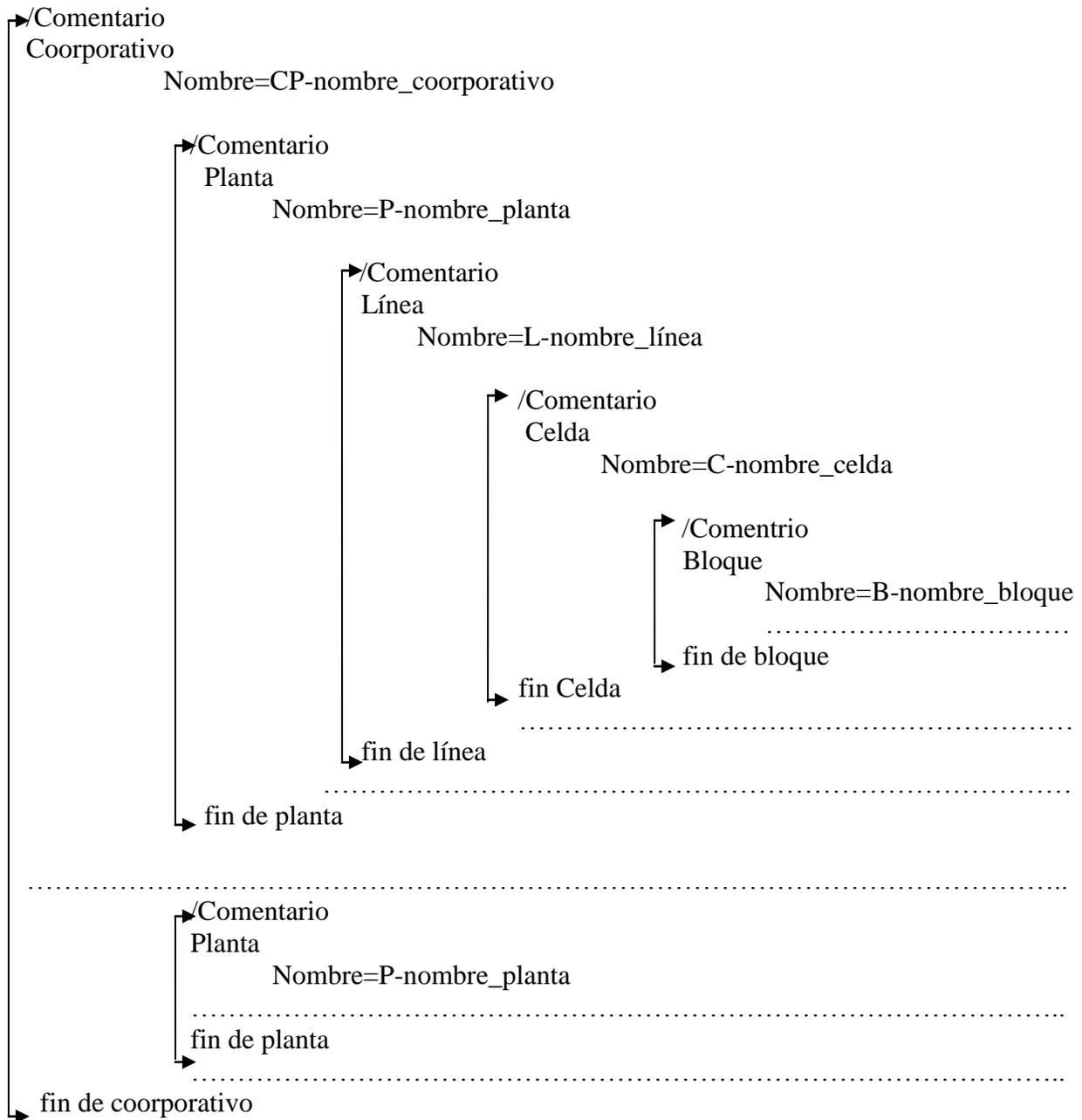
La Especificación Estándar para Sistemas de Manufactura (EESM) se hace para cada uno de los cinco niveles del sistema. A continuación se describen las componentes de cada uno de los niveles.

