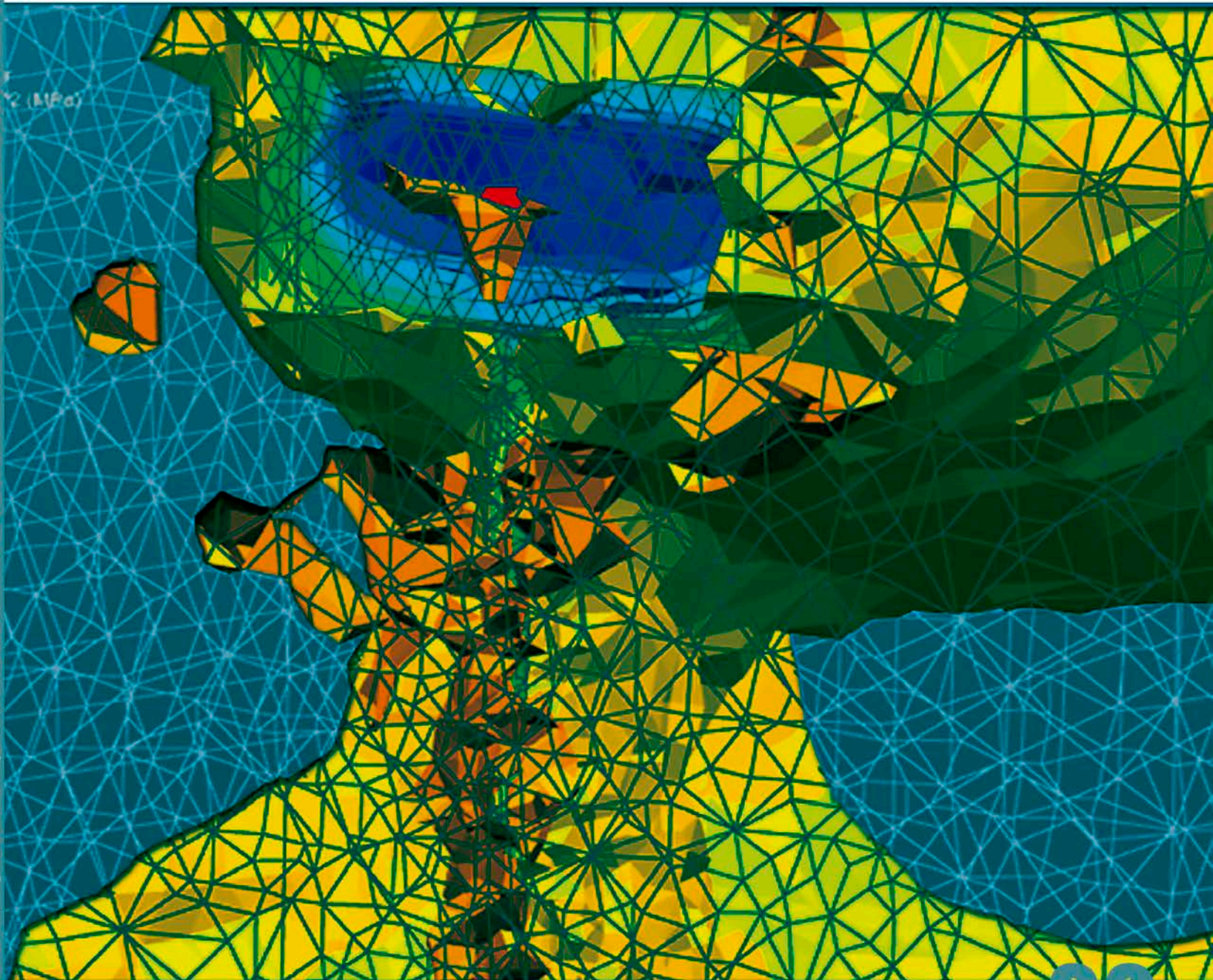


Ingeniería y Tecnología

Facultad de Ingeniería
Benemérita Universidad Autónoma de Puebla



DIRECTORIO TUTORES

JOSÉ CASTILLO ROMÁN
TUTOR DEL COLEGIO
DE INGENIERÍA GEOFÍSICA
Generación 2012



JOSÉ LUIS GONZÁLEZ GUEVARA
TUTOR DEL COLEGIO
DE INGENIERÍA GEOFÍSICA
Generación 2011 y 2015



YLEANA CLAUDIA MARTÍNEZ MIRÓN
TUTOR DEL COLEGIO
DE INGENIERÍA GEOFÍSICA
Generación 2009 y 2014



JOSÉ SERRANO ORTIZ
TUTOR DEL COLEGIO
DE INGENIERÍA GEOFÍSICA
Generación 2013



ISAAC RAÚL SORIANO GARIBO
TUTOR DEL COLEGIO
DE INGENIERÍA GEOFÍSICA
Generación 2008 y Rev. 2014



MANUEL CONRADO URIBE ARRIAGA
TUTOR DEL COLEGIO
DE INGENIERÍA GEOFÍSICA
Generación 2010



CÉSAR ANTONIO ARGÜELLO ROSALES
TUTOR DEL COLEGIO
DE INGENIERÍA INDUSTRIAL
Generación 2013



JOSÉ MARÍA ÁLVAREZ ALARCÓN
TUTOR DEL COLEGIO
DE INGENIERÍA INDUSTRIAL
Generación 2010



LUIS ENRIQUE CARVAJAL JIMÉNEZ
TUTOR DEL COLEGIO
DE INGENIERÍA INDUSTRIAL
Generación 2014



ALEJANDRA CAMPOS VILLATORO
TUTOR DEL COLEGIO
DE INGENIERÍA INDUSTRIAL
Generación 2011



ALFONSO CRUZ HERRERA
TUTOR DEL COLEGIO
DE INGENIERÍA INDUSTRIAL
Generación 2009 y 2013



MARÍA ELENA DEL MORAL JIMÉNEZ
TUTOR DEL COLEGIO
DE INGENIERÍA INDUSTRIAL
Generación 2010 y 2015



ROSANGELA FONTANILLA URDANETA
TUTOR DEL COLEGIO
DE INGENIERÍA INDUSTRIAL
Generación 2014



BEATRIZ GAMBOA FILISOLA
TUTOR DEL COLEGIO
DE INGENIERÍA INDUSTRIAL
Generación 2009, 2014 y Rev. 2011



ALEJANDRA GONZÁLEZ PÉREZ
TUTOR DEL COLEGIO
DE INGENIERÍA INDUSTRIAL
Generación Rev. 2014



GLORIA MORALES CARRASCO
TUTOR DEL COLEGIO
DE INGENIERÍA INDUSTRIAL
Generación 2009 y 2013



Ingeniería y Tecnología

Facultad de Ingeniería
Benemérita Universidad Autónoma de Puebla

ABRIL-SEPTIEMBRE 2015,
AÑO 10, NO. 22

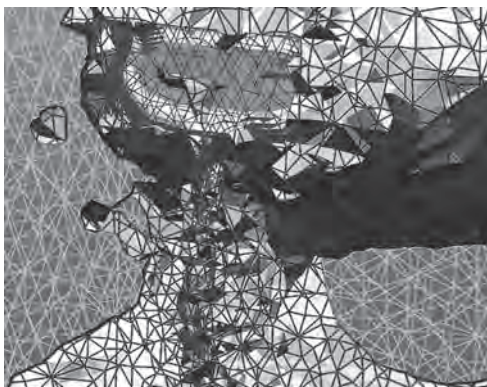


IMAGEN EN PORTADA

VISTA FRONTAL DE PRESIONES
SOBRE ANUNCIO ESPECTACULAR
POR ELEMENTOS FINITOS

AUTORES:

ANTONIO SABUGAL VILLAMAR,
EDGAR IRAM VILLAGRÁN ARROYO

DIRECTORIO

**BENEMÉRITA UNIVERSIDAD
AUTÓNOMA DE PUEBLA**

MTRO. JOSÉ ALFONSO ESPARZA ORTÍZ
RECTOR

DR. RENÉ VALDIVIEZO SANDOVAL
SECRETARIO GENERAL

M.C.E. MARÍA DEL CARMEN MARTÍNEZ REYES
VICERRECTORA DE DOCENCIA

FACULTAD DE INGENIERÍA

M.I. EDGAR IRAM VILLAGRÁN ARROYO
DIRECTOR

M.I. ANA ELENA POSADA SÁNCHEZ
SECRETARIA ACADÉMICA

M.I. FERNANDO D. LAZCANO HERNÁNDEZ
SECRETARIO ADMINISTRATIVO

DR. GABRIEL JIMÉNEZ SUÁREZ
SECRETARIO DE INVESTIGACIÓN Y ESTUDIOS
DE POSGRADO Y DIRECTOR DE LA REVISTA

**REVISTA "INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA BUAP"**

DR. FILIBERTO CANDIA GARCÍA
EDITOR RESPONSABLE

LDF. INGRID LÓPEZ GUAJARDO
DIFUSIÓN Y COMUNICACIÓN

CONSEJO EDITORIAL

DRA. MARÍA MAURA MARGARITA TEUTLI LEÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA BUAP

DR. ALEJANDRO BAUTISTA HERNÁNDEZ
FACULTAD DE INGENIERÍA BUAP

DR. MARTÍN SALAZAR VILLANUEVA
FACULTAD DE INGENIERÍA BUAP

DRA. PATRICIA MARTÍNEZ VARA
FACULTAD DE INGENIERÍA BUAP

DRA. SANTA TOXQUI LÓPEZ
FACULTAD DE INGENIERÍA BUAP

MTRA. GELSOMINA GUADALUPE QUE CANDIA
JEFA DEL ÁREA DE EVALUACIÓN
INSTITUCIONAL, UADY

ÍNDICE

ARTÍCULOS DE INVESTIGACIÓN

3 Análisis CFD en anuncios espectaculares de tipo unipolar sometidos a cargas de viento

Antonio Sabugal Villamar, Edgar Iram Villagrán Arroyo

21 Modelado de líneas de transmisión a través del método de las características

Juan C. Escamilla, P. Moreno, Ismael Albino, Filiberto Candia

27 Análisis de variables no correlacionadas en protección de líneas de transmisión

Jorge Luis Arizpe Islas, Juan Rafael Cervantes Vega

ARTÍCULOS DE DIVULGACIÓN

37 Remoción de compuestos de azufre en hidrocarburos mediante reactores químicos y electroquímicos

Harumi González Piedra, Alia Méndez Albores, Miguel Ángel González Fuentes, Erika Méndez Albores

49 Medidor de energía calorífica de un generador de vapor, mediante un canal parabólico solar

Fernando O. González Manzanilla, Ángel Pérez Coyotl, Luis A. Gaspariano, Carlos Muñoz Montero

55 Avances de los biocombustibles útiles para su uso en la ingeniería

Laura A. Paniagua Solar, S.A. Gamboa



EDITORIAL

Los grandes retos en la enseñanza de la ingeniería radican en el grado de participación que los profesionistas logran desarrollar durante su estancia en las Instituciones de Educación Superior (IES). Esta participación convertida en innovación es un referente de pertinencia nacional que es necesario se transforme en desarrollo de tecnología propia, generando su transferencia al sector productivo y de esta manera contribuir al desarrollo sustentable de un país.

Las patentes y los registros de propiedad industrial son indicadores de crecimiento económico —en el caso de nuestro país se muestran con poca representatividad en el desarrollo sustentable de acuerdo a las estadísticas del IMPI (Instituto Mexicano de la Propiedad Intelectual) y de WIPO (World Intellectual Property Organization)— que permiten medir el desarrollo tecnológico de una nación. Asimismo el factor de impacto (JCR) de los artículos publicados en revistas indexadas no representa para los países en vías de desarrollo un aliciente considerable sobre el desarrollo tecnológico (WEB of SCIENCE), que proporcione indicios de autogestión en infraestructura productiva.

Entonces ¿qué sucede con la ingeniería en México, realmente está en crisis como la UNESCO ha declarado en el primer informe mundial sobre la ingeniería? O solamente no es adecuadamente difundida debido a la pronta incorporación de los estudiantes al sector laboral —en promedio cuatro años de estudio los habilitan para el sector laboral y dejan inacabados los proyectos de innovación tecnológica. El mismo caso ocurre con las maestrías profesionalizantes que habilitan a los profesionistas en el desarrollo de buenas prácticas de ingeniería y excluyen a la investigación.

En la Conferencia Internacional sobre Ciencia y Tecnología de la Ingeniería, Irina Bokova pidió nuevos enfoques en la enseñanza de la ingeniería, así como en la investigación y el fomento de las capacidades, “para apoyar a los Estados en la configuración de una nueva agenda mundial para el desarrollo después de 2015... recordando que la UNESCO nació en 1945 en el Instituto de Ingenieros Civiles de Londres, y nuestro mandato de promover la cooperación en materia de ingeniería, ciencia y tecnología nunca ha revestido mayor importancia”.

Por lo tanto a título personal y considerando que el ingenio que existe en las IES no es adecuadamente difundido, es prioridad que se motive a los estudiantes a difundir las buenas prácticas en ingeniería a través de publicaciones que permitan una amplia cobertura internacional. Para ello la revista Ingeniería y Tecnología ha planteado como reto profesional su pronta incorporación como publicación electrónica, acción que permitirá ampliar su alcance de regional a internacional, garantizando cobertura de divulgación a los estudiantes de las Licenciaturas y Posgrados propios y de la región.

INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA, Año 10, No. 22, Abril-Septiembre de 2015, es una publicación semestral editada por la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, con domicilio en 4 sur 104, Col. Centro, C.P. 72000, Puebla Pue., y distribuida a través de la Facultad de Ingeniería, con domicilio en Blvd. Valsequillo esq. Av. San Claudio s/n, Edif. ING4 Ciudad Universitaria BUAP, Col. San Manuel, C.P. 72570, Puebla Pue., Tel. (52) (222) 229 5500 ext. 7618, www.ingenieria.buap.mx, Editor Responsable Dr. Filiberto Candia García, posgrado.fi.buap@gmail.com. Reserva de Derechos al uso exclusivo 04-2015-052612271800-102. ISSN: 2007-1876, ambos otorgados por el Instituto Nacional del Derecho de Autor. Con Número de Certificado de Licitud de Título y Licitud de Contenido: 14935, otorgado por la Comisión Calificadora de Publicaciones y Revistas Ilustradas de la Secretaría de Gobernación. Impresa en Talleres Gráficos. Intra Comunicación. Calle 14 Oriente No. 2803-A. Col. Humboldt. C.P. 72370 Puebla, Pue. Tel. 01(222) 296 3953, éste número se terminó de imprimir en Enero de 2016 con un tiraje de 3000 ejemplares.

Las opiniones expresadas por los autores no necesariamente reflejan la postura del editor de la publicación.

Queda estrictamente prohibida la reproducción total o parcial de los contenidos e imágenes de la publicación sin previa autorización de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla.

INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA es una publicación semestral arbitrada de divulgación científica y tecnológica de la Facultad de Ingeniería de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, dirigida a profesionistas, profesores, investigadores y estudiantes de las diferentes áreas de ingeniería.



Análisis CFD en anuncios espectaculares de tipo unipolar sometidos a cargas de viento

Antonio Sabugal Villamar, Edgar Iram Villagrán Arroyo

RESUMEN

Se modeló un anuncio espectacular de tipo unipolar mediante un análisis CFD (Dinámica de Fluidos Computacional) utilizando el método del elemento finito, en el programa NX Siemens versión 8.5 y con ello se determinaron las presiones máximas inducidas por el viento sobre la mampara y la columna de la estructura, así mismo se obtuvieron los coeficientes de presión y de arrastre asociados a las presiones mencionadas. Los resultados obtenidos se compararon con los obtenidos con un análisis utilizando el *Manual de Diseño de Obras Civiles de la CFE (2008)*. Se observó que existen diferencias en los resultados numéricos y que estos dependen en gran parte de la precisión y el número de simulaciones realizadas, sin embargo el comportamiento del viento simulado concuerda con lo establecido en los fundamentos teóricos.

Palabras clave: Elemento finito, CFD, Cargas de viento.

ABSTRACT

An unipolar type billboard was modeled using an CDF analysis (Computational Dynamic Fluids) using the finite element method, in the NX Siemens Program version 8.5 and the result has determined the maximum pressures induced by wind on the screen and the column of the structure. Also pressure and drag coefficients associated to the mentioned pressures were obtained. The results were compared to the results obtained using the *Manual de Diseño de Obras Civiles de la CFE (2008)*. Differences in the numerical results were perceived and it depends mainly on the precision and the number of simulations made, although the simulated wind behavior coincide with the statements of the theory.

Keywords: Finite element, CFD, Wind loads.

1 INTRODUCCIÓN

Dentro de los fenómenos naturales, el viento es capaz de afectar a diversas estructuras, dependiendo de la intensidad de estos, se pueden producir afectaciones serias. El fenómeno eólico afecta a las estructuras metálicas por ser ligeras, como es el caso de los anuncios espectaculares. En México, la Ingeniería de Viento es

un campo que en la última década ha tenido un gran progreso, pero en el cual aún existe un amplio camino por recorrer. Una alternativa para estudiar el comportamiento del viento sobre las estructuras, son las pruebas realizadas mediante Túnel de Viento, las cuales, si se tiene el equipo, suelen representar un costo considerable y dependiendo de la prueba, la duración y tiempo de procesamiento pueden ser largos.

Es por ello, que una alternativa que puede ser más viable para estudiar del comportamiento de las estructuras y su interacción con el viento, es la modelación matemática mediante el análisis Dinámico de Fluidos Computacional (CFD), que permite tener un panorama aproximado, pero de buena manera el comportamiento de la interacción de los fluidos (el viento) con las estructuras.

Recibido 15 de septiembre, 2015; aceptado 28 de octubre, 2015

Antonio SABUGAL VILLAMAR
Correo electrónico: ingantoniosv@gmail.com
Edgar Iram VILLAGRÁN ARROYO

Maestría en Ingeniería, opción terminal en Estructuras, Facultad de Ingeniería BUAP

Es importante señalar que, como todo método, la precisión de los resultados depende esencialmente del dominio de los fundamentos teóricos, el potencial de la herramienta (software) usada y en algunos casos la experiencia del usuario, por lo que se recomienda cuando se haga uso de este tipo de herramientas contar con la asesoría de especialistas en la materia.

También, es importante en un análisis CFD definir con precisión la geométrica de los modelos y su dominio, así como la elaboración de la malla. La calidad de los resultados está en función de las capacidades del software.

En los siguientes apartados se hace una revisión de los conceptos básicos de la aerodinámica aplicada a estructuras civiles y de la normativa mexicana, en particular del MDOC-DV-CFE-08. Se muestran también, las fallas originadas en los anuncios espectaculares como producto de altas velocidades de viento. Finalmente, se realiza una simulación de un anuncio espectacular por medio de un análisis CFD utilizando el método del elemento finito (MEF), obteniendo con ello, presiones, fuerzas y coeficientes de presión para esa estructura, así mismo, es presentada una comparación de los resultados obtenidos con dicho análisis y los obtenidos con un análisis utilizando el *Manual de Diseño de Obras Civiles, Diseño por Viento de CFE (2008)*.

2 MARCO DE REFERENCIA

2.1 Modelo matemático para un anuncio espectacular

Para dejar esto más claro, en la figura 1 se muestra un modelo de masa m , rígido, de área frontal A , colocado sobre un poste flexible con constante elástica k , sometido a una corriente incidente $U_i(t)$, el caso de un anuncio espectacular unipolar.

Para estudiar el problema, la ecuación de movimiento tiene que incluir las tres fuerzas ya mencionadas: elásticas (kx), aerodinámicas (F_a), y de inercia ($m d^2x/dt^2$), a las que hay que añadir la disipación de energía de la estructura, ($C_e dx/dt$), representada por un amortiguador, es decir:

$$m \frac{d^2x}{dt^2} + C_e \frac{dx}{dt} + kx = F_a \quad (1)$$

Que es la ecuación diferencial clásica del movimiento de un oscilador amortiguado sometido a una fuerza exterior F_a .

Como consecuencia de la forma de la estructura, la resultante de las fuerzas aerodinámicas debe estar orientada en la dirección del eje x , y en esta resul-

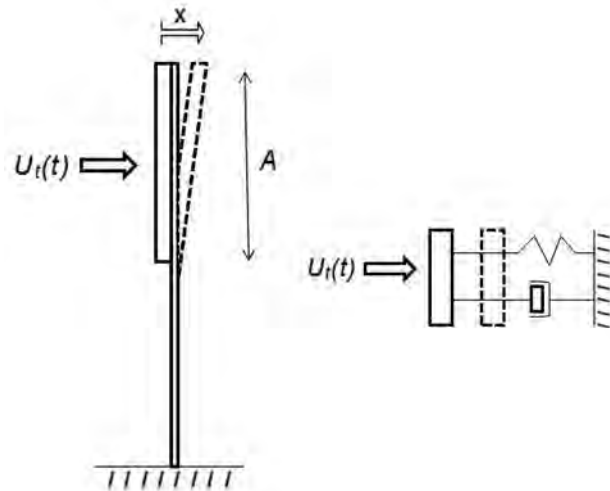


Figura 1. Modelo físico y analítico de un anuncio espectacular unipolar.

tante habrá una parte cuasiestacionaria, proporcional al cuadrado de velocidad relativa al obstáculo $(U_i - dx/dt)^2$ y otra no estacionaria, que de forma general puede representarse, para un cuerpo romo, como la fuerza necesaria para acelerar una cantidad de masa de aire adicional, m_a , además de la que acompaña a la estructura en su movimiento. En los casos más simples el cálculo de la masa aditiva requiere la solución del problema del flujo potencial no estacionario alrededor de la estructura, las fuerzas aerodinámicas pueden expresarse como:

$$F_a = \frac{1}{2} \rho C_D A \left(U_i - \frac{dx}{dt} \right)^2 - m_{a1} \frac{d^2x}{dt^2} + m_{a2} \frac{dU_i}{dt} \quad (2)$$

Donde se ha incluido el efecto de otra masa aditiva, m_{a2} , que aparece como consecuencia de la corriente no estacionaria. Las masas aditivas no son las mismas, m_{a1} , corresponde al que el objeto se mueve y m_{a2} , aparece cuando el cuerpo está fijo y la corriente incidente es no estacionaria. En general $U_i(t)$, velocidad en función del tiempo, toma el valor de la velocidad media U , sobre lo que se supone la fluctuación turbulenta $u(t)$ también se puede suponer que la velocidad del movimiento de deformación es muy pequeña en comparación a la velocidad incidente, $dx/dt \ll U$, por lo que despreciando los términos de segundo orden tenemos:

$$F_a = \frac{1}{2} \rho C_D A \left(U^2 - 2U \frac{dx}{dt} + 2Uu \right)^2 - m_{a1} \frac{d^2x}{dt^2} + m_{a2} \frac{dU_i}{dt} = F_a^C + F_a^M \quad (3)$$

Se puede identificar los dos tipos de fuerza aerodinámicas:

$$F_a^C = \frac{1}{2} \rho c_D A U^2 + \rho c_D A U u + m_{a2} \frac{dU}{dt} \quad (4)$$

$$F_a^M = -\rho c_D A U \frac{dx}{dt} - m_{a1} \frac{d^2x}{dt^2} \quad (5)$$

El término debido a la aceleración de la corriente incidente,

$$m_{a2} \frac{dU}{dt}$$

es despreciable frente al de la perturbación de la resistencia aerodinámica, $\rho c_D A U u$, los términos restantes representan, respectivamente, el valor medio, F_q y el valor instantáneo de fluctuación, F_f , es decir:

$$F_a^C = F_q + F_f \quad (6)$$

$$F_q = \frac{1}{2} \rho c_D A U^2 \quad (7)$$

$$F_f = \rho c_D A U u = \frac{2F_q}{U} u \quad (8)$$

Sustituyendo estas expresiones en la ecuación (1) se tiene:

$$\begin{aligned} m \frac{d^2x}{dt^2} + C_e \frac{dx}{dt} + kx \\ = F_q + \frac{2F_q}{U} u - \frac{2F_q}{U} \frac{dx}{dt} - m_{a1} \frac{d^2x}{dt^2} \end{aligned}$$

Agrupando términos, finalmente se tiene:

$$m_T \frac{d^2x}{dt^2} + C_T \frac{dx}{dt} + kx = F_q + \frac{2F_q}{U} u \quad (9)$$

donde $m_T = m + m_{a1}$, masa total y $c_T = c_e + 2F_q/U$, amortiguamiento total, siendo el segundo término el amortiguamiento aerodinámico.

La ecuación (9) permite estudiar los dos casos que se pueden presentar en el análisis de la interacción del viento con una estructura: el caso de cargas cuasiestáticas y el caso de cargas dinámicas.

En el primer caso si se considera que las velocidades y aceleraciones son pequeñas o que la rigidez estructural es grande, se pueden despreciar los primeros dos términos de la ecuación (9), teniendo:

$$F_e = kx = F_q + \frac{2F_q}{U} u \quad (10)$$

lo que determina la carga sobre el cuerpo.

Como la velocidad turbulenta u está en función de tiempo, las fuerzas elásticas también lo serán, pero como se han eliminado los términos que depen-

dían del tiempo, este aparece en la solución como un parámetro.

Si la función $u(t)$ es determinista, se podría determinar la carga máxima de inmediato. Sin embargo, en el caso del viento atmosférico es una función aleatoria, caracterizada estadísticamente por parámetros como su varianza y densidad espectral. Algo así le sucederá a la fuerza aplicada sobre la estructura, que en este caso coincide con la fuerza elástica. Dicha fuerza tiene una parte constante F_q , y otra fluctuante proporcional a la velocidad de la agitación turbulenta $u(t)$.

De consideraciones estadísticas se deduce que fuerza máxima $F_{m\acute{a}x}$ está dada por $F_{m\acute{a}x} = F_q + K_p \sigma_F$, donde F_q es el valor medio, σ_F , la desviación típica y K_p el factor de pico.

En el segundo caso, en el análisis de cargas dinámicas, se debe considerar que las fuerzas aerodinámicas pueden depender, de la posición de x , de la velocidad dx/dt , y de la aceleración d^2x/dt^2 , del cuerpo en su movimiento de deformación, por lo que es necesario tomar en cuenta las fuerzas de inercia asociadas a la dinámica de la estructura.

En el caso general, si las fuerzas aerodinámicas se pueden descomponer en suma de las diversas contribuciones, el coeficiente del término en d^2x/dt^2 se interpreta como una masa aditiva que se añade a la masa del cuerpo, el coeficiente del término dx/dt se comporta como un coeficiente de amortiguamiento, añadido al amortiguamiento estructural, y el término de x se traduce en un cambio de la rigidez efectiva de la estructura.

Para obtener la fuerza elástica, que, como el resorte no tiene masa, es igual a la carga efectiva que actúa sobre la estructura, kx , se ha de resolver la ecuación (9). Para esto, se toma la deformación x , como la suma de un valor medio X valor correspondiente a la carga media F_q , y una fluctuación, $\xi(t)$, que como el problema es lineal, es la respuesta a la fluctuación de la velocidad, es decir, $x = X + \xi$, expresión que introducida en la ecuación (9) permite obtener dos ecuaciones, una para determinar la carga de viento media:

$$kX = F_q \quad (11)$$

y para calcular la carga fluctuante:

$$m_T \frac{d^2\xi}{dt^2} + C_T \frac{d\xi}{dt} + k\xi = \frac{2F_q}{U} u \quad (12)$$

la solución de esta ecuación, proporciona la respuesta bien en deformación, ξ , o bien en carga elástica fluctuante, $k\xi$.

Para el caso de interés del presente trabajo se abordará en particular el diseño por viento para los anuncios espectaculares, utilizando para ello el *Manual de Diseño de Obras Civiles, Diseño por Viento de CFE (2008)*. Para el cual, antes de proceder al diseño utilizando algún método de análisis como puede ser el estático, el dinámico o ensayos en túneles de viento, se deben cumplir algunos requisitos generales de análisis y diseño estructural, como:

1. En cuanto a los requisitos generales para el análisis y diseño estructural que deben considerarse, el manual menciona: dirección de análisis, factores de carga y resistencia, seguridad contra volteo, seguridad contra deslizamiento, seguridad contra el levantamiento, presiones interiores, seguridad durante la construcción de la estructura, efecto de grupo debido a construcciones vecinas, análisis estructural e interacción suelo-estructura.
2. En cuanto a la clasificación de la estructura según su importancia, los anuncios espectaculares, según dicho Manual, se clasifican como estructuras pertenecientes al Grupo B.
3. En cuanto a la clasificación de la estructura según su respuesta ante la acción del viento, para los anuncios espectaculares, el Manual los clasifica como estructuras Tipo 3.
4. En cuanto a las acciones del viento que deben considerarse para el Manual son:
Empujes medios, vibraciones generadas por ráfagas turbulentas en la dirección del viento, vibraciones transversales al flujo y a torsión, inestabilidad aerodinámica.

2.2 Análisis por viento utilizando velocidades óptimas y comparación con los análisis estático y dinámico previamente realizados

Para realizar un análisis o diseño desde un punto de vista óptimo, el *Manual de Diseño de Obras Civiles, Diseño por Viento de CFE (2008)*, propone el uso de las llamadas *velocidades regionales óptimas*, que se explicarán a continuación como se presenta en el Manual:

La *velocidad regional óptima*, V_{RO} , en km/h, es la máxima velocidad para la cual se minimiza el costo total determinado con el costo inicial de la construcción más el costo de las reparaciones y de las pérdidas, directas e indirectas, en caso de presentarse una falla. El costo de la falla (reparaciones y pérdidas) se introduce en un parámetro adimensional, Q , llamado factor de importancia de las pérdidas dado por:

$$Q = \frac{C_L}{C_I}$$

en donde:

C_I - es el costo inicial de la construcción, y

C_L - el costo de las pérdidas directas e indirectas que se tendrían en caso de una falla estructural.

La velocidad regional óptima, V_{RO} , se determina tomando en consideración tanto la importancia de las pérdidas a través del valor de Q , como la localización geográfica del sitio de desplante de la estructura.

Para la aplicación simplificada de este procedimiento, se ha optado por asociar un valor de $Q=15$ para el diseño de las estructuras del Grupo A y de $Q=5$ para las del Grupo B, para las mencionadas velocidades regionales óptimas.

Si se selecciona el segundo procedimiento, la velocidad regional, V_R , tomará el valor de V_{RO} para el cálculo de presiones y fuerzas que se requieran en los análisis estático y dinámico, para cada caso de estructura en particular.

El criterio de diseño óptimo de Esteva (1969 y 1970) planteado para el caso del peligro sísmico en México, ha sido aplicado en el *Manual de Diseño de Obras Civiles, Diseño por Viento de CFE (2008)*, para definir el peligro eólico en términos de las velocidades regionales asociadas a periodos de retorno óptimos (Q), para los cuales el costo total de la obra, conformado por su costo inicial y los costos de las pérdidas, es mínimo en el caso de presentarse una falla. Para minimizar el costo total, se realizó un estudio de optimización para las estructuras de los Grupos A y B del que se obtuvieron los mapas de velocidades regionales óptimas recomendados.

De esta manera, si en el diseño de una construcción se emplea una velocidad regional óptima, a largo plazo dará como resultado que el costo total sea menor que el que se tendría adoptando otra velocidad de diseño.

El aspecto más importante en esta formulación de diseño óptimo es el suponer que tanto las pérdidas esperadas por viento como el costo inicial de la construcción dependen de un solo parámetro: la resistencia nominal de diseño.

Esta resistencia está relacionada, para el caso que aquí interesa, con la fuerza (presión) del viento sobre el área expuesta. Por lo tanto, un valor de la velocidad de diseño es óptimo si minimiza la suma del valor presente de las pérdidas esperadas por la acción del viento, más los costos iniciales de la construcción. Como consecuencia, los valores óptimos no están asociados a un periodo de retorno fijo.

Una vez estudiado este concepto de diseño óptimo, obtenido a través de las *velocidades regionales óptimas* asociadas a los periodos de retorno óptimos, las cuales están mostradas en un par de los mapas de isotacas dentro de dicho *Manual de Diseño de Obras Civiles, Diseño por Viento de CFE (2008)*; se procedió a realizar un análisis estático y dinámico para el ejemplo mostrado en los apartados anteriores, pero utilizando los valores de las *velocidades regionales óptimas* que proporciona el *Manual de CFE*, esto, con el fin de realizar la comparación que hay entre realizar un análisis estático o dinámico y hacerlo con un punto de vista óptimo.

Por fines de practicidad, solo se presentarán los resultados obtenidos de los análisis ya descritos y los que se realizaron utilizando las *velocidades regionales óptimas*.

Se presenta en las tablas comparativas 1 y 2, entre los valores de los coeficientes de presión, presiones estáticas y fuerzas tanto estáticas como dinámicas obtenidas para la mampara o letrero, asimismo, para la columna del anuncio espectacular, y de los mismos valores obtenidos pero utilizando una velocidad óptima.

Para el caso de la mampara o letrero, se muestran distintos tipos de ángulo de incidencia del flujo de viento y poder con ello observar para qué caso se presentan los valores o magnitudes mayores.

Observaciones relevantes de las tablas 1 y 2:

- Lo primero que se puede observar es que tanto para el análisis estático como para el análisis dinámico se utilizan los mismos coeficientes de presión y por ende las mismas presiones (presión estática), esto debido a que la caracterización de las presiones sobre las estructuras, generalmente se toma como estática por cuestiones de practicidad, pues en realidad las cargas producidas por el fluido son de carácter dinámico. Por ello, normalmente se toman las cargas aerodinámicas adecuadamente promediadas en un periodo de tiempo.
- La diferencia entre los dos análisis radica en que, para el caso del análisis dinámico se toma en cuenta un factor F_{AD} , el cual toma en consideración parámetros dinámicos que afectan el comportamiento de la estructura cuando interactúa con las cargas aerodinámicas.
- También se observa que, el ángulo de incidencia del fluido para los casos de 0° (perpendicular al anuncio) y de 45° , tienen valores de coeficiente de presión y por consiguiente presiones estáticas, iguales. Esto se debe a la geometría particular del anuncio espectacular estudiado. En general, este tipo de estructuras suelen presentar esta situación, esto debido a que la dimensión

Tabla 1. Resultados del análisis estático y dinámico del anuncio espectacular, utilizando una velocidad regional.

Componente del anuncio espectacular	Ángulo de incidencia del viento	Análisis estático (velocidad regional)			Análisis dinámico (velocidad regional)		
		Coefficiente de presión (CPN y CO)	Presión estática (Kg/m ²)	Fuerza estática (Kg y Kg/m para la Columna)	Coefficiente de presión [Cpn y Ca]	Presión estática (Kg/m ²)	Fuerza dinámica (Kg y Kg/m para la Columna)
Mampara o letrero	0°	1.471	95.157	1712.823	1.471	95.157	2350.958
	45°	1.471	95.157	1712.823	1.471	95.157	2350.958
	90°	1.2	77.623	1337.213	1.2	77.623	1917.763
Columna	0°	0.747	43.465	22.08	0.747	43.465	30.307

Tabla 2. Resultados del análisis estático y dinámico del anuncio, utilizando una velocidad regional óptima.

Componente del anuncio espectacular	Ángulo de incidencia del viento	Análisis estático (velocidad regional óptima)			Análisis dinámico (velocidad regional óptima)		
		Coefficiente de presión (CPN y CO)	Presión estática (Kg/m ²)	Fuerza estática (Kg y Kg/m para la Columna)	Coefficiente de presión [Cpn y Ca]	Presión estática (Kg/m ²)	Fuerza dinámica (Kg y Kg/m para la Columna)
Mampara o letrero	0°	1.471	125.612	2261.019	1.471	125.612	3327.886
	45°	1.471	125.612	2261.019	1.471	125.612	3327.886
	90°	1.2	102.466	1844.397	1.2	102.466	2714.68
Columna	0°	0.747	57.376	29.147	0.747	57.376	42.9

transversal de la estructura es mucho menor en comparación a las otras dos, en cuanto al letrero o mampara se refiere.

- La diferencia entre los valores de las fuerzas obtenidas mediante los análisis estático y dinámico, se encuentran en el orden del 27%, lo cual deja claro lo importante que resulta considerar aplicar cada caso de análisis, pues en realidad se estaría subestimando una estructura que debido a sus condiciones dinámicas, solo se analizará desde un punto de vista estático. De tal suerte, que se debe elegir con responsabilidad y conciencia un análisis respecto del otro.
- Por otro lado, la comparación que existe en realizar dichos análisis que provienen de tomar velocidades regionales y hacerlo mediante el uso de las velocidades óptimas, genera una diferencia global del orden de un 24% a un 29%.

Los datos nos indican que, si deseamos realizar un diseño óptimo mediante el uso de estas velocidades óptimas, estaríamos sometiendo a las estructuras a una carga mayor a la obtenida con los análisis convencionales, un 25% más de fuerzas ejercidas sobre la estructura, lo cual conduciría a diseños más robustos de los elementos estructurales, que si bien en un inicio esto podía parecer impráctico, la realidad es que como ya se ha mencionado, estas velocidades óptimas están pensadas para optimizar el diseño a lo largo de la vida útil de la estructura, tomando en cuenta las posibles fallas a las que pueda estar sujeta y que estén contempladas en cuanto a pérdidas económicas se refiere.

Este tipo de diseños óptimos, es cada vez más señalado y utilizado en distintas normativas y reglamentos en muchos lugares, sobre todo en estructuras que por sus características particulares, al fallar puedan generar costos altos o significativos.

De ahí que para el caso de los anuncios espectaculares, sea muy válido realizar este mencionado diseño óptimo mediante el uso de velocidades óptimas, pues generalmente este tipo de estructuras, aunque no generen pérdidas económicas muy elevadas por fallas particulares de ellas en sí, sí suelen causar pérdidas bastante considerables cuando estas se localizan en lugares urbanos, como suele pasar en las ciudades, donde, incluso está en riesgo la vida de seres humanos, que difícilmente puede dársele un valor monetario, aunque este exista en tabuladores de agencias de seguros o instituciones gubernamentales, y el cual es bastante significativo en comparación con el de la estructura.

3 DESARROLLO

3.1 Modelo y análisis CFD realizado por MEF para el anuncio espectacular; utilizando el software NX 8.5 NASTRAN

Para comprender mejor el modelo generado en el software NX 8.5 NASTRAN del anuncio espectacular, es importante mencionar un par de conceptos considerados dentro de este tipo de modelado, que se basa en el método del elemento finito simulando un flujo de viento incidente sobre la estructura analizada.

Estos conceptos son, el análisis del flujo fluido (viento) dentro de un túnel de viento subsónico y el análisis CFD (Computational Fluid Dynamics), los cuales se abordarán en los apartados siguientes de manera general y para ello poder comprender de mejor manera el modelo que se realizará para una simulación de túnel de viento en la parte final del presente trabajo.

Concepto básico de simulación con Túnel de Viento

El túnel de viento es una herramienta de investigación muy utilizada en la actualidad ya que, permite realizar estudios de las características aerodinámicas que presentan los cuerpos al interactuar con el aire, así como, sus efectos.

