

ISSN 2410-3934

# Revista de Energía Química y Física

Volumen 3, Número 8 — Julio — Septiembre -2016

**ECORFAN<sup>®</sup>**



**ECORFAN-Bolivia**

## **Indización**

Google Scholar

ResearchGate

REBID

Mendeley

RENIECYT

## **ECORFAN-Bolivia**

### **Directorio**

#### **Principal**

RAMOS-ESCAMILLA, María. PhD

#### **Director Regional**

IGLESIAS-SUAREZ, Fernando. BsC

#### **Director de la Revista**

SERRUDO-GONZALES, Javier. BsC

#### **Edición de Logística**

PERALTA-CASTRO, Enrique. PhD

#### **Diseñador de Edición**

TREJO-RAMOS, Ivan. BsC

Revista de Energía Química y Física, Volumen 3, Número 8, de Julio a Septiembre -2016, es una revista editada trimestralmente por ECORFAN-Bolivia. Loa 1179, Cd. Sucre. Chuquisaca, Bolivia. WEB: [www.ecorfan.org](http://www.ecorfan.org), [revista@ecorfan.org](mailto:revista@ecorfan.org). Editora en Jefe: RAMOS-ESCAMILLA, María. PhD, Co-Editor: IGLESIAS-SUAREZ, Fernando. ISSN-2410-3934. Responsables de la última actualización de este número de la Unidad de Informática ECORFAN. ESCAMILLA-BOUCHÁN, Imelda. PhD, LUNA-SOTO, Vladimir. PhD, actualizado al 30 de Septiembre 2016.

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

Queda terminantemente prohibida la reproducción total o parcial de los contenidos e imágenes de la publicación sin permiso del Instituto Nacional del Derecho de Autor.

## **Consejo Editorial**

PEREZ- PERAZA, Jorge. PhD  
*Centre National de Recherche Scientifique-France*

GONZALEZ-ALVARADO, Juan Manuel. PhD  
*Universidad Politecnica de Madrid- Spain*

AVENDAÑO-ARRAZATE, Carlos Hugo. PhD  
*Universidad de Lerida- Spain*

MENDEZ-MEDINA, Ruben Danilo. PhD  
*University of Bristol-England*

ESCAMILLA-GARCIA, Erandi. PhD  
*University of Burgundy-France*

FERNANDEZ-PALACIN, Fernando. PhD  
*Universidad de Cadiz-Spain*

CARBAJAL-DE LA TORRE, Georgina. PhD  
*Université des Sciences de Lille 1-France*

VALENZUELA, Miguel. PhD  
*ESIQIE – IPN-Mexico*

## **Consejo Arbitral**

MVHG. PhD

*Instituto Politecnico Naciona- Mexico*

PRJF. PhD

*CINVESTAV-IPN-Mexico*

MRMA. PhD

*Escuela Nacional de Ciencias Biologicas-IPN-Mexico*

GOH. PhD

*Facultad de Quimica, UNAM-Mexico*

AMAJ. PhD

*Universidad de Carabobo-Venezuela*

LPC. BsC

*Universidad JuarezAutonoma de Tabasco- Mexico*

SMCJ. PhD

*Universidad Autonoma Benito Juarez de Oaxaca-Mexico*

MRMA. MsC

*Universidad Nacional Experimental Politecnica de la Fuerza Armada Bolivarian-Venezuela*

## Presentación

ECORFAN, es una revista de investigación que publica artículos en las áreas de: Energía Química y Física.

En Pro de la Investigación, Enseñando, y Entrenando los recursos humanos comprometidos con la Ciencia. El contenido de los artículos y opiniones que aparecen en cada número son de los autores y no necesariamente la opinion dela Editor en Jefe.