2.Sintaxis del Lenguaje de la Especificación Estándar para Sistemas de Manufactura EESM

El contenido de los bloques elípticos son las palabras reservadas y obligatorias. Los bloques rectangulares son códigos proporcionados por el usuario.

En todos los diagramas los campos antecesor y sucesor son obligatorios. Se codifica una instrucción por línea de código. Una línea de código no puede exceder 80 caracteres. Si hay necesidad de prolongar la instrucción a la línea siguiente, hay que poner los caracteres -> como los primeros dos caracteres en la línea de prolongación (esto no funciona para los comentarios).

Los comentarios deben incluir los caracteres // en las dos primeras posiciones del comentario, en cada línea del mismo.



Nota : La referencia completa de un bloque se construye como lo muestra la siguiente regla :

nombre = P-nombre_planta-L-nombre_línea-C-nombre_celda-B-nombre_bloque

Figura 1. Niveles de un sistema de manufactura.

Datos comunes

En la siguiente especificación las palabras clave se escriben con negrita. Si aparece el signo de

igualdad, éste es obligatorio y después de él debe venir el dato correspondiente.

No todas las opciones son obligatorias. Las que sí lo son están marcadas con (ob) (el "(ob)" no aparece en el texto del archivo final). Note que el lenguaje en el cual se llevara a cabo la simulación puede ser especificado, pero no es obligatorio. Todo el texto debe comenzar con la palabra EESM. La especificación no es sensible a minuúsculas/mayúsculas. El conjunto de caracteres es el del idioma Español. Sin embargo, las mayúsculas no pueden tener acentos. Si se usan los corchetes, el valor debe ser igual a una de las opciones indicadas dentro de los mismos. Todo lo que aparece en los paréntesis normales en la siguiente especificación son comentarios y no debe aparecer en el texto del código. Muchos de los datos siguientes no son obligatorios, por ejemplo se puede omitir versión del proyecto, el lenguaje de simulación ó el intervalo de tiempo de modelo para la simulación (estos datos se determinarán posteriormente, en la etapa de traducción y en la corrida del programa final).

EESM

proyecto= nombre del proyecto (ob).

versión=versión del proyecto.

objetivo=objetivo de la simulación (ob).

autor=nombre del autor.

fecha=fecha.

language=nombre del lenguaje de simulación.

unidad_de_tiempo=[día, hora,minuto] (ob).

intervalo=intervalo del tiempo de simulación.

Modo=modo de la corrida de simulación ; depende del lenguaje de simulación que se pretende usar. Puede indicar, por ejemplo, animación, intervalos de confianza, gráficas de los buffers, etc.

Nivel_general=[corporativo,planta,línea,celda]; indica el nivel más alto que se usa en los datos (ob).

Resultados_generales

(Resultados generales dependen de las características del lenguaje de simulación que se usará para implementar la simulación) Se supone que estos datos deben incluir lo siguiente:

Estación de llegadas:

Tipos ó modelos de piezas que llegan.

Número de lotes de piezas que llegan.

Cantidad de pieza de cada lote.

Distribución de los tipos y lotes de piezas que llegan.

Demoras (no se conoce el tiempo exacto de espera):

Número de piezas que entraron a espera.

Número de piezas que no esperaron.

Número de piezas promedio que esperaron.

Tiempo promedio de espera.

Tiempo total en espera.

Cantidad máxima de piezas que esperaron.

Cantidad Mínima de piezas que esperaron.

Cantidad de piezas que no pudieron entrar a espera.

Almacenes (se conoce el tiempo, puede ser constante ó aleatorio).

Número de piezas que entraron a espera.

Número de piezas que no esperaron.

Número de piezas promedio que esperaron.

Tiempo promedio de espera.

Tiempo total en espera.

Cantidad máxima de piezas que esperaron.

Cantidad Mínima de piezas que esperaron.

Cantidad de piezas que no pudieron entrar a espera.

Estaciones de trabajo, Estaciones de ensamble, Estación de inspección, Estación de trabajo e inspección.

Capacidad múltiple:

Estado: Descompuesta ó en funcionamiento.

Capacidad simple:

Estado: descompuesta, bloqueada, operación, vacía y preparación.

Utilización: Tiempo durante el cual esta vacía, Tiempo durante el cual esta ocupada.