La importancia de esta herramienta reside en la posibilidad de realizar estudios de modelos a escala (normalmente escalas de reducción), del prototipo real. Esta posibilidad reduce los costos y mejora el diseño final del prototipo. Claro está que el uso de esta herramienta es fructífero si está correctamente diseñada y aplicada a cada estructura analizada.

El análisis CFD, mediante software es un método que, desde la aparición de computadoras capaces de procesar la enorme cantidad de información requerida para llevarlo a cabo, ha venido a apoyar o en ocasiones a reemplazar el estudio aerodinámico realizado en terreno o en túneles de viento con el que desde hace décadas se busca lograr mejores resultados.

El análisis CFD es por sí mismo, una de las ramas de la mecánica de fluidos que utiliza métodos numéricos y algoritmos para resolver y analizar problemas sobre el flujo de sustancias. Los procesadores de última generación son utilizados para realizar los millones de cálculos requeridos para simular la interacción de los líquidos y los gases con superficies complejas proyectadas por la ingeniería. Aún con ecuaciones simplificadas y computadores de alto rendimiento, los resultados suelen ser aproximados y sujetos a verificación respecto a condiciones y experimentos reales,

como túneles de viento en condiciones totalmente controladas. Aun así la posibilidad de realizar múltiples ensayos mediante un entorno virtual, incluso existiendo aún la necesidad relativa de evaluar dichos ensayos mediante una comparación con la realidad, logra un ahorro sustancial en todo el proceso de estudio aerodinámico de muchas estructuras.

El motor del MEF para cálculo estructural y mecánico utilizado por el software NX de Siemens es NASTRAN, que fue desarrollado para la NASA a fines de los años sesenta por MSC Software y se convirtió en el emblema de esta compañía y uno de los softwares MEF más utilizados del mercado. Su nombre es un acrónimo de NAsa STRuctural ANalysis, Jacob (2010). NX ha desarrollado alrededor del núcleo de su motor de cálculo una serie de aplicaciones que han ido evolucionando en los últimos años, pudiendo ser adquiridas como el módulo MEF en NX o bien por separado como un software MEF independiente.

Lo primero que se realizó en el programa NX fue el dibujo en 3D (figura 2), también llamado CAD, tanto del volumen del anuncio espectacular como del volumen donde estará contenido el fluido, que para el caso en particular es el aire. Este modelo de CAD debe realizarse con las consideraciones pertinentes para lograr resultados correctos y confiables, como son: la estructura en este caso el anuncio, debe ser un solo objeto cerrado formando un cascarón sobre el

cual incidirá el fluido, debe crearse un paralelepípedo que envuelva la estructura por completo y que deje suficiente espacio libre en todas sus caras excepto en la del suelo, con el fin de no alterar el comportamiento del fluido.

Para los diferentes modelos del anuncio espectacular se utilizó un volumen de control del fluido (aire), el cual es usado como Túnel de Viento. Después de probar distintos volúmenes para representar dicho Túnel de Viento, las medidas adecuadas para el correcto comportamiento (sin que se viera alterado el fluido por las paredes del Túnel), se adoptaron las medidas siguientes: Alto-30m, Ancho-18m y Largo-35m.

Una vez realizado el modelo de CAD, se procede a realizar el mallado tanto de la estructura del anuncio espectacular como del dominio del fluido (figura 3). La malla utilizada para el anuncio fue 2D tipo Shell y la malla para el dominio del fluido fue 3D tipo Solid, que son las mallas más adecuadas para representar mejor el comportamiento del viento sobre una estructura.

Es importante que el mallado tanto de la estructura como del fluido sean muy refinados, pues esto permite que el mallado se adapte mejor en zonas de transición y permite un análisis más preciso, aunque esto conlleva a un tiempo de análisis grande, los resultados son mejores y más confiables.

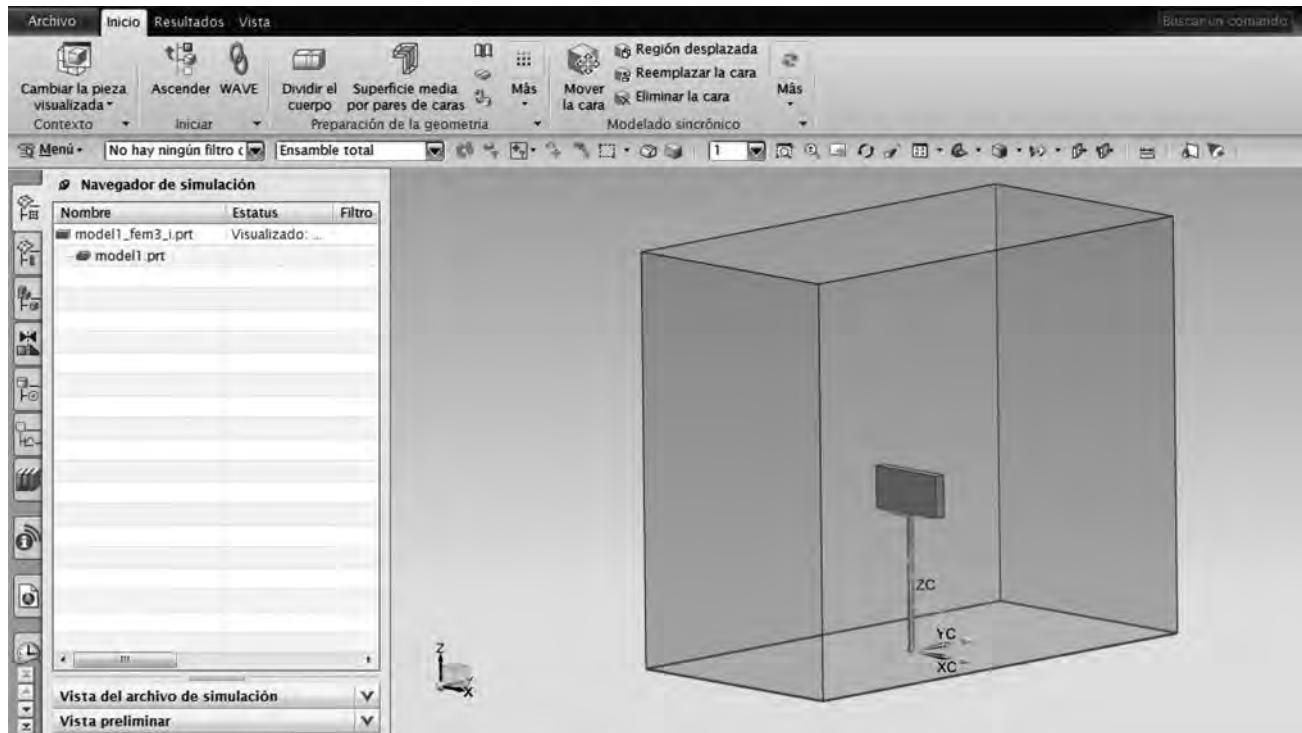


Figura 2. Modelo CAD del anuncio espectacular y su entorno.

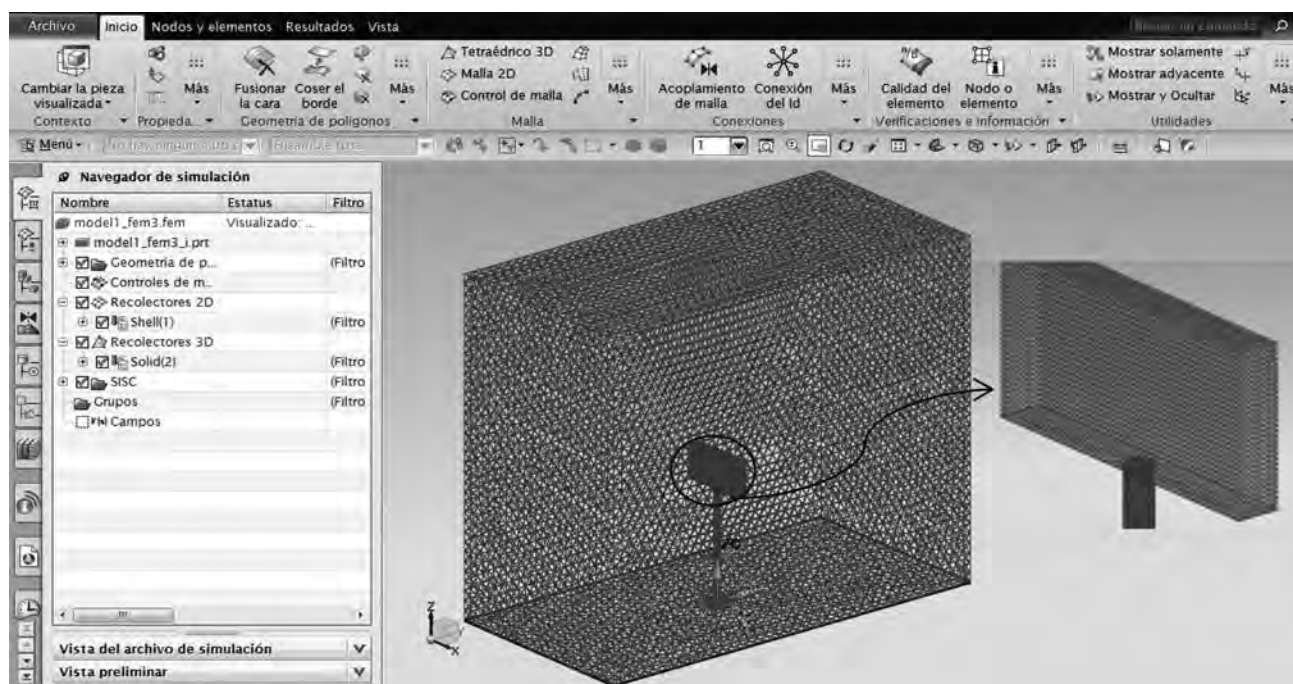


Figura 3. Modelo de elemento finito (MEF), para el análisis de CFD.

Para el caso de la malla del anuncio espectacular se tiene:

INFORMACIÓN SOBRE LA MALLA

```

Nombre : 2d_mesh(1)
Tipo de malla : 2D
Número de elementos en la malla : 28718
Número de nodos en la malla : 57440
Tri6 Thin Shell elementos : 28718
    
```

Para el caso de la malla del dominio del fluido se tiene:

INFORMACIÓN SOBRE LA MALLA

```

Nombre : 3d_mesh(1)
Tipo de malla : 3D
Número de elementos en la malla : 116279
Número de nodos en la malla : 169774
Tetra10 elementos : 116279
    
```

Una vez realizado el mallado el dominio del fluido y la estructura, se asignaron propiedades al fluido, que para nuestro caso es aire, se asignó velocidad, temperatura, el modelo viscosidad-turbulencia ($k-\xi$) y dirección del fluido.

Para poder dar sentido al fluido dentro del Túnel de Viento simulado en el software para el análisis CFD, se estableció un par de condiciones de entrada y salida, las cuales se muestran en la figura 4.

Después de mallar tanto el anuncio como el fluido, asignar propiedades al fluido y dar dirección a este, se procedió a realizar la simulación (correr el software) y con ello obtener los resultados requeridos mediante el análisis CFD del anuncio espectacular. Posteriormente se compararon estos resultados con

los obtenidos de un análisis utilizando del MDOC-DV-CFE-08.

Se realizaron varias simulaciones para diferentes ángulos de la mampara o letrero, frente a la incidencia del viento, como se muestra en la figura 5. Esto se realizó con el fin de englobar el comportamiento de la estructura ante diferentes escenarios en cuanto a la interacción con el viento, asimismo, para poder comparar los casos de análisis que coincidan con los del MDOC-DV-CFE-08, con ello validar y discutir los resultados obtenidos.

Se simuló o corrió los distintos modelos (diferentes ángulos) en por lo menos tres ocasiones cada uno, esto con el fin de corroborar los resultados obtenidos y tener certidumbre en los valores.

Una vez simulados los diferentes modelos, se verificaron y analizaron los resultados, se comenzó por analizar el comportamiento de la estructura ante el flujo del viento, en cuanto a la velocidad como se observa en la figura 6, el comportamiento del flujo al interactuar con la estructura es el esperado de acuerdo a la teoría, se aprecia que justo cuando el viento incide en la mampara, este se dispersa de manera súbita tanto en la parte superior como en la inferior y los laterales, situación que era de esperarse puesto que la mampara del espectacular no es un cuerpo fuselado, sino romo, es decir tiene aristas que provocan justo ese comportamiento, a diferencia con la columna, que al ser un cuerpo cilíndrico, en este se forma

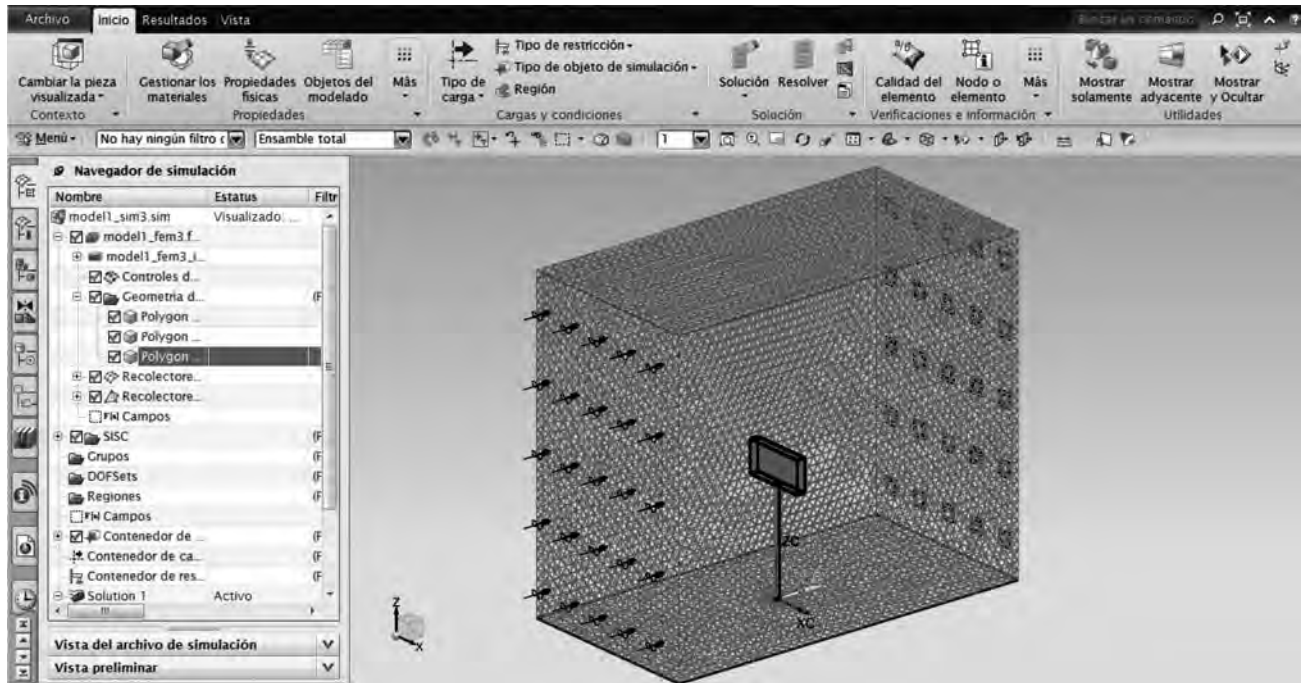


Figura 4. Dirección del flujo del aire dentro del Túnel del viento.

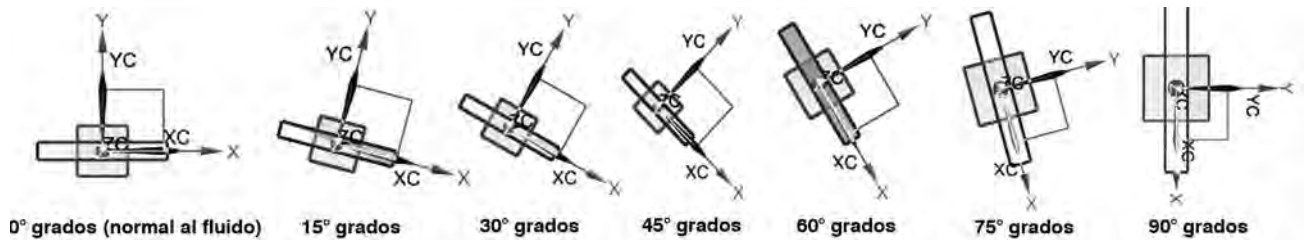


Figura 5. Ángulos de la Mampara ante la incidencia del fluido (viento).

una capa límite la cual hace que el fluido se adhiera a la estructura (figura 7a y 7b), y esto conduce a que exista mayor velocidad en toda la columna, así como en la parte superior de la mampara donde se dispersa o dispara el flujo del viento debido a la condición de las aristas de la estructura.

También se observa en las ilustraciones que justo en la parte trasera de la mampara o letrero existe un valor menor de velocidad (color azul), situación que también es de esperarse cuando el flujo del viento incide a 0° o normal al plano del letrero y dándose los valores mayores de velocidad donde ya se ha mencionado.

Lo observado en los resultados de la simulación para el caso de la presión sobre la estructura, al igual que la velocidad resultó en algo esperado. Los valores mayores de presión se dan en la mampara, seguido por las presiones sobre la columna, de igual forma, se aprecia que existe aunque en valor mucho menor, una presión en la parte posterior o trasera de la mampara (figura 8). Esto se dio tanto para la presión estática, como para la presión total o dinámica.

Se observa en las ilustraciones una presión uniforme en la columna y una presión más concéntrica en el letrero o mampara (figura 9a y 9b), situación que también es de esperarse y coincidente con la teoría, pues en las zonas donde se alcanza una velocidad mayor como es el caso de las aristas, se espera que la presión no sea tan alta como en las zonas de las mamparas francas, es decir, las zonas donde incide de lleno el flujo, como lo es la parte central de la mampara o letrero.

Cabe mencionar, que todas las ilustraciones mostradas corresponden al caso de análisis para el ángulo de la mampara a 0° o normal al flujo. Para los demás casos también se realizó el debido análisis e interpretación de los resultados obtenidos, así como del comportamiento de la velocidad y presión del flujo sobre la estructura a diferentes ángulos.

Se presentan las tablas 3 y 4 con los resultados obtenidos de las distintas simulaciones realizadas para el ejemplo del anuncio espectacular.

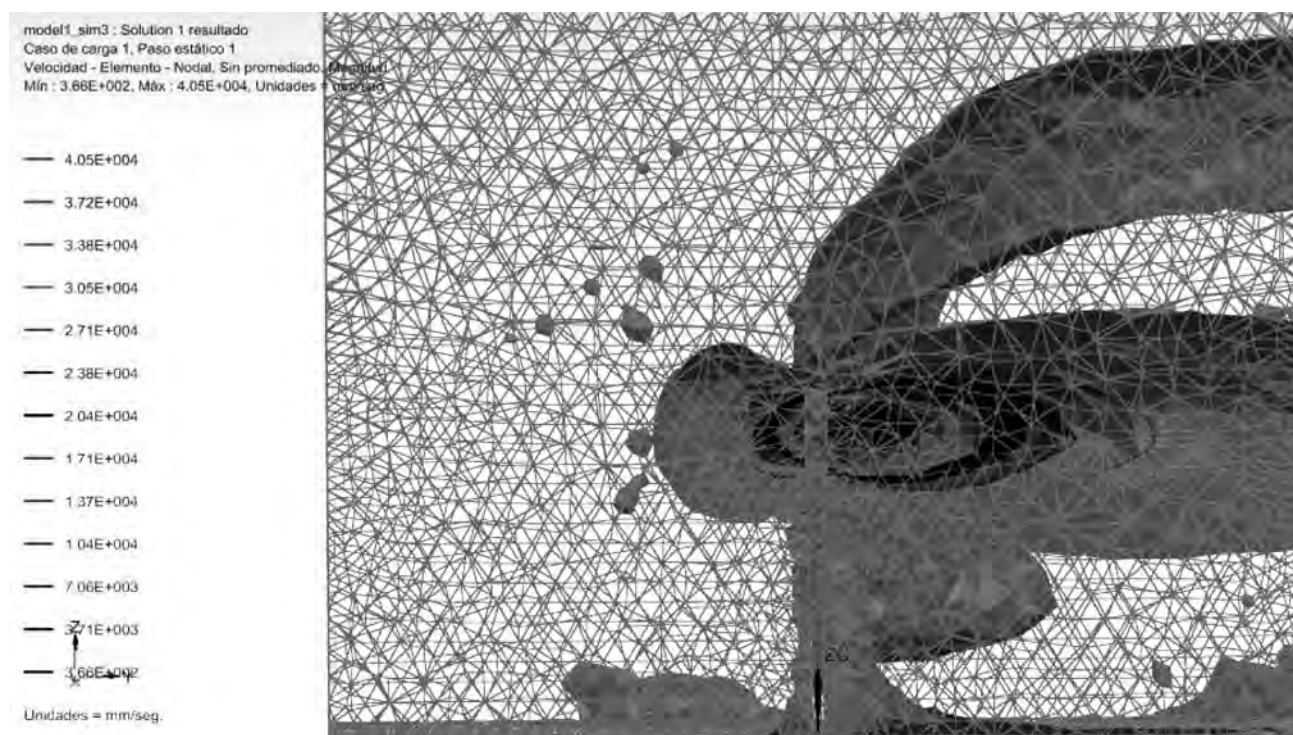


Figura 6. Comportamiento aerodinámico del viento sobre la estructura.

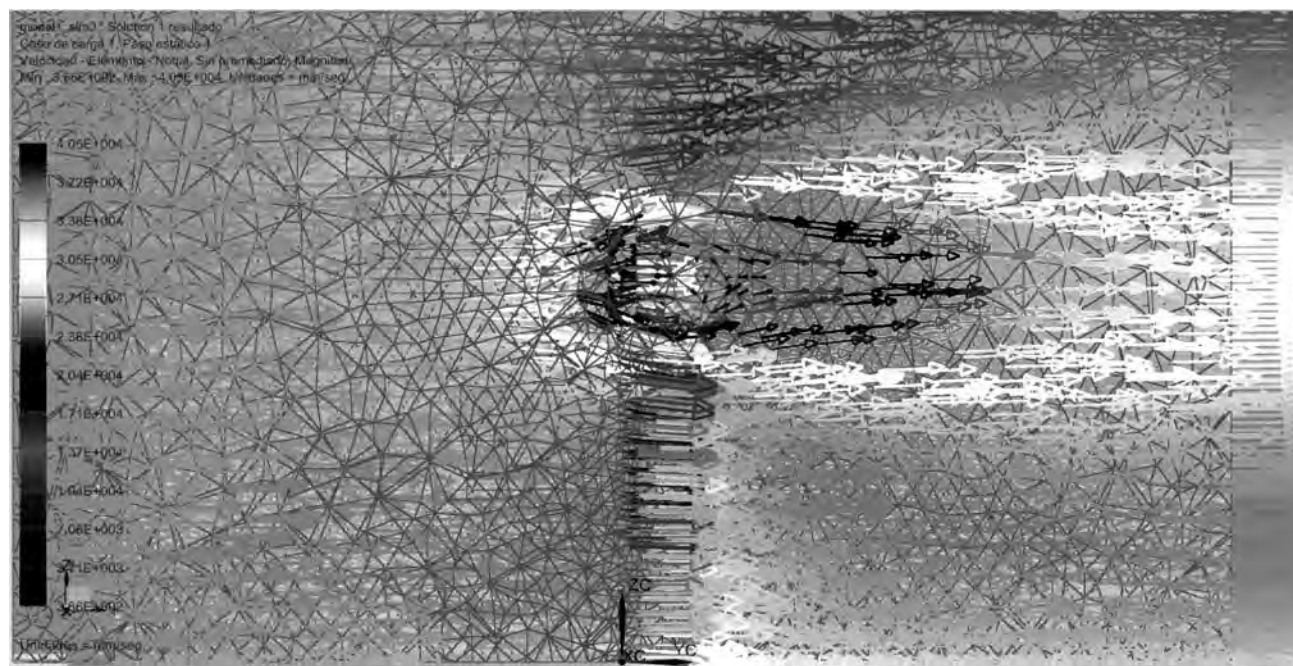


Figura 7a. Capa limite formada en la columna y dispersión del fluido en las zonas con aristas.

Se muestra en las tablas 3 y 4 tanto las presiones estáticas como las presiones dinámicas para la mampara o letrero y para la columna del anuncio espectacular. También, se incluyen los valores de las fuerzas estáticas y dinámicas para la mampara y columna respectivamente, obtenidas con base en las presiones y las correspondientes áreas.

A continuación se muestran las tablas 5 y 6 comparativas entre los valores de presión y fuerza obtenidos con el software 'NX 8.5' y los valores obtenidos con el MDOC-DV-CFE-08.

Finalmente se elaboraron las tablas 7, 8 y las gráficas 1 y 2 con los valores de los *coeficientes de presión*

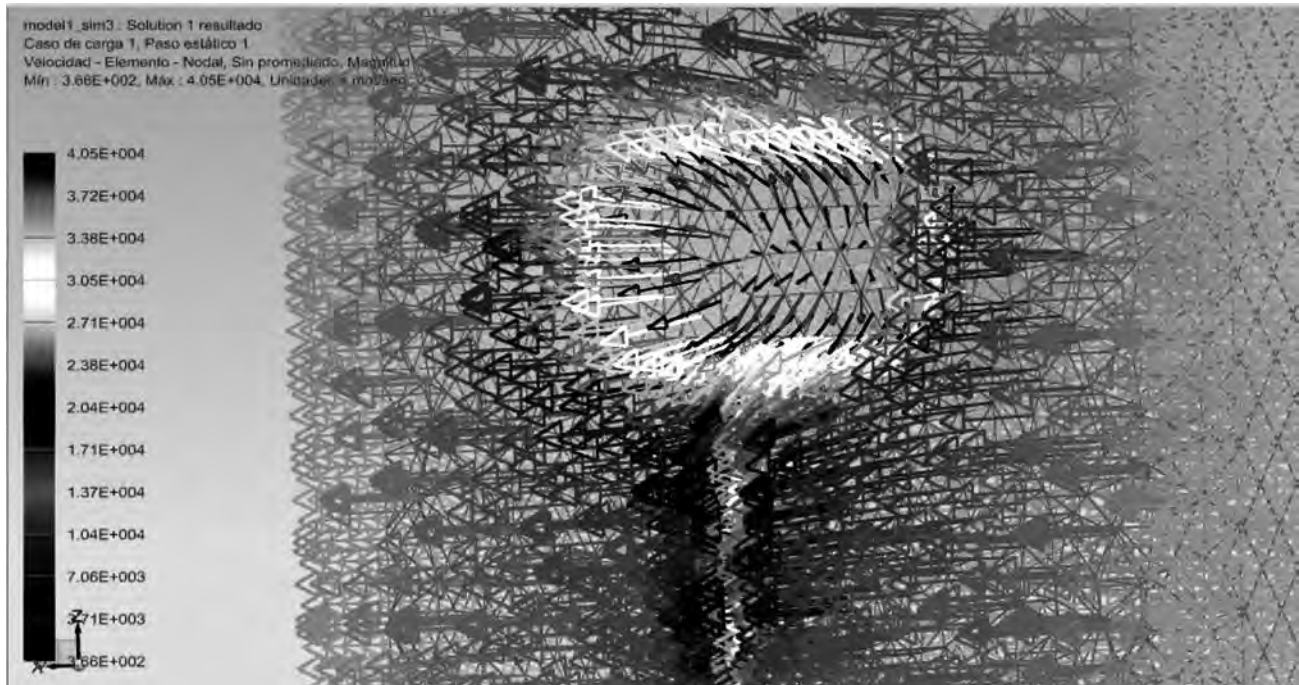


Figura 7b. Vista posterior de anuncio espectacular donde se observan mayores valores de velocidad en la columna y en las zonas de la estructura con aristas.

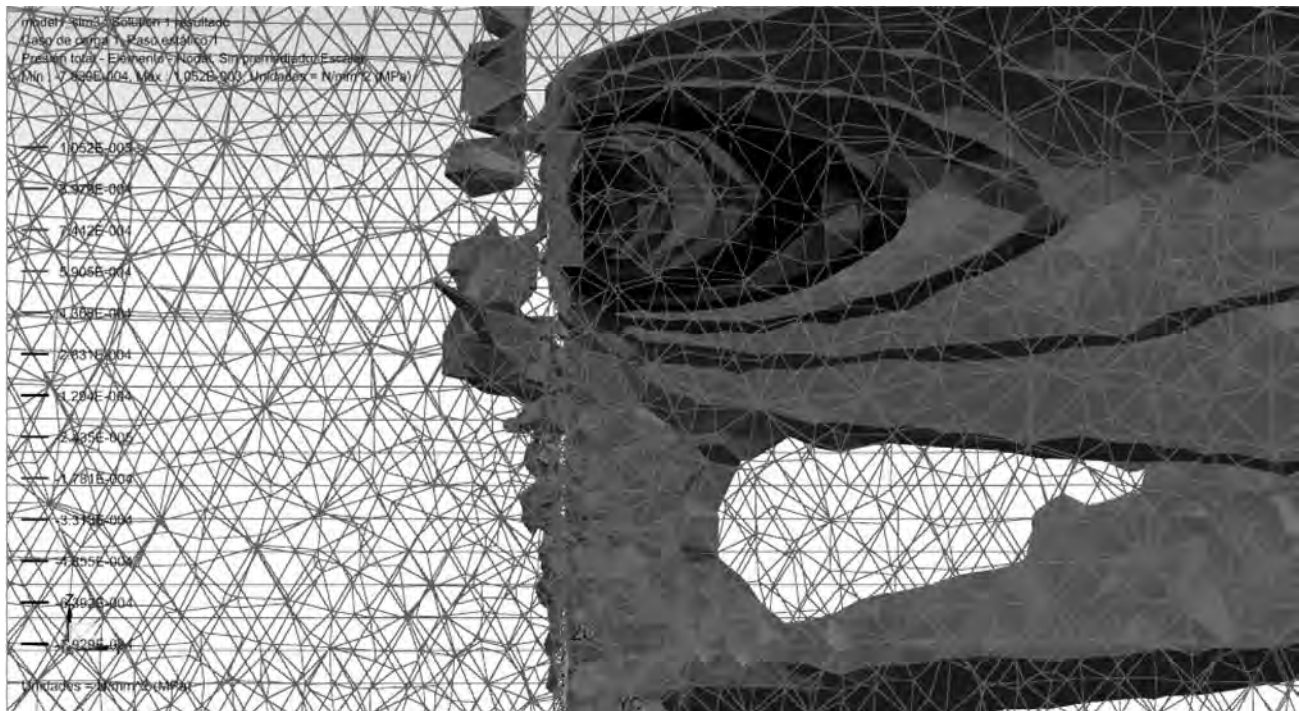


Figura 8. Vista lateral de presiones sobre el anuncio espectacular.

para las presiones estáticas y dinámicas previamente obtenidas, asociadas a sus áreas respectivas.

Estos coeficientes se obtuvieron con base en la formulación que proporciona la teoría. Cabe recordar que el ejemplo presentado del anuncio espectacular realizado tanto con el *Manual de Diseño de Obras Civiles, Diseño por Viento de CFE (2008)*, como en

el software NX 8.5, está hecho para las condiciones particulares de un sitio, en este caso el municipio de Tehuacán, Puebla.

Para el ejemplo se usaron características propias del lugar como lo es la densidad del aire, que está en función de la altura sobre el nivel del mar y de la temperatura. Para el caso de Tehuacán se tomó

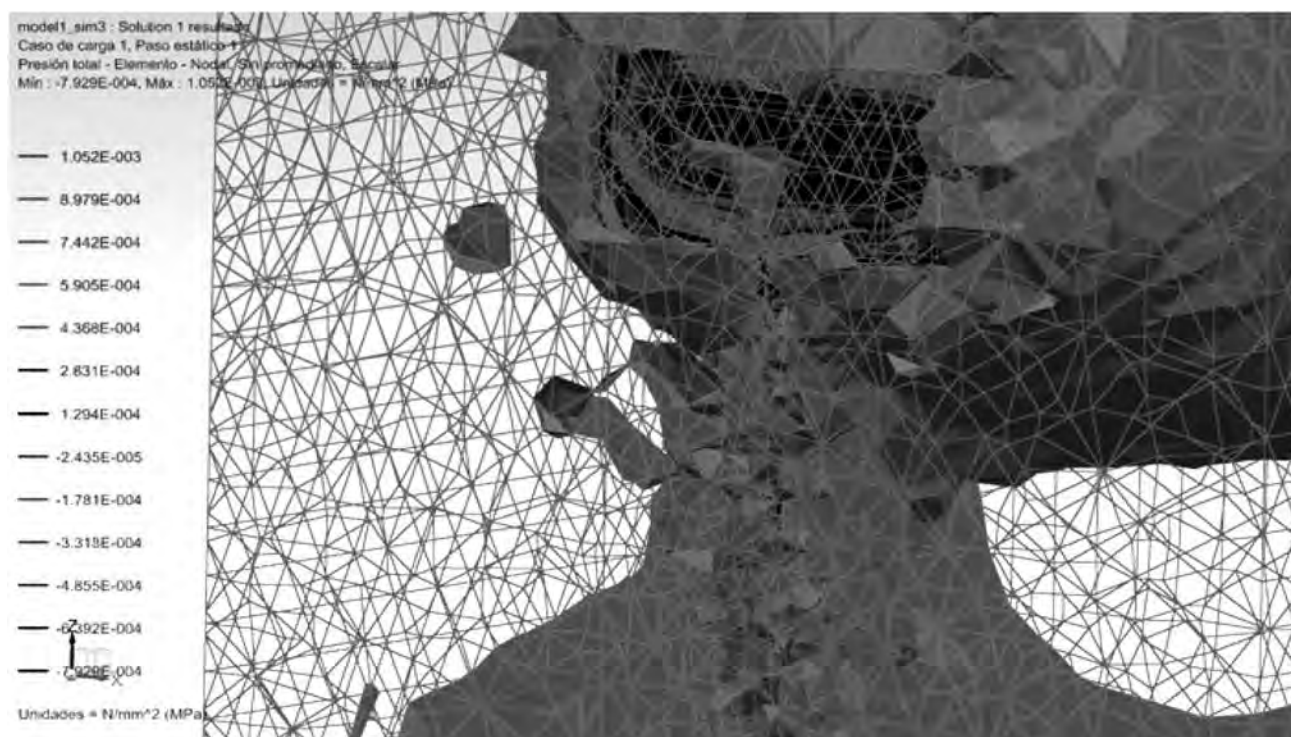


Figura 9a. Vista frontal de presiones donde se observan los mayores valores en la mampara seguidos por la columna.

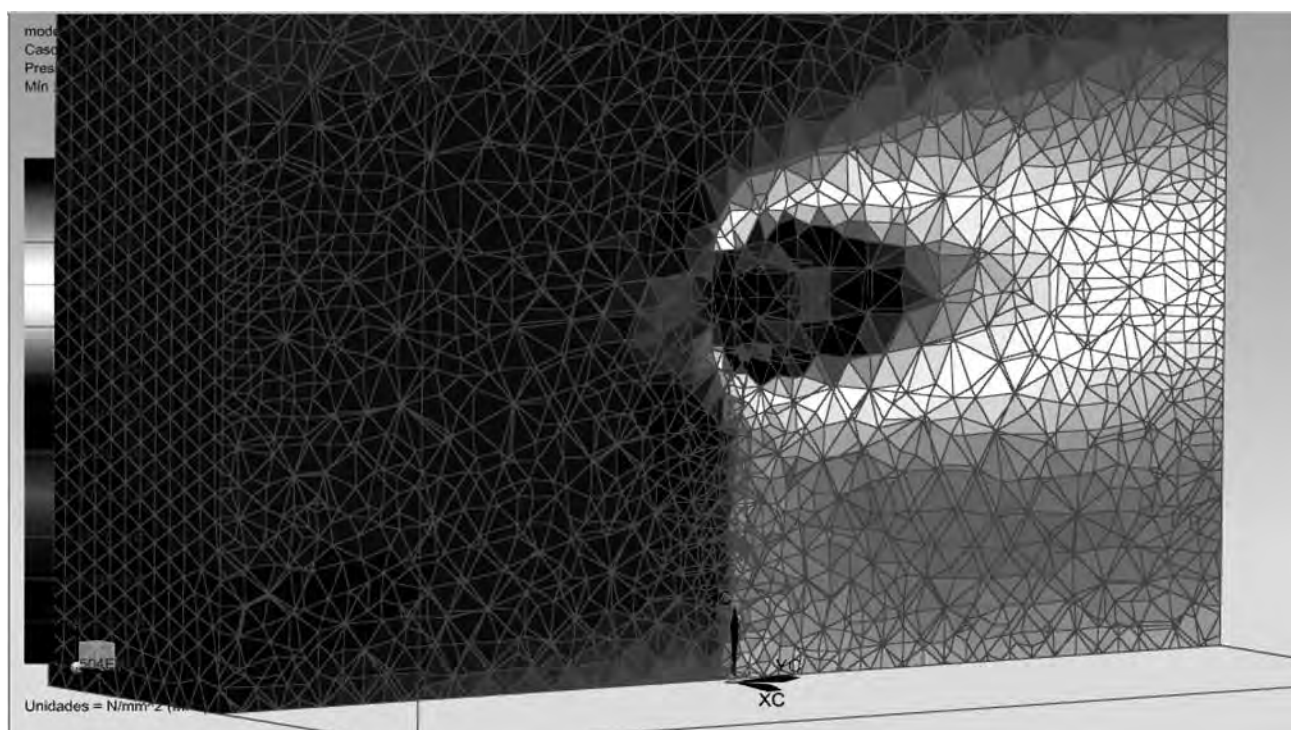


Figura 9b. Vista lateral de presiones sobre el anuncio espectacular por elementos finitos.

una densidad del aire de $\rho=1.043 \text{ Kg/m}^3$, se utilizó la misma velocidad que para el ejemplo hecho para el MDOC-DV-CFE-08, de $v=126 \text{ Km/h}$.

4 DISCUSIÓN

Una vez realizadas las distintas simulaciones en el software NX 8.5 para el ejemplo del anuncio espectacular de tipo unipolar, se analizaron y compararon

Tabla 3. Resultados de las presiones estáticas y dinámicas obtenidas del programa 'NX 8.5' y fuerzas resultantes para la Mampara o letrero.

Presiones sobre la mampara				
Ángulo de incidencia del viento para la Mampara	Presión estática (Kg/m ²)	Presión dinámica (Kg/m ²)	Fuerza estática máxima (Kg)	Fuerza dinámica máxima (Kg)
0°	92.26	107.23	1660.68	1930.14
15°	89.14	105.3	1604.52	1895.4
30°	87.09	111.41	1567.62	2005.38
45°	72.6	112.13	1306.8	2018.34
60°	60.13	110.001	1082.34	1980.018
75°	53.58	107.33	964.44	1931.94
90°	52.5	106.01	945	1908.18

Tabla 4. Resultados de las presiones estáticas y dinámicas obtenidas del programa 'NX 8.5' y fuerzas resultantes para la Columna.