Operadores: desocupados, ocupados en forma AND y OR.

Recursos:

Estado: En uso, en movimiento para usarse, en movimiento para estacionarse, desocupado descompuesto y bloqueado.

Utilización: Porcentaje de ocupación.

Salidas:

Tipos ó modelos de piezas que salen.

Número de lotes de piezas que salen.

Cantidad de pieza de cada lote.

Distribución de los tipos y lotes de piezas que salen.

Envío por pieza ó lote.

Tiempo en el que se hace el envío.

A nivel systema.

Piezas.

Tiempo que permanece en proceso.

Tiempo que permanece en transporte de una estación y otra

Tiempo que permanece en espera.

Tiempo que la pieza permanece en alguna estación bloquead..

costo_acumulado=[tota_sisteml,proceso_sistema,total_línea,proceso_línea,total_celda,proceso_celda,total_bloque,proceso_bloque].

Costo_Acumulado_total_sistema: es el costo total del sistema (incluye costo por proceso, demoras, etc.).

Costo_Acumulado_proceso_sistema: es el costo total del sistema solo por proceso.

Costo_Acumulado_total_línea: es el costo total en la línea (incluye costo por proceso, demoras, etc.).

Costo_Acumulado_proceso_línea: es el costo total en la línea solo por proceso.

Costo_Acumulado_total_celda: es el costo total en la celda (incluye costo por proceso, demoras, etc.).

Costo_Acumulado_proceso_celda: es el costo total en la celda solo por proceso.

Costo_Acumulado_total_bloque: es el costo total en el bloque (depende del tipo de bloque).

Costo_Acumulado_proceso_bloque: es el costo en el bloque solo por proceso (operación, inspección inspección-operación).

Datos del bloque generador



El generador es una "puerta de entrada" para las piezas a procesar, de un cierto tipo. El conjunto de datos consiste en una secuencia de definiciones de los parámetros correspondientes, codificadas en cualquier orden. Las definiciones obligatorias están marcadas con (ob). Las palabras y caracteres obligatorios están escritos con letra de molde. El signo de igualdad es obligatorio. El antecesor para este bloque siempre tiene que tener valor cero.

nombre=nombre del bloque (ob).

antecesor= 0 (ob).
sucesor=*bloque sucesor* (ob).
generador (ob).
pieza=*tipo de pieza* (ob).
nlot=*número de lotes*.
tlot=*tamaño de lote*.
tinicio=*tiempo inicial*.
función=*generador de tiempos entre llegadas de lotes ó piezas* (ob).
peso=*peso de la pieza*.
volumen=*volumen de la pieza*.

(Valores definidos "por defecto":).

nlot=*sin límite*.
tlot= 1 .
tinicio= 0 .
peso= 0 .
volumen=
como se puede apreciar en la figura 5.6.

Datos del bloque Demora  D n

El bloque demora se simula la espera de las piezas de un cierto tipo que van a ser procesadas. El conjunto de datos consiste en una secuencia de definiciones de los parámetros correspondientes, codificadas en cualquier orden. Las definiciones obligatorias están marcadas con (ob). Las palabras y caracteres obligatorios están escritos con letra de molde. Los signos de igualdad son obligatorios.

nombre=*nombre del bloque* (ob).
antecesor=*bloque antecesor* (ob).
sucesor=*bloque sucesor*(ob).
demora (ob).
captot=*capacidad del buffer para la cola de piezas de uno ó varios tipos* (ob).
incant= Z si *cero cantidad inicial*, N si *diferente de cero*.
incantidad =*cantidad inicial de piezas (si incant= N)*.
orden=[*FIFO, LIFO ó RANDOM*] (ob).
costo_demora=*el costo por pieza y unidad de tiempo*.

como se puede apreciar en la figura 5.7.