Presiones sobre la mampara				
Ángulo de incidencia del viento para la Columna	Presión estática (Kg/m ²)	Presión dinámica (Kg/m ²)	Fuerza estática máxima (Kg)	Fuerza dinámica máxima (Kg)
0°	46.77	91.52	23.75916	46.49216
15°	43.21	89.46	21.95068	45.44568
30°	37.37	93.99	18.98396	47.74692
45°	40.93	96.94	20.79244	49.24552
60°	47.09	90.68	23.92172	46.06544
75°	44.34	96.01	22.52472	48.77308
90°	43.42	93.37	22.05736	47.43196

Tabla 5. Comparación de presiones y fuerzas (Mampara) obtenidas en el programa NX8.5 y el MDOC-DV-CFE-08.

Ángulo de incidencia del viento para la Mampara	Presión estática obtenida en 'NX8.5' (Kg/m ²)	Presión dinámica obtenida en 'NX8.5' (Kg/m ²)	Fuerza estática máxima obtenida en 'NX8.5' (Kg/m)	Fuerza dinámica máxima obtenida en 'NX8.5' (Kg/m)	Presión neta de acuerdo al MDOC-DV-CFE-08 (Kg/m ²)	Fuerza estática máxima de acuerdo al MDOC-DV-CFE-08 (Kg)	Fuerza dinámica máxima de acuerdo al MDOC-DV-CFE-08 (Kg)
0°	92.26	107.23	1660.68	1930.14	95.157	1712.823	2350.958
15°	89.14	105.3	1604.52	1895.4	—	-	-
30°	87.09	111.41	1567.62	2005.38	—	-	-
45°	72.6	112.13	1306.8	2018.34	95.157	1712.823	2350.958
60°	60.13	110.001	1082.34	1980.018	—	-	-
75°	53.58	107.33	964.44	1931.94	—	-	-
90°	52.5	106.01	945	1908.18	77.623	1397.213	1917.763

Tabla 6. Comparación de presiones y fuerzas (Columna) obtenidas en el programa NX 8.5 y el MDOC-DV-CFE-08.

Ángulo de incidencia del viento para la Columna	Presión estática obtenida en 'NX8.5' (Kg/m ²)	Presión dinámica obtenida en 'NX8.5' (Kg/m ²)	Fuerza estática máxima obtenida en 'NX8.5' (Kg/m)	Fuerza dinámica máxima obtenida en 'NX8.5' (Kg/m)	Presión neta de acuerdo al MDOC-DV-CFE-08 (Kg/m ²)	Fuerza estática máxima de acuerdo al MDOC-DV-CFE-08 (Kg)	Fuerza dinámica máxima de acuerdo al MDOC-DV-CFE-08 (Kg)
0°	46.77	91.52	23.75916	46.49216	43.465	22.08	30.307
15°	43.21	89.46	21.95068	45.44568	43.465	22.08	30.307
30°	37.37	93.99	18.98396	47.74692	43.465	22.08	30.307
45°	40.93	96.94	20.79244	49.24552	43.465	22.08	30.307
60°	47.09	90.68	23.92172	46.06544	43.465	22.08	30.307
75°	44.34	96.01	22.52472	48.77308	43.465	22.08	30.307
90°	43.42	93.37	22.05736	47.43196	43.465	22.08	30.307

los datos obtenidos con los resultados arrojados de los análisis realizados con el MDOC-DV-CFE-08, de lo anterior se encontró lo siguiente:

- Lo primero que se nota en los resultados obtenidos con el software NX es que, para las presiones

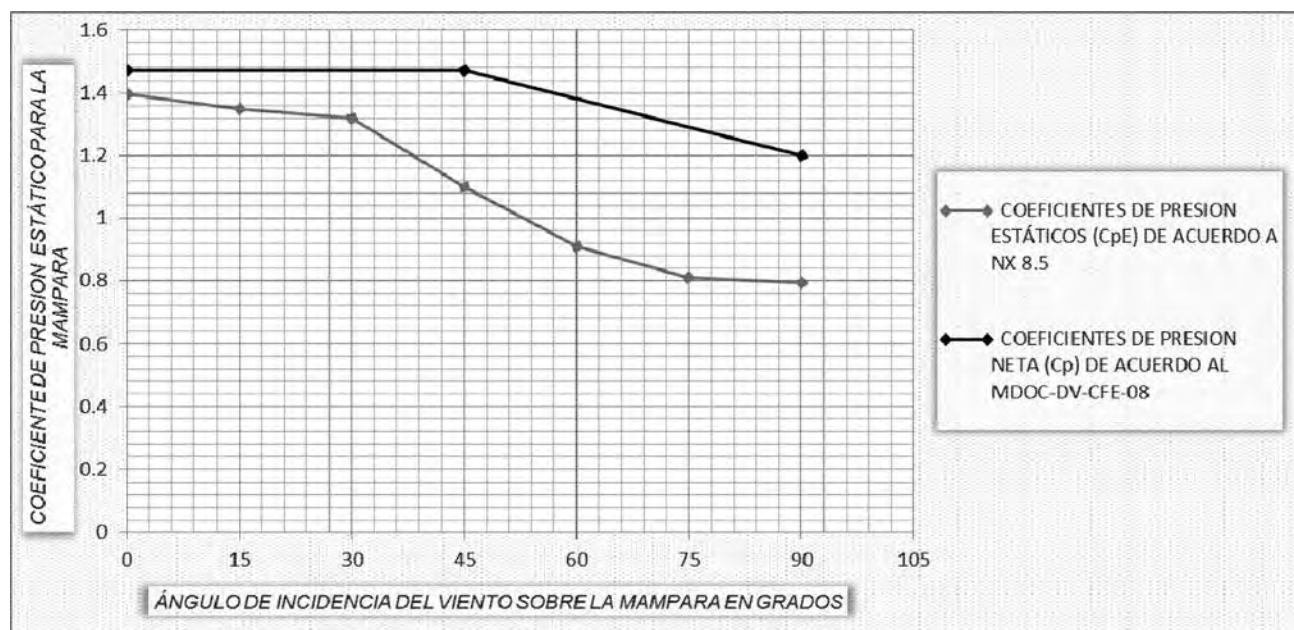
estáticas la de valor mayor corresponde al ángulo de 0°, es decir, en la que la mampara se encuentra normal al plano y esta presión disminuye para los ángulos hasta llegar al valor menor para el de 90°. Situación que no sucede para el caso de las pre-

Tabla 7. Coeficientes de presión estática y dinámica para la Mampara obtenidos del programa NX 8.5 y del MDOC-DV-CFE-08.

Ángulo de incidencia del viento para la Mampara	Coeficiente de presión estática (CpE) obtenidos en 'NX 8.5'	Coeficiente de presión dinámica (CpD) obtenidos en 'NX 8.5'	Coeficiente de presión neta (Cp) de acuerdo al MDOC-DV-CFE-08
0°	1.396	1.622	1.471
15°	1.349	1.593	—
30°	1.318	1.686	—
45°	1.098	1.696	1.471
60°	0.91	1.664	—
75°	0.81	1.624	—
90°	0.794	1.601	1.2

Tabla 8. Coeficientes de arrastre estático y dinámico para la Columna obtenidos del programa NX 8.5 y del MDOC-DV-CFE-08.

Ángulo de incidencia del viento para la Columna	Coeficiente de presión estática (CpE) obtenidos en 'NX 8.5'	Coeficiente de presión dinámica (CpD) obtenidos en 'NX 8.5'	Coeficiente de presión neta (Cp) de acuerdo al MDOC-DV-CFE-08
0°	0.677	1.385	0.747
15°	0.653	1.353	0.747
30°	0.565	1.422	0.747
45°	0.619	1.467	0.747
60°	0.712	1.372	0.747
75°	0.671	1.452	0.747
90°	0.657	1.413	0.747



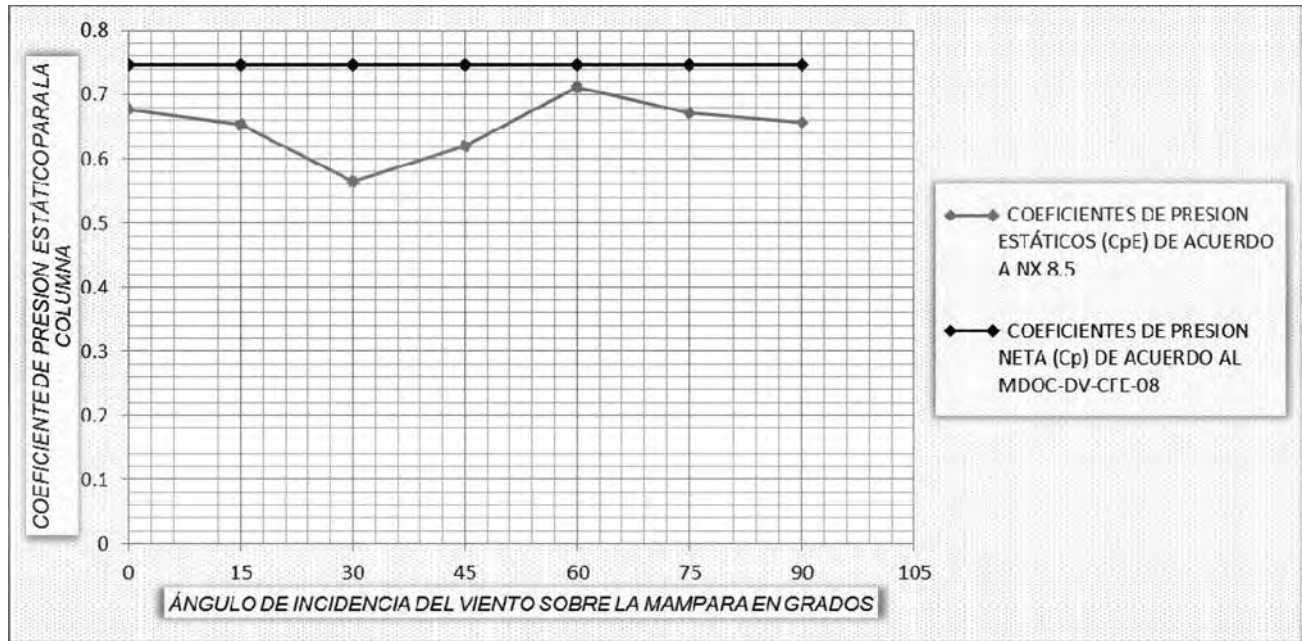
Gráfica 1. Comparativa entre los Coeficientes de presión para la Mampara obtenidos con el software NX 8.5 y del MDOC-DV-CFE-08.

siones dinámicas, pues los valores mayores se dan para los ángulos de 45° y 30°, lo cual es coincidente con lo dicho por Palemón et al. (2014). Así mismo, los valores de las fuerzas obtenidas están relacionados directamente proporcional a los valores de las presiones.

- Las presiones sobre la columna tanto estáticas como dinámicas, son más uniformes, aunque en ambos casos existen diferencias en los valores para los diferentes ángulos. En apariencia esto no debería variar, pues la geometría de la columna no se modifica al modificar el ángulo (sección circular). La variación que se da entre los diferentes valores es debida a la influencia de la mampara sobre la

columna, es decir, la posición de la mampara afecta el comportamiento del fluido sobre la columna. Presentándose el valor mayor de presión dinámica también para el ángulo de 45°.

- En el *Manual de Diseño de Obras Civiles, Diseño por Viento de CFE (2008)* solo se obtienen valores para las presiones estáticas, pues el comportamiento dinámico se toma en cuenta, multiplicando el valor de la presión estática por un factor de amplificación dinámica para hallar el valor de la fuerza dinámica, de ahí que, solo puedan compararse los valores obtenidos en cuanto a presión para CFE con los obtenidos para NX para el caso de los valores de presión estática, en cuanto a las fuerzas puede darse



Gráfica 2. Comparativa entre los Coeficientes de arrastre para la Columna obtenidos con el software NX 8.5 y del MDOC-DV-CFE-08.

una comparación franca para los casos estático y dinámico.

- Se observa que el valor de presión estática obtenido en el manual de CFE y el de NX para el caso del ángulo a 0° es cercano, en cambio los valores de CFE para el caso de los ángulos de 45° y 90° son más grades que los del software NX, lo que conduce a pensar que el manual de CFE arroja valores un tanto más conservadores, pues en el software NX se realizaron simulaciones para más casos que los que proporciona el manual de CFE, lo cual proporciona un panorama más amplio y completo, además claro, de haber comparado y validado los resultados obtenidos en NX con los resultados obtenidos anteriormente por otros autores.
- En cuanto a la comparación de las fuerzas estáticas y dinámicas para la mampara, existe diferencia notable, para el caso estático varían hasta en un 30%, mientras que para el caso dinámico varían hasta un 18%, siendo las fuerzas de valor mayor las obtenidas con el MDOC-DV-CFE-08. Por lo anterior es claro que el elegir realizar un análisis más preciso (software NX 8.5) para obtener las presiones y fuerzas, implica una diferencia notable. Estos valores utilizados en un diseño para una estructura, como es el caso del anuncio espectacular, puede significar una diferencia considerable en peso/costo.

- Para el caso de los análisis estático y dinámico para las columnas sucede algo similar en las presiones y las fuerzas cuando se compara los resultados de CFE y de NX. El manual de CFE solo obtiene un valor para la presión pues analiza la columna por separado de la mampara, mientras que en NX al analizar la mampara y la columna como una sola estructura y haciéndolo mediante un análisis CFD se obtienen valores distintos para cada ángulo de incidencia, lo que conduce a un análisis más elaborado.
- Por ende, los coeficientes de presión y de arrastre obtenidos del análisis hecho con el manual de CFE son mayores que los obtenidos en el programa NX, esto conduce a que si se utilizan los coeficientes obtenidos con NX se obtendrán valores menores de fuerza ya sea estática o dinámica y con ello se optimiza el diseño al cual se apliquen dichas fuerzas.
- Cabe mencionar que el MDOC-DV-CFE-08 solo proporciona valores de coeficiente de presión y de arrastre para el caso estático, mientras que utilizando el software NX se obtuvieron coeficientes de presión y de arrastre estáticos así como dinámicos. Estos últimos coeficientes son la propuesta del presente trabajo, lo cual conduce a valores más precisos para describir mejor el comportamiento de un fluido interactuando con una estructura (el viento y el anuncio espectacular).

5 CONCLUSIONES

Se puede concluir lo siguiente:

- El análisis CFD por MEF es una buena alternativa para simular un análisis de Túnel de Viento si no se cuenta con el equipo adecuado (Túnel de Viento a escala), pues los resultados brindados aunque aproximados, son muy aceptables, más aún cuando se realiza un análisis de MEF más refinado.
- Con los datos proporcionados al realizar un análisis CFD por MEF utilizando el software NX, se pueden comprender de manera más detallada el comportamiento de los fluidos y su interacción con las estructuras dentro de una simulación.
- Los muchas simulaciones realizadas en el software NX para el ejemplo mostrado, permitió además de mejorar el dominio del NX, entender mejor el comportamiento aerodinámico de viento sobre los anuncios espectaculares, asimismo dichas simulaciones permitieron ir afinando los modelos con el fin de obtener mejores resultados.
- De la comparación de los resultados obtenidos en el programa NX y los obtenidos en el MDOC-DV-CFE-08, se observó que los resultados del manual en general arrojan valores mayores o conservadores que los obtenidos en NX, pues estos últimos al provenir de un análisis más detallado y completo, ofrecen resultados más reales del ejemplo simulado (para el caso en específico).
- Los coeficientes de presión y de arrastre obtenidos con el NX, son óptimos en comparación a los brindados en el Manual de CFE, pues los que se brindan en dicho manual son más generales, en cambio, los obtenidos con el software NX son particulares de cada estructura simulada, lo que conduce a tener valores más reales y que en comparación pueden optimizar el diseño de las estructuras simuladas.
- Si bien el MDOC-DV-CFE-08 proporciona coeficientes de presión y de arrastre estáticos, mediante el análisis CFD por MEF realizado en el presente trabajo se hallaron coeficientes de presión y de arrastre estáticos equivalentes a los del manual y aunado a ello se obtuvieron coeficientes de presión y arrastre dinámicos, es decir, tomando en cuenta el comportamiento dinámico del fluido analizado, lo que permite agilizar la obtención de fuerzas conociendo la presión sobre la estructura.

REFERENCIAS

- [1] Álvarez L. J., et al. (2001). Notas teóricas de Método de elementos finitos: Análisis, Software y aplicación en la Ingeniería. (Universidad de Vigo España). Recuperado de <http://www.dma.uvigo.es/files/cursos/mef/teoria.pdf>
- [2] Amaya, E., et al. Estudio del comportamiento del viento en naves industriales con mecánica de fluidos computacional. En: XIX Congreso Nacional de Ingeniería Estructural (19°, 2014, Puerto Vallarta Jalisco, México), 1-12. Recuperado de http://cnie2014.com.mx/SIADAR/eventos/XIX_CNIE/articulos/05-10_adrin_estrada_estrada.pdf
- [3] Baeza, J. C., Vargas, G., & Pérez, D. (2004). La peligrosidad de las mamparas elevadas (anuncios espectaculares) ante viento huracanado. Ingeniería, 8(3), 47-57. Recuperado de <http://www.revista.ingenieria.uady.mx/volumen8/lapeligrisidad.pdf>
- [4] Ceja, E., & Hernández, H. (2006). Simulación de ráfagas de viento para determinar el comportamiento eólico de estructuras. Ciencia Nicolaita, 1(45), 119-138. Recuperado de http://www.cic.umich.mx/documento/ciencia_nicolaita/2006/45/CN45-119.pdf
- [5] CFE (2008). Manual de diseño de Obras Civiles para diseño por viento, de la Comisión Federal de Electricidad. México.
- [6] Cruz Alarcón, M. (2009). La respuesta dinámica inducida por el viento turbulento y su tratamiento en las recomendaciones contenidas en reglamentos. (Tesis de maestría, Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México). Recuperado de <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/handle/132.248.52.100/2899?show=full>
- [7] Facultad de Ingeniería BUAP (2012), Diplomado en Diseño Industrial módulo VI Elemento Finito, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla.
- [8] Gaceta oficial del Distrito Federal. (2004). Normas Técnicas complementarias para diseño por viento. México, D.F.
- [9] Gonzales, R., et al. (2009). Efecto de la resonancia en el diseño por viento de estructuras flexibles de anuncios espectaculares. Quehacer Científico en Chiapas, 1(8), 21-34. Recuperado de http://www.dgip.unach.mx/images/pdf-REVISTA-QUEHACERCIENTIFICO/QUEHACERCIENTIFICO-2009-jul-dic/efecto_de_la_resonancia.pdf

- [10] Lesso, R., et al. Simulación y análisis de cargas de viento en una estructura para Luminaria por el método de Volumen Finito. En: Coloquio de Investigación Multidisciplinaria CIIM (1º, 2010, Orizaba Veracruz, México), 1-10. Recuperado de <http://jaguar.itc.mx/coppermine/albums/userpics/10089/paper%20ITO%202010b.pdf>
- [11] Lima Castillo, I. F. (2012). Diseño óptimo de edificios sensibles al viento, considerando formulaciones simplificadas de daño. (Tesis de maestría, Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México). Recuperado de <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/handle/132.248.52.100/5251?show=full>
- [12] Meseguer, J. et. al. (2001). Aerodinámica Civil, Cargas de viento en las edificaciones. España: Editorial McGraw Hill.
- [13] Mott, R. (2006). Mecánica de Fluidos. México: Editorial Pearson Educación.
- [14] NX versión 8.5, (2012), Manual de uso, Lessons 1-4. Recuperado de <http://ide20.com/upload/ModuleNX/Lesson03.pdf>
- [15] Ossandón Tapia, R. A. (2008). Determinación de la acción del viento sobre las Estructuras en Chile. (Tesis de licenciatura, Universidad de Chile). Recuperado de http://www.inti.gob.ar/cirsoc/pdf/accion_viento/ossandon_rt.pdf
- [16] Palemón, L., et al. Determinación de presiones sobre un tablero electrónico en túnel de viento virtual con OPENFOAM. En: XIX Congreso Nacional de Ingeniería Estructural (19º, 2014, Puerto Vallarta Jalisco, México), 1-9. Recuperado de http://cnie2014.com.mx/SIADAR/eventos/XIX_CNIE/articulos/05-01_leonardo_arcos_arcos.pdf
- [17] Sámano, D. A., & Sen, M. (2009). Apuntes de Mecánica de Fluidos. Instituto de Ingeniería, (Universidad Nacional Autónoma de México). Recuperado de <http://www3.nd.edu/~msen/>
- [18] Simiu, E. & Scanlan, R. (1996). Wind Effects on Structures: Fundamentals and Applications to Design. 3ª ed. E.U.A. Publicaciones Wiley–Interscience.
- [19] Tapia, M. et. al. (2012). Diseño óptimo de estructuras tridimensionales para techos. Acta Universitaria, 22(7), 25-31. Recuperado de <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=41624511003>
- [20] Vergara Zamora, G. R. (2010). Estudio del comportamiento mecánico de elementos estructurales compuestos (Concreto-Acero), por medio de simulaciones numéricas basadas en el Método de los elementos finitos. (Tesis de maestría, Escuela superior de Ingeniería y Arquitectura, Instituto Politécnico Nacional). Recuperado de <http://www.repositoriodigital.ipn.mx/handle/123456789/7184>



CONVOCATORIA MAESTRÍAS 2016

A Ingenieros, Arquitectos y Profesionistas de áreas afines, interesados en cursar:

Maestría en Ingeniería

con opción terminal en:

- Ambiental
- Construcción
- Estructuras
- Geotecnia
- Sistemas Eléctricos de Potencia
- Tránsito y Transporte

y Maestría en Valuación

Requisitos

El curso propedéutico se llevará a cabo los viernes de 17:00 a 21:00 horas y los sábados de 8:00 a 14:00 horas. Los aspirantes a inscribirse al curso propedéutico y que ya se hayan entrevistado con el coordinador de la maestría de su interés, deben acudir a la Secretaría de Investigación y Estudios de Posgrado ubicada en el edificio 108B planta alta (edificio ING2), del 8 de junio al 10 de julio, de lunes a viernes de 9:00 a 15:00 horas, para entregar la siguiente documentación:

- Formato de admisión que deberá solicitar al correo posgradoicv@yahoo.com.mx
- Título profesional*
- Cédula profesional*
- Acta de nacimiento*
- Certificado de calificaciones de Licenciatura (promedio mínimo de 8.0), si no aparece su promedio general, es necesaria una constancia de promedio del programa de licenciatura
- Curriculum Vitae resumido (una cuartilla)
- CURP
- 2 fotografías tamaño infantil blanco y negro
- Cursar y aprobar con calificación mínima de 8.0 las materias del curso propedéutico
- Alumnos extranjeros deberán presentar documentos apostillados o legalizados en la embajada de su país
- Pago de derechos (imprimir su ficha bancaria en la página www.ingenieria.buap.mx - sistema de pagos referenciados)

*copia notarial en tamaño carta de buena calidad

Calendario de Actividades

1 DE JUNIO AL 11 DE JULIO Y DEL
3 DE AGOSTO AL 30 DE SEPTIEMBRE DE 2015

Entrevistas* e inscripción al curso propedéutico

2 DE OCTUBRE AL 28 DE NOVIEMBRE DE 2015

Curso propedéutico

80 HORAS

Duración de curso propedéutico

7 DE DICIEMBRE DE 2015

Publicación de aceptados

11 DE DICIEMBRE DE 2015 A LAS 16:00 HORAS

Examen de Inglés Técnico

7 DE DICIEMBRE DE 2015 AL 7 DE ENERO DE 2016

Inscripción a la maestría

8 DE ENERO DE 2016

Inicio de clases de la maestría

*Para entrevista deberá agendar su cita vía telefónica.

Costo

Concepto	Nacionales	Extranjeros
Curso propedéutico	\$3,500.00	770 USD

Informes:

Secretaría de Investigación y Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería
Edificio 108B (edificio ING2) planta alta, Ciudad Universitaria, Puebla, Puebla
Teléfono: (222) 229 5500 ext. 7618 correo electrónico: posgradoicv@yahoo.com.mx

www.ingenieria.buap.mx

Modelado de líneas de transmisión a través del método de las características

Juan C. Escamilla, P. Moreno, Ismael Albino, Filiberto Candia

RESUMEN

En este artículo se implementa el método de las Características para el estudio de transitorios electromagnéticos en líneas de transmisión, la técnica no requiere de la discretización a lo largo de la línea de transmisión y se consideran parámetros eléctricos constantes. Para validar el modelo los resultados fueron comparados con datos obtenidos por un método en el dominio de la frecuencia.

Palabras Clave: Líneas de transmisión, Método de las Características, Transitorios electromagnéticos.

ABSTRACT

This article describes the method for studying the properties of electromagnetic transients in transmission lines is implemented, this technique is not required discretization along the transmission line and electrical parameters are assumed constant. To validate the model results were compared with those obtained by a method in frequency domain.

Keywords: Transmission lines, Method of characteristics, Electromagnetic transients.

1 INTRODUCCIÓN

Los transitorios electromagnéticos tienen lugar en los sistemas de energía eléctrica durante la operación diaria. Surgen de las fallas, de la resonancia, o de cualquier cambio de la topología o en las condiciones de funcionamiento del sistema. Estos transitorios pueden activar los sistemas de protección, dar lugar a interrupciones de energía, o incluso pueden provocar el daño de otros componentes. Es por esto que resulta tan importante el estudio de los transitorios en las redes eléctricas.

Recibido 10 de octubre, 2015; aceptado 18 de noviembre, 2015

Juan C. ESCAMILLA, Ismael ALBINO, Filiberto CANDIA
BUAP, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Colegio de
Ingeniería Mecánica y Eléctrica, Blvd. Valsequillo y Av. San
Claudio, Col. San Manuel, C.P. 72570, Puebla, México.

P. MORENO
CINVESTAV GDL, Centro de Investigación y de Estudios
Avanzados del Instituto Politécnico Nacional, Av. del Bosque 1145,
Col. El Bajío, Zapopan, C.P. 45019, Jalisco, México.

Para considerar la propagación de ondas viajeras en líneas de transmisión y reproducir adecuadamente este comportamiento en estado transitorio ha sido necesario el desarrollo de modelos de parámetros distribuidos. De los modelos implementados en el dominio del tiempo destacan los siguientes:

J. Marti en 1982 desarrolló un modelo en el cual la función de propagación y la impedancia característica se consideran para un rango de frecuencias. La impedancia característica se obtiene por medio de una aproximación racional a partir de la representación de Foster, mientras que los polos y ceros se obtienen a partir del método de Bode [1].

En 1999 Morched, Gustavsen y Tartibi presentan un modelo en el dominio de fases. Lo más importante de este modelo es el ajuste adecuado de la admitancia característica y la función de propagación por medio de una aproximación racional [2, 3]. El método de las Características (MCS) que requiere de la discretización de la línea tanto en el tiempo como en la distancia ha sido usado exitosamente para el cálculo de transitorios en líneas con condiciones no uniformes y no lineales [4-6]. Sin embargo en el caso de líneas de

transmisión uniformes la discretización de la línea es impráctico e innecesario. En este trabajo se presenta un modelo de líneas de transmisión uniformes con parámetros eléctricos constantes para análisis transitorio en el dominio del tiempo. La técnica se basa en la solución de las ecuaciones del Telegrafista usando el método de las Características y no requiere de la discretización a lo largo de la línea. Los resultados obtenidos con el modelo propuesto son comparados con los obtenidos con un método en el dominio de la frecuencia (MDF) [7, 8].

2 MODELADO DE LÍNEA DE TRANSMISIÓN

Las ecuaciones del Telegrafista son usadas para el análisis de estado transitorio; estas ecuaciones reproducen el comportamiento de las líneas de transmisión. Expresando estas ecuaciones en el dominio del tiempo con parámetros eléctricos constantes se obtiene:

$$\frac{\partial \mathbf{V}(\xi, t)}{\partial \xi} + \mathbf{L} \frac{\partial \mathbf{I}(\xi, t)}{\partial t} + \mathbf{R} \mathbf{I}(\xi, t) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \mathbf{I}(\xi, t)}{\partial \xi} + \mathbf{C} \frac{\partial \mathbf{V}(\xi, t)}{\partial t} = 0 \quad (2)$$

Donde $\mathbf{V}(\xi, t)$ e $\mathbf{I}(\xi, t)$ son los voltajes y corrientes de la línea, respectivamente. Por otro lado \mathbf{L} , \mathbf{C} , y \mathbf{R} son las matrices de inductancia, capacitancia y resistencia de la línea, respectivamente. Multiplicando (1) y (2) por \mathbf{L}^{-1} y \mathbf{C}^{-1} respectivamente, se obtiene el siguiente sistema de ecuaciones.

$$\frac{\partial}{\partial \xi} \mathbf{U} + \mathbf{A} \frac{\partial}{\partial t} \mathbf{U} + \mathbf{B} = 0 \quad (3)$$

donde

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & \mathbf{C}^{-1} \\ \mathbf{L}^{-1} & 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & \mathbf{L}^{-1} \mathbf{R} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{U} = \begin{bmatrix} \mathbf{V}(\xi, t) \\ \mathbf{I}(\xi, t) \end{bmatrix} \quad (4a)$$

$$(4b)$$

$$(4c)$$

La diagonalización de los productos \mathbf{LC} y \mathbf{CL} se definen por:

$$\mathbf{T}_V^{-1} \mathbf{L} \mathbf{C} \mathbf{T}_V = \mathbf{E} \quad \text{y} \quad \mathbf{T}_I^{-1} \mathbf{C} \mathbf{L} \mathbf{T}_I = \mathbf{E} \quad (5a), (5b)$$

donde \mathbf{T}_V y \mathbf{T}_I son las matrices de transformación de voltajes y corrientes, respectivamente. A partir de (3) y (5) se obtienen los parámetros eléctricos modales:

$$\tilde{\mathbf{L}} = \mathbf{T}_V^{-1} \mathbf{L} \mathbf{T}_I, \quad \tilde{\mathbf{C}} = \mathbf{T}_I^{-1} \mathbf{C} \mathbf{T}_V \quad (6a), (6b)$$

$$\tilde{\mathbf{R}} = \mathbf{T}_V^{-1} \mathbf{R} \mathbf{T}_I, \quad \tilde{\mathbf{L}} \tilde{\mathbf{C}} = \mathbf{E} \quad (6c), (6d)$$

donde $\tilde{\mathbf{L}}$, $\tilde{\mathbf{C}}$ y $\tilde{\mathbf{R}}$ son matrices diagonales. Considerando la diagonalización de \mathbf{A} se obtiene lo siguiente:

$$\mathbf{M}_L \mathbf{A} \mathbf{M}_R = \begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{A}} & 0 \\ 0 & -\tilde{\mathbf{A}} \end{bmatrix} \quad (7)$$

donde $\tilde{\mathbf{A}} = \sqrt{\tilde{\mathbf{C}}^{-1} \tilde{\mathbf{L}}^{-1}} = \text{diag}(\gamma_1, \dots, \gamma_n)$, γ_j representan las velocidades de propagación del j -ésimo modo. Los eigenvectores izquierdos y derechos se definen como:

$$\mathbf{M}_L = \begin{bmatrix} \frac{\mathbf{T}_V^{-1}}{\sqrt{2}} & \frac{\mathbf{Z}_W \mathbf{T}_I^{-1}}{\sqrt{2}} \\ \frac{\mathbf{T}_V^{-1}}{\sqrt{2}} & -\frac{\mathbf{Z}_W \mathbf{T}_I^{-1}}{\sqrt{2}} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{M}_R = \begin{bmatrix} \frac{\mathbf{T}_V}{\sqrt{2}} & \frac{\mathbf{Z}_W \mathbf{T}_V}{\sqrt{2}} \\ \frac{\mathbf{T}_I \mathbf{Y}_W}{\sqrt{2}} & -\frac{\mathbf{T}_I \mathbf{Y}_W}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (8a)$$

siendo \mathbf{Z}_W y \mathbf{Y}_W la impedancia y admitancia característica, respectivamente. Para obtener un sistema de ecuaciones diferenciales ordinarias las ecuaciones del Telegrafista deben estar en el dominio de las características, esta familia de curvas se muestra en la figura 1. Del producto de (8a) por (3) se obtiene el siguiente sistema de ecuaciones para el j -ésimo modo:

$$\left(\frac{\partial}{\partial t} + \gamma_j \frac{\partial}{\partial \xi} \right) V_{mj}(\xi, t) + Z_{wj} \left(\frac{\partial}{\partial t} + \gamma_j \frac{\partial}{\partial \xi} \right) I_{mj}(\xi, t) + \gamma_j \tilde{\mathbf{R}}_j I_{mj}(\xi, t) = 0 \quad (9a)$$

$$\left(\frac{\partial}{\partial t} - \gamma_j \frac{\partial}{\partial \xi} \right) V_{mj}(\xi, t) - Z_{wj} \left(\frac{\partial}{\partial t} - \gamma_j \frac{\partial}{\partial \xi} \right) I_{mj}(\xi, t) - \gamma_j \tilde{\mathbf{R}}_j I_{mj}(\xi, t) = 0 \quad (9b)$$

A lo largo de las curvas características se cumple la condición:

$$\gamma_j = \pm \frac{dx}{dt} \quad (10)$$

con esta condición los términos en los paréntesis de las ecuaciones (9a) y (9b) se convierten en derivadas totales las cuales se pueden expresar como:

$$dV_{mj}(\xi, t) + Z_{wj} dI_{mj}(\xi, t) + dx_j \tilde{\mathbf{R}}_j I_{mj}(\xi, t) = 0 \quad (11a)$$

$$dV_{mj}(\xi, t) - Z_{wj} dI_{mj}(\xi, t) - dx_j \tilde{\mathbf{R}}_j I_{mj}(\xi, t) = 0 \quad (11b)$$

las ecuaciones (11) son un sistema de ecuaciones diferenciales ordinarias que representan el sistema de ecuaciones diferenciales parciales de las ecuaciones (1) y (2). De acuerdo a la figura 1 se aplica el método de diferencias finitas centrales a las ecuaciones (11) obteniendo lo siguiente:

$$V_{mj}^R - V_{mj}^A + Z_{aux2} I_{mj}^R - Z_{aux1} I_{mj}^A = 0 \quad (12a)$$

$$V_{mj}^S - V_{mj}^B - Z_{aux2} I_{mj}^S + Z_{aux1} I_{mj}^B = 0 \quad (12b)$$

donde

$$Z_{aux1} = \left(Z_{wj} - \frac{\ell \tilde{\mathbf{R}}_j}{2} \right) \quad (13a)$$

$$Z_{aux2} = \left(Z_{wj} + \frac{\ell \tilde{\mathbf{R}}_j}{2} \right) \quad (13b)$$

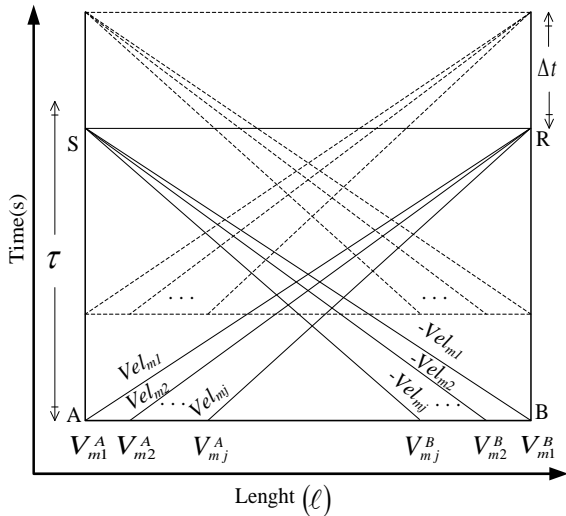


Figura 1. Voltajes modales y curvas características.

De la figura 1, Vel_{mj}^A y Vel_{mj}^B son las velocidades de propagación de cada modo, mientras que V_{mj}^A y V_{mj}^B son los voltajes modales. Los valores en S y R se aproximan con los de un tiempo de viaje anterior. Las variables V_{mj}^A , V_{mj}^B y I_{mj}^A , I_{mj}^B se calculan usando un método de interpolación lineal de primer orden. Expresando la ecuación (12) en forma matricial se obtiene el siguiente sistema de ecuaciones:

$$\mathbf{V}_m^R + \mathbf{Z}_{aux2} \mathbf{I}_m^R = \mathbf{V}_{Hm}^A \quad (14a)$$

$$\mathbf{V}_m^S - \mathbf{Z}_{aux2} \mathbf{I}_m^S = \mathbf{V}_{Hm}^B \quad (14b)$$

donde

$$\mathbf{V}_{Hm}^A = \mathbf{V}_m^A + \mathbf{Z}_{aux1} \mathbf{I}_m^A \quad (15a)$$

$$\mathbf{V}_{Hm}^B = \mathbf{V}_m^B - \mathbf{Z}_{aux1} \mathbf{I}_m^B \quad (15b)$$

las ecuaciones (15) representan los términos de historia de voltajes y corrientes calculados un tiempo de viaje anterior τ como se muestra en la figura 1. Con las matrices de transformación \mathbf{T}_v y \mathbf{T}_i , (14) se puede expresar en el dominio de fase como:

$$\mathbf{I}^{R'} = \mathbf{Y}_{phase} \mathbf{V}^{R'} + \mathbf{I}_H^A \quad (16a)$$

$$\mathbf{I}^S = \mathbf{Y}_{phase} \mathbf{V}^S + \mathbf{I}_H^B \quad (16b)$$

donde

$$\mathbf{I}_H^A = -\mathbf{T}_i \mathbf{Z}_2^{-1} \mathbf{V}_{Hm}^A \quad (17a)$$

$$\mathbf{I}_H^B = -\mathbf{T}_v \mathbf{Z}_2^{-1} \mathbf{V}_{Hm}^B \quad (17b)$$

$$\mathbf{Y}_{phase} = \mathbf{T}_i \mathbf{Z}_2^{-1} \mathbf{T}_v^{-1} \quad (17c)$$

Las ecuaciones (16) representan los circuitos equivalentes de Norton para ambos extremos de la línea (emisor y receptor), como se muestra en la figura 2. Esta representación permite conectar más elementos a ambos extremos de la línea como cargas lineales, no lineales o incluirla en programas del tipo EMTP.

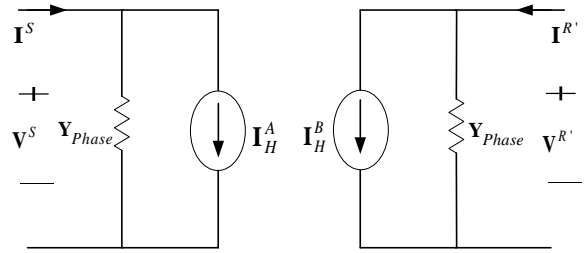


Figura 2. Circuito de Norton del modelo de la línea de transmisión.

3 EJEMPLO DE APLICACIÓN

Se modelaron diferentes casos para la validación del modelo, su objetivo es evaluar la efectividad el modelo.

a) **Energización de un circuito.** Como primer ejemplo de aplicación se modela un sistema de tres circuitos paralelos como se muestra en la figura 3. Las longitudes de cada línea son 100 km. El radio de los conductores es 0.02 m. La permeabilidad del terreno y del conductor es 1.2566×10^{-6} H/m, las resistividades del terreno y del conductor son $100 \Omega\text{-m}$ y $2.71 \times 10^{-8} \Omega\text{-m}$ respectivamente.

En el extremo emisor de la línea del Circuito A se conecta una fuente trifásica senoidal, los tiempos de cierre son 0.002, 0.006 y 0.012 s para las fases O, P y Q respectivamente. El extremo receptor de cada fase se considera como circuito abierto.

Por otro lado los circuitos B y C no son energizados y ambos extremos se consideran abiertos. En la figura 4 se muestran los voltajes transitorios en el extremo receptor de fase P del circuito A. Los voltajes transitorios inducidos a la fase P del circuito C y B se muestran en las figuras 5 y 6 respectivamente. Como se puede ver, los resultados del modelo presentado en este trabajo muestran muy buena aproximación con respecto a los resultados obtenidos con el método en la frecuencia.

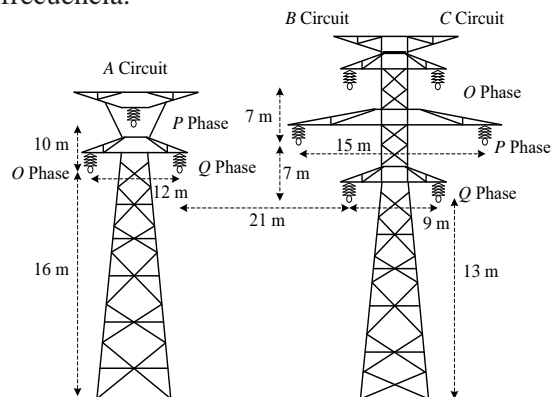


Figura 3. Configuración de un sistema de tres circuitos trifásicos.

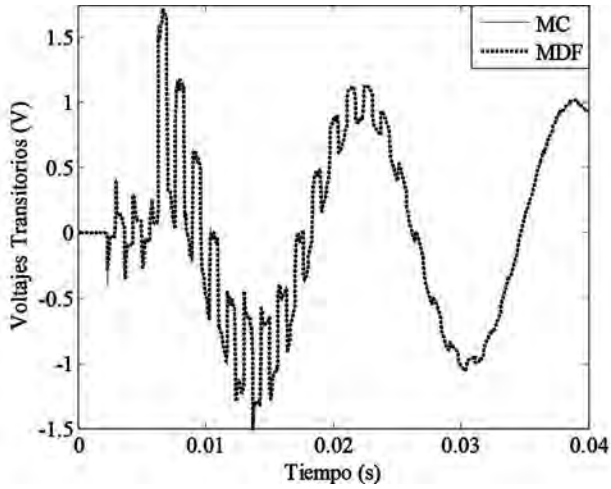


Figura 4. Voltajes transitorios en la fase P del circuito A.

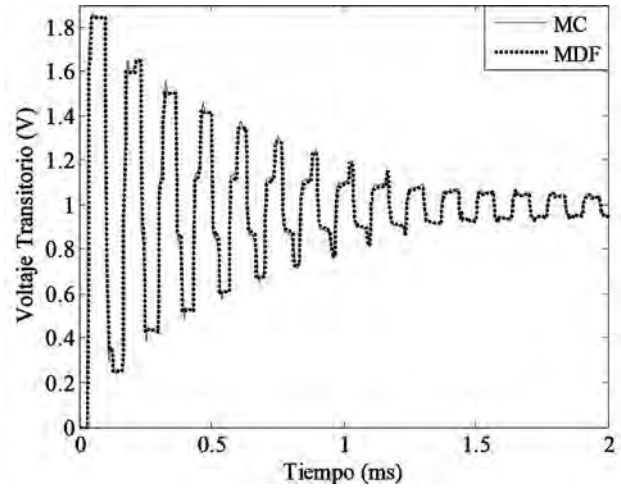


Figura 7. Voltajes transitorios en la fase O del circuito A.

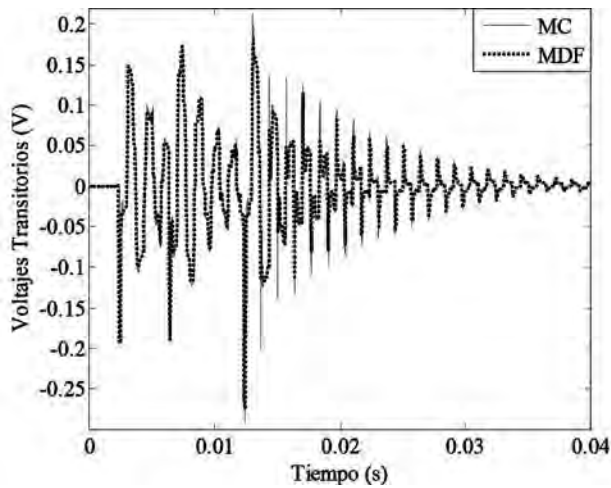


Figura 5. Voltajes transitorios en la fase P del circuito B.

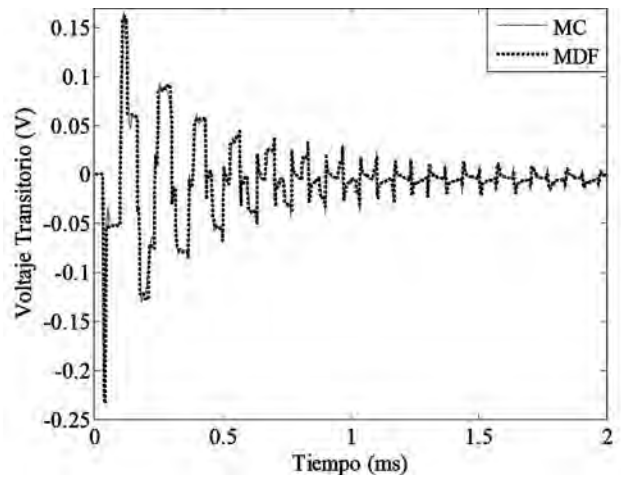


Figura 8. Voltajes transitorios en la fase O del circuito B.

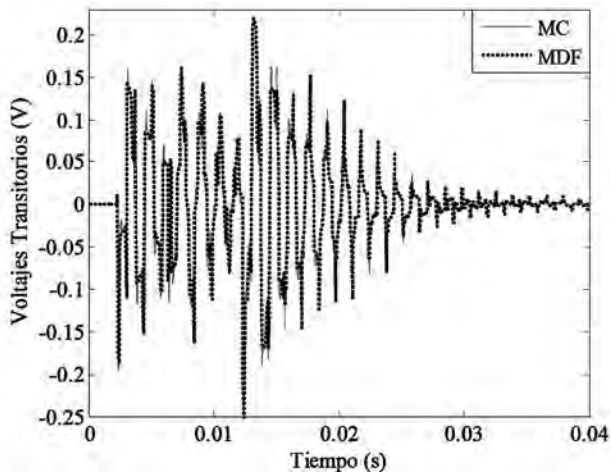


Figura 6. Voltajes transitorios en la fase P del circuito C.

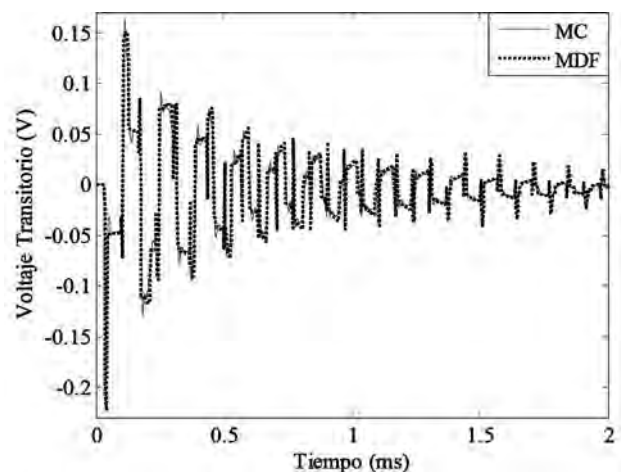


Figura 9. Voltajes transitorios en la fase O del circuito C.

b)Excitación con una fuente del tipo escalón.

Para este último ejemplo de aplicación se utiliza el circuito de la figura 3 con una longitud de línea de 10 km. La fase O del circuito A es energizada con una

fuerza de voltaje del tipo escalón unitario, mientras que los extremos receptores se consideran como circuitos abiertos. Ambos extremos de los circuitos B y C se consideran como circuitos abiertos. El voltaje

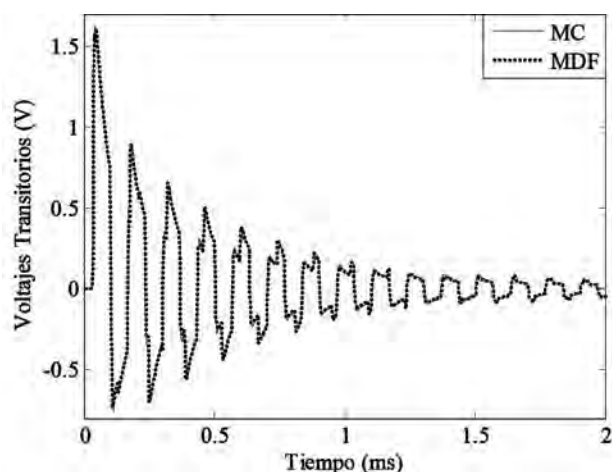


Figura 10. Voltajes transitorios en la fase O del circuito A.

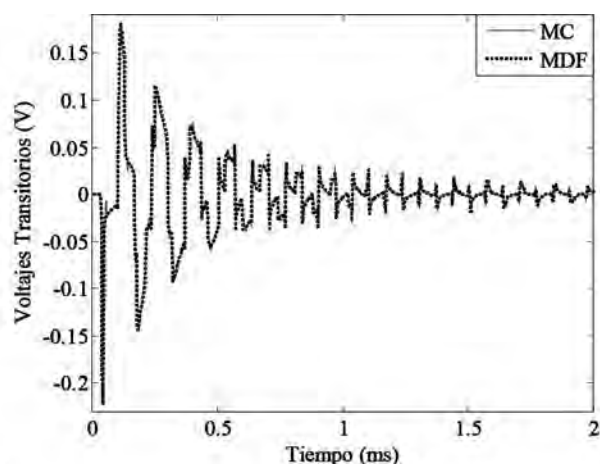


Figura 11. Voltajes transitorios en la fase O del circuito B.

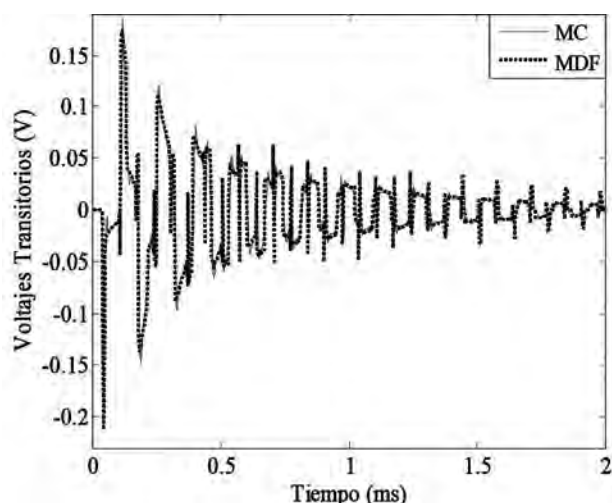


Figura 12. Voltajes transitorios en la fase O del circuito C.

transitorio en el extremo receptor de la fase energizada se muestra en la figura 7, finalmente los voltajes transitorios inducidos de la fase O del circuito B y C se muestran en las figuras 8 y 9.

b) Descarga atmosférica en la línea. Como segundo ejemplo se considera el mismo sistema mostrado en la figura 3. Para este ejemplo la longitud de línea es 10 km. En el extremo emisor de la fase O del circuito A se conectó una fuente de voltaje del tipo doble exponencial la cual representa el impacto de una descarga directa en la línea. Los tiempos de frente y del valor medio de la cola de la onda son 1.2 y 50 μ s. El extremo receptor de la línea se consideró como circuito abierto. Los circuitos B y C no son energizados y ambos extremos se consideran como circuitos abiertos.

La figura 10 muestra el voltaje transitorio al final de la fase O del circuito A. Las figuras 11 y 12 muestran las sobretensiones inducidas en los extremos de la fase O del circuito B y C.

4 CONCLUSIONES

En este trabajo se presenta un modelo de parámetros distribuidos de línea de transmisión multiconductora en el dominio del tiempo. El modelo permite el análisis de fenómenos transitorios considerando parámetros eléctricos constantes. Al igual que el modelo de J. Martí y el Modelo Universal, la técnica que se presenta no necesita de la discretización a lo largo de la línea. Su representación en circuitos de Norton permite la inclusión del modelo con programas del tipo EMTP así como la conexión de diferentes elementos lineales o no lineales en los extremos de la línea. Los resultados obtenidos con este modelo se validaron con los resultados obtenidos de un método en el dominio de la frecuencia.

REFERENCIAS

- [1] J. Martí, "Accurate Modeling of Frequency-Dependent Transmission Lines in Electromagnetic Transient Simulations", IEEE Trans. Power Apparatus and Systems, vol. PAS-101, no. 1, January 1982.
- [2] A. Morched, B. Gustavsen and M. Tartibi, "A Universal Model for Accurate Calculation of Electromagnetic Transients on Overhead Lines and Underground Cables", IEEE Trans. Power Delivery, vol. 14, no. 3, July 1999.
- [3] Gustavsen, B., Semlyen, A.: 'Combined Phase Domain and Modal Domain Calculation of Transmission Line Transients Based on Vector Fitting', IEEE Trans. Power Delivery, 1998, 13, (2), pp. 596-604.

- [4] A. Ramírez, J. L. Naredo, P. Moreno, L. Guardado, "Electromagnetic Transients in Overhead Lines Considering Frequency Dependence and Corona Effect via the Method of Characteristics", Int. Journal of Electrical Power and Energy Systems, vol. 23, pp. 179-188, 2001.
- [5] J. A. Gutierrez, P. Moreno, J. L. Naredo, J. C. Gutierrez, "Fast Transients Analysis of Nonuniform Transmission Lines Through the Method of Characteristics", Int. Journal of Electrical Power and Energy Systems, vol. 24, pp. 781-788, 2002.
- [6] A.R. Chávez, P. Moreno, J.L. Naredo, L. Guardado, "Fast transients analysis of Non-uniform multiconductor frequency-dependent transmission lines", IEEE Transactions on Power Delivery, vol.21, no.2, pp. 809-815, April 2006.
- [7] Moreno P., A. Ramírez, "Implementation of the Numerical Laplace Transform: A Review", IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 23, no. 4, Oct 2008, pp. 2599-2609.
- [8] Gómez P., Uribe, F. A.: 'The numerical Laplace transform: an accurate tool for analyzing electromagnetic transients on power system devices', Int. Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2009, 31, 2, pp. 116-123.
- [9] Electromagnetic Transient Program (EMTP – Theory Book), Portland, USA, July 1995.
- [10] B. Gustavsen and A. Semlyen, "Simulation of transmission line transients using Vector Fitting and modal decomposition", IEEE Trans. On Power Delivery, vol.3, No. 2, April 1998.
- [11] Clayton R. Paul, "Analysis of Multiconductor Transmission line" A Wiley-Interscience Publication John Wiley & Sons. Canada 1994.

BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA

INGENIERÍA
FACULTAD

Departamento de Vinculación
y Educación Continua

Potencializa tus capacidades

DIPLOMADOS

- Diplomado Profesional en Enterprise Resource Planning (ERP's) con SAP Business One
- Lean Six Sigma para certificación Green Belt
- Aplicaciones en Excel Avanzado y Macros
- Simulación de Procesos para la Toma de Decisiones
- Manufactura Esbelta
- Control Industrial
- Diseño Mecánico Industrial
- Quality Core Tools para la Industria Automotriz con Minitab
- Construcción y rehabilitación de Pavimentos

Informes

Educación Continua de la Facultad de Ingeniería

Edificio ING2 Posgrado y Educación Continua. Segundo Nivel

(222) 229 55 00 ext. 7626 fi.educont@gmail.com <http://www.ingenieria.buap.mx>



PRÓXIMO INICIO

Análisis de variables no correlacionadas en protección de líneas de transmisión

Jorge Luis Arizpe Islas, Juan Rafael Cervantes Vega

RESUMEN

El objetivo central de este trabajo consiste en aplicar una técnica estadística de análisis multivariable para encontrar patrones de datos de alta dimensión y simplificar el proceso de discriminación y ubicación de cortocircuitos en líneas de transmisión.

La ventaja fundamental de esta técnica es la reducción del número de dimensiones de los datos, sin que exista mucha pérdida de información. En este artículo se hace una descripción de esta transformación matemática, y se presentan aplicaciones en el área de protección de los sistemas eléctricos de potencia, las cuales son simuladas en el programa PSCAD.

Palabras clave: Estadística, Varianza, Covarianza, Correlación.

ABSTRACT

The central objective of this work is to apply a multivariate statistical analysis techniques to find patterns of high-dimensional data and simplify the process of discrimination and location of short circuits in transmission lines.

The main advantage of this technique is reducing the number of data dimensions, without any great loss of information. This article presents a mathematical description of this transformation is made, and applications are presented in the area of protection of electric power systems, which are simulated in the PSCAD program.

Keywords: Statistics, Variance, Covariance, Correlation.

1 INTRODUCCIÓN

Por medio del Centro Nacional de Control de Energía (CENACE), la CFE garantiza la seguridad, calidad y economía del suministro en el Sistema Eléctrico Nacional¹. Estos Centros monitorean la operación de todos los componentes de la red, a través de la infor-

¹ Centro Nacional de Control de Energía (Cenace) http://www.cfe.gob.mx/Proveedores/4_Informaciongeneral/Control_despacho_energia/Paginas/Control-y-despacho-de-energia-.aspx

Recibido 21 de octubre, 2015; aceptado 24 de noviembre, 2015

M.C. Jorge Luis ARIZPE ISLAS
Profesor de la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica de la UANL.
Correo electrónico: jlarizpei@yahoo.com.mx

M.C. Juan Rafael CERVANTES VEGA
Coordinador General de Eléctrica de la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica de la UANL.

mación de niveles de tensión en subestaciones, flujos potencia (activa y reactiva) en líneas de transmisión y transformadores, niveles de carga en los generadores y el estado de los sistemas de protección, control y medición de la red eléctrica, etc.

De tal forma que para un Sistema Eléctrico de Potencia (SEP) con un número aproximado de 200 subestaciones, el CENACE recibiría en promedio de 1,250 datos por segundo, dependiendo del sistema de adquisición de datos (SCADA) y de las condiciones de operación.

Actualmente los SEPs cuentan con dispositivos digitales de protección, medición y supervisión, que reciben información trifásica en tiempo real de los niveles de tensión y corriente. Las protecciones de líneas de transmisión cuentan con una frecuencia de muestreo de 4 kHz a 8 kHz y el equipo procesa poco más de 20,000 valores instantáneos de tensión y corriente por segundo.

Esto significa que se tiene un alto volumen de información para manipular en tiempo real, por lo que es de suma importancia el desarrollo de algoritmos capaces de procesar esta información en el menor tiempo posible.

El análisis de variables no correlacionadas o de componente principal (ACP) es una técnica estadística de análisis multivariable ampliamente utilizada para encontrar patrones de datos de alta dimensión [1]. Esto se logra analizando la estructura de la varianza-covarianza de los datos analizados a través de combinaciones lineales de los datos originales y permite expresar la información de tal forma que se acentúen las similitudes y diferencias en los datos bajo estudio. La ventaja fundamental de ACP es que una vez que se han encontrado los patrones en los datos se puede seleccionar la información más importante reduciendo el número de dimensiones de los datos, sin que exista gran pérdida de información. Para entender cómo trabaja esta técnica es necesario tener en mente algunos conceptos utilizados en estadística como los son: media, desviación estándar, varianza, covarianza, matriz de covarianza, eigenvectores y eigenvalores [2]. Los cuales se describen a continuación.

2 CONCEPTOS DE ESTADÍSTICA UTILIZADOS

En esta sección se mostrarán algunos conceptos matemáticos necesarios para entender el proceso de Análisis de Variables No Correlacionadas. Además, se incluye una sección donde se explican brevemente las medidas estadísticas de distribución, lo cual permite saber cómo están dispersos los datos. También, se presenta una breve sección en álgebra matricial, eigenvectores y eigenvalores, los cuales son muy importantes al realizar este análisis.

El propósito generalizado de la estadística está basado en la idea de que se tiene un gran grupo de datos el cual se desea analizar con el fin de encontrar relación entre los puntos individuales que conforman al grupo. Para ello es necesario aplicar algunas mediciones al grupo de datos así como interpretar de manera correcta los resultados de esas mediciones.

2.1 Desviación estándar

Al definir la desviación estándar es necesario un grupo de datos, los cuales en términos estadísticos consisten en una muestra que sea representativa de la

población de la que fue tomada, con el fin de trabajar solamente con la muestra y evitar el uso de la población entera.

Una muestra se puede representar de la siguiente forma:

$$x = [x_1, x_2, x_3, \dots, x_{n-1}, x_n] \quad (1)$$

Existen algunos cálculos que se pueden realizar con el grupo de datos x . Por ejemplo, es posible calcular la media de la muestra, cuya fórmula es:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (2)$$

Nótese que el símbolo \bar{x} indica la media del grupo x . Desafortunadamente la media solo encuentra el punto medio de los datos, pero no proporciona mayor información acerca de los datos de estudio.

A continuación, se presentan dos grupos de datos que tienen exactamente la misma media (10), cabe señalar que estos grupos son diferentes:

$$[0 \ 8 \ 12 \ 20] \text{ y } [8 \ 9 \ 11 \ 12] \quad (3)$$

Como se puede observar los dos grupos tienen la misma media, de tal forma que es necesario aplicar una medida que provea mayor información acerca de la dispersión de los datos, como lo es la desviación estándar.

La desviación estándar (s) de un grupo de datos es una medida de su dispersión o variación, la cual se define como:

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{(n-1)}} \quad (4)$$

La razón por la que se divide entre $n-1$ en lugar de n , es ampliamente tratada en [3] donde se explica el cambio de denominaciones y la diferencia entre muestras y poblaciones.

Ejemplo: Al aplicar la desviación estándar a los grupos presentados anteriormente, se tiene:

Grupo 1: [0 8 12 20]

x	$(x - \bar{x})$	$(x - \bar{x})^2$
0	-10	100
8	-2	4
12	2	4
20	10	100
Total		208
Dividido por (n-1)		69.33
Raíz cuadrada		8.3266

Grupo 2: [8 9 11 120]

x	$(x - \bar{x})$	$(x - \bar{x})^2$
8	-2	4
9	-2	1
11	1	1
12	2	4
Total		10
Dividido por (n-1)		3.33
Raíz cuadrada		1.8257

Una vez que se ha aplicado la desviación estándar a los grupos 1 y 2, como se observa, el primer grupo tiene mayor desviación estándar, por el hecho de que sus datos están más dispersos de la media.

2.2 Varianza

La varianza es otra medida de dispersidad de los datos, la cual es muy parecida a la desviación estándar, y su expresión es:

$$s^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{(n-1)} \quad (5)$$

Como se puede apreciar, se trata de la desviación estándar (s) elevada al cuadrado, y s^2 es el símbolo para la varianza de un grupo de datos. Las dos son medidas de dispersidad de los datos. Aunque la desviación estándar es más usada. Por otra parte la varianza provee una sólida plataforma para explicar el concepto de covarianza.

2.3 Covarianza

Las últimas dos medidas presentadas son unidimensionales. Pero la mayoría de los datos prácticos tienen más de una dimensión, y el objetivo del análisis estadístico consiste en ver si existe alguna relación entre las dimensiones, por ejemplo, se puede estar interesado en conocer la relación que existe entre la altura de los alumnos y la calificación alcanzada en un examen. La desviación estándar y la varianza operan solamente una dimensión, de tal manera que es necesario contar con una forma de medir el grado en que los valores de una dimensión varía con respecto a otras dimensiones. La covarianza puede proporcionar esa información ya que permite hacer la medición entre dos dimensiones.

Si se tiene un grupo de datos de tres dimensiones (x, y, z) entonces es posible medir la covarianza entre las dimensiones X y Y , dimensiones X y Z y por último Y y Z . La expresión para la covarianza es muy similar a la de la varianza:

$$\text{var}(x) = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(x_i - \bar{x})}{(n-1)} \quad (6)$$

Donde se expandió el término al cuadrado para formar dos partes. La fórmula de la covarianza es:

$$\text{cov}(x, y) = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{(n-1)} \quad (7)$$

Se puede observar que se trata de la misma fórmula excepto que en el segundo término en corchetes, las X 's se remplazaron por Y 's, y la información que genera el cálculo de la covarianza indica cómo están relacionados los datos de las dimensiones.

La covarianza es de gran utilidad cuando se requiere encontrar las posibles relaciones existentes entre datos de alta dimensión donde una visualización gráfica no está disponible.

2.4 Matriz de covarianza

La varianza es una medida entre dos dimensiones, si se tiene un grupo de datos con más de dos dimensiones, entonces existe más de una medida de covarianza que puede ser calculada. Por ejemplo, para un grupo de datos de tres dimensiones (dimensiones x, y, z), se puede calcular $\text{cov}(x,y)$, $\text{cov}(x,z)$, $\text{cov}(y,z)$. De hecho para un grupo n -dimensional es necesario calcular $n(n+1)/2$ valores diferentes de covarianza. Resulta de gran utilidad ordenar todas las covarianzas calculadas en una matriz, la cual por definición es de la siguiente forma:

$$C_{n \times n} = (c_{i,j}, c_{i,j} = \text{cov}(Dim_i, Dim_j)) \quad (8)$$

Donde:

$C_{n \times n}$ es una matriz con n filas y n columnas, y la Dim_i es la i -ésima dimensión.

La fórmula indica que la matriz es cuadrada ($n \times n$) y que cada término es el resultado de calcular la covarianza entre dos dimensiones. Por ejemplo, para una matriz de covarianza de tres dimensiones (x, y, z), la matriz quedaría de la siguiente forma:

$$\text{cov} = \begin{bmatrix} \text{cov}(x, x) & \text{cov}(x, y) & \text{cov}(x, z) \\ \text{cov}(y, x) & \text{cov}(y, y) & \text{cov}(y, z) \\ \text{cov}(z, x) & \text{cov}(z, y) & \text{cov}(z, z) \end{bmatrix}$$

Aquí el término de la fila 2 y columna 3, es el valor de la covarianza calculado entre la 2ª y 3ª dimensión. Nótese que la diagonal principal consiste de las varianzas de cada una de las dimensiones. Además debido a que $\text{cov}(a,b) = \text{cov}(b,a)$, la matriz es simétrica con respecto a la diagonal principal.

2.5 Eigenvalores y Eigenvectores

Asumiendo que A es una matriz cuadrada, supóngase que un vector x diferente de cero es tal que al ser multiplicado por A , el resultado es el mismo vector, escalado por λ .

En forma matemática:

$$Ax = \lambda x$$

Donde λ es un escalar multiplicado por un vector x .

Si la ecuación anterior es verdadera, entonces se dice que x es un eigenvector de la matriz A , y λ es un eigenvalor de la matriz A [4]. Los eigenvalores y eigenvectores pueden ser encontrados para matrices cuadradas.

3 ANÁLISIS DE VARIABLES NO CORRELACIONADAS

Con la finalidad de conocer la relación existente entre un grupo de variables puede ser de utilidad transformar las variables originales en un nuevo grupo de variables, no correlacionadas, llamadas componentes principales (CP). Esas nuevas variables son combinaciones lineales de las variables originales y están ordenadas en forma decreciente de importancia, de tal manera que la primer componente principal cuenta con la mayor dispersión en los datos originales. El ACP fue propuesto por Karl Pearson y posteriormente fue desarrollado más detalladamente por Harold Hotelling en 1930 [5]. La transformación consiste en una rotación ortogonal en el espacio p . La técnica para encontrar esta transformación es llamada análisis de componente principal cuyos objetivos generales son: la reducción de datos, su posible interpretación y la construcción de la población.

3.1 Reducción de datos

Cuando se tienen datos que originalmente tienen p variables, generalmente su varianza se puede definir en términos de un pequeño número (m) de componentes principales, de tal forma que cuando mucha de la información total contenida en las variables originales se concentra en las primeras CP, entonces el grupo de datos que originalmente consistía de n observaciones y p variables puede ser reducido a uno conformado de n observaciones en m componentes principales.

3.2 Interpretación

Un análisis de componente principal puede mostrar relaciones que no se habían considerado previamente, y permite interpretaciones que no podrían hacer con resultados ordinarios.

3.3 Construcción de la población

Supóngase $X = [X_1 \dots X_p]$ es una variable aleatoria p dimensional con media μ y matriz de covarianza Σ . El problema consiste en encontrar un nuevo grupo de variables, a las llamadas Y_1, Y_2, \dots, Y_p las cuales no están correlacionadas y su varianza se decrementa de la primera a la última. Cada Y_j será una combinación lineal de las X 's así que:

$$Y_j = a_{1j}X_1 + a_{2j}X_2 + \dots + a_{pj}X_p \quad (9)$$

$$Y_j = a_j^T X$$

Donde $a_j^T = a_{j1}, \dots, a_{jp}$ es un vector de constantes.

La ecuación anterior contiene un factor de escala arbitrario. Para asegurar sea ortogonal la condición

$$a_j^T a_j = \sum_k^p a_{kj}^2 = 1$$

es impuesta, de esta manera se asegura que las distancias en el espacio p sean conservadas.

La primer componente principal Y_1 , se obtiene escogiendo a_1 de tal forma que tenga la varianza más grande posible. Es decir, se escoge a_1 de tal forma que maximice la varianza $a_1^T X$ sujeta a la restricción $a_1^T a_1 = 1$. Esta propuesta fue sugerida originalmente por Harold Hotelling [5] dando resultados equivalentes a los trabajos de Karl Pearson, el cual encontró la línea en el espacio p cuya suma de las distancias al cuadrado de los puntos a la línea es minimizada.

La segunda componente principal es encontrada escogiendo a_2 para el cual Y_2 tenga la mayor varianza posible para todas las combinaciones de Y_j las cuales deben ser no correlacionadas con Y_1 . De manera similar se obtiene Y_3, \dots, Y_p tales que no estén correlacionadas y tengan varianza decreciente.

Para encontrar la primera componente principal se escoge a_1 la cual maximiza la varianza de Y_1 sujeta a la restricción de normalización $a_1^T a_1 = 1$.

La varianza de esta dada por:

$$Var(Y_1) = Var(a_1^T X) \quad (10)$$

$$Var(Y_1) = a_1^T \sum a_i$$

Así que

$$Var(Y_1) = a_1^T \sum a_i$$

será la función objetivo.

El procedimiento estándar para maximizar una función de varias variables sujeto a una o más restricciones es el método de los multiplicadores de Lagrange. En el caso de solo una restricción, este método usa el hecho de que los puntos estacionarios de una función diferenciable de variables, sea $f(x_1, \dots, x_p)$, su-

jeta a la restricción $g(x_1, \dots, x_p) = c$, existe un número λ llamado multiplicador de Lagrange tal que:

$$\frac{\partial f}{\partial x_1} - \frac{\partial g}{\partial x_i} = 0 \quad \forall i = 1, \dots, p \quad (11)$$

en los puntos estacionarios.

Esas p ecuaciones junto con la restricción son suficientes para determinar los puntos estacionarios (y los correspondientes valores λ).

De todas formas es necesario saber si un punto estacionario es un máximo o un mínimo, para esto es de gran ayuda formar una nueva función, $L(x)$ tal que:

$$L(x) = f(x) - \lambda[g(x) - c] \quad (12)$$

Donde el término entre corchetes es cero.

Entonces esta ecuación puede reescribirse como

$$\frac{\partial L}{\partial x} = 0 \quad (13)$$

Aplicando este método a nuestro problema, podemos escribir:

$$L(a_1) = a_1^T \sum a_1 - \lambda(a_1^T a_1 - 1) \quad (14)$$

A partir de la cual se obtiene:

$$\frac{\partial L}{\partial a_1} = 2 \sum a_1 - 2\lambda a_1 \quad (15)$$

Igualando a cero se consigue:

$$(\sum - \lambda I) a_1 = 0 \quad (16)$$

Si esta última expresión tiene una solución para a_1 diferente al vector nulo, entonces $(\Sigma - \lambda I)$ debe ser una matriz singular. Así que debe ser escogido para que:

$$|\sum - \lambda I| = 0 \quad (17)$$

Así que una solución para $(\Sigma - \lambda I)$ diferente de cero existe si y solo si λ es un eigenvalor de Σ .

Σ tiene p eigenvalores ya que Σ es una matriz definida positiva, los cuales se pueden denotar por $\lambda_1 > \lambda_2 > \dots > \lambda_p \geq 0$. Ahora se escoge un eigenvalor para determinar el primer componente principal:

$$\begin{aligned} \text{Var}(a_1^T X) &= a_1^T \sum a_1 \\ \text{Var}(a_1^T X) &= a_1^T \lambda I a_1 \\ \text{Var}(a_1^T X) &= \lambda \end{aligned} \quad (18)$$

Debido a que se desea determinar la varianza se selecciona el λ que sea el más grande eigenvalor al cual se denominara λ_1 . Entonces a partir de la ecuación (16) el primer componente principal a_1 será el eigenvector de Σ correspondiente al más grande eigenvalor. La segunda componente principal llamada $Y_2 = a_2^T X$ es obtenida por la extensión al razo-

namiento anterior teniendo en cuenta la restricción $a_2^T a_2 = 1$ y la condición de que Y_2 no debe estar relacionada con Y_1 . Para esta última se tiene:

$$\text{Cov}(Y_2, Y_1) = \text{Cov}(a_2^T X, a_1^T X)$$

$$\text{Cov}(Y_2, Y_1) = E[a_2^T (X - \mu)(X - \mu)^T a_1] \quad (19)$$

$$\text{Cov}(Y_2, Y_1) = a_2^T a_1$$

el cual se requiere que sea cero, ya que $\Sigma a_1 = \lambda_1 a_1$ es posible utilizar la condición equivalente más simple $a_2^T \sum a_2$, sujeta a las dos restricciones, es necesario introducir dos multiplicadores de Lagrange, los cuales serán denotados por λ y δ , y a partir de la ecuación:

$$L(a_2) = a_2^T \sum a_2 - \lambda(a_2^T a_2 - 1) - \delta a_2^T a_1 \quad (20)$$

en los puntos estacionarios se tiene:

$$\frac{\partial L}{\partial a_2} = 2(\sum - \lambda I) a_2 - \delta a_1 = 0 \quad (21)$$

Si se premultiplica la ecuación por a_1^T , se obtiene:

$$(\sum - \lambda I) a_2 = 0 \quad (22)$$

esto debido a que $a_1^T a_2 = 0$. Pero de la ecuación (19) es necesario que $a_2^T \sum a_2$ sea cero así que δ es el punto estacionario. Por lo tanto la ecuación se convierte en:

$$2a_1^T \sum a_2 - \delta = 0 \quad (23)$$

Se puede observar que la elección de λ corresponde al segundo eigenvalor más grande de Σ , y a_2 será su correspondiente eigenvalor.

Continuando con este razonamiento la j -ésima componente principal será el eigenvector asociado al j -ésimo eigenvalor más grande. Una importante propiedad es que los eigenvalores pueden ser interpretados como las varianzas de sus respectivas componentes. La suma de las varianzas es dada por:

$$\sum_{i=1}^p \text{Var}(Y_i) = \sum_{i=1}^p \lambda_i = \text{trace}(\Lambda) \quad (24)$$

Donde:

$$\text{trace}(\Lambda) = \text{trace}(A^T \sum A)$$

$$\text{trace}(\Lambda) = \text{trace}(\sigma A A^T)$$

$$\text{trace}(\Lambda) = \text{trace}(\sum)$$

$$\text{trace}(\Lambda) = \sum_{i=1}^p \text{Var}(X_i)$$

Lo que muestra que la suma de las varianzas de las variables originales y sus componentes principales es la misma. Por lo tanto es conveniente enun-

ciar la *i*-ésima componente principal cuenta con una proporción de

$$\frac{\sum_{j=1}^m \lambda_j}{\sum_{j=1}^p \lambda_j}$$

de la variación total en los datos originales. Sin embargo, se debe recordar que no es haciendo un análisis en el sentido estricto de la expresión. Cabe señalar que las primeras *m* componentes principales cuentan como una proporción de la varianza total.

$$\frac{\sum_{j=1}^m \lambda_j}{\sum_{j=1}^p \lambda_j}$$

4 APLICACIÓN DE ANÁLISIS DE COMPONENTE PRINCIPAL

4.1 Ejemplo 1

Obtención de datos

Se aplicará ACP a un grupo de datos en dos dimensiones con la finalidad de visualizar el resultado de cada uno en cada paso.

x	2.5	0.5	2.2	1.9	3.1	2.3	2.0	1.0	1.5	1.1
y	2.4	0.7	2.9	2.2	3.0	2.7	1.6	1.1	1.6	0.9

La figura 1 muestra los datos utilizados en forma gráfica:

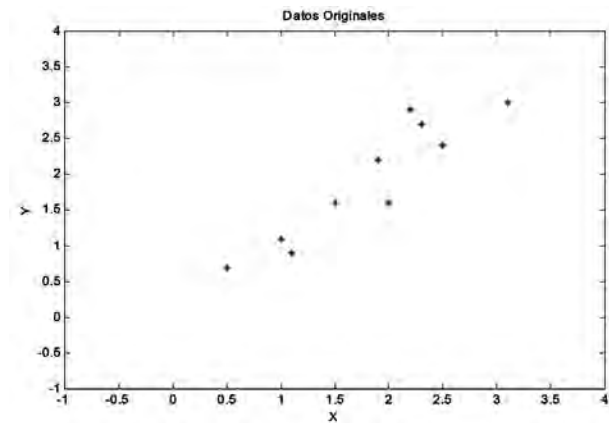


Figura 1. Datos originales.

Extracción de la media de los datos

Para que ACP funcione apropiadamente es necesario realizar una traslación al origen, para lo cual se debe sustraer la media de cada uno de los datos de la dimensión. Esto produce grupos de datos cuya media es cero.

x	0.69	-1.31	0.39	0.09	1.29	0.49	0.19	-0.81	-0.31	-0.71
y	0.49	-1.21	0.99	0.29	1.09	0.79	-0.31	-0.81	-0.31	-1.01

La figura 2 muestra los datos del ejemplo con la traslación al origen, en forma gráfica:

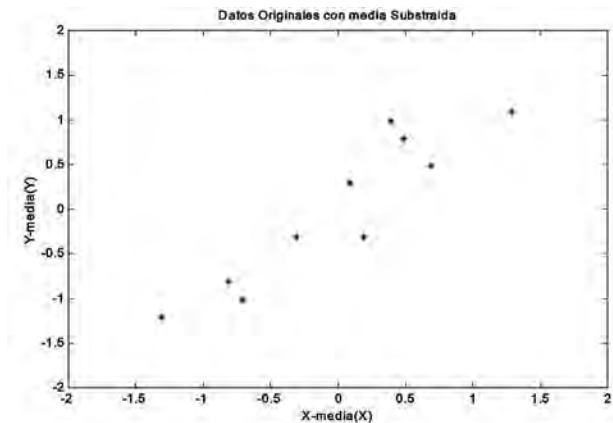


Figura 2. Datos con la media sustraída.