Operación  O n

Inspección  In

Operación-inspección  O I n

El bloque operación simula la actividad que modifica físicamente a la pieza de un cierto tipo. El conjunto de datos consiste en una secuencia de definiciones de los parámetros correspondientes, codificadas en cualquier orden. Las definiciones obligatorias están marcadas con (ob). Las palabras y caracteres obligatorios están escritos con letra de molde. Los signos de igualdad son obligatorios.

nombre=*nombre del bloque* (ob).

antecesor=0 (ob).

sucesor=*bloque sucesor* (ob).

operación (ob).

pieza=*código de pieza* (ob).

nopera=*número de operación según datos sobre procesos para la pieza.*

(si el número de operación nopera es diferente de cero, entonces todos los datos de la operación se buscarán en la base de datos de los procesos. En este caso es obligatorio el código de la pieza para poder encontrar el registro de la base de datos correspondiente. Si nopera es igual a cero, hay que proporcionar los datos de la operación explícitamente en el código de EESM).

opp=*descripción de la operación, hasta 80 caracteres.*

entradas=*número de entradas que alimentan al bloque.*

tiempo_col.=*tiempo de colocación en el pallet.*

operación=*nombre de la operación de un programa de secuencias conocido.*

cantidad=*cantidad de pieza que pueden ser procesadas a la vez.*

tiempo_ope=*función que genera el tiempo de maquinado.*

retraso=*función de tiempo.*

costo_maq=*costo por usar la máquina.*

costo_operador=*costo por el uso del operador.*

operadores=*número de operadores utilizados en la estación de trabajo.*

costo_ener=*costo de la energía utilizada para producir.*

recursos =*cantidad de recursos compartidos*

lógica=*and ó or.*

tiempo_falla=*función de tiempo.*

tiempo_reparación=*función de tiempo*.
 costo_rep=*costo por reparar la estación de servicio*.
 costo_inactiv =*costo por permanecer inactiva la estación*.
 mantenimiento_preventivo=*función de tiempo*.
 costo_mantenimiento=*costo por darle mantenimiento a la estación de servicio*
 costo_materiales =*costo de los materiales para la operación*.
 costo_pieza=*costo por procesar la pieza*.

Datos del bloque ensamble



En

El bloque ensamble simula la actividad de ensamblar varias piezas para dar forma a un nuevo producto de un cierto modelo o tipo. El conjunto de datos consiste en una secuencia de definiciones de los parámetros correspondientes, codificadas en cualquier orden. Las definiciones obligatorias están marcadas con (ob). Las palabras y caracteres obligatorios están escritos con letra de molde. Los signos de igualdad son obligatorios.

Bloque

Nombre=*nombre del bloque* (ob).
 antecesor=*bloque antecesor* (ob).
 antecesor=*bloque antecesor* (ob).
el bloque ensamble tiene al menos dos antecesores
 sucesor=*bloque sucesor* (ob).
 ensamble (ob).
 pieza=*nombre(código) de la pieza ensamblada*.
(si el número de operación de ensamble nensamb es diferente de cero, entonces todos los datos de la operación se buscarán en la base de datos de los procesos. En este caso es obligatorio el código de la pieza para poder encontrar el registro de la base de datos correspondiente. Si nensamb es igual a cero, hay que proporcionar los datos de la operación explícitamente en el código de EESM).
 nensamb=*nombre del ensamble*.
 npartes=*numero de entradas (tipos de partes a ensamblar)*.
 Si npartes>0 hay que proporcionar las cantidades de cada tipo de parte, uno por cada línea consecutiva .
 t_coloc=*tiempo de colocación de pieza en pallet*.
 t_acesorio=*tiempo de colocación de accesorio*.
 cantidad=*cantidad de ensamblar a la vez*.
 cantidad_total=*cantidad total de ensamblados=cantidad de ensamblados*.
 tensamble=*tiempo de operación*.

tretraso=tiempo de retraso.
costo_ens=costo de uso de estación de ensamble.
costo_oper=costo por operador.
noperadores=número de operadores.
costo_ener_ens=costo de energía.
crecursos=cantidad de recursos utilizados y compartidos.
lógica_ens=forma de utilización de recursos=" or " o " and ".
tfalla_ens=tiempo de falla de la estación de ensamble.
trepara_ens=tiempo de reparación.
costo_rep_ens=costo de reparación.
tmant_ens=tiempo de mantenimiento preventive.
costo_mant_ens=costo por mantenimiento preventive.
costo_inactiv_ens=costo de inactividad.
costo_ens=costo del proceso - es el costo por procesar la pieza.
 como se puede apreciar en la figura 5.9.