Cálculo de la matriz de covarianza

Como los datos son de dos dimensiones, se obtiene una matriz de 2 x 2.

La matriz calculada queda de la forma:

$$\text{cov} = \begin{bmatrix} 0.6166 & 0.6154 \\ 0.6154 & 0.7166 \end{bmatrix}$$

Cálculo de eigenvectores y eigenvalores de la matriz de covarianza

Es necesario calcular los eigenvectores y eigenvalores de la matriz de covarianza. Ellos contienen información importante para el ACP.

Para la matriz de covarianza de este ejemplo se obtiene:

$$\text{eigenvalores} = \begin{bmatrix} 1.2840 & 0 \\ 0 & .0491 \end{bmatrix}$$

$$\text{eigenvectores} = \begin{bmatrix} -0.6779 & -0.7352 \\ -0.7352 & 0.6779 \end{bmatrix}$$

Es importante notar que los eigenvectores son ortonormales, su significado se puede ver en la figura 3, donde las líneas punteadas corresponden a los eigenvalores 1 y 2, los cuales son ortogonales y unitarios. Se puede observar que la línea correspondiente al eigenvector e_1 caracteriza la mayor información del comportamiento de los datos, la línea e_2 corresponde al segundo eigenvector el cual contiene menor información acerca del comportamiento de los datos. El resto del proceso de ACP consiste en transformar los datos para expresarlos en términos de esos nuevos ejes.

Elección de las componentes principales y formación del vector de transformación

Es necesario ordenar los eigenvalores y su eigenvector asociado del más grande al más pequeño,

el eigenvector asociado al eigenvalor más grande corresponde a la primera componente principal, el eigenvector asociado al segundo eigenvalor más grande corresponde a la segunda componente principal y así sucesivamente. Es posible ignorar las componentes menos significativas, con su correspondiente pérdida de información, pero si los eigenvalores correspondientes son pequeños, entonces las pérdidas son despreciables.

Una vez seleccionadas las componentes principales que se van a utilizar, se forma una matriz de transformación T con los eigenvectores:

$$T = [eig_1 \ eig_2 \dots \ eig_n]$$

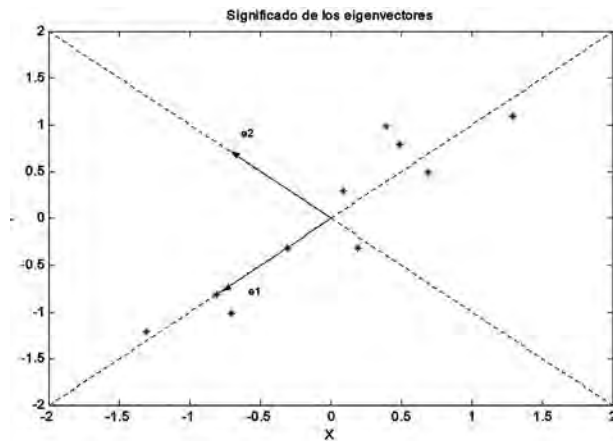


Figura 3. Significado de los eigenvectores.

Obtención de los nuevos datos

Finalmente, se lleva a cabo la transformación de los datos, lo cual dará como resultado los datos originales en términos de los eigenvectores previamente escogidos los cuales serán los nuevos ejes, esto se muestra en la figura 6. La figura 4 muestra la varianza de las dos componentes principales.

$$Datos \ finales = T \cdot Datos \ ajustados$$

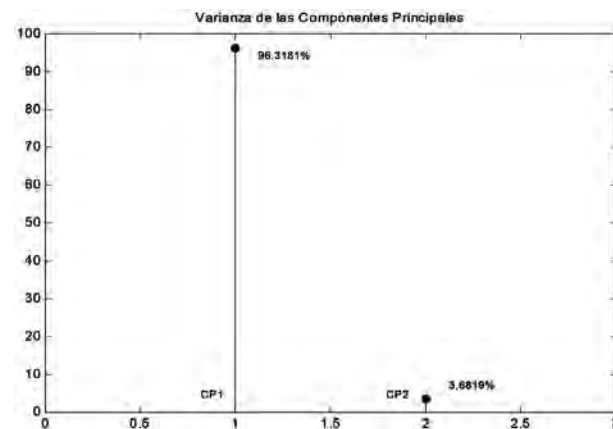


Figura 4. Varianza de las dos componentes principales.

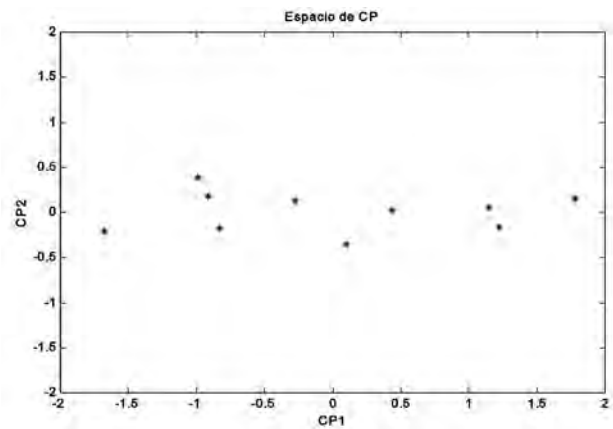


Figura 5. Datos finales utilizando las dos componentes principales.

4.2 Ejemplo 2

Se consideró el problema de reducir el tiempo para la detección de fallas en líneas de transmisión, así como mejorar la sensibilidad de los esquemas de protección ante fallas de alta impedancia, y mejorar la seguridad del algoritmo por la discriminación entre fallas internas y externas al final de la línea de transmisión protegida (figura 6), utilizando las señales transitorias de alta frecuencia generadas en el punto de aparición de la falla, ya que contienen información que describe las características de la falla.

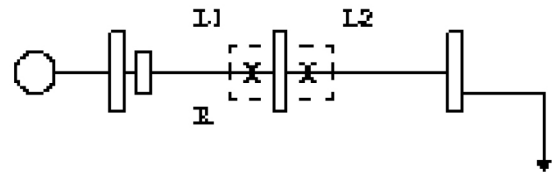


Figura 6. Pérdida de seguridad de los algoritmos de zonas de protección basados en ondas viajeras.

En el caso de los sistemas de transmisión de alta tensión, las ondas viajeras que se generan ante la aparición de un disturbio en la línea de transmisión se propagan por las líneas hasta que llegan a una discontinuidad (elementos en una subestación, unión de varias líneas, etc.); en ese punto las ondas se dividen en una onda reflejada y onda transmitida (figura 6), la onda viajera reflejada viaja a través de la línea superpuesta a la onda incidente. La onda transmitida o refractada penetra más allá de la discontinuidad.

La magnitud de cada una de esas ondas está dada por los coeficientes de reflexión (K_R) y transmisión (K_T) los cuales son de la forma:

$$K_R = \frac{Z_b - Z_a}{Z_a + Z_b} \quad K_T = \frac{2Z_b}{Z_a + Z_b}$$

donde: Z_a y Z_b corresponden a las impedancias características de cada una de las líneas. Cabe mencionar que la impedancia característica de la línea, dependiendo de la geometría de la línea, definida como:

$$Z_0 = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}}$$

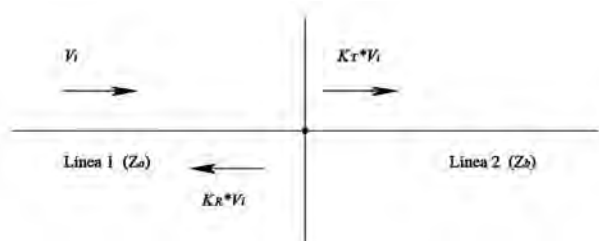


Figura 7. Comportamiento de las ondas viajeras al alcanzar una discontinuidad en un SEP.

Las ondas viajeras propagándose por una línea de transmisión experimentan una modificación en su contorno al atravesar por una discontinuidad que se caracteriza por un cambio de impedancia. En el caso de la figura 6, la onda incidente V_i que va propagándose por la línea 1 con una impedancia características Z_a alcanza la discontinuidad (subestación) y continúa a través de la línea 2 con una impedancia Z_b como una onda refractada. Se aprecia que existe una modificación en la magnitud de la onda; esto se refleja en una modificación en el contorno de la onda viajera entre V_i y $K_R V_i$.

En el caso de que ambas líneas sean idénticas ($Z_a = Z_b$), el contorno de la onda viajera no se ve afectado, y no existe onda reflejada. Esta situación, es difícil que se presenten en sistemas eléctricos de potencia reales. Así, las ondas viajeras que se propagan a través de una línea de transmisión se ven mínimamente afectadas en su contorno (o bien no se perciben cambios abruptos) aun considerando pérdidas por atenuación.

Por tanto, un frente de onda originado por una falla externa experimenta una modificación en su contorno al pasar por la discontinuidad que representa el cambio de la impedancia característica entre las líneas de transmisión (Z_a a Z_b en la figura 7). A diferencia de esto, un frente de onda originado por una falla interna solo es afectado por la atenuación propia de la línea. En general, esta diferencia es muy sutil y difícil de identificar.

Un ACP puede mostrar relaciones que no se habían considerado previamente, y permite interpretaciones que no se podrían hacer con resultados ordinarios, esta

técnica fue inicialmente estudiada por H. Hotelling en 1933 [2, 5] y se define de la siguiente manera.

Para un grupo de vectores p -dimensionales $\{t^n\}$, $n \in \{1...N\}$, los q ejes principales w_j , $j \in \{1...q\}$ son aquellos ejes ortonormales en los cuales la máxima varianza es retenida por proyección. Se puede demostrar que los ejes w_j corresponde a los q eigenvalores dominantes en:

$$S w_j = \lambda_j w_j$$

asociados a los eigenvectores más grandes de la matriz de covarianza de S formada por:

$$S = \frac{\sum_1^n (t_n - \bar{t})(t_n - \bar{t})}{n - 1}$$

donde \bar{t} es la media de la muestra. La nueva representación vectorial es:

$$x_n = W^T (t_n - \bar{t})$$

Siendo $W = [w_1 \ w_2 \ ... \ w_q]$ y x_n corresponde a la representación reducida q dimensional de los vectores t_n .

Cuando se tienen datos que originalmente tienen p variables, generalmente su varianza puede ser explicada en términos de un pequeño número q de componentes principales, de tal forma que la información más representativa contenida en las variables originales se concentra en las primeras CP , esto significa que el grupo de datos que originalmente consistía de n observaciones y p variables puede ser reducido a uno conformado de n observaciones en q componentes principales.

Resultados obtenidos

Se han realizado simulaciones en el programa PSCAD, utilizando el sistema de prueba de la figura 8, donde la principal característica del sistema es que ambas líneas de transmisión son prácticamente idénticas. La diferencia es que la línea uno tiene un conductor por fase y la línea dos tiene dos conductores por fase, esto es para tener un escenario donde la zona de pérdida de seguridad del algoritmo (figura 7) es muy crítica, ya que el cambio de impedancia característica entre ambas líneas es muy pequeño.

A medida de ejemplo, en la figura 9 se muestra la aplicación del ACP en la identificación de la forma de onda de corriente para fallas monofásicas en la zona interna de la línea de transmisión en una posición.

El algoritmo se ha estado probando en forma exhaustiva con distintos escenarios de simulación utilizando el sistema de la figura 8. Una de las pruebas es la que aparece en la figura 9.

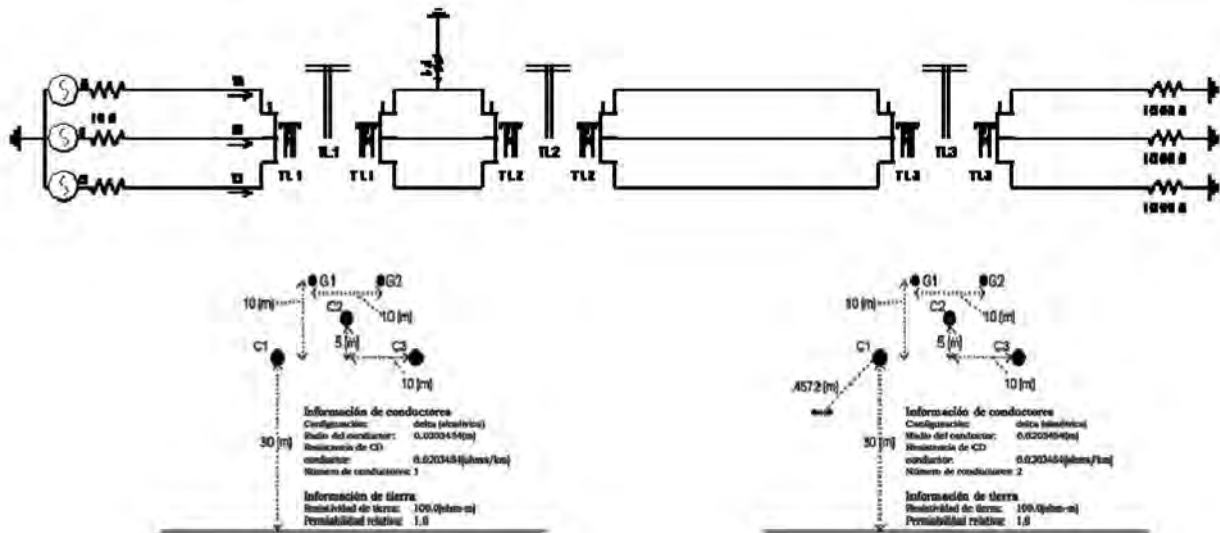


Figura 8. Sistema de prueba radial.

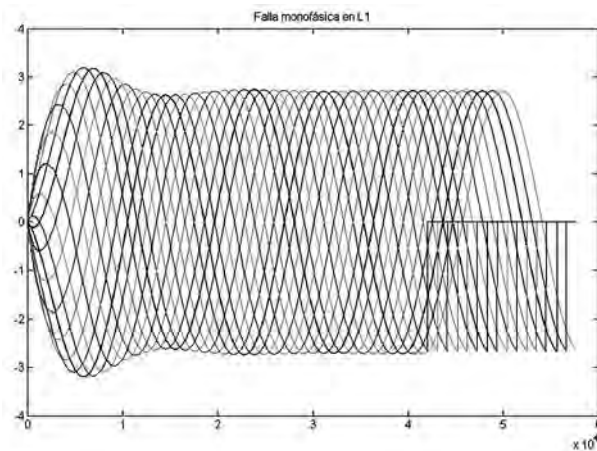


Figura 9. Ejemplo de formas de onda de corriente para fallas monofásicas.

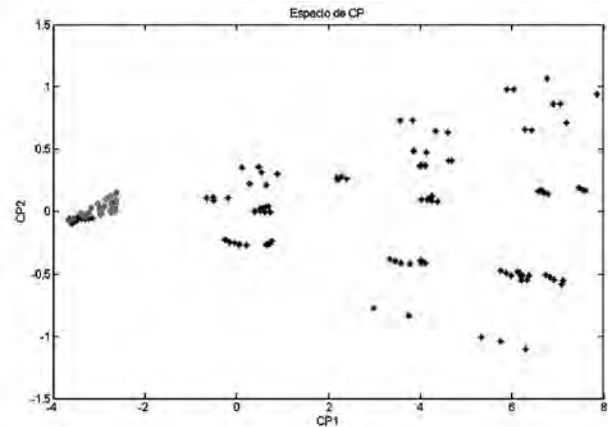


Figura 10. Representación de las ondas viajeras de la figura 9 en el subespacio de CP.

En este caso se simulan 416 casos de fallas monofásicas, que corresponden a 13 fallas internas (10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 95, 97, 99, 99.9% de la longitud de la línea de transmisión interna) y 13 fallas externas (90, 80, 70, 60, 50, 40, 30, 20, 10, 5, 3, 1, 0.1% de la longitud de la línea de transmisión externa) cada una de las cuales se simularon para dieciséis instantes de tiempo distintos.

El porcentaje de efectividad del resultado pretendido es del 94%, no obstante, esto no ha sido completamente satisfactorio.

5 CONCLUSIONES

Es posible utilizar la técnica de ACP con el propósito de obtener una representación en un subespacio de dos dimensiones de las mediciones de corriente obtenidas a partir de un cortocircuito en LT.

Al aplicar el ACP se simplifica el proceso de reconocimiento de las formas de onda de corriente a través de su representación en un subespacio de dos dimensiones, que corresponden a las primeras dos componentes principales más dominantes, cuyos ejes son los eigenvectores asociados a los eigenvalores de mayor valor de la matriz de covarianza de los datos originales.

A partir de los resultados expresados en este trabajo, es posible resolver el problema de localización de fallas en LT a través del análisis de la distancia de cada punto en el plano al eje de separación.

El algoritmo de protección propuestos en algunos trabajos de la actualidad utilizan una frecuencia de muestreo de 1 MHz ($\Delta t = 1$ seg), lo cual no es realizable en los relevadores de protección actuales, que no superan 8 kHz como frecuencia de muestreo, equivalente a 64 muestras por ciclo. Debido a ello, una de

las metas de este trabajo es reducir la frecuencia de muestreo.

Cabe mencionar que los transformadores de corriente (TC) considerados en este trabajo son ideales; sin embargo, poseen un ancho de banda limitado, y actúan como filtros pasa bajos. El ancho de banda práctico de un TP es de 2kHz, mientras que el de un TC es de 10kHz [13]; por esta razón, en este trabajo solo se utilizan ondas viajeras de corriente originados por la falla.

Evidentemente las ondas viajeras en una línea de transmisión se originan, además de por cortocircuitos, por maniobras de apertura y cierre de interruptores. Por lo que, se deberán enfocar los esfuerzos para desarrollar un algoritmo capaz de discriminar entre la onda viajera originada por una falla y por un cortocircuito. Este aspecto no es considerado en los trabajos desarrollados hasta el momento.

REFERENCIAS

- [1] Christopher Chatfield and Alexander J. Collins Introduction to Multivariate Analysis, School on Mathematics, Bath University, Chapman and Hall, London-New York 1980.
- [2] T. W. Anderson An Introduction to multivariate Statistical Analysis, Stanford University, John Wiley and sons. December 1957.
- [3] Murray R. Spiegel Estadística, Harford Graduate Center, Serie Sahum, 2a Edición, España 1991.
- [4] Harvey Gerber Algebra Lineal, Simnon Fraser University, Grupo editorial Iberoamericana, EUA 1992.
- [5] Stefan Van Aelst Principal Component Analysis, Ghent University, Faculty of Sciences, Department of Applied Mathematics and Computer Science, Krijgslaan 281, S9 B-9000 Gent BELGIUM.





Remoción de compuestos de azufre en hidrocarburos mediante reactores químicos y electroquímicos

Harumi González Piedra, Alia Méndez Albores,
Miguel Ángel González Fuentes, Erika Méndez Albores

RESUMEN

Las grandes multas que reciben las refinerías petroquímicas por los impactos ambientales se deben principalmente a que dentro de las torres de destilación, los derivados del petróleo todavía poseen altos contenidos de compuestos de azufre, cuya combustión produce óxidos de azufre que luego se manifiestan en la lluvia ácida. Asociado a esto, con el paso del tiempo, estos compuestos corroen las tuberías, las torres de destilación, los motores y otros equipos donde fluye el hidrocarburo. Debido a las nuevas especificaciones de los combustibles industriales y automotrices, el tema de la desulfuración profunda se ha convertido en una meta clara para la industria del petróleo. La tecnología mayormente empleada en las refinerías para desulfurar es la hidrodesulfuración, la cual se lleva a cabo en reactores que resultan costosos y peligrosos de manejar debido a la necesidad de utilizar altas presiones de hidrógeno y elevadas temperaturas. Tales condiciones se vuelven más extremas cuando se encuentran presentes compuestos como el dibenzotiofeno y sus derivados alquilados (metil y etildibenzotiofeno). En este sentido, la tecnología electroquímica surge como una alternativa al proceso de la desulfuración del crudo, de aceites pesados y de combustibles ligeros lo que ha motivado al diseño de reactores electroquímicos para llevar a cabo métodos más amigables con el medio ambiente y que no requieran de grandes dimensiones. En general, el diseño de este tipo de reactores depende de la fusión de aspectos conceptuales de la tecnología química y de la electroquímica, lo que permitirá contar con reactores electroquímicos útiles para desulfurar combustibles bajo condiciones técnicas y económicas más rentables que los reactores convencionales.

Palabras clave: Hidrocarburo, Hidrodesulfuración, Reactor electroquímico, Dibenzotiofeno.

ABSTRACT

The excessive penalties obtained by the petrochemical industry are mainly due to the production of fuels containing sulfur compounds in distillation towers. The combustion of these fuels causes an environmental damage related to the acid rain. Further more, these fuels polluted with sulfur compounds corrode pipe lines, distillation towers, machinery and other equipments that are in contact with the fuel. Due to the new specifications for industrial and automotive fuels, deep desulfurization has become a clear goal for petroleum industry. Hydrodesulfurization is the technology mainly employed in refineries; however the reactors used during this process are expensive and dangerous due to the use of hydrogen at high pressure and temperature conditions. When some sulfur compounds such as dibenzothiophene and its alkyl derivatives are present, the treatment conditions are still more drastic. In this sense, electrochemical processes have emerged as good alternatives to the conventional ones, for example, in desulfurization of crude and heavy oils. Electrochemical desulfurization is environmentally friendly and does not require large dimension reactors, which represent an advantage particularly attractive. Generally, the design of this sort of reactors depends on the fusion of considerations arising from chemical and electrochemical engineering points of view, which make electrochemical reactors useful for the desulfurization of fuels under more viable technical and economical conditions than those for conventional reactors.

Keywords: Hydrocarbon, Hydrodesulfurization, Electrochemical Reactor, Dibenzothiophene

1 INTRODUCCIÓN

Existe una gran variedad de tecnologías que se han empleado para refinar a los hidrocarburos dependiendo la naturaleza del crudo en la fuente de alimentación, entre las que se incluyen la coquización retardada (*delayed coking*), coquización fluida (*fluid coking*) y la destilación. La coquización retardada es un proceso unitario donde aceites pesados son calentados a 500°C y bombeados de un lado a otro hasta obtener varios productos que van de sólidos a compuestos en fase líquida y vapor, como el nafta, aceites ligeros y pesados y gas. La coquización fluida es similar, excepto que es un proceso en continuo [1]. La destilación es también un proceso empleado para tratar aceites pesados en la fuente de alimentación, donde los componentes son separados aprovechando sus diferentes puntos de ebullición, por lo que, los hidrocarburos más ligeros con bajo punto de ebullición (gasolinas, naftas, etc.) son transportados como vapor en lo alto de la torre, mientras que los hidrocarburos más pesados y densos y con alto punto de ebullición (lubricantes, alquitrán) se obtienen como líquidos en la parte inferior de la torre (figura 1) [2].

Dependiendo del origen del crudo y su refinamiento será el contenido de azufre que posean el petróleo y los productos derivados. Por mencionar algunos ejemplos, el *bitumen* (hidrocarburo semisólido producido mediante la eliminación de las fracciones más ligeras del crudo durante el proceso de refinado) sigue conteniendo altos niveles de heteroátomos de azufre, nitrógeno, oxígeno y metales como níquel, hierro y vanadio [3]. El diesel y la gasolina son ejemplos de combustibles líquidos que también

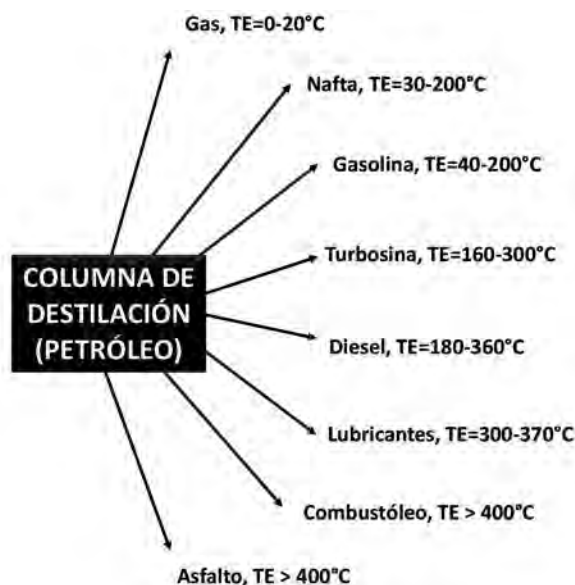


Figura 1. Derivados del petróleo obtenidos durante su refinamiento con su respectiva temperatura de ebullición (TE).

poseen cantidades considerables de azufre en su composición [4].

De los compuestos químicos presentes en el petróleo, los hidrocarburos policíclicos aromáticos azufrados representan un mayor problema debido a que son tóxicos, mutagénicos y carcinogénicos, ya que se ha demostrado que sus isómeros exhiben una gran variedad de grados de actividad [5]. De esta manera, la caracterización detallada de estos compuestos resulta importante no solo en las fracciones pesadas del petróleo, sino también en sus productos derivados y residuos de destilación, ya que su identificación y eliminación son importantes para reducir los riesgos al medio ambiente y a la salud.

En este sentido, la desulfuración de combustibles (diesel y gasolina) representa uno de los mayores objetivos de la industria petroquímica en cuanto al cuidado del medio ambiente, debido a que las consecuencias por las emisiones de dióxido de azufre para la salud humana y el medio ambiente son elevadas. Por ello, el contenido de compuestos azufrados en los productos del petróleo está continuamente regulado y las especificaciones de sus concentraciones en combustibles para motores de combustión interna han sido recientemente reducidas, aunque existe la perspectiva de que en las futuras especificaciones, estos niveles sean cada vez más bajos hasta lograr eliminarlos.

Por lo anterior, es deseable contar con procesos alternos que sean capaces de remover compuestos de

Recibido 22 de octubre, 2015; aceptado 24 de noviembre, 2015

Harumi GONZÁLEZ PIEDRA
Facultad de Ingeniería Química, Universidad Autónoma de Puebla,
CU, C.P 72570. Puebla, Puebla, México
Correo electrónico: hagsph156@hotmail.com

Alia MÉNDEZ ALBORES
Laboratorio de Bioinorgánica Aplicada, Centro de Química-ICUAP,
Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. C.P 72570 Puebla,
Puebla., México
Correo electrónico: alhy_@hotmail.com

Miguel Ángel GONZÁLEZ FUENTES
Correo electrónico: magf_27@yahoo.com
Erika MÉNDEZ ALBORES
Correo electrónico: erika.mendez@correo.buap.mx
Facultad de Ciencias Químicas, Edif. de Posgrado 105 i - 201 A,
Ciudad Universitaria, Universidad Autónoma de Puebla, C.P. 72570,
Puebla, Puebla., México

azufre sin emplear condiciones severas que afecten el número de octanos y cetanos para la gasolina y diesel, respectivamente, además de buscar la viabilidad en cuanto al ahorro de energía durante el diseño y construcción del reactor a emplear.

El objetivo de esta revisión es el de dar a conocer los tipos de reactores y condiciones operacionales utilizados comúnmente en la hidrodesulfuración, así como mostrar el desarrollo de reactores electroquímicos como una alternativa para hacer frente al desafío de la desulfuración.

2 TECNOLOGÍAS ACTUALES PARA DESULFURAR

En la figura 2 se muestran las diversas tecnologías actuales empleadas para desulfurar el hidrocarburo de acuerdo a la forma de operación, ya sea transformándolo o separándolo del producto inicial [6].

La desulfuración de aceites pesados se realiza en su mayoría utilizando una dispersión con metales alcalinos, donde el sodio es comúnmente usado como agente reductor de azufre [7]. En este caso, cada átomo de sodio le transfiere un electrón a las moléculas en los aceites pesados, generando un radical libre para comenzar con la desulfuración química. De esta manera, el sodio reacciona con el azufre para formar Na_2S disperso con la fracción del hidrocarburo. Sin

embargo, este proceso no es comercialmente atractivo, sobre todo para tratar fracciones con puntos de ebullición altos (lubricantes, ceras, asfaltos), principalmente aquellas que contienen concentraciones elevadas de compuestos de azufre y aceites pesados debido: a) al alto costo del sodio, b) problemas relacionados con la generación del sulfuro de sodio (Na_2S) en el proceso, c) imposibilidad de regenerar sodio del Na_2S , d) poca eficiencia debido a la formación de cantidades substanciales de sales de sodio orgánico y e) gran tendencia a formar compuestos de alto peso molecular (componentes poliméricos) como los asfaltenos [8]. Por tal motivo, en la actualidad, el Hidrotreamiento o Hidrodesulfuración (HDS) representa una importante tecnología empleada para reducir los niveles de azufre, así como nitrógeno y trazas de metales presentes en los hidrocarburos.

La hidrodesulfuración es por lo tanto una tecnología comercial y convencional empleada en las refinerías para desulfurar al crudo y sus derivados, utilizando $\text{Co-Mo/Al}_2\text{O}_3$, $\text{Ni-Mo/Al}_2\text{O}_3$ y Ni-W como catalizadores dentro de un reactor en particular (figura 3). Dependiendo la naturaleza de la alimentación y la cantidad de azufre que se requiere remover durante el proceso, puede operar a una temperatura entre 343°C y 426°C y emplear de 3 a 4 MPa (700 a 2500 PSI) de presión, por lo que el proceso requiere del suministro de hidrógeno [8].

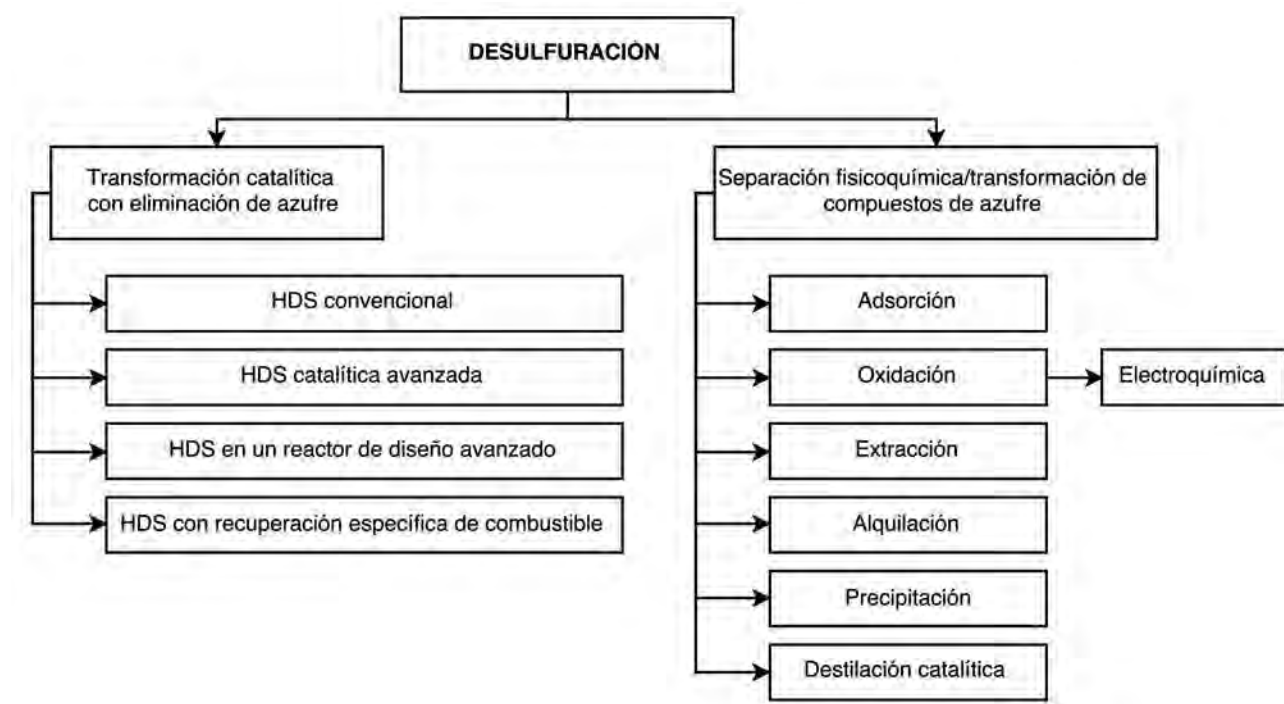


Figura 2. Tecnologías existentes para desulfurar hidrocarburos (HDS= hidrodesulfuración).

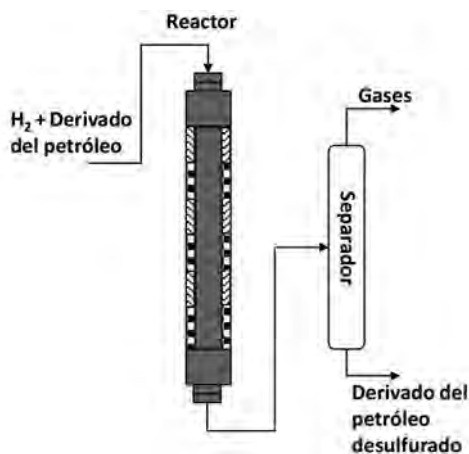


Figura 3. Esquema del reactor empleado en la hidrodesulfuración de aceites pesados [9].

En general, la hidrodesulfuración reduce químicamente los compuestos orgánicos azufrados, particularmente sulfuros, tioles, tiofenos, benzotiofenos, dibenzotiofenos y dibenzotiofenos alquilados, a sulfuro de hidrógeno (H_2S). Sin embargo, se ha demostrado que una fracción substancial de compuestos azufrados se mantiene después de la HDS, como por ejemplo, los dibenzotiofenos mono y polialquilados (principalmente 4,6 dialquildibenzotiofenos) (figura 4) [10]. La resistencia a la HDS del 4,6-dimetildibenzotiofeno y de los 9-alkil dibenzotiofenos (figura 4) se puede explicar por la presencia de grupos metilo en las posiciones 4 y 6, así como la unión en el anillo *cis* que pueden obstaculizar estéricamente al átomo de azufre y así evitar la interacción con la superficie sólida del catalizador durante el proceso de hidrodesulfuración. Así, la reactividad de los compuestos orgánicos azufrados en la hidrodesulfuración está influenciada por el impedimento estérico y la densidad de electrones del átomo de azufre [11, 12, 13].



Figura 4. Dificultad de los componentes azufrados para la hidrodesulfuración.

Por lo que para remover dibenzotiofeno y sus alquilados, se requiere de mayor presión de hidrógeno y altas temperaturas (desulfuración profunda), lo que ocasiona un aumento en el consumo de energía y la disminución de la vida útil del catalizador [14].

Debido a que la HDS es la tecnología petroquímica principalmente empleada en las refinerías para desulfurar hidrocarburos, a lo largo de los últimos años se ha buscado la manera de mejorar el proceso. Algunos de esos cambios han resultado en la modificación de algún factor como: cambiando el tipo de catalizador empleado, aumentando o disminuyendo el tiempo de residencia, o simplemente variando el diseño del reactor (tabla 1).

En la tabla 1 se presentan los diferentes tipos de reactores químicos empleados en la hidrodesulfuración con algunas de las condiciones operacionales más relevantes, así como los porcentajes de remoción obtenidos en cada uno de ellos. Como se puede apreciar, los cambios principales que se han hecho entre cada prueba de hidrodesulfuración radican principalmente en agregar algún agente oxidante para mejorar el proceso, aumentar el tiempo de residencia de la HDS dentro del reactor, aumentando la temperatura del sistema o simplemente cambiando el tipo y concentración de catalizador a emplear.

A pesar de que algunos trabajos reportan porcentajes de remoción por encima del 90% con las variantes implementadas al proceso de HDS (tabla 1), estos cambios no han resultado del todo eficientes para remover dibenzotiofenos y sus derivados alquilados. A continuación se enlistan los tipos de reactores químicos empleados en algunas alternativas a la HDS.

3 REACTORES QUÍMICOS EMPLEADOS EN LA DESULFURACIÓN

Existen diversas alternativas a la hidrodesulfuración [20]:

Biodesulfuración: El fluido a tratar se pone en contacto con una solución acuosa en la que se cultivan bacterias que reducen a los compuestos azufrados presentes en el fluido a azufre elemental.

Reducción catalítica: Los combustibles pasan a través de un lecho catalítico fijo o móvil donde los compuestos azufrados son convertidos a azufre elemental.

Rociado y secado (Spray-Dryer): Los gases de combustión pasan a contraflujo en condiciones turbulentas en un cono donde se atomiza una solución acuosa alcalina, formando una sal absorbente, generalmente basada en calcio.

Tabla 1. Tipos de reactores empleados en el proceso de HDS con algunas de sus condiciones operacionales.

Compuesto	Condiciones operacionales del reactor	% de remoción
Reactor discontinuo (DBT en diesel)	<p>Características del reactor Tiempo de proceso: 300min Temperatura de operación: 25°C [Catalizador]: 2578 mg_{DBT}/Kg_{catalizador}</p> <p>Características del combustible pH del diesel: 9.3 [DBT en diesel comercial]: (2000±15) mg/Kg</p>	Al adicionar ácido acético mejoró la remoción de DBT y otros compuestos aromáticos hasta en un 55% [15]
Reactor Intermitente (DBT en diesel y gasolina)	<p>Condiciones en el reactor Capacidad: 250 mL Temperatura: 60°C Agentes oxidantes: peróxido de hidrógeno H₂O₂ (30% en peso) y Terbutil hidroperóxido (TBHP) (70% en peso) a 6 mol/mol [Catalizador]: vanadio (2 g_{catalizador}/L_{mezcla})</p> <p>Características del combustible Contenido de azufre en el combustible: DBT al 98%: 217 ppm, 4-MDBT al 96%: 206 ppm, 4,6-DMDBT al 97%: 186 ppm.</p>	Conversión de: DBT: 85% 4-MDBT: 72% 4,6-DMDBT: 61% [16]
Reactor trifásico por lotes tipo autoclave (DBT en hidrocarburo)	<p>Condiciones en el reactor Sistema: Autoclave de 500 mL con N₂ Temperatura final: 320-360°C Presión de hidrógeno: 50-70 kg cm⁻² [Catalizador]: 0.2 g_{catalizador}/100 mL_{solución}</p> <p>Características del combustible 0.3 g de DBT disueltos en 100 mL de n- hexadecano</p>	Conversión: 96% Velocidad de reacción: 1.48x10 ⁻⁴ L g ⁻¹ s ⁻¹ Tiempo: 3-4 h de reacción Selectividad: 67.25% mol hacia ciclohexilfenil bicyclohexil [17]
Reactor por lotes (DBT en diesel)	<p>Condiciones en el reactor [Catalizadores]: Cu(5)/Al₂O₃ y Cu(5)/TiO₂ (1,5,10 y 20% en peso de Cu) Agentes oxidantes: H₂O₂: 30% en vol. y (TBHP) al 70% en vol.</p> <p>Características del combustible Hexadecano (99.8%) con 2-MT: 847 ppm de S, 2,5 DMT: 720 ppm de S, BT: 612 ppm de S, DBT: 444 ppm de S, 4- MDBT: 414 ppm de S, 4,6-DMDBT: 387 ppm de S</p>	En un tiempo de 60 min, la remoción fue de: 4- MDBT: 86% 4,6-DMDBT : 76% DBT: 86% [18]
Reactor de lecho fijo (DBT en diesel y gasolina)	<p>Condiciones en el reactor Catalizador: NiMo/TiO₂-Al₂O₃ (10:90), donde [TiO₂-Al₂O₃] de 5, 10 y 95% mol de TiO₂ a pH 9 Flujo del gas: 2.2 L h⁻¹ H₂ Temperatura: 300°C Presión: 30 bar</p> <p>Características del combustible Solución: 0.37 mol DBT/n-hexadecano con 0.5% en peso de azufre.</p>	Tiempo: 4 h Tiempo de reacción: 2-8 h Velocidad de reacción: 2.0x10 ⁻⁷ mol s ⁻¹ g ⁻¹ Remoción: 63% [19]

S= azufre, 2-MT= 2-metiltofeno, 2,5-dimetiltiofeno, BT= benzotiofeno, DBT= dibenzotiofeno, 4-MDBT= 4-metildibenzotiofeno, 4,6-DMDBT= 4,6-dimetildibenzotiofeno.

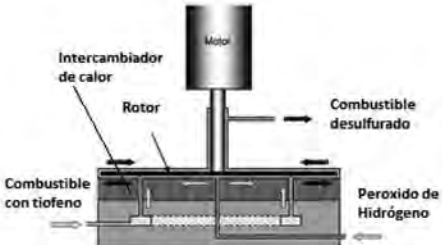
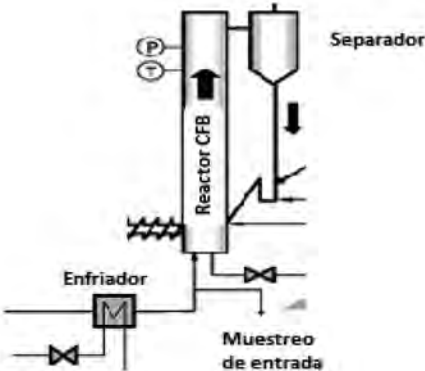
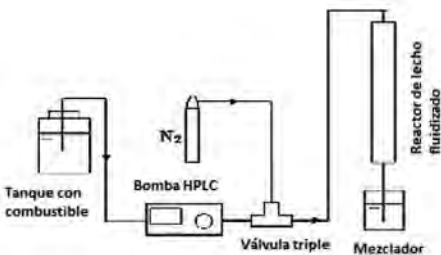
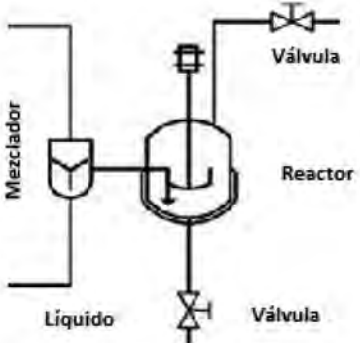
Electroquímico: Permiten degradar compuestos azufrados presentes en medios líquidos ya sea oxidándolos o reduciéndolos mediante un proceso de electrólisis que los convierte en sulfóxidos o sulfonas.

En la tabla 2 se presentan algunos esquemas de reactores químicos que se han empleado en diferen-

tes tratamientos para la desulfuración de hidrocarburo, indicando el porcentaje de remoción del proceso.

De acuerdo a los esquemas de reactores presentados en la tabla 2, se puede apreciar que existen diferentes arreglos de reactores químicos para desulfurar combustibles dependiendo del proceso que se utilice. Sin embargo, una de las características comunes es

Tabla 2. Esquemas de reactores químicos empleados para desulfurar combustibles por diversos tratamientos.

Tipo de Reactor/ desulfuración	Esquema del reactor y/o proceso	Características del reactor
<p>Reactor de Película Cizalla</p> <p>Porcentaje de eficiencia en la desulfuración</p> <p>2-25% [21]</p>	 <p>The diagram shows a reactor vessel with a central rotor driven by a motor. A heat exchanger is located at the top. Fuel containing thiophene enters from the left, and desulfurated fuel exits from the right. Hydrogen peroxide is added to the bottom of the reactor.</p>	<p>Oxidante: H_2O_2 Ácido fórmico al 5% en H_2O_2 al 30% (1:1) Temperatura: 10°C y 70°C Tiempo de residencia: 80 s, y 120 s Agitación: 1500 rpm, 6300 rpm y 19000 rpm rpm=revolución por minuto</p>
<p>Reactor de Lecho Fluidizado Circulante (CFB)</p> <p>Porcentaje de eficiencia en la desulfuración</p> <p>63 – 95% [22]</p>	 <p>The diagram illustrates a CFB reactor system. It includes a fluidized bed reactor (Reactor CFB) connected to a separator. A cooling coil (Enfriador) is wrapped around the reactor. A sampling point (Muestreo de entrada) is located at the bottom. A pressure gauge (P) and a vacuum gauge (V) are also shown.</p>	<p>Temperatura de lecho: 600-800°C $[SO_2] = 1500$ ppm $[CO_2] = 10\%$ Vel. Superficial de lecho: 2.5 m. s⁻¹ Densidad de lecho: 33.3 kg. m⁻³ Altura: 6 m Diámetro Interno: 0.305 m</p> <p>ppm= partes por millón</p>
<p>Reactor de Lecho Fijo</p> <p>Porcentaje de eficiencia en la desulfuración</p> <p>95% [23]</p>	 <p>The diagram shows a fixed bed reactor setup. It includes a fuel tank (Tanque con combustible), a high-pressure liquid chromatography pump (Bomba HPLC), a nitrogen gas source (N₂), a triple valve (Válvula triple), a mixer (Mezclador), and the fixed bed reactor (Reactor de lecho fluidizado).</p>	<p>Adsorbente: 10NiO-CeO₂/7.5Al₂O₃-SiO₂ Tamaño de partícula del adsorbente: 0-125 µm Temperatura y Presión: ambiente $[S] = 1037$ ppm en peso Velocidad de flujo de combustible: 0.1mL min⁻¹ Diámetro de lecho empacado: 7.75 mm Longitud empacada con catalizador: 203.2 mm</p>
<p>Reactor de suspensión</p> <p>Porcentaje de eficiencia en la desulfuración</p> <p>98.3% [24]</p>	 <p>The diagram shows a suspension reactor. It features a mixer (Mezclador) where liquid (Líquido) is added. The mixture then flows into a reactor vessel equipped with an agitator. Two valves (Válvula) are positioned at the inlet and outlet of the reactor.</p>	<p>Catalizador: NiMoS/Al₂O₃ [NiMoS/Al₂O₃] = 23.1(% peso) Temperatura: 320-360°C Presión: 3-5 MPa Vel. de flujo de hidrogeno: 0.56-2.77 L min⁻¹ $[S]_{inicial} = 2200$ ppm</p> <p>$[S]$= concentración de azufre</p>

que para diseñar cualquier reactor se requiere conocer la química básica del proceso a emplear para asegurar la efectividad y mayor eficiencia del mismo.

De acuerdo con los porcentajes de desulfuración de la tabla 2, se puede apreciar que dentro de un reactor de suspensión se obtuvo el 98% de desulfuración uti-

lizando catalizadores como tecnología química aplicada. Por el contrario, en un reactor de película cizalla empleando peróxido de hidrógeno como agente oxidante, solo se obtuvo el 25% de la desulfuración total.

Debido a estos inconvenientes, otras tecnologías como alternativas a la desulfuración han sido plan-

teadas para eliminar o disminuir la cantidad de compuestos azufrados en los hidrocarburos. Como el caso de los métodos electroquímicos, cuya principal ventaja sobre otras técnicas es que opera en condiciones ambientales (presión y temperatura), no se requiere la adición de reactivos y además, es posible el diseño de reactores que incluyen procesos electroquímicos teniendo como base a la tecnología de los reactores químicos ya existentes.

4 TECNOLOGÍA QUÍMICA Y ELECTROQUÍMICA

De las alternativas de desulfuración anteriormente citadas, los procesos electroquímicos presentan la ventaja de que los reactores empleados no requieren de grandes volúmenes y son fáciles de operar. Sin embargo, dicha tecnología ha sido poco aprovechada en el mercado mundial.

Con el objetivo de explorar las capacidades de los métodos electroquímicos en el tratamiento de contaminantes, es importante considerar el campo de la ingeniería electroquímica, que estudia las reacciones electroquímicas, la forma en que se suministra energía y los fenómenos de transporte involucrados, así como la construcción y funcionamiento de reactores destinados a la obtención de productos a partir de la reducción u oxidación por transferencia de electrones [25].

Tal como se puede inferir, la ingeniería química y la ingeniería electroquímica son disciplinas íntimamente ligadas entre sí, especialmente en campos particulares de aplicación de la ingeniería de procesos, tal como se muestra en la figura 5, donde la Ingeniería de los Procesos de Transformación Físico-Química (IPTFQ) se conecta a toda una red de sectores de aplicación [26, 27].

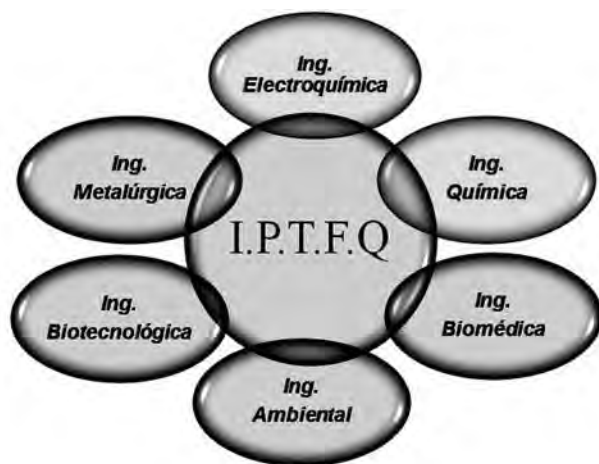


Figura 5. Sectores de aplicación de la Ingeniería de Procesos de Transformación Físico-Química I.P.T.F.Q.

Por otro lado, existe una diferencia marcada entre tecnología electroquímica e ingeniería electroquímica [27]. La ingeniería electroquímica es una ciencia de los procesos electroquímicos basados en conceptos generales expresados matemáticamente. En cambio la tecnología electroquímica involucra la aplicación de los resultados generados a partir de la ingeniería electroquímica.

Una parte importante de los procesos químicos o electroquímicos es la reacción que se llevará a cabo y el reactor donde ocurrirá dicha reacción. Existen diferentes tipos de reactores; pero la forma de este depende del número de fases involucradas y los requerimientos de energía, mientras que el tamaño depende de la velocidad de reacción y la cantidad de producto a obtener [26, 28].

5 REACTORES ELECTROQUÍMICOS EMPLEADOS EN LA DESULFURACIÓN

Sin importar si se trata de procesos químicos o electroquímicos, dependiendo de las condiciones hidrodinámicas y el tiempo de residencia requerido, los reactores se clasifican en intermitentes o batch, de flujo pistón (PFR), reactor continuo de tanque agitado (CSTR) y reactores con recirculación. También pueden configurarse en una combinación de estos [26, 29].

No obstante, existen ciertas condiciones que hacen diferente a un reactor químico de uno electroquímico. Los reactores electroquímicos deben de tener como mínimo un ánodo y un cátodo y estos a su vez pueden estar o no separados por medio de una membrana y, por consecuencia, las reacciones que sobre ellos ocurren [26, 30]. Además, el suministro de corriente para que se lleve a cabo la reacción de interés proporciona un parámetro de control adicional al reactor.

Dependiendo la forma en que operen los reactores electroquímicos pueden ser clasificados como potencioestáticos o galvanostáticos, según se aplique un potencial o una corriente constante, respectivamente. Y pueden ser cerrados o abiertos con un caudal volumétrico igual en la entrada y salida (figuras 6a y 6b) [27].

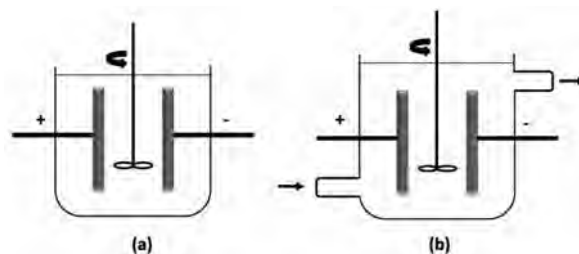
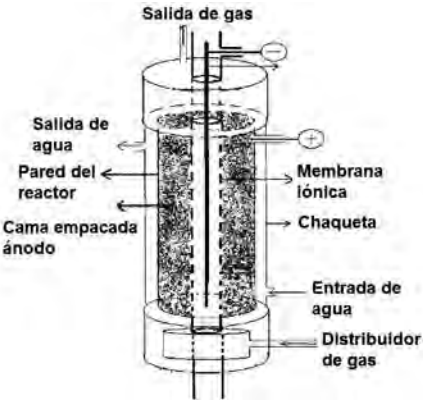
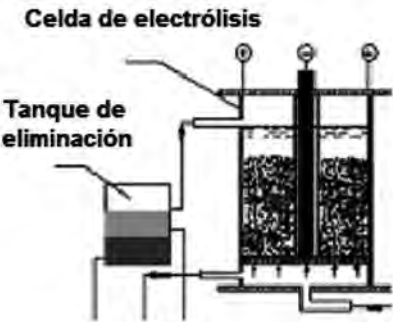
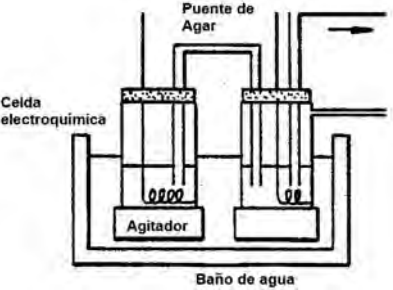
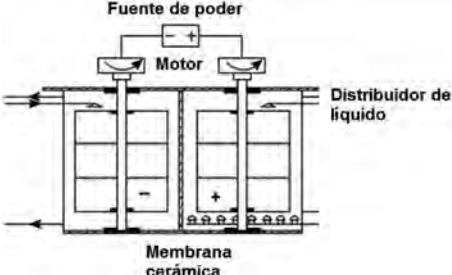


Figura 6. Esquema de reactores electroquímicos ideales (a) cerrados y (b) abiertos.

Dado que un reactor electroquímico cuenta con un electrodo de trabajo (aquel en el que se lleva a cabo la reacción de interés) y se le aplica un potencial o corriente, las ecuaciones de diseño para este tipo de reactores dependen del área superficial del electrodo de trabajo [26]. El área superficial, a su

vez, depende de las dimensiones y geometría del electrodo. Por ejemplo, existen reactores electroquímicos donde los electrodos se encuentran apilados en tipo bipolar, electrodos de lecho fluidizado, electrodos porosos, electrodos en tercera dimensión, entre otros [31,32, 33].

Tabla 3. Reactores electroquímicos empleados para desulfurar combustibles y su porcentaje de eficiencia.

Tipo de reactor	Esquema o imagen del reactor	Características	% de eficiencia
Reactor electroquímico Absorción-oxidación		Electrolito: H ₂ SO ₄ al 1, 5 y 10% Cátodo: Varilla de titanio Ánodo: Malla de platino Densidad de corriente: 1 Am ⁻² Flujo de gas H₂: 1.5 L min ⁻¹ Consumo de energía: 2.22 x 10 ⁻² kW h m ⁻³ Tiempo de electrolisis: 8 h	> 98% [34]
Reactor electroquímico de lecho fluidizado		Electrolito: Nitrato de Cerio, 0.08 mol L ⁻¹ Potencial de celda: 3.2 V Flujo de alimentación: 300 mLmin ⁻¹ Ánodo: CeO ₂ /C Cátodo: Columna de Cobre	92% [35]
Reactor Bio-electroquímico		Tiempo de Reacción: 6 días. Electrodos: Carbono y/o Platino. Bacterias: <i>Desulfovibrio vulgaris</i> y <i>Desulfovibriodesulfuricans</i>	20.1-39.1% [36]
Reactor electroquímico con electrodos cilíndrico rotatorios		Electrolito en catolito: NaCl, 2 mol L ⁻¹ Electrolito en anolito: Hierro quelado con la solución a desulfurar Potencial aplicado: 4 V Ánodo: Titanio Cátodo: Acero inoxidable	> 80% [37]

Por lo anterior, en la tabla 3 se hace un resumen de algunos diseños de reactores electroquímicos, cada uno con formas y características especiales, así como diversos materiales electródicos empleados para desulfurar combustibles contemplando la técnica electroquímica en su proceso.

En la tabla 3 se puede ver que los porcentajes de eficiencia en la desulfuración de los compuestos azufrados varían con el tipo y forma del reactor, con el material del electrodo empleado, así como el potencial aplicado. En este sentido, el material del electrodo no es el único parámetro a considerar para el diseño del reactor electroquímico, existen otros factores como volumen, tiempo de residencia, productos de degradación, forma en que se da la transferencia de materia, relación entre potencial eléctrico y densidad de corriente, tipo de electrolito, etc., que representan temas que ocupan a la ingeniería electroquímica.

Al respecto, durante los últimos años se han patentado diversos tratamientos que hacen uso de la electroquímica para desulfurar hidrocarburos. En la tabla 4 se resumen algunas patentes donde se ha empleado la electroquímica como proceso principal.

Como se puede observar en la tabla 4, los procesos de desulfuración electroquímica han sido enfocados a diversas aplicaciones y condiciones, como tratar los vapores generados en una refinación del crudo, la desulfuración de los compuestos azufrados, así como del agua o del ácido sulfhídrico formados después de la desulfuración.

De esta manera, el diseño de un reactor electroquímico tiene que ser de tal modo que se asegure la transformación del reactivo al producto deseado,

y de ser posible, con un máximo en la eficiencia al menor costo.

6 CONCLUSIONES

Las diferentes tecnologías para la remoción de azufre conducen a una gran variedad de temas de investigación. Sin embargo, solo un enfoque integrado (diseño del reactor o configuración del proceso) permitirá mejorar la eficiencia del proceso de desulfuración, para la generación de combustibles sin emisiones de azufre. Lo que es un hecho es que actualmente se destinan esfuerzos para diseñar una tecnología que logre complementar a la hidrosulfuración, o incluso reemplazarla, y que opere a temperatura y presión ambiente.

El renovado interés ha originado progresos en el trabajo de diseño de los reactores donde se logre una mejor transferencia de masa y se eliminen los espacios muertos. La utilización de reactores electroquímicos se ha convertido en una propuesta acertada desde los puntos de vista técnico, económico y de seguridad. Paradójicamente, para el buen funcionamiento de la economía y comercio en el mundo actual el consumo de petróleo es imperante. El problema radica en que en los últimos años este consumo ha aumentado mientras que el descubrimiento de nuevos yacimientos ha disminuido (por cada barril descubierto, tres son consumidos). La naturaleza finita del petróleo, o la disminución del consumo prevista para las próximas dos décadas, hace que no se quiera invertir en hacer mejoras tecnológicas. Sin embargo, es necesario continuar con la implementación de reactores para

Tabla 4. Patentes que hacen uso de la electroquímica para desulfurar hidrocarburos.

Número de patente	Proceso patentado
[38] US 8,557,101B2	Tratamiento electroquímico de vapores de aceite pesados seguido por una extracción cáustica.
[39] US 8,075,762 B2	Electrodesulfuración de petróleo pesado.
[40] US 8,871,951 B2	Proceso in-situ para la oxidación electroquímica y conversión de los compuestos organoazufrados.
[41] US 6,274,026	Oxidación electroquímica de compuestos de azufre en nafta empleando líquidos iónicos.
[42] US 4,670,113	Activación electroquímica de reacciones químicas.
[43] US 4,954,229	Desulfuración bioelectroquímica del petróleo.
[44] US 3,338,450 A	Proceso para la conversión electroquímica.
[45] US 3,249,522 A	Oxidación electroquímica del ácido sulfhídrico.
[46] US 8,444,843 B2	Disociación electrocatalítica del agua proveniente de la hidrosulfuración de hidrocarburos.
[47] US 6,274,026 B1	Oxidación electroquímica de los compuestos de azufre en nafta empleando líquidos iónicos.
[48] CN 1,782,027 A	Oxidación electroquímica como método para desulfurar diesel.

desulfurar combustibles, pues el uso de estos no cesará repentinamente y su carácter tóxico hace de su tratamiento una necesidad inmediata.

Perspectivas a futuro

Debido a la gran flexibilidad en el diseño de reactores a emplear en la desulfuración de hidrocarburos, otras técnicas pueden ser adaptadas para trabajarse en condiciones útiles, optimizando y mejorando las tecnologías existentes. Constantemente se están estudiando las propiedades y composiciones de los compuestos de azufre y compuestos volátiles azufrados con la finalidad de buscar un proceso selectivo donde se pueda sustituir el hidrógeno empleado en la hidrodesulfuración.

Nuevas ideas pueden emerger, sin embargo, mientras la mayoría de las tecnologías aquí presentadas solamente se quedan en la investigación, otras están luchando por ganarse una posición en el mercado, convenciendo a las industrias para entrar a la competitividad y disponibilidad de tecnologías cada vez más avanzadas. En ese sentido, los reactores en pequeña escala pueden constituir una opción lógica y una alternativa para desulfurar combustibles líquidos tanto para los países industrializados como los que están en desarrollo.

REFERENCIAS

- [1] S. Lee, J.G. Speight, S.K. Loyalka. Handbook of Alternative Fuel Technologies Green Chemistry and Chemical Engineering. Edición Ilustrada. CRC 2007.
- [2] L. Mayer, F. Hortal-Sánchez, F. Tegeder. Métodos de la Industria Química en diagramas de flujo en colores. Parte 2ª: Orgánica. Una visión panorámica y moderna de los métodos de industria química. Editorial Reverté S.A. España, 1987.
- [3] T. McNally. Polymer modified bitumen: properties and characterisation. First Edition. Cambridge, Woodhead Publishing, USA, 2011.
- [4] Qiang P.T, Hu Z.Y, Lou D.M. Regulated and unregulated emissions from a light-duty diesel engine with different sulfur content fuels. Fuel 88 (2009) 1086–1091.
- [5] A.V. Botello, J. Rendón von Osten, G. Gold-Bouchot y C. Agraz-Hernández, Golfo de México: Contaminación e impacto ambiental, diagnóstico y tendencias. 2a. Edición. Univ. J. Autónoma de Tabasco. 2005.
- [6] I.V. Babich, J.A Mouljn Science and technology of novel processes for deep desulfurization of oil refinery streams: a review. Fuel, 82 (2003) 607-631.
- [7] B.G. Hemant, R.D. Srivastava, H. Kee, R.E. Hucko R.E., An Overview of the Chemistry of the Molten-caustic Leaching Process, Coal Preparation, 7 (1989) 1-28.
- [8] G. Brons, R. D. Myers, R. Bearden. Continuous in-situ combination process for upgrading heavy oil. US5,935,421A. August 10, 1999.
- [9] Planta de hidrodesulfuración, recuperado en septiembre de 2015, de <http://gustato.com/petroleo/hidrotratamiento.html>
- [10] C. Song, An overview of approaches to deep desulfuration for ultraclean gasolina, diesel and jet fuel. Catalysis Today 86 (2003) 211-263.
- [11] X. Ma, K. Sakanishi, I. Mochida, Hydrodesulfurization reactivities of various sulfur compounds in diesel fuel, Industrial Engineering Chemistry Research, 33 (1994), 218-222.
- [12] X. Ma, K. Sakanishi, T. Isoda, I. Mochida, Quantum Chemical calculation on the desulfurization reactivities of heterocyclic sulfur compounds, Energy Fuels, 9 (1995), 33-37.
- [13] G.F. Froment, G.A. Depauw, V. Vanrysselberghe, Kinetics of the catalytic removal of the sulphur components from the light cycle oil of a catalytic cracking unit, Studies in Surface Science and Catalysis, 106 (1997) 83-97.
- [14] F. Andreolini, C. Borra, D. Wiesler, M. Novotny. High-efficiency separation and characterization of highmolecular-weight heterocyclic sulfur compounds in fossil fuels by microcolumn liquid chromatography and related techniques. Journal of Chromatography, 406 (1987) 375-388.
- [15] Y.S. Al-Degs, M.A. Al-Ghouti, Influence of diesel acidification on dibenzothiophene removal: A new desulfurization practice. Separation and Purification Technology, 139 (2015) 1-4.
- [16] M.A. Álvarez-Amparán y L. Cedeño-Caero. Desulfuración oxidativa de dibenzotiofenos con VOx/ZrO2-Al2O3. Revista Mexicana de Ingeniería Química 11(2012) 431-438.
- [17] J. A. Toledo-Antonio, M. Pérez-Luna, M. A. Cortes-Jacome, J. Escobar-Aguilar, M.L. Mosqueira-Mondragón, C. Ángeles-Chávez, E. López-Salinas, V. Pérez-Moreno, G. Ferrat-Torres, R.J. Mora-Vallejo, Y.M. Lozada-Cassou. Process for preparing a catalytic composition for the hydroconversion of petroleum fractions. USP 8,946,110 B2, Feb 3, 2015.
- [18] L. Cedeño-Caero, E. Martínez-Abarca, M. Gómez-Díaz y F. Pedraza-Archila, Desulfuración de órganoazufrados presentes en diésel por oxidación y extracción. Parte I. Catalizadores de cobre soportados. Revista Mexicana de Ingeniería Química, 4(2005) 241-252.

- [19] G. Lozano-Hernández. Síntesis y caracterización de catalizadores de NiO-MoO₃ soportados en óxidos mixtos TiO₂-AlO₃ para la eliminación de compuestos azufrados contenidos en diésel. Tesis para obtener título de Licenciada en Química.
- [20] R.H. Perry, D.W. Green. Perry's. Chemical Engineers' Handbook. Editorial McGraw-Hill International Editions, 7a. Edición, 1997.
- [21] B.R. Fox, B.L. Brinich, J.L. Male, R.L. Hubbard, M.N. Siddiqui, T.A. Saleh, D.R. Tyler, Enhanced oxidative desulfurization in a film-shear reactor. *Fuel*, 156(2015), 142-147.
- [22] J. Zhang, C. You, H. Qi, B. Hou, C. Chen, X. Xu. Effect of operating parameters and reactor structure on moderate temperature dry desulfurization. *Environmental Science and Technology*, 40 (2006) 4300-4305.
- [23] X. Xu, S. Zhang, P. Li, Y. Shen, Desulfurization of jet-a fuel in a fixed-bed reactor at room temperature and ambient pressure using a novel selective adsorbent, *Fuel* 117 (2014) 499-508.
- [24] Z. Deng, T. Wang, Z. Wang. Hydrodesulfurization of Diesel in a Slurry Reactor. *Chemical Engineering Science*, 65 (2010) 480-486.
- [25] C. L. Mantell. Ingeniería Electroquímica. Reverté 4º Edición, España, 2003.
- [26] F. Goodridge, K. Scott. Electrochemical Process Engineering A Guide to the Design of Electrolityc Plant. New York, USA: Springer Science + Bussines Media New York, 1995.
- [27] F. Coeuret. Introducción a la Ingeniería electroquímica. Editorial Reverté, S.A. Edición en español, 1992.
- [28] H.S. Fogler. Elements of Chemical Reaction Engineering. Prentice Hall 3ª. Edición U.S.A, 1999.
- [29] O. Levenspiel. El Minilibro de los Reactores Químicos. Reverté, España, 1987.
- [30] V.S. Bagotsky. Fundamentals of Electrochemistry. Moscow, Rusia: Wiley 2a. Edición. 2006.
- [31] M. Maja, P. Spinelli, Chem. A bipolar porous electrode with internal mass transfer for electrochemical reactors. *Chemical Engineering Science*, 47(1992)2915-2920.
- [32] R.Thilakavathi, N.Balasubramanian, C. Srinivasakannan, A. Al Shoaibi, Int. Modeling particulate bed electrode for metal recovery. *International Journal of Electrochemical Science*, 7 (2012)1371-1385.
- [33] J. L. Nava, M. T. Oropeza, G. Carreño, Mass Transport and potential studies in a flow-through porous electrode reactor. Effect of the carbón particle size, used as a porous cathode during the deposition of silverions. *International Journal of Electrochemical Science*. 8 (2013) 11933-11942.
- [34] Ü.T. Ün, A.S. Koparal, Ü.B. Ögütveren. Electrochemical Desulfurization of Waste Gases in a Batch Reactor. *Journal of Environmental Engineering* 133(2007) 13-19.
- [35] W.Wang, S.Wang, H. Liu, Z. Wang. Desulfurization of gasoline by a new method of electrochemical catalytic oxidation. *Fuel*. 86 (2007), 2747-2753
- [36] B.H. Kim, T.S. Kim, H.Y. Kim. Bioelectrochemical desulfurization of petroleum. US 4954229 A. Sep. 4, 1990.
- [37] Y Yu, Y. Liu, G. Guisheng, Rapid regeneration of chelated iron desulfurization solution using electrochemical reactor with rotating cylindrical electrodes. *Catalisys, kinetics and reaction engineering*, 22 (2014) 136-140.
- [38] M.A. Greaney, K. Wang, F.C. Wang. Electrochemical treatment of heavy oil streams followed by caustic extraction. US 8,557,101 B2. Oct 15, 2013.
- [39] M.A. Greaney, C.A. Wright, J.M. McConnachie, H. Freund, K. Wang. US 8,075,762 B2. Dec. 13, 2011.
- [40] E. N. Al-Shafei. Process for in-situ electrochemical oxidative generation and conversion of organosulfur compounds. US 8,871,951 B2. Oct. 28, 2014.
- [41] R.C. Schucker, W.C. Baird, Jr. Electrochemical oxidation of sulfur compounds in naphtha using ionic liquids. US 6,274,026 B1. Aug. 14, 2001.
- [42] A.C. Lewis. Electrochemical activation of chemical reactions. US 4,670,113. Jun. 2, 1987.
- [43] B.H Kim, T.S. Kim, H.Y. Kim. Bioelectrochemical desulfurization of petroleum. US 4,954,229, Sep. 4, 1990.
- [44] B.H Ashe Jr, W. V Childs. Process for electrochemical conversion. US 3,558,450. Jan, 1971.
- [45] P.W. Bolmer. Electrochemical oxidation of hydrogen sulfide. US 3,249,522 A. May 3, 1966.
- [46] M. Elanany, E.Z. Hamad. Electrocatalytic dissociation of wáter for hydrodesulfurization of hydrocarbon feedstock. US 8,444,843 B2, May 21, 2013.
- [47] R.C. Schucker, W.C. Baird, Jr. Electrochemical oxidation of sulfur compounds in naphtha using ionic liquids. US 6,274,026 B1. Aug. 14, 2001.
- [48] L. Chang, V.Y. Shicheng, Z. Zhihua, H. Sheng, L. Weibin, L. Po, W. Guohua, G. Liyan, T. Ran, Z. Shuyan, D. Qin, B.S. Qiu, Z. Hao, Electric chemical oxidizing desulfurizing method of diesel engine. CN 1782027 A. Jun. 7 2006.



CALENDARIO DE REINSCRIPCIÓN PRIMAVERA 2016

PUBLICACIÓN DE OFERTA ACADÉMICA

03
NOV



TUTORÍAS

17-30
NOV

CONSULTA
LOS HORARIOS
DE TUTORÍAS

CAPTURA DE CALIFICACIONES

01-02
DIC

PROYECCIONES DEFINITIVAS EN LÍNEA

08
DIC

PUBLICACIÓN DE CITAS EN LÍNEA

20
NOV

FIN DE CURSOS Y EXÁMENES

30
NOV

PROYECCIONES
MANUALES
A CARGO DE LA
COMISIÓN DE
PROYECCIONES

SOLICITUD DE PROYECCIONES

09-14
DIC

REINSCRIPCIONES

10-16
DIC

BAJAS

06-15
ENE

IMPRESIÓN DE PÓLIZA Y PAGO

06-19
ENE

INICIO DE CURSOS

04
ENE

LÍMITE DE PAGO

19
ENE

NOTA: Cualquier duda sobre el proceso la puedes consultar con tu tutor, o en el "Manual de Procedimientos para la Reinscripción", que se encuentra en la sección Alumnos de la página www.ingenieria.buap.mx

Medidor de energía calorífica de un generador de vapor, mediante un canal parabólico solar

Fernando O. González Manzanilla, Ángel Pérez Coyotl,
Luis A. Gaspariano, Carlos Muñoz Montero

RESUMEN

La principal función del medidor, es cuantificar la energía colectada mediante el aumento de temperatura en el agua, en fase vapor, el cual circula en un Sistema generador de vapor, formando un ciclo Rankine y el fluido se calienta mediante la concentración del canal parabólico de los rayos solares. Se extraen datos en diversos puntos mediante sensores de temperatura, los cuales enviarán información al PIC. El cambio de las estaciones durante el año presenta una diversidad de información que es posible cuantificar a través del comportamiento del Sistema.

Palabras clave: Canal parabólico, Vapor, Energía solar, Sensor, Temperatura.

ABSTRACT

The main function of the meter, to quantify the energy collected by the temperature increase in the water vapor, which flows in a steam generating system, forming a Rankine cycle fluid heated by concentrating parabolic channel sunlight. Data is extracted at various points by temperature sensors, which send information to the PIC. The seasons change during the year presents a variety of information that is possible to quantify through behavior of the system.

Keywords: Canal parabolic, Steam, Solar energy, Sensor, Temperature.

1 INTRODUCCIÓN

En la actualidad existe una gama muy grande de equipos para realizar mediciones de temperatura, sin embargo para visualizar y medir energía proveniente de un proceso foto térmico no se encuentran disponibles con facilidad, por lo cual se recurrió al diseño electrónico y se desarrolló un medidor de temperatura y energía térmica, diseñado a la medida de los requerimientos del generador de vapor solar con el que cuenta la Universidad Politécnica de Puebla, en el cual se hacen mediciones y se estima la energía producida.

Recibido 6 de octubre, 2015; aceptado 3 de noviembre, 2015

Fernando O. GONZÁLEZ MANZANILLA, Ángel PÉREZ COYOTL, Luis A. GASPARIANO, Carlos MUÑIZ MONTERO
Universidad Politécnica de Puebla, Tercer Carril del Ejido "Serrano" s/n San Mateo Cuanalá. Juan C. Bonilla, C.P. 72640, Puebla, Puebla, México.

El medidor de energía, utiliza el PIC16F877A, un LCD, sensores de temperatura, así como el software utilizado para este proyecto PIC C. Además la metodología de cómo fue realizada la programación y el tipo de programador que se utilizó en el desarrollo de este prototipo son descritos en el presente trabajo.

2 DESARROLLO EXPERIMENTAL

Se requiere conocer las ecuaciones que rigen el comportamiento térmico utilizado en transferencia de calor, con el fin de ser programadas en el PIC. Se consideró un elemento delgado con forma de casco cilíndrico, de espesor Δr , en un cilindro largo. Suponga que la densidad del cilindro es ρ , esta consideración se hace por ser el tubo de absorción donde se concentran los rayos solares y donde circula el fluido, el calor específico es C y la longitud es L . El área del cilindro, normal a la dirección de transferencia de

calor en cualquier lugar, es $A=2\pi rL$, en donde r es el valor del radio en ese lugar.

Siendo:

$E = \text{Energía}$

$V = \text{Volumen y/o masa}$

$C = \text{Calor específico}$

$\rho = \text{Densidad del agua}$

$\Delta T = \text{Diferencia de temperatura}$

$T = \text{Temperatura}$

$$\Delta E \text{ sistema} = E_{\text{ent}} - E_{\text{sal}} \quad (1)$$

$$\dot{Q}_r - \dot{Q}(r + \Delta r) + \dot{E}_{\text{gen, elemento}} = E_{\text{elemento}} / \Delta t \quad (2)$$

$$\Delta E_{\text{Elemento}} = E(t + \Delta t) - E_r = mc(T(t + \Delta t) - Tt) \quad (3)$$

$$\Delta E_{\text{Elemento}} = E(t + \Delta t) - E_r = \rho c A \Delta r ((Tt + \Delta t) - Tt) \quad (3.1)$$

$$E = V C_p \rho (\Delta T) \quad (4)$$

$$\text{Eficiencia} = \left\{ \frac{E_{\text{Entrada}} - E_{\text{Salida}}}{E_{\text{Entrada}}} \right\} * 100 \quad (5)$$

El funcionamiento del generador de vapor es el siguiente: el inicio es el depósito de agua, en la cual la condición inicial es que exista agua, cumplida la condición el agua circula a través de una bomba la cual está programada por tiempos, este fluido pasa por el pre calentador y este pre calentador como su nombre lo indica calienta el agua del depósito ini-

cial y al calentarse el agua evita un choque térmico entre el agua fría y el generador de vapor solar puesto que ambos tienen temperaturas y/o energías diferentes; el agua pasa por el generador de vapor donde sufre un cambio de estado de líquido a vapor a través del canal parabólico, este canal parabólico tiene una potencia aproximada de 8 kW; a la salida del generador de vapor se cuenta con un separador de vapor y agua. Una vez que cedió calor, el agua regresa al depósito, con la variante de ser agua caliente (60°C), para ser nuevamente circulada por medio de la bomba a hacer el ciclo Rankine y el vapor se envía a otro lugar. Está planeado colocar una turbina en este lugar que se acoplará a un generador de energía eléctrica, o, se podría enviar este vapor a un intercambiador de calor para calentar agua de regaderas. De acuerdo a los datos producidos por la estación meteorológica de la Universidad Politécnica de Puebla, la radiación solar promedio es de 985 W/m². Se presenta a continuación el diagrama a bloques del generador de vapor por medio de energía solar (figura 1).

2.1 El recurso solar

El recurso solar en México es constante en casi todo el territorio nacional, para el caso particular de la planicie del Valle de Puebla, existen condiciones favorables, sin embargo son pocos los meses que presentan afectaciones en el índice global de radiación solar incidente. Se muestra en la gráfica de la figura 2 la radiación incidente que se ve afectada por nubosidad producto de las lluvias recurrentes por fenómenos meteorológicos, como entrada de ciclones y huracanes. Solo en meses muy marcados, el

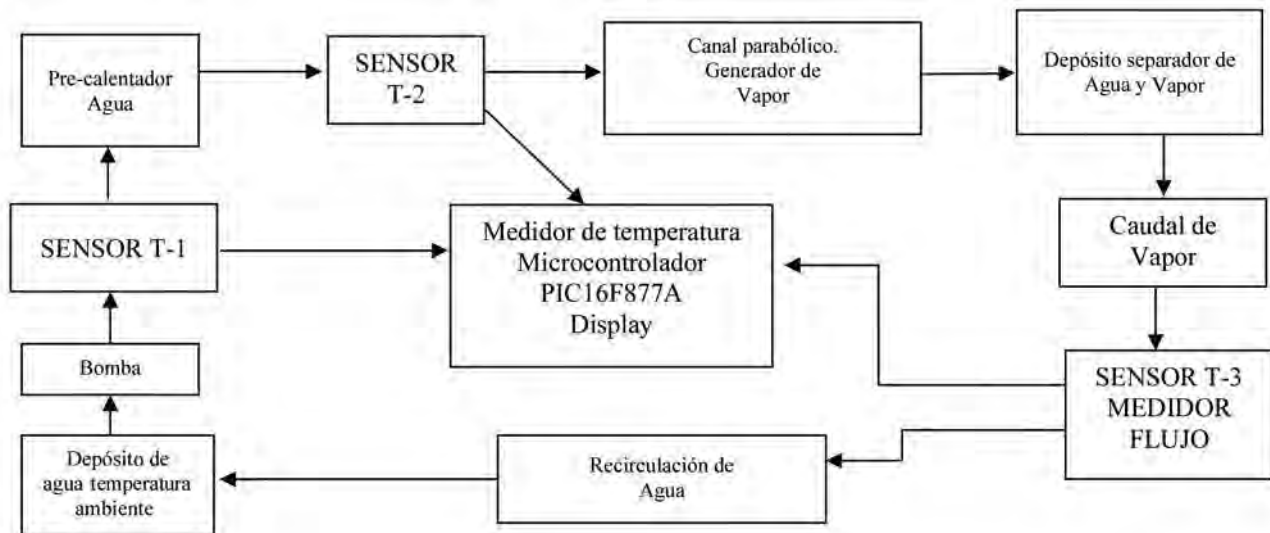


Figura 1. Diagrama a bloques del generador de vapor solar.