Datos del bloque Almacén



A n

El bloque almacén simula el almacenamiento por un tiempo definido de cada uno de los diferentes tipos de piezas. El conjunto de datos consiste en una secuencia de definiciones de los parámetros correspondientes, codificadas en cualquier orden. Las definiciones obligatorias están marcadas con (ob). Las palabras y caracteres obligatorios están escritos con letra de molde. Los signos de igualdad son obligatorios.

nombre=nombre del bloque (ob).
antecesor=bloque antecesor (ob).
sucesor=bloque sucesor(ob).
almacen (ob).
captot=capacidad del almacén para almacenar piezas de uno o varios tipos (ob).
incant= Z si cero cantidad inicial, N si diferente de cero.
incantidad =cantidad inicial de piezas (si incant=N)
tiempo_alma =tiempo mínimo de permanecer dentro, cero para una cola ó buffer.
orden=[FIFO, LIFO ó RANDOM] (ob).
costalma=costo de almacenamiento, pieza x hora.

Datos del bloque Transporte



TR n

El bloque transporte simula el transporte por un tiempo definido de cada uno de los diferentes

tipos de piezas. El conjunto de datos consiste en una secuencia de definiciones de los parámetros correspondientes, codificadas en cualquier orden. Las definiciones obligatorias están marcadas con (ob). Las palabras y caracteres obligatorios están escritos con letra de molde. Los signos de igualdad son obligatorios.

nombre=*nombre del bloque* (ob).

antecesor=*bloque antecesor* (ob).

sucesor=*bloque sucesor* (ob).

transporte (ob).

tipo_te=[a,g,v] (ob).

capacidad_tr=*cantidad de piezas que puede transportar el transporte* (ob).

tiempo_tr=*función de tiempo (no es necesario si se proporcionan la longitud y velocidad)*.

longitud=*longitud que recorre el transporte*.

velocidad=*velocidad del transporte*.

retraso_tr=*tiempo de retrso adicional*.

costo_tiempo_tr=*costo*.

costo_operador_tr=*costo por transporte*.

costo_pieza_tr=0.

costo total acumulado del sistema=*costo total acumulado del sistema+ costo total del bloque*.

Datos del bloque Decisor



DF n

nombre=*nombre del bloque* (ob).

antecesor=*bloque antecesor* (ob).

sucesor=*bloque sucesor* (ob).

decisor (ob).

salidas=*decisiones del bloque (número de salidas posibles)* (ob).

tiposalida=*decisión tomada por probabilidad, prioridad o alguna otra regla lógica, debe ser R, P o S*.

regla=*función que determina el número de salida actual (estrategia de salidas)*.

Este bloque debe tener sucesores múltiples. Si el dato “tiposalida” no es R, entonces después de la línea "salidas" tiene que venir una secuencia de números que determinan probabilidades (el caso "S") o prioridades (el caso "P"). Si el dato “tiposalida” es R, entonces hay que proporcionar el dato regla definiendo el nombre de una función con valor entero, que determina el número de salida.

Datos del bloque salida



TER i

El bloque salida simula la salida de la pieza de un cierto tipo del sistema. El conjunto de datos consiste en una secuencia de definiciones de los parámetros correspondientes codificadas en cualquier orden. Las definiciones obligatorias están marcadas con (ob). Las palabras y caracteres obligatorios están escritos con letra de molde. Los signos de igualdad son obligatorios. El sucesor debe ser cero.

nombre=nombre del bloque (ob).

antecesor=bloque antecesor (ob).

sucesor=0 (ob).

npieza=número de piezas de un tipo que deben ser producidas que salen del sistema. La simulación terminará cuando se alcanza este número de piezas producidas en cualquiera de los bloques de salida. Poner cero si no hay límite.

costo_envío=costo de envío.

3. Ejemplo de Listado de la Especificación Estándar del Sistema de Manufactura

A continuación, como ejemplo, se describe el listado de la especificación estándar de un sistema que tiene la estructura siguiente:

Nota: Por problemas de espacio sólo se edita el código correspondiente a la línea “L1”

El modelo está formado por las siguientes componentes:

Tres Líneas: “L1”, “otra” y “ensambleprueba”.