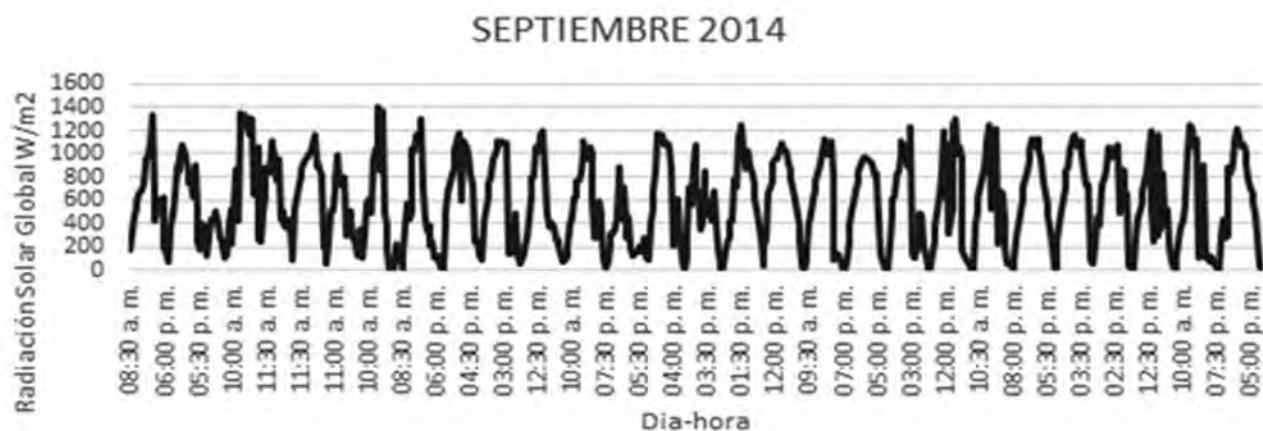


Figura 2. Gráfica de comportamiento solar en el mes de septiembre de 2014. El cual presenta deformaciones debido a la nubosidad o lluvias durante el mes.

clima (caso particular de septiembre) es muy similar a años anteriores, por lo cual se afecta la potencia solar obtenida del sistema, Por ser requerido un elemento comparativo en el presente trabajo, se utiliza la gráfica de la figura 2.

En las coordenadas geográficas del sistema Latitud Norte 19°05'42" Longitud Oeste 98° 22'05.94 altura 2,229 msnm, situadas en la Universidad Politécnica de Puebla.

La respuesta diaria tiene la forma similar a una campana de Gauss, cuando la radiación solar es favorable, pero en el caso anterior se presenta algún tipo de nubosidad y afecta de manera notoria la gráfica y sobre todo se ve reflejada en la potencia producida por el Canal Parabólico, generador de vapor solar.

2.2 Diseño Electrónico

Se inicia el programa PIC-600, al abrirse el programa se selecciona la familia 16FXXXX. Se carga el archivo a grabar en PIC, se verifican errores. En el PIC se requiere de 20 MHz para programar una función de reloj, con 200 ns en ciclo de instrucción y las características analógicas: convertidor analógico digital 10 bit para 8 canales analógico al digital, el ciclo de borrado/escritura hasta de 100000 en memoria típica y el ciclo de borrado/escritura hasta de 1000000 en memoria EEPROM, RAM de 368 x 8 bytes y EEPROM 256 x 8 bytes con retención de datos de hasta 40 años, voltaje de alimentación de 5V, entre otras características. El bus de datos de un módulo LCD puede funcionar como un bus de 8 bits o como un bus multiplexado de 4 bits. Esto permitiría ahorrar 4 pines al micro controlador utilizado pero complicaría mucho el control del LCD ya que habría que multiplexar los datos.

Al multiplexar, solo utilizaríamos los pines del D4 al D7, y primero se retransmitirían los bits más significativos y luego los menos significativos.

Para la programación se utilizó el software PIC MUC C Compiler V.4. Con esta herramienta se podrá programar el micro controlador, y en este programa se realizó la lógica y código de programación.

Para medir la temperatura se utilizó el sensor de temperatura LM35 con una precisión calibrada de 1°C. Su rango de medición abarca desde -55°C hasta 150°C. La salida es lineal y cada grado centígrado equivale a 10 mV, por lo tanto: 150°C = 1500 mV y -40°C = -400 mV.

El código de programación del micro controlador consiste en leer cuatro variables analógicas que son las temperaturas.

Procedimiento de código: se declaran las librerías del programa y las variables a utilizar, en este caso son de tipo flotante. Se declara el LCD, así como el tipo de micro controlador, se habilitan los puertos a utilizar del micro controlador, se inicializa el LCD, y se inicia la lógica de programación. Se colocan las leyendas que aparecerán en el LCD, se leen los puertos analógicos y estos dan la temperatura. Para que se tenga la temperatura correcta se realiza un arreglo, después se calculan las energías 1 que es el generador de vapor y la energía 2 que es el pre calentador, a continuación se calcula la eficiencia del sistema en general y obtenemos los datos esperados.

3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

De acuerdo con las simulaciones, el programa desarrollado proporciona resultados satisfactorios, por la

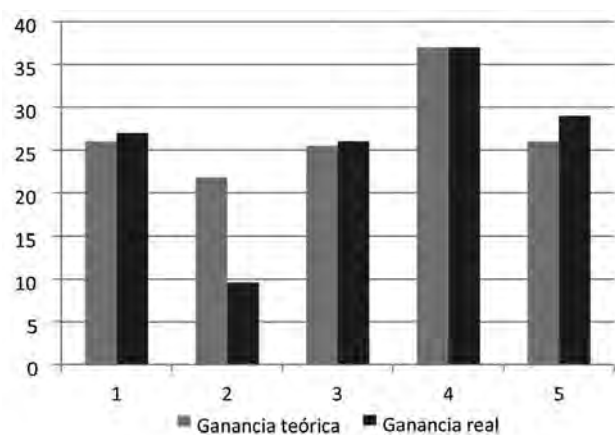


Figura 4. Comparativo de ganancia de temperaturas teóricas y reales.

Como se puede ver hay un error de aproximación significativa y la resolución es 4.16% dando un enfoque fiable para ser el primer desarrollo tecnológico, por lo que se debe seguir para ajustar. El otro equipo de medición con el que comparar era un multímetro temperatura BK exactitud de medición con un termopar de tipo K como un sensor de temperatura. Las pruebas se realizan en un día soleado entonces 1070 W/m² medidos como referencia con la gráfica de barras comparativas de la figura 4. Se observa que las mediciones del sistema son bastante aproximadas. Por lo cual los sistemas son deficientes porque dependen

del clima y los materiales utilizados en su construcción y la eficiencia es muy similar a lo calculado y en comparación a la energía de entrada calculada, esto significa que el medidor de energía es confiable.

4 CONCLUSIONES

- Se diseñó y construyó el dispositivo deseado con una respuesta aproximada a la teórica (figura 5). Se realizarán los ajustes correspondientes para colocar el sistema de medición de la temperatura en la estructura del generador de vapor.
- En la radiación se observó que en la actualidad es superior a otros años.
- Se pone en práctica la integración interdisciplinaria para lograr el desarrollo de proyectos que aporten nuevo conocimiento.
- Las estaciones del año con los cambios meteorológicos afectan directamente los resultados mostrados en el medidor de energía.

Trabajo futuro

- Desarrollar un solarímetro que sea compatible al medidor de energía, para lograr una comparación de eficiencia con mayor grado de confiabilidad.
- Utilizar sensores de grado industrial, a fin de realizar mediciones confiables si bien presentan distancias significativas.

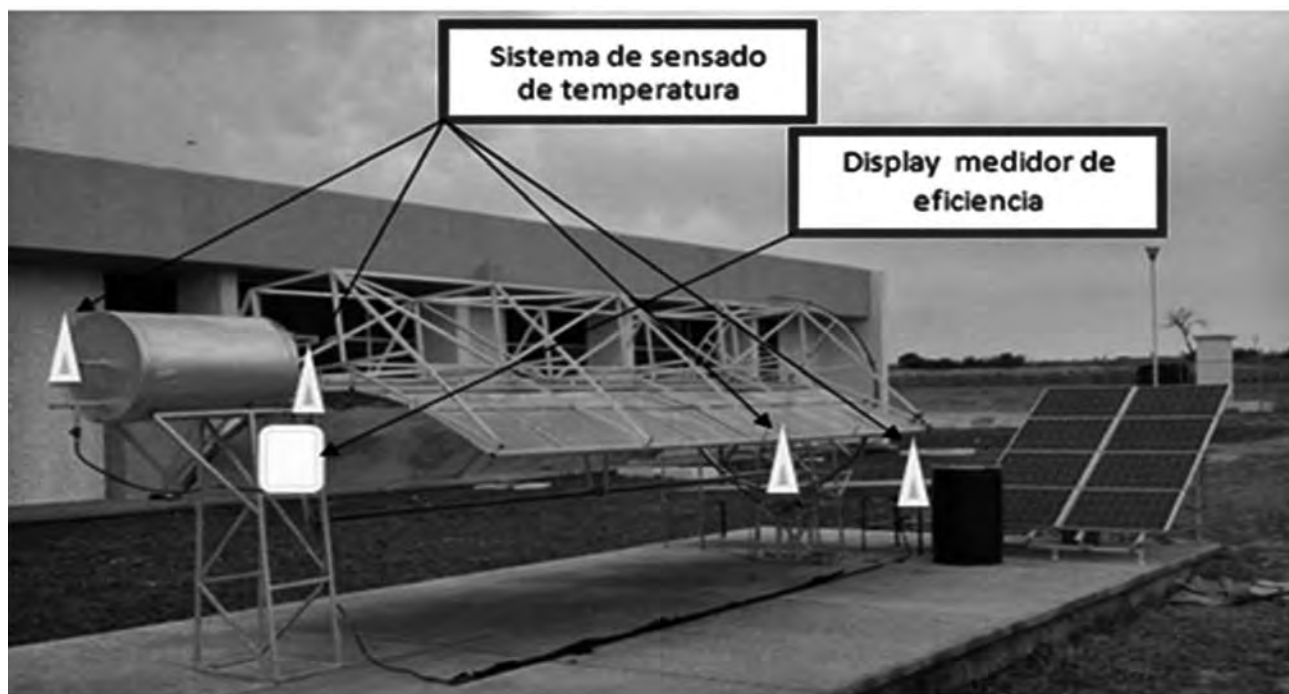


Figura 5. Fotografía con el generador solar mediante un canal parabólico con la ubicación del equipo de medición y sensores.

- Integrar este sistema a un control general centralizado mediante un PLC, incluyendo el actual sistema de seguimiento solar.

AGRADECIMIENTOS

Al CONACYT- FOMIX 2009 por el apoyo para la construcción del generador de vapor solar.

REFERENCIAS

- [1] Catálogo TraversTool S. de R.L. de C.V. Capítulo de A precisión.
- [2] Catálogo NEWARK IN ONE capítulo 9 equipos de prueba y medición.
- [3] Yunus A. Gengel, Transferencia de calor y masa. Mc Graw-Hill. Interamericana
- [4] González Manzanilla Fernando Osvaldo. Generador de vapor por medio de energía solar. UPPUE.
- [5] Microchip <http://ww1.microchip.com/downloads/en/devicedoc/39582b.pdf>. Manual de micro controlador PIC16F877A.
- [6] UNAM <http://www.cie.unam.mx/ojs/pub/Termodinamica/Termo.pdf>
- [7] Microchip [http://www.microchip.com/conference/Tutorial Descriptivo del PIC18Fxxxx](http://www.microchip.com/conference/Tutorial%20Descriptivo%20del%20PIC18Fxxxx).
- [8] Sensores <http://www.x-robotics.com/sensores.htm#LM35>.
- [9] <http://www.wikipedia.com>
- [10] Microchip <http://ww1.microchip.com/downloads/en/devicedoc/39582b.pdf>
- [11] Calzada Martínez Juan Carlos. Tesis: Generación de vapor por medio de un canal parabólico UPPUE.
- [12] Moreno Barrera Oscar. Tesis: Ajuste óptico de un horno solar en configuración de doble reflexión. UPPUE.
- [13] Manrique Valdez J.A. Termodinámica. Alfa omega. Oxford
- [14] Ayuda de programa PIC Ccompiler
- [15] www.sterem.com/pic600



¿Le interesa un espacio en nuestra revista?

CONTÁCTENOS

-  posgrado.fi.buap@gmail.com
-  <http://investigacionyposgradofi.blogspot.mx>
-  [facebook.com/posgrado.ingenieria.buap](https://www.facebook.com/posgrado.ingenieria.buap)
-  @POSGRADO_FI

DDC 

Departamento de Difusión y Comunicación de la Facultad de Ingeniería

Edificio EMA2
Cubículo Dos
Ciudad Universitaria

Comunícate con tu Facultad

 comunicate.fi@gmail.com

Avances de los biocombustibles útiles para su uso en la ingeniería

Laura A. Paniagua Solar, S.A. Gamboa

RESUMEN

La búsqueda de nuevas fuentes de energía ha sido un común denominador de la política energética alrededor del mundo. En las últimas décadas además de la seguridad energética se han sumado otras preocupaciones y motivaciones para reducir la dependencia en combustibles fósiles, como son la volatilidad de los precios y las crisis políticas en regiones petroleras, el acceso a la energía y el cambio climático. La bioenergía ofrece respuestas a estas inquietudes y encierra además múltiples oportunidades de negocios y creaciones de empleos, es la componente energética que se obtiene de diferentes tipos de biomasa o compuestos orgánicos entre los que se encuentran cultivos energéticos, residuos forestales, grasas de origen vegetal o animal, residuos orgánicos, entre otros. Los procesos de conversión de la biomasa en energía, depende del tipo de materia prima que se utilice, y van desde la quema directa de leña para la cocción de alimentos y la aplicación de reacciones químicas dominadas hace doscientos años, hasta los procesos más sofisticados de biotecnología y genética. Los biocombustibles son una solución potencialmente atractiva para reducir la intensidad del carbono producido en el sector del transporte, y hace frente a los problemas que conciernen a seguridad energética. La demanda de la primera generación de biocombustibles está creciendo con mayor intensidad y ella puede competir en costos con la gasolina sin necesidad de subsidios de dependencias gubernamentales. Algunos países en desarrollo están llevando a cabo la producción de su propio etanol, impulsados por los altos costos del petróleo. En estudios recientes los potenciales de la bioenergía difieren considerablemente entre las diferentes regiones, el factor principal para las grandes potencialidades de la biomasa es la disponibilidad de las tierras agrícolas excedentes.

Palabras clave: Biocombustibles, Biomasa, Generación de biocombustibles, México, Bioetanol, Biodiesel, Hidrógeno.

ABSTRACT

The search for new energy sources has been a common denominator of energy policy worldwide. In recent decades, in addition to energy security they have added other concerns and motivations to reduce dependence on fossil fuels, such as price volatility and political crises in oil regions, access to energy and climate change. Bioenergy offers answers to these concerns and also contains multiple business opportunities and job creations, it is the energy component that is obtained from different types of biomass and organic compounds including energy crops are, forestry waste, vegetable fats or animal, among other organic waste. The process of conversion of biomass into energy, depends on the type of raw material used, and range from direct burning of firewood for cooking and the application of chemical reactions dominated two hundred years ago, even the most sophisticated processes biotechnology and genetics. Biofuels are a potentially attractive solution for reducing carbon intensity produced in the transport sector, and face problems concerning energy security. The demand for first generation biofuels is growing more intense and she can compete on cost with gasoline without subsidies from government agencies. Some developing countries are conducting their own production of ethanol, driven by high oil prices. Recent studies bioenergy potentials differ considerably between different regions, the main factor in the great potential of biomass is the availability of surplus agricultural land.

Keywords: Biofuels, Biomass, Biofuel generation, Mexico, Bioethanol, Biodiesel, Hydrogen.

Recibido 20 de agosto, 2015; aceptado 6 de octubre, 2015

Laura A. PANIAGUA SOLAR
Benemérita Universidad Autónoma de Puebla Avenida San Manuel
S/N México C.P 72000.
Correos electrónicos: lapas@ier.unam.mx, laura.paniagua@correo.
buap.mx

S.A. GAMBOA
Instituto de Energías Renovables, Universidad Nacional Autónoma
de México, Privada Xochicalco S/N, Temixco, Morelos. C.P 62580.

1 INTRODUCCIÓN

1.1 ¿Qué son los biocombustibles?

Los biocombustibles son aquellos recursos producidos de las fuentes renovables como son las plantas o desechos orgánicos a las cuales se les denomina biomasa. Pueden ser líquidos, sólidos o gaseosos y su finalidad es liberar la energía que contienen en sus componentes químicos mediante una reacción de combustión. Existen varias razones para que los biocombustibles, puedan ser considerados como una tecnología relevante en el transporte para los países industrializados, como para los países en desarrollo, incluyendo la seguridad energética, las preocupaciones ambientales, y las cuestiones socioeconómicas [1, 2, 4].

1.2. Generación de biocombustibles

Para hablar de biocombustibles se deben mencionar las diferentes clasificaciones que existen, dependiendo de la materia prima empleada en su elaboración y la tecnología empleada para producirlos, en base a esto se tiene catalogados como a continuación se presenta.

2 PRIMERA GENERACIÓN DE BIOCOMBUSTIBLES

Son los biocombustibles que provienen de cultivos alimenticios como se observa en la figura 1 y que se procesan por medios convencionales, como el bioetanol, que se obtiene de la caña de azúcar como se observa en la figura 2, la remolacha o el biodiesel que proviene de la semilla del cártamo o girasol como se observa en la figura 3. La mayoría de los estudios han puesto de manifiesto que la producción de biocombustibles de la primera generación a partir de materias primas actuales resultan en una reducción de las emisiones del orden del 20-60% en comparación con los combustibles fósiles [1, 2, 5].

Esta primera generación de biocombustibles puede ofrecer algunos beneficios para mejorar la seguridad de la energía doméstica. Pero existe una gran preocupación en el abastecimiento de esta materia prima, incluyendo el impacto que puede tener en la biodiversidad y el uso de la tierra, ya que compete con los cultivos alimentarios [3, 4, 6, 11].

Una primera generación de biocombustibles (por ejemplo biodiesel [bioésteres], bio-etanol, y biogás) son característicos por su capacidad de ser mezclados en bases de combustible-petróleo y combustionados

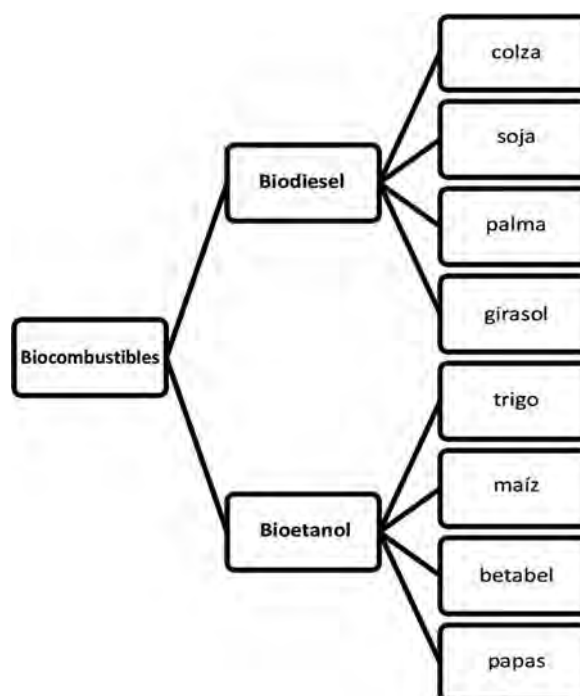


Figura 1. Biocombustibles que provienen de productos alimenticios.



Figura 2. Caña de azúcar.



Figura 3. Semilla de girasol.

en motores de combustión interna, y distribuidos a través de la infraestructura existente, o por el uso de

la tecnología de vehículos alternativos en existencia (como los vehículos adaptados a la flexibilidad de combustibles) o vehículos de gas natural [1, 4, 7, 8].

La producción de la primera generación de biocombustibles es comercializada hasta la fecha con al menos 50 billones de litros que se producen anualmente.

También hay otros nichos de biocombustibles, tales como el biogás, el cual es derivado por el tratamiento de la digestión anaerobia del estiércol y otros materiales de la biomasa. Sin embargo, el volumen del biogás usado en el transporte es relativamente muy pequeño en nuestros días, pero se sabe que irá en aumento [1,6,7,9].

A pesar de estar dando resultados favorables, la primera generación de biocombustibles parece crear cierto escepticismo en la comunidad científica ya que existe la preocupación acerca de los impactos ambientales y el balance del carbono, que establece un límite en el incremento y la producción del mismo [2, 5, 7, 9,11].

La ventaja de estos biocombustibles es que en la combustión solo presentan un ciclo de dióxido de carbono, tienen un considerable potencial ecológico, presentan algunos beneficios ambientales, ecológicos y de consumo cuando son utilizados, pero además son biodegradables y contribuyen a la sustentabilidad [2, 9, 10, 12].

La principal desventaja de los biocombustibles de la primera generación es el debate entre “combustible vs alimentos”. Una de las razones para aumentar el precio de los alimentos es el aumento en la producción de estos combustibles. Las tierras destinadas a cultivos alimenticios en México se distribuyen como se observa en la figura 4, donde es notorio que el 48% de la siembra y la cosecha está destinada para los granos como el maíz. México tiene la oportunidad de producir biocombustibles de primera generación aprovechando tierras de baja productividad sin perjudicar la producción de alimentos [4,6,9,11,13].

2.1 Bioetanol

Es de vital importancia saber que en los últimos 10 años la producción de estos biocombustibles se ha incrementado. Entre 2000 y 2015, por ejemplo, la producción de “bioetanol”, uno de los biocombustibles más estudiado y utilizado por muchos países como se observa en la figura 5, se incrementó de 4,519 millones de galones en el año 2000 a 21,916 millones de galones en el año 2010. El incremento de esta producción ha sido impulsado por las intervenciones gubernamentales [5, 9, 13, 15].

Avance de Siembra y cosechas Otoño-Invierno 2014
Riego+Temporal

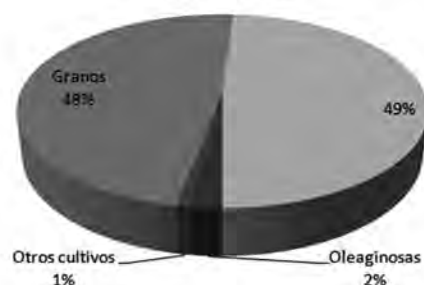


Figura 4. Resumen Nacional de Avances de Siembra y Cosecha. Fuente elaborado por el servicio de información agroalimentaria y pesquera (SIAP) con información de la SAGARPA (2013).

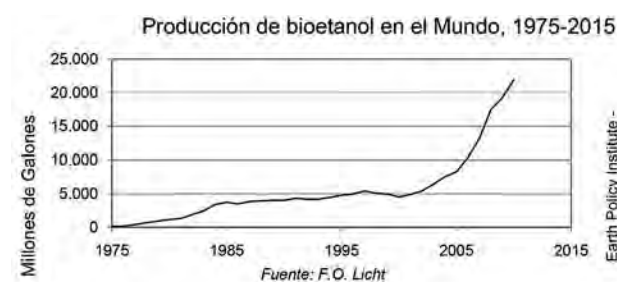


Figura 5. Producción de bioetanol en el Mundo, 1975-2015.

Este biocombustible “bioetanol” puede mezclarse con gasolina. Estas mezclas se conocen como “gasohol” E10. Esta mezcla se da con un 10% de etanol (que se obtiene de la fermentación de cultivos agrícolas o de residuos agrícolas) y el 90% de gasolina que pueden ser usados en motores de combustión interna (ICEs), o quemarse puro en motores de encendido de chispa ligeramente modificados. Los alcoholes que pueden ser usados en los ICEs sin ningún problema son el metanol (CH_3OH), etanol ($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$), propanol ($\text{C}_3\text{H}_7\text{OH}$), el butanol ($\text{C}_4\text{H}_9\text{OH}$), sin embargo solo los dos primeros alcoholes son técnica y económicamente convenientes como combustibles para estos ICEs [5, 7, 9, 15].

Un litro de etanol contiene aproximadamente el 66% de la energía suministrada por un litro de petróleo, pero también se sabe que posee un nivel más elevado de octanaje y, mezclado con gasolina para el transporte mejorará el rendimiento, además reduce las emisiones de monóxido de carbono, hidrocarburos sin quemar y carcinógenos. También su combustión provoca una reacción más fuerte con el nitrógeno de la atmósfera, lo que puede resultar en un aumento marginal de los gases de óxido de nitrógeno. Este biocombustible contiene solo una cantidad ínfima de azufre. Por lo tanto la mezcla de gasolina y etanol

ayuda a reducir el contenido de azufre del combustible y también reduce las emisiones de óxido de azufre que es uno de los componentes de la lluvia ácida y además es carcinógeno [1, 5, 18, 20].

Como se puede observar en la tabla 1, Estados Unidos es el productor de etanol más grande del mundo con una producción de 11,993 millones de galones. Esto se ha logrado con fuertes incentivos financieros para garantizar la producción de este biocombustible [1, 5, 19, 20].

Tabla 1. Producción de Etanol en los 10 países líderes del mundo 2010.

País	Producción Millones de Galones
Estados Unidos	11,993
Brasil	7,270
China	555
Canadá	304
Francia	277
Alemania	238
España	159
Tailandia	139
Bélgica	85
Colombia	85
Total en el Mundo	21,105

Fuente: F.O. Licht, World Ethanol and Biofuels Report, vol. 8, no. 16 (28 April 2010), p. 328.

En febrero del 2008 fue aprobada la Ley de Promoción y Desarrollo de los Bioenergéticos en México; en esta ley se separa la producción y la comercialización de insumos para biocombustibles, de la producción comercialización y uso de los mismos, con el fin de crear condiciones que permitan la introducción de los biocombustibles de manera económica y la protección de los ecosistemas. Además con esta ley se crean comisiones intersecretariales de Bioenergéticos, integrada por la Secretaría de Energía, Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación, Medio Ambiente y Recursos Naturales, Hacienda y Crédito Público, así como la Secretaría de Economía, con el fin de asegurar que la incorporación de los Bioenergéticos en el país (México), garanticen los objetivos de desarrollo rural, sustentabilidad, y seguridad energética [21, 23, 24].

2.2 Biodiesel y aceites vegetales

Los aceites vegetales son químicamente moléculas de triglicéridos en la que tres grupos de ácidos grasos son ésteres unidos a una molécula de glicerol. Los aceites vegetales de semillas oleaginosas pueden ser

usados con mezclas (aceites de semillas con combustibles fósiles diésel). Los aceites vegetales tienen una viscosidad mucho más alta que el combustible fósil usual (diésel), para obtenerlos se utilizan diferentes métodos que reduzcan la viscosidad de los aceites vegetales. Estos métodos pueden ser la dilución, micro emulsión, pirolisis, craqueo catalítico y transesterificación [1, 7, 15, 21].

Los ésteres del biodiesel se caracterizan por sus propiedades físicas y de combustible como son la densidad, viscosidad, índice de yodo, índice de acidez, la turbidez, calor total de combustión y su volatilidad. El biodiesel como combustible produce ligeramente un potencial y un torque inferior al diésel, su costo varía dependiendo del aceite base y de la técnica utilizada, del área geográfica. La variedad de la producción del cultivo durante las cuatro estaciones, el precio del petróleo crudo y otros factores (International Energy Agency 2010). El biodiesel tiene más del doble del precio del diésel de petróleo, debido a los altos precios de la materia prima, sin embargo, el biodiesel se puede hacer de otras materias primas incluyendo la manteca del cerdo, de los sebos y hasta de la propia grasa amarilla [1, 18, 19, 20].

El biodiesel que se utiliza actualmente proviene del aceite de soya, metanol y un catalizador alcalino. El alto valor del aceite de soya como alimento hace que la producción del combustible a un costo efectivo, sea muy difícil. Sin embargo existen grandes cantidades de aceites de bajo costo tales como los aceites de desecho de los restaurantes y las grasas de desecho de animales que pueden ser convertidos en biodiesel. El problema con los procesos de aceites y grasas de bajo costo es que a menudo contienen grandes cantidades de ácidos grasos libres (FFA) que no se pueden convertir a biodiesel usando un catalizador alcalino [1,16,17,19].

3 SEGUNDA GENERACIÓN DE BIOCOMBUSTIBLES

Aunque los biocombustibles de la segunda generación siguen resultando insignificantes a nivel comercial, suelen ofrecer reducciones de emisiones de efecto invernadero del orden de 70% al 90% en comparación con el diésel de los fósiles y el petróleo, sin contabilizar el carbono emitido debido al cambio del uso de la tierra [3, 7, 11, 15].

El debate de los alimentos contra los combustibles hechos con estas materias primas no afecta la producción de los biocombustibles si estos se elabo-

ran de biomasa que no es utilizada para una alimentación [1, 11, 13, 18].

Una incertidumbre clara es ¿cómo la segunda generación de biocombustibles hecha de nuevas materias primas podría afectar el precio de los alimentos? Sin embargo la producción de biocombustibles a partir de subproductos agrícolas solo podría satisfacer una parte de la creciente demanda de combustibles líquidos. Esto ha generado un gran interés en hacer uso de los cultivos de la biomasa dedicados a las materias primas para la producción de biocombustibles [2, 4, 9, 21].

Los materiales lignocelulósicos son recolección de materias primas para biocombustibles avanzados y se pueden obtener ya sea a través de la hidrólisis y la fermentación (por ejemplo bioetanol) o por medio de la gasificación (por ejemplo Fischer-Tropsch biodiesel, bio-DME y bio-SNG). Las fuentes típicas para estos combustibles son cultivos forestales de rotación corta como los álamos sauces y eucaliptos, pastos perennes como el miciantus, pastos y forraje, residuos de la madera industrial, forestal y agrícolas [4, 7, 9, 22].

La ventaja de estos pastos o hierbas es que son perennes, una vez que crecen rápidamente se cosechan sin necesidad de fertilizantes, además que sus cultivos son en tierras marginales, y poseen un alto rendimiento energético.

La desventaja de estos pastos o hierbas es que no son adecuados para la producción de biodiesel, requieren de un proceso muy intenso para convertirlos a etanol, toma varios años alcanzar la densidad de la cosecha, su principal desventaja es que requieren de suelos húmedos pues no les va bien en climas áridos [7, 11, 15, 23].

Los biocombustibles avanzados también conocidos como los biocombustibles de segunda generación, son combustibles a base de carbón que se producen mediante procesos innovadores utilizando principalmente materiales lignocelulósicos, para el cual la utilización comercial está todavía en fase de desarrollo como el bioetanol que es un sustituto de la gasolina, se trata de un complemento para la gasolina llamado combustible flexible para vehículos. Con la hidrólisis los azúcares se extraen de las materias primas lignocelulósicas, después de que los azúcares son fermentados a etanol [21, 23, 24,].

La biomasa lignocelulósica se gasifica para producir gas de síntesis, que a su vez se transforma en hidrocarburos líquidos, principalmente diésel y que-roseno. El Bio-SGN (Synthetic Natural Gas) es un

combustible que puede ser usado en vehículos a gasolina con una simple adaptación. La biomasa lignocelulósica es gasificada para producir gas de síntesis que es a su vez transformada a metano. El Bio-DME (Dimetil éter) es un combustible que puede ser usado en los vehículos a diésel con una simple adaptación [12, 15, 17, 19].

Hay dos rutas principales para la producción de biocombustibles líquidos a partir de la biomasa. El primero involucra los procesos termoquímicos y el segundo los procesos bioquímicos [13, 16, 18, 21].

Los procesos termoquímicos definen la conversión de la biomasa en una gama de productos como se observa en la figura 6, por la descomposición térmica y reformados químicos, esencialmente implica el calentamiento de la biomasa en presencia de diferentes concentraciones de oxígeno [1, 5, 21, 23].

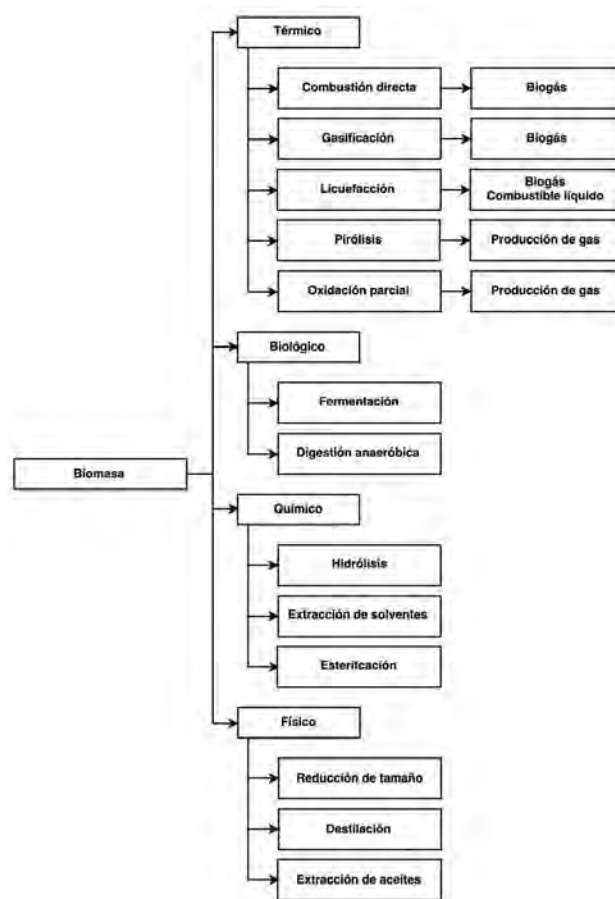


Figura 6. Conversión de procesos termoquímicos.

La clara ventaja de los procesos termoquímicos es que pueden ser convertidos todos los componentes orgánicos de la biomasa, si se compara con los procesos bioquímicos que solo se centran principalmente en los polisacáridos [1, 2, 5, 9, 11].

La producción actual y el uso de los biocombustibles lignocelulósicos han estado por debajo de los objetivos hasta ahora, y el futuro desarrollo de la tecnología de producción es incierta [1, 5, 17, 19]. En abril del 2013 el IEA Bioenergy 2020+ y FJ-BLT reporta el estado de la segunda generación de biocombustibles y la ubicación de su explotación en todo el mundo como se observa en la figura 7.

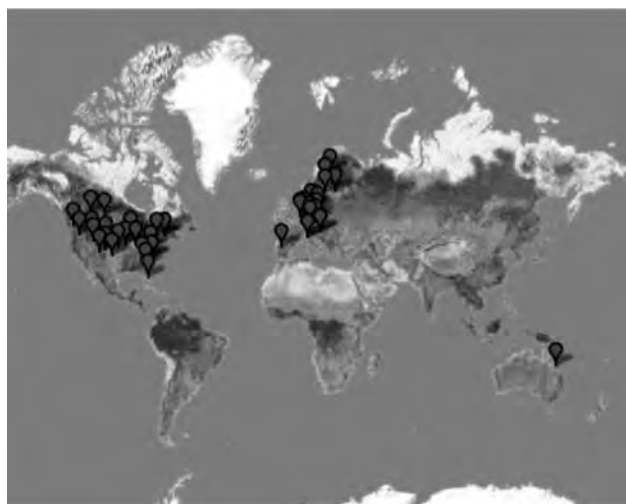


Figura 7. Reporte de IEA Bioenergy en su capítulo 39 bioenergy 2020+.

En la figura 8 se observa que ocho países son los seleccionados por el IEA Bioenergy para la producción de biocombustibles de segunda generación entre ellos se encuentra México cuya capacidad de producción en desechos de maderas y residuos de pastizales es muy alto [1, 5, 9, 10, 15].

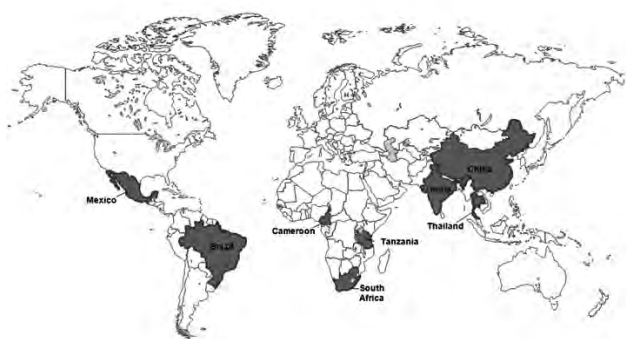


Figura 8. Los ocho países en estudio para la producción de biocombustibles de segunda generación.

La Agencia de Protección Ambiental (EPA) ha renunciado a esta parte del mandato cada año debido al potencial de producción proyectado, este ha caído muy por debajo de la meta de volumen. Las fechas proporcionadas por la EPA de el seguimiento de las

certificaciones de cumplimiento sugiere que los biocombustibles no celulósicos fueron usados antes del 2012 (20,000 galones) y se utilizaron en el 2012. La evaluación de los volúmenes de proyección del que se podría hacer en 2013 [3, 7, 11, 23].

Cinco materias primas son parte de un modelo que E.U. está elaborando para trabajar con biomasa lignocelulósica, como se observa en la tabla 2, dentro de estas materias primas están incluidos los pastos, las pajas de trigos, cáscaras de maíz, material forestal, y desechos de sólidos municipales. La disposición de los compradores depende de los precios de salida [4, 7, 15, 18, 21].

Tabla 2. Clasificación de la segunda generación de biocombustibles de materias primas lignocelulósicas.

Biocombustible	Biocombustible específico	Proceso de producción
Bioetanol	Etanol celulósico	Avances enzimáticos, hidrólisis y fermentación*
Síntesis de biocombustibles	Biomasa para líquidos (BTL) Método Fisher –Tropsch (FT) síntesis de diésel. Biometanol Alcoholes pesados (butanol y mezclas) Dimetil éter (DME)	Gasificación y síntesis**
Metano	Biosíntesis de gas natural (SNG)	Gasificación y síntesis**
Bio-hidrógeno	Hidrógeno	Gasificación y síntesis** ó procesos biológicos*.

*Obtención por ruta bioquímica

**Obtención ruta termoquímica

Fuente: basada en IEA 2008 OECD/IEA 2010

4 TERCERA GENERACIÓN DE BIOCMBUSTIBLES

La producción mundial de biocombustibles de la primera y segunda generación depende de los materiales lignocelulósicos para su bio-conversión y está determinado por cada país y sus condiciones ambientales [7, 9, 15, 24].

Las algas, una de las forma de vida más antiguas, son plantas primitivas con tallo como cuerpo estructural, células reproductivas desnudas, y tienen clorofila “a” como su pigmento fotosintético primario [4, 7, 11, 18, 19]. La estructura de las algas son para la conversión primaria de energía sin ningún solo desarrollo más allá de la célula, y su simple desarrollo le

permite adaptarse a las condiciones ambientales pre-valeciendo y prosperando en largo tiempo. El interés en las algas verdes emana del hecho de que en principio se pueden emplear en procesos altamente eficientes de fotosíntesis para producir hidrógeno (H_2) un invaluable combustible, y el más abundante de las fuentes naturales, la luz solar y el agua (H_2O) [4, 7, 15, 22]. Bajo condiciones óptimas de crecimiento las algas verdes crecen a velocidades notables, alcanzando tiempo de duplicación de la biomasa de 6 hr en el laboratorio según estudios realizados por Smith en 1990, y de 24 hr bajo condiciones ambientales de acuerdo a estudios realizados por Ben-Amotz y Avron en 1990.

La genética es uno de los factores que afectan los lípidos de las microalgas y la productividad de la biomasa. Por lo tanto es muy importante para elegir las especies que tienen el potencial de comercialización.

Basándose en el balance de energía para la producción de biocombustibles a partir de microalgas, al menos el 25% de la producción de energía recuperable depende del cultivo. Mediante la manipulación del método de cultivo como adicionar suficiente o insuficiente nitrato por un cierto periodo, entonces la microalga con un alto contenido de lípidos se puede producir [16, 17, 19, 21]. El costo del proceso de conversión puede reducirse aún más mediante la adición de productos químicos adecuados o la aplicación de tecnologías adecuadas [11, 15, 17, 18, 23].

Comparado con otros cultivos de biodiesel tales como el aceite de palma y la jatropha, la microalga requiere técnicas específicas para su cultivo, cosecha extracción y conversión para que el proceso sea económicamente factible.

Si bien se reportaron micro algas para producir altos contenidos de lípidos en comparación con otros cultivos, el costo capital para transformar la biomasa (micro algas) en biocombustible son altos. Este problema ha impedido la comercialización exitosa del biocombustible de algas como una fuente de energía para reducir el consumo de combustibles fósiles [19, 20, 21, 22, 23, 24].

4.1 Ingeniería de las Algas

Esta es la que pretende crear el bioetanol a partir de cultivos específicos, como las algas. Las algas tienen un potencial energético que puede llegar a ser 30 veces mayor que el de los cultivos energéticos en tierra, ya que capturan una gran cantidad de energía solar y se reproducen rápidamente. Existe un tipo de algas

que de manera natural producen bioetanol. Sin embargo, la producción de bioetanol a partir de algas todavía se encuentra en etapa experimental por lo que el uso de esta tecnología para producción en masa no es económicamente viable [18, 19, 20, 23, 24].

4.2 ¿Por qué las algas presentan ventajas sobre las materias primas de la primera y segunda generación?

Las algas alguna vez fueron consideradas como “plantas acuáticas” pero ahora se clasifican por separado pues carecen de verdaderas raíces, hojas y embriones. Cuando se refieren a las algas como materias primas para los biocombustibles la definición incluye a todos los microorganismos multicelulares y unicelulares simples, incluyendo a las microalgas procariontas (Cianobacteria Clorobacteria) y eucariotas (algas verdes Clorofita), algas rojas (Rhodophyta) y diatomeas (bacilariophyta) [18, 19, 20, 23, 24].

Las principales ventajas de los biocombustibles derivados de las microalgas sobre los biocombustibles de la primera y segunda generación son los siguientes:

- Las microalgas se pueden producir todo el año y por lo tanto la cantidad de producción de aceites excede el rendimiento de los mejores cultivos de semillas oleaginosas, por ejemplo la producción de biodiesel es de 58,700 Lha-1 por microalgas contiene solo el 30% de aceite en peso, comparado con 1190 Lha-1 que se obtiene de Colza o Canola, 1892 Lha-1 que se obtiene de la Jatrofa, y 2590 Lha-1 que se obtiene de Karanj.

La tabla 3 muestra una lista de la producción típica de aceites que se obtienen por diferentes fuentes [17, 18, 19, 20, 21, 22].

Tabla 3. Producción de aceites típico de diversas fuentes de biomasa en orden ascendente.

Cultivos	Producción de aceites (l/ha)
1 Maíz	172
2 Soya	446
3 Cacahuete	1059
4 Canola	1190
5 Colza	1190
6 Jatrofa	1892
7 Karanj (Pongomiapinnata)	2590
8 Coco	2689
9 Aceite de palma	5950
10 Microalgas (70% de aceite en peso)	136,900
11 Microalgas (30% de aceite en peso)	58,700

Lele (4) <http://www.svlele.com/karanj.html>.

El potencial de crecimiento rápido y numerosas especies de microalgas con contenido de aceite en el rango de 20 -50% en peso seco de la biomasa es la otra ventaja para su selección como una biomasa potencial. La tasa de crecimiento exponencial puede duplicar la biomasa en periodos cortos como de 3.5 hr [19, 20, 21, 22, 23, 24].

- En segundo lugar, a pesar de su crecimiento en medios acuosos, las algas necesitan menos agua que los cultivos terrestres así la carga sobre las fuentes de agua dulce también se reduce. Debido a estas razones, las microalgas pueden también ser cultivadas en aguas saladas o en tierras no cultivables, y por lo tanto no incurrir en el cambio del uso de la tierra [19, 20, 21, 22, 23, 24].

4.3 Crecimiento de algas en el mundo

La figura 9 muestra la distribución porcentual de los biocombustibles de algas que producen empresas de todo el mundo en diferentes regiones.



Figura 9. Porcentaje de empresas de todo el mundo que producen combustibles a base de algas por zonas.

Se observa en la figura 9 que la mayor producción la tiene Estados Unidos con un porcentaje del 77%, en las regiones de California, Arizona, Seattle, Massachusetts, entre otros. El otro porcentaje lo tiene Europa y las zonas en donde se trabajan los biocombustibles con algas son España, Países Bajos, Helsinki, entre otros. Y el porcentaje menor involucra a otros países como Nueva Zelanda, Israel, entre otros (International Energy Agency 2010).

Como indica la figura 10 se está haciendo un esfuerzo para cultivar algas en sistemas cerrados o mediante fotobioreactores. Estos bioreactores están, de hecho, instalados cerca de una fuente de CO₂ y así sirven para un propósito adicional como es el secuestro del carbono [21, 22, 23, 24].

Los estanques abiertos también son una opción atractiva para las regiones donde una parte de la tierra puede ser asignada para el cultivo de algas, sin interferir con las cadenas alimenticias [20, 21, 22, 23, 24].



Figura 10. Tecnologías en todo el mundo se están utilizando para la producción de biocombustibles por medio de algas.

4.4 Concepto de la Biorefinería de algas

El concepto de biorefinería de algas tiene la razón fundamental en explorar la posibilidad de producir biocombustibles a gran escala en la industria del cultivo de las algas por diferentes vías como biodiesel, hidrógeno y aceites que se utilizan en la industria farmacéutica, nutracéutica y cosmocéutica como se observa en la figura 11. Los principales componentes de un alga como materia prima son las proteínas, los carbohidratos, los lípidos y otros componentes como por ejemplo pigmentos, antioxidantes, ácidos grasos, vitaminas etc. Los contenidos de proteínas y carbohidratos en varias cepas de microalgas están arriba del 50% en peso. El contenido máximo de lípidos en una microalga está alrededor del 40% en peso seco [16, 17, 18, 19, 20].

Todos estos factores hacen a la microalga una fuente potencial para la producción de bio-aceites.

4.5 Biohidrógeno

La producción de hidrógeno es principalmente el dominio de algas y bacterias. La naturaleza ha creado reacciones biológicas que utilizan la luz solar para la oxidación de agua (fotosíntesis oxigénica), y enzimas que utilizan electrones para la generación de hidrógeno (hidrogenaza), el oxígeno afecta negativamente la función de la enzima hidrogenaza y actúa como un supresor positivo de hidrogenaza. Hans Galfron descubrió el hidrógeno en el metabolismo unicelular de las algas verdes las cuales son organismos eucariotas de la fotosíntesis oxigénica. Gaffron observó que en condiciones anaeróbicas, el alga verde puede utilizar el hidrógeno como donador de electrones en el proceso de fijación de CO₂ en la oscuridad, o se desarrolle el hidrógeno en la luz [1, 5, 9, 21, 23, 24].

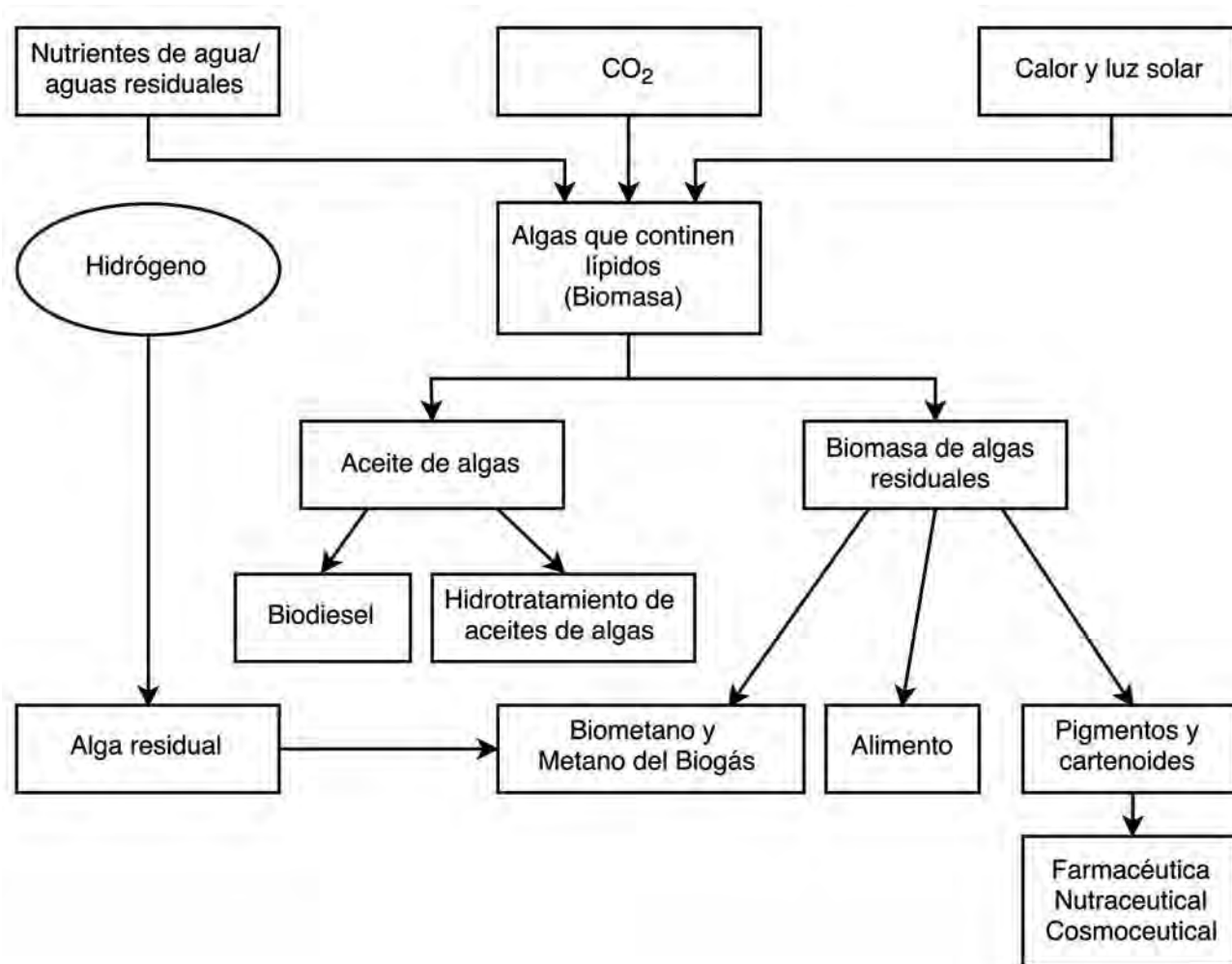


Figura 11. Biorefinería de Algas NaikGoud 2010.

La producción de hidrógeno a partir de algas verdes se basa principalmente en la fotosíntesis de la molécula del agua en el proceso de la reacción de la luz en la fotosíntesis. La producción de hidrógeno es una propiedad de muchos organismos fototróficos, incluyendo varios cientos de especies de diferentes géneros de procariotas y eucariotas como las plantas, las algas verdes, rojo, marrón, y amarillo y las cianobacterias utilizando el agua como una fuente de electrones y protones. Recientes avances se muestran con respecto a la identificación de genes implicados en la hidrogenasa [15, 16, 17, 21, 23, 24].

De acuerdo a Edwards y sus colaboradores en el año 2006 propusieron los siguientes puntos como los desafíos técnicos científicos y económicos para el desarrollo del hidrógeno.

- a) Reducir el costo de la producción del hidrógeno a un nivel competitivo con la energía de los combustibles fósiles.

- b) Desarrollo de una ruta libre de CO₂ para una producción en masa de un costo sostenible y competitivo.
- c) Desarrollo de una infraestructura nacional segura y eficiente para la distribución del hidrógeno.
- d) Desarrollo de sistemas de almacenamiento de hidrógeno viables para vehículos.
- e) Drástica reducción de costos y una mejora significativa en la durabilidad del sistema de celdas de combustible.

Las perspectivas futuras son las siguientes:

- a) El desarrollo del diseño de celdas con una mayor tasa de producción (100x).
- b) Diseño de una planta de producción comercial.
- c) Implementación del uso de la Biomasa.
- d) Mejora energética de los componentes del proceso.
- e) Participación de la iluminación sobre la luz del sol.

La producción de biohidrógeno por medio de algas puede ser una respuesta potencial para superar algunas de las limitaciones económicas para cumplir muchas de las necesidades energéticas [7, 9, 11, 15].

5 CUARTA GENERACIÓN DE BIOCOMBUSTIBLES

Los biocombustibles se producen a partir de bacterias genéticamente modificadas, las cuales emplean anhídrido carbónico (CO₂) o alguna otra fuente de carbono para la obtención de los biocombustibles. Actualmente esta generación de biocombustibles se encuentra en fase teórica, solo se conoce la posible ruta de síntesis del etanol a partir de anhídrido carbónico, sin embargo, depende totalmente de la información genética de una bacteria artificial y puede tener limitaciones termodinámicas importantes [21, 24].

Las diversas materias primas de la biomasa usadas para producir biocombustibles se pueden clasificar en las generaciones que se mencionaron y se puede resumir la clasificación de estos biocombustibles dependiendo del sustrato utilizado como se muestra en la figura 12.

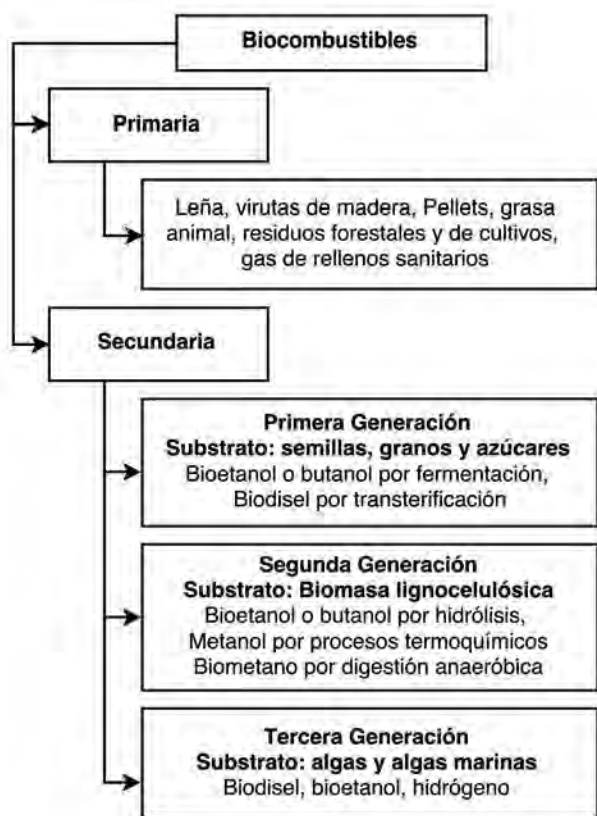


Figura 12. Clasificación de biocombustibles dependiendo del sustrato utilizado.

Muchos fabricantes de autos, producen autos que pueden integrarse con estas alternativas de biocombustibles, incluyendo Audi, BMW y Dodge. Por lo general necesitan de pequeñas o ninguna modificación para que estos autos funcionen. Estos autos vienen previamente equipados con capacidades para este tipo combustibles, esto simplifica el proceso de orden para nuevos propietarios de automóviles que desean utilizar esta tecnología limpia.

El biodiesel en un automóvil sirve como limpiador pues quita los restos del diésel mineral del depósito y del sistema de distribución. Cuando se sustituye el diésel por el biodiesel la primera semana deben tener una constante vigilancia ya que pueden obstruirse los filtros. Nissan Australia acaba de aprobar el uso de biodiesel al 100% en sus modelos.

Varios autos grandes incluyendo la Ford, GM y Toyota ofrecen sus vehículos "Flex Fuel", modelos populares como el Ford Explorer, Chevrolet Impala y Toyota Tundra pueden aceptar E-85.

El consorcio CFM International ha aprobado con éxito el motor de avión CFM56-7B que utiliza una mezcla de combustible con un 30% de biodiesel y un 70% de queroseno.

La compañía estadounidense Continental Airlines ha completado con éxito el primer vuelo de un avión propulsado con una mezcla de biodiesel derivado de algas. El trayecto duró 90 minutos y fue operado por un Boeing 737-800.

El desarrollo de los biocombustibles comienza a recoger sus primeros éxitos en la industria automovilística, como en la aeronáutica y su importancia no se debe dejar a un lado ya que avanza a pasos agigantados.

6 CONCLUSIÓN

Los países como México que subsisten de los combustibles fósiles, han creado un efecto desafortunado y una resistencia al uso de los biocombustibles. Una de las formas de evitar los efectos negativos en la producción de estos biocombustibles a partir de alimentos es hacer que los combustibles derivados de la materia lignocelulósica (segunda generación) se utilicen en el menor tiempo posible. Esto exige un cambio logístico para su utilización y un desarrollo de tecnología para producirlos. Estos combustibles de sustitución se han visto impulsados por las políticas gubernamentales.

La biorefinería basada en materia lignocelulósica será capaz de acceder a una variedad mucho

más amplia de materia prima, incluyendo la biomasa forestal. Por lo tanto, hay una necesidad de integrar las operaciones de los procesos, desde el diseño de los reactores hasta los catalizadores, para poder mejorar la eficacia de los diferentes procesos utilizados para la producción de bioproductos y biocombustibles, en un sistema típico de Biorefinería cuyo objetivo principal es producir múltiples productos utilizando combinaciones tecnológicas.

REFERENCIAS

- [1] "A review of biofuel policies in the major biofuel producing countries of ASEAN: Production, targets, policy drivers and impacts" S. Kumar, Pujan Shrestha, P. Abdul Salam.
- [2] "An overview of biofuel policies across the world". Giovanni Sorda, Martin Banse, Claudia Kemfert. *Energypolicy* 38 (2010) 6977-6988.
- [3] "Biocombustibles: Desarrollo histórico-tecnológico, mercados actuales y comercio internacional". Carlos Álvarez Maciel, número 359 Julio-Agosto 2009. *Economía Informa*.
- [4] "Biofuel Cells- Recent advances and applications". Frank Davis Seamus P.J Higson. *Biosensors Bioelectronic* 22 (2007) 1224- 1235.
- [5] "Biofuels source, biofuels policy, biofuels economy and global biofuel projections". Ayhan Demirbas. *Energy Conversion and Management* 49 (2008) 2106-2116-
- [6] "Biohydrogen Production from Microalgae" Dheeraj Rathore and Anoop Singh, V.K. Gupta and M.G Tuohy *Biofuel technologies* DOI: 10.1007/978-3-642-34519-7_13©Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2013.
- [7] "Carbonnanotube/enzyme biofuel cells" Michael Holzinger, Alan Le Goff, Serge Cosnier. *Electrochimica Acta* 82 (2012) 179-190.
- [8] "Commercialization potential of microalgae for biofuels production". Jasvinder Singh, Sai Gu. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 14 (2010) 2596-2610.
- [9] "Energy balance and efficiency analysis for power generation in internal combustion engine sets using biogás" Li Yingjian, Qiu Qi, He Xiangzhu, Li Jiezhi. *Sustainable Energy Technologies and Assessments* 6 (2014) 25-33.
- [10] "First or second generation biofuel crops in Brandenburg, Germany? A model- based comparison of their production-ecological sustainability" Sander C. de Vries, Gerrie W. J. van de Ven, Martin K. van Ittersum. *European Journal of Agronomy* 2013 Article in press.
- [11] "Framing energy efficiency and renewable energy policies: An international comparison between Mexico and China". José Maria Valenzuela, ye Qi. *Energy Policy* 51 (2012) 128-137.
- [12] "From 1^a to 2^a Generation Biofuel Technologies" International Energy Agency OECD/IEA; Noviembre 2008.
- [13] "How much hope should we have for biofuels? Govinda R. Timilsina, Ashish Shrestha. *Energy* 36 (2011) 2055-2069.
- [14] "Improving the Effectiveness of Green Local Development: The Role and Impact of Public sector-led initiatives in renewable energy" Cristina Martínez- Fernández, Samantha Sharpe, Merritt Hughes. *OECD Green Growthpapers* 2013-9 November 2013.
- [15] "Lessons from first generation biofuels and implications for the sustainability appraisal of second generation biofuels". Alison Mohr, Sujatha Raman. *Energy Policy* 63 (2013) 114-122.
- [16] "Organic Rankine cycle system preliminary design with corn cob biomass waste burning as heat source". Nur Rohmah, Ghalya Pikra and Agus Salim. *Energy Procedia* 32 (2013) 200-208.
- [17] "Production of first and second generation biofuels: A Comprehensive review". S.N. Naik, Vaibhav V. Goud, Prasant K. Rout, ajay K. Dalai. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 14 (2010) 578-597.
- [18] "Second biofuels and bioinvasions: An evaluation of invasive risks and policy responses in the United States and Canada". A.L. Smith, N. Klenk, S. Wood, N.Hewitt, I. Henriques, N.Yan, D.R. Bazely. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 27 (2013) 30-42.
- [19] "Second generation biofuels and food crops: Co products or competitors? Wyatt Thompson, Seth Meyer. *Global Food Security* 2 (2013) 89-96.
- [20] "Sustainable production of second-generation biofuels: Potential and perspectives in major economies and developing countries". International Energy Agency IEA February 2010, OECD/IEA 2010.
- [21] "The Role of Fungal Enzymes in Global Biofuel Production Technologies". Jessica M. Coyne, Vijai K. Gupta, Anthonia O' Donovan and María G. Tuohy. DOI 10:1007/978-3-642-34519-7_5© Springer-Verla Berlin Heidelberg 2013.
- [22] "What is the resource of second generation gaseous transport biofuels base don pig slurry in Spain? Julio Fierro, Xiomar Gómez, Jenry D. Murphy. *Applied Energy* (2013) Article in press.

- [23] Energy consumption and GHC emission scenarios of a university campus in Mexico”. Azucena Escobedo, Sonia Briceño, Héctor Juárez, Daniel Castillo, Mireya Imaz, Claudia Sheinbaum. Energy for Sustainable Development 18 (2014) 49-57.
- [24] Renewable and Sustainable Energy Reviews 26 (2013) 822-836.
- [25] Strategies for second generation biofuels in EU-Co-firing to stimulate feedstock supply development and process integration to improve energy efficiency and economic competitiveness” Goran Berndes, Julia Hansson, Andrea Egeskog, Filip Johnsson. Biomass and Bioenergy 34 (2010) 227-236.

BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA

INGENIERÍA
FACULTAD | Laboratorio Integral

SERVICIOS QUE OFRECE LABORATORIO INTEGRAL DE FACULTAD DE INGENIERÍA

MATERIALES DE TERRACERIAS Y PAVIMENTOS

- Calidad de materiales de terracerías y pavimentos
- Determinación del peso volumétrico seco máximo y la humedad óptima de terracerías y pavimentos
- Determinación del grado de compactación en capas de terracerías y pavimento
- Determinación del peso volumétrico seco del lugar en capas de terracerías y pavimentos
- Determinaciones del desgaste en materiales petreos
- Calidad de materiales asfálticos
- Control de riego de asfálticos
- Calidad de carpeta asfáltica
- Extracción de corazón en carpeta asfáltica
- Determinación del grado de compactación
- Permeabilidad de la carpeta
- Estudio de calidad del material petreo para mezcla asfáltica
- Diseño Marshall en carpeta asfáltica

CONCRETO HIDRÁULICO

- Muestreo y ensaye de cilindros estándar de concreto hidráulico
- Estudio de calidad de arena y grava para concreto hidráulico
- Diseño de proporcionamiento para concreto hidráulico
- Extracción de núcleos de concreto hidráulico
- Muestreo y ensaye a compresión de testigos de mortero hidráulico
- Ensayes con esclerómetro

ACEROS

- Muestreo y ensaye de probetas de acero de refuerzo de $F_y = 4200 \text{ kg/cm}^2$, con diámetros 1/4" a 3/4"
- Muestreo y ensaye de alambre de acero
- Muestreo y ensaye de malla electrosoldada de 10 x 10

MATERIALES DIVERSOS

- Ensaye a compresión y módulo de ruptura de tabique rojo común
- Ensaye de calidad de adoquines de concreto hidráulico
- Muestreo y ensaye a compresión y absorción de adoquines de concreto hidráulico
- Extracción de corazón en roca y ensaye a compresión
- Determinación de la resistencia a compresión y absorción de block

ENSAYES DE MECÁNICA DE SUELOS

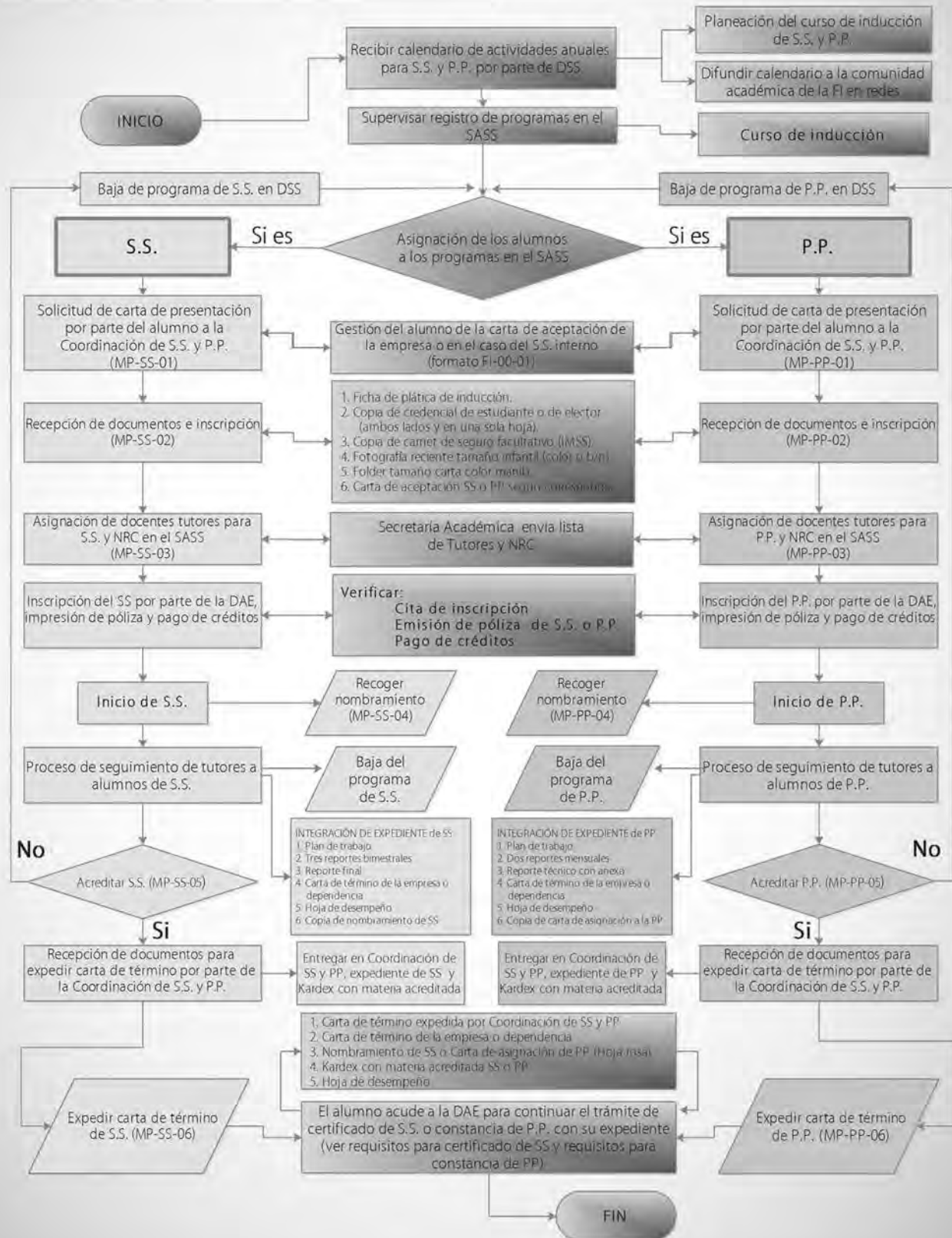
- Obtención de muestras inalteradas
- Obtención de muestras alteradas
- Determinación de peso volumétrico del lugar
- Determinación de las pruebas índice en suelos
- Densidad de sólidos
- Determinación de la compresión simple
- Determinación de prueba triaxial
- Determinación de prueba triaxial, tipo C.U. (Consolidada no drenada)
- Determinación de la consolidación
- Estudios de Mecánica de Suelos (determinación de capacidad de carga y diseño de la cimentación)

INGENIERÍA AMBIENTAL

- Análisis físico-químico de agua potable y agua residual
- Análisis físico-químico y bacteriológico de agua potable y agua residual
- Análisis físico-químico de agua para concreto hidráulico

Informes

Laboratorio Integral de la Facultad de Ingeniería
Edificio ING-1. Ciudad Universitaria
(222) 229 55 00 ext. 7620
labointegral@outlook.com



Ingeniería y Tecnología

Facultad de Ingeniería
Benemérita Universidad Autónoma de Puebla

La invitación se apertura a todos los documentos que pueden ser reportados mediante, ARTÍCULOS DE INVESTIGACIÓN, ARTÍCULOS DE REVISIÓN, ARTÍCULOS DE BUENAS PRÁCTICAS, INFORMES TÉCNICOS y COMUNICACIONES CORTAS y DE PROSPECTIVA, y que se realizan en el idioma español. Estos trabajos deben ser originales e inéditos y no deben de estar siendo considerados en otra revista para su publicación. El autor es el único responsable de las afirmaciones sostenidas en su artículo. Los comentarios y su respuesta serán situados en <http://www.ingenieria.buap.mx>.

Requisitos, Plantilla y Estructura del trabajo

- Los originales se remitirán preferentemente por correo electrónico a posgrado.fi.buap@gmail.com, en su defecto serán entregados directamente al editor responsable en las instalaciones de la Facultad de Ingeniería.
- El formato del artículo enviado debe de prepararse mediante una plantilla que se puede descargar en: <http://www.ingenieria.buap.mx>.
- En la medida de lo posible, se debe evitar utilizar un lenguaje de corte excesivamente especializado y el abuso en la utilización de funciones matemáticas, en beneficio de una más fácil comprensión de las ideas expuestas.

Los artículos pueden ser redactados en castellano o inglés (para autores extranjeros), aunque se dará prioridad de Publicación a los que están en ambos idiomas. Sus requisitos son los siguientes:

- El trabajo se debe acompañar de una Carta (o e-mail) de presentación donde el autor solicita la consideración de su trabajo para su publicación indicando:
 - Que es un trabajo original no publicado en otros medios o revistas.
 - Que el artículo no ha sido enviado simultáneamente a otros medios o revistas.
 - Claramente estos tres apartados: Cuál es la aportación original que el trabajo presenta, por qué se ha llevado a cabo y cuáles son los resultados reales obtenidos.
 - Confirmación de la autoría de todos los autores que figuran en el artículo y su contribución intelectual al mismo.
 - Que todos los autores han leído y aprobado la versión final del manuscrito remitido.
 - Que en el caso de aceptación para su publicación, los autores ceden los derechos al editor, sin cuyo permiso expreso no podrá reproducirse ninguno de los materiales publicados.
- En el caso de que los autores deseen recomendar a tres expertos en la especialidad de su trabajo como posibles evaluadores, podrán hacerlo en esta carta de presentación indicando sus datos de contacto: nombres, e-mail, teléfono, lugar de adscripción.

Con el objeto de facilitar el proceso de "Revisión entre pares", el autor deberá asignar el código INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA de 6 dígitos correspondiente a la temática del artículo (en concordancia con CONACyT), seleccionándolo de entre los códigos disponibles en el sitio <http://www.ingenieria.buap.mx>.

Formato del artículo

Para la presentación del trabajo se debe utilizar la plantilla Word de formato de artículo, descargable en: <http://www.ingenieria.buap.mx>. Las extensiones para el envío de artículos pueden ser .doc (msword), .rtf, o .txt.

Cabecera:

- Título del artículo: (en castellano e inglés). El título será breve y conciso con una longitud máxima de 15 palabras. Si es necesario se puede añadir a continuación un subtítulo separado por un punto. Evitar el uso de expresiones vacías, símbolos, fórmulas, abreviaturas o acrónimos.
- Nombre y dos apellidos de cada uno de los autores. Se acompañará un breve currículum y fotografía del autor, si éste así lo deseara, al final de la bibliografía.
- Nombre completo del centro de trabajo de cada uno de los autores, el cual tendrá su referencia debajo del nombre del autor.
- E-mail y número de teléfono.
- El Resumen (en español e inglés) del trabajo será de una extensión máxima de 300 palabras. Se describirá de forma concisa, el motivo y el objetivo de la investigación, la metodología empleada, los resultados más destacados y las principales conclusiones.
- Palabras clave (en castellano e inglés): Debajo del resumen se especificarán de 3 a 5 palabras clave o frases cortas que identifiquen el contenido del trabajo para su inclusión en los repertorios y bases de datos nacionales e internacionales.

Texto del artículo:

El artículo tendrá una extensión máxima de 6,000 palabras (En casos excepcionales, se podrá concertar con el editor responsable de RITFIBUAP una extensión superior, la cual será sometida a la aprobación del Consejo de Redacción.)

Todas las siglas citadas deberán ser aclaradas en su significado.

Se utilizarán cifras arábigas para la paginación y para la numeración de los apartados y sub-apartados del artículo. La utilización de unidades de medida seguirá la normativa del Sistema Internacional.

Imágenes, figuras y gráficas

Se recomienda para imágenes, gráficas y fotografías una calidad mínima de 300 ppi; esas se deben adjuntar por separado en un archivo anexo, agregando en ambos archivos la referencia correspondiente (ej: Figura 1, Imagen 1, Fotografía 1, etc.). Los dibujos de líneas deben tener una resolución mínima de 800 dpi (preferiblemente 1200 dpi).

Referencias bibliográficas

Estas se adaptarán de acuerdo al formato de referencias Harvard o IEEE.

[1] Alaniz-Álvarez (2003). La Revista Mexicana de Ciencias Geológicas a través de los índices de impacto del Institute for Scientific Information. Boletín De La Sociedad Geológica Mexicana, Tomo LVI, Núm. 1, 2003, P. 87-98.

DIRECTORIO TUTORES

**ODETTE MARIE
GRAS MARÍN**
TUTOR DEL COLEGIO
DE INGENIERÍA INDUSTRIAL
Generación 2008 y 2013



**CARLOS
IBÁÑEZ JUÁREZ**
TUTOR DEL COLEGIO
DE INGENIERÍA INDUSTRIAL
Generación 2012



**TOMÁS AARÓN
JUÁREZ ZERÓN**
TUTOR DEL COLEGIO
DE INGENIERÍA INDUSTRIAL
Generación 2014



**GENARO ROBERTO
LÓPEZ AGUILAR**
TUTOR DEL COLEGIO
DE INGENIERÍA INDUSTRIAL
Generación 2009 y 2014



**JOSÉ LUIS
MACÍAS PONCE**
TUTOR DEL COLEGIO
DE INGENIERÍA INDUSTRIAL
Generación 2011, 2015 y Rev. 2009



**KARINA
MARTÍNEZ MORALES**
TUTOR DEL COLEGIO
DE INGENIERÍA INDUSTRIAL
Generación 2010 y 2015



**FRANCISCO JAVIER
MÉNDEZ RAMÍREZ**
TUTOR DEL COLEGIO
DE INGENIERÍA INDUSTRIAL
Generación 2008 y 2012



**ENRIQUE
MONTIEL PIÑA**
TUTOR DEL COLEGIO
DE INGENIERÍA INDUSTRIAL
Generación 2012



**ALEJANDRO
OLVERA GARCÍA**
TUTOR DEL COLEGIO
DE INGENIERÍA INDUSTRIAL
Generación 2011



**MANUEL
PASTÉN HERNÁNDEZ**
TUTOR DEL COLEGIO
DE INGENIERÍA INDUSTRIAL
Generación 2011



**AUGUSTO
PÉREZ PÉREZ**
TUTOR DEL COLEGIO
DE INGENIERÍA INDUSTRIAL
Generación 2011



**SERGIO PONCE DE
LEÓN DE LA HUERTA**
TUTOR DEL COLEGIO
DE INGENIERÍA INDUSTRIAL
Generación 2008, 2012, Rev. 2010 y 2013



**LORENA
ROJAS BRUSCHETTA**
TUTOR DEL COLEGIO
DE INGENIERÍA INDUSTRIAL
Generación 2008, 2013 y Rev. 2012



**JULIA
RODRÍGUEZ MORALES**
TUTOR DEL COLEGIO
DE INGENIERÍA INDUSTRIAL
Generación 2012



**NANCY
RUÍZ CHÁVEZ**
TUTOR DEL COLEGIO
DE INGENIERÍA INDUSTRIAL
Generación 2010



**GABRIELA
YÁÑEZ PÉREZ**
TUTOR DEL COLEGIO
DE INGENIERÍA INDUSTRIAL
Generación 2015





BUAP / **INGENIERÍA**
FACULTAD