La línea “L1” tiene una celda: “c1”.

La línea “otra” tiene una celda: “uno”.

La línea “ensambleprueba” tiene una celda: “celdaens”.

La celda “c1” tiene 6 bloques y son: generador, demora, operación, demora, operación, terminal. Estos bloques son: Los bloques son: entra, cola1, server1, cola2, server2 y sale.

La celda “uno” tiene tres bloques: generador, demora y operación.

Los bloques son: fuente, cola1 y server1.

La celda “celdaens” tiene cinco: generador, generador, almacén, almacén y ensamble.

Los bloques son: ent1, ent2, b1, b2, ens1.

Como se puede apreciar en la figura 5.14.

En el anexo 7 se muestra el listado de la especificación estándar del modelo del sistema planta 2.

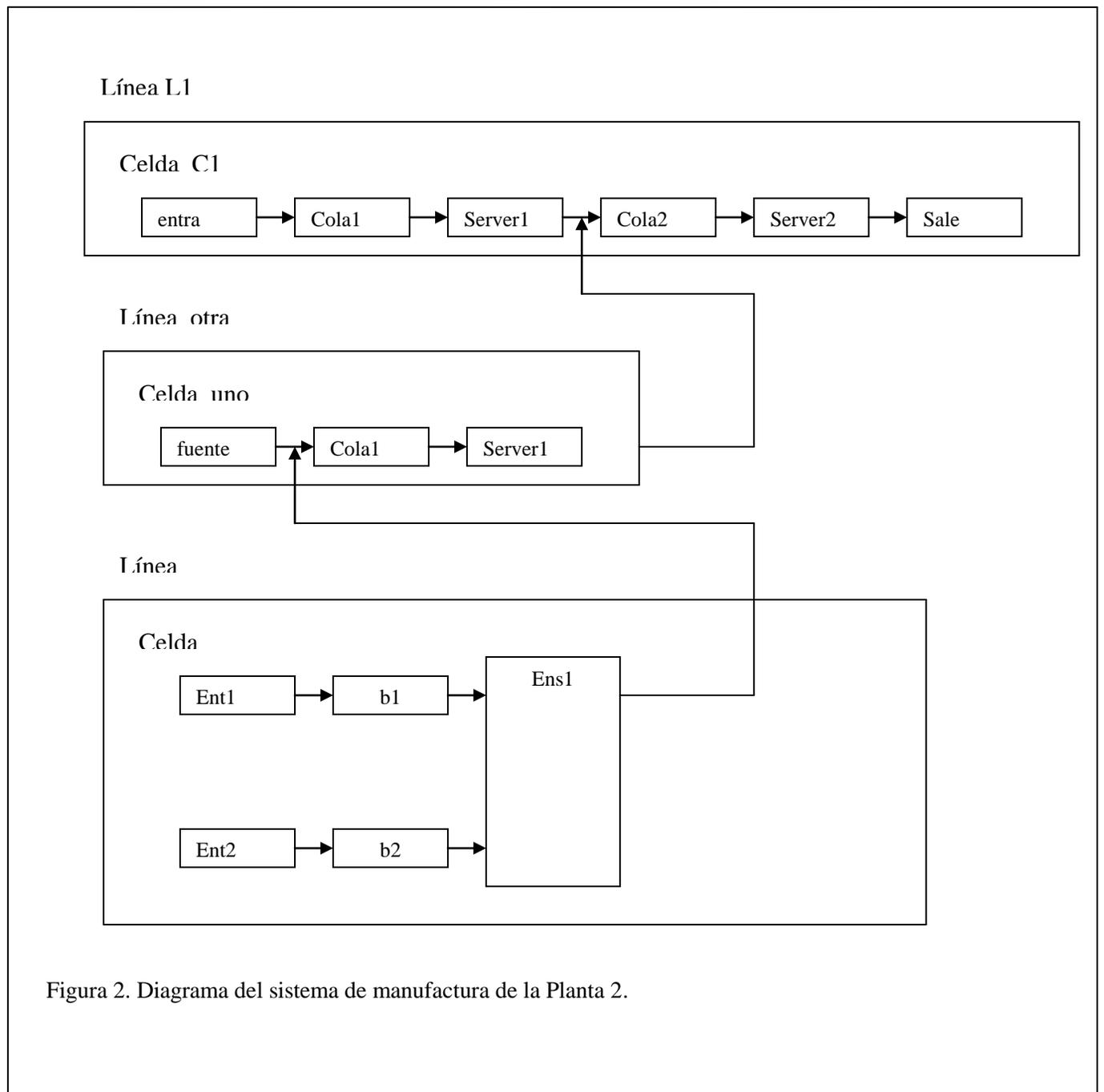


Figura 2. Diagrama del sistema de manufactura de la Planta 2.

```

// Aqui empieza todo
PLANTA
//datos planta
Nombre=Planta2

línea
nombre=l1

CELDA
nombre=c1

bloque
nombre=entra
Antecesor=0
sucesor=b cola1
generador
pieza=tornillo
nlot=0
tlot=1
tinicio=0
unción=negexp(10.0)
peso=20
volumen=10
fin bloque

bloque
nombre=cola1
antecesor=b entra
sucesor=B server1
almacén
captot=5
incant=0
incantidad=0
tiempo_alma=500
orden=FIFO
costalma=1
fin bloque

bloque
nombre=server1
antecesor=b cola1
sucesor=b cola2
operación
pieza=tuerca
nopera=0
opp=limpiar
entradas=1
tiempo_col=10

operación=maquinado
cantidad=1
tiempo_ope=erlang(2,1.1)
retraso=5
costo_maq=500
costo_operador=100
operadores=1
costo_ener=50
recursos=1
lógica=or
tiempo_falla=180
tiempo_reparación=10
costo_rep=12000
costo_inactiv=500
mantenimiento_preventivo=30
costo_mantenimiento=300
costo_materiales=200
costo_pieza=400
fin bloque

bloque
nombre=cola2
antecesor=b server1
antecesor=l otra c uno b
server1
sucesor=B server2
almacén
captot=5
incant=0
incantidad=0
tiempo_alma=5
orden=FIFO
costalma=1
fin bloque

bloque
nombre=server2
antecesor=b cola2
sucesor=b sale
operación
pieza=tuerca
nopera=0
opp=pintar
entradas=1
tiempo_col=10
operación=maquinado
cantidad=1
tiempo_ope=erlang(2,1.4)

```

```
retraso=5
costo_maq=500
costo_operador=100
operadores=1
costo_ener=50
recursos=1
lógica=or
tiempo_falla=180
tiempo_reparación=10
costo_rep=12000
costo_inactiv=500
mantenimiento_preventivo=30
costo_mantenimiento=300
costo_materiales=200
costo_pieza=400
fin bloque
```

```
bloque
nombre=sale
antecesor=b server2
sucesor=0
salida
npieza=0
salida
costo_envío=20
fin bloque
fin celda
fin línea
```

Conclusiones

Una vez que ha sido construido el modelo siguiendo la lógica del proceso de manufactura y/o servicio. A continuación se revisa la sintaxis del modelo de acuerdo a la especificación estándar para sistemas de manufactura (EESM). Si existen errores, se corrigen. Si todo está bien se procede a correr el modelo. Lo anterior solo es posible mediante un TRADUCTOR. El TRADUCTOR es un archivo que revisa la sintaxis del modelo y que ejecuta su corrida para proporcionar resultados que posteriormente se analizan estadísticamente. El traductor se construye tomando en cuenta el código fuente del lenguaje de simulación. El TRADUCTOR puede ser construido para cualquiera de los lenguajes. Tales como: PACION, SIMNET, PROMODEL, GPSS, ARENA, TAYLOR, XCELL, etc.

Para el presente trabajo se ha diseñado el TRADUCTOR para el lenguaje PACION. Mediante este traductor es posible simular cualquier modelo de un sistema de manufactura. Con esta herramienta se puede modelar y cualquier sistema sin que para ello el usuario tenga que conocer o ser un especialista del lenguaje de simulación a través del cual se desea hacer la simulación.

Bibliografía.

- [1] Raczynski Stanislaw, “Simulación de sistemas”, Editorial Noriega Editores, 2004
- [2] Raczynski Stanislaw, Software de simulación PACION o FSM, 2005