En el primer número es presentado el artículo *Análisis dinámico estructural de un heliostato concentrador de energía solar* por LEDESMA-JAIME, Reynaldo, RODRÍGUEZ-SÁNCHEZ, Marcos, FERRER-ALMARÁZ, Miguel Ángel y RAMOS-LÓPEZ, Humberto con adscripción en la Universidad Tecnológica del Suroeste de Guanajuato, como siguiente artículo está *Aplicación del método de hilo caliente en la determinación de la resistencia térmica de bloques de concreto-material reciclado* por ROBLES-SOLÍS, Manuel, VEJAR-RUIZ, Set, LOZANO-MANDUJANO, David y GUTIÉRREZ-VILLEGAS, Carlos con adscripción en la Universidad Politécnica de Zacatecas, como siguiente artículo está *Comparación de puntos de equilibrio de sistemas de potencia con modelos de carga estática dependiente de voltaje* por GARCÍA-GUZMÁN, José Miguel, OLIVARES-NEGRETE, Leonardo, ORTEGA-HERRERA, Francisco Javier y FIGUEROA-GODOY, Fernando con adscripción en el Instituto Tecnológico Superior de Irapuato, como siguiente artículo esta *Construcción de un foto-reactor para medir el desempeño de un geopolímero fotocatalítico* por GASCA-TIRADO, J. R., HERRERA-DÍAZ, E. I, VÁZQUEZ-LANDAVERDE, P. A.´ y GÓMEZ-LUNA, B. E. con adscripción en la Universidad de Guanajuato y el Centro de Investigaciones y de Estudios Avanzados del I.P.N. Unidad Querétaro, Querétaro respectivamente, como siguiente artículo está *Determinación de los factores que influyen en la recuperación de Oro y Plata de soluciones del proceso de cianuración mediante Electrocoagulación, aplicando diseño de experimentos 2<sup>3</sup>* por GARCÍA-CARRILLO, María Cristina, PARGA-TORRES, José Refugio, MORENO-CASILLAS, Héctor Aurelio y PAREDES-SOTO, Jesús con adscripción en el Instituto Tecnológico de la Laguna y el Instituto Tecnológico de Saltillo respectivamente, como siguiente artículo está *Incorporación de nanomateriales en el concreto fotocatalítico para la reducción de NOX y CO<sub>2</sub>*, por FUENTES, Teresa, VAZQUEZ, Cristofer y VAZQUEZ, Kevin, como siguiente artículo está *Simulación de defectos subsuperficiales con forma irregular y aleatoria para la inspección no-destructiva de objetos mediante Termografía Infrarroja* por RAMÍREZ-GRANADOS, Juan Carlos, GÓMEZ-LUNA, Blanca, MORENO-MARTÍNEZ, Jatziri y ALMANZA-ACEVEDO, Jessica con adscripción en la Universidad de Guanajuato.

## Contenido

Artículo	Pág
<b>Análisis dinámico estructural de un heliostato concentrador de energía solar</b> LEDESMA-JAIME, Reynaldo, RODRÍGUEZ-SÁNCHEZ, Marcos, FERRER-ALMARÁZ, Miguel Ángel y RAMOS-LÓPEZ, Humberto	1-11
<b>Aplicación del método de hilo caliente en la determinación de la resistencia térmica de bloques de concreto-material reciclado</b> ROBLES-SOLÍS, Manuel, VEJAR-RUIZ, Set, LOZANO-MANDUJANO, David y GUTIÉRREZ-VILLEGAS, Carlos	12-24
<b>Comparación de puntos de equilibrio de sistemas de potencia con modelos de carga estática dependiente de voltaje</b> GARCÍA-GUZMÁN, José Miguel, OLIVARES-NEGRETE, Leonardo, ORTEGA-HERRERA, Francisco Javier y FIGUEROA-GODOY, Fernando	25-33
<b>Construcción de un foto-reactor para medir el desempeño de un geopolímero fotocatalítico</b> GASCA-TIRADO, J. R., HERRERA-DÍAZ, E. I, VÁZQUEZ-LANDAVERDE, P. A.´ y GÓMEZ-LUNA, B. E.	34-39
<b>Determinación de los factores que influyen en la recuperación de Oro y Plata de soluciones del proceso de cianuración mediante Electrocoagulación, aplicando diseño de experimentos 2<sup>3</sup></b> GARCÍA-CARRILLO, María Cristina*†, PARGA-TORRES, José Refugio´, MORENO-CASILLAS, Héctor Aurelio y PAREDES-SOTO, Jesús	40-49
<b>Incorporación de nanomateriales en el concreto fotocatalítico para la reducción de NOX y CO<sub>2</sub></b> FUENTES, Teresa, VAZQUEZ, Cristofer y VAZQUEZ, Kevin	50-56
<b>Simulación de defectos subsuperficiales con forma irregular y aleatoria para la inspección no-destruccion de objetos mediante Termografía Infrarroja</b> RAMÍREZ-GRANADOS, Juan Carlos, GÓMEZ-LUNA, Blanca, MORENO-MARTÍNEZ, Jatziri y ALMANZA-ACEVEDO, Jessica	57-63

*Instrucciones para Autores*

*Formato de Originalidad*

*Formato de Autorización*

## Análisis dinámico estructural de un heliostato concentrador de energía solar

LEDESMA-JAIME, Reynaldo†, RODRÍGUEZ-SÁNCHEZ, Marcos, FERRER-ALMARÁZ, Miguel Ángel y RAMOS-LÓPEZ, Humberto

*Universidad Tecnológica del Suroeste de Guanajuato*

Recibido Agosto 05, 2016; Aceptado Septiembre 25, 2016

### Resumen

Un heliostato es un dispositivo utilizado para la recepción y reflexión de rayos solares con el propósito de canalizarlos a un concentrador ubicado en una torre. Como parte de una investigación sobre una planta solar de torre central, el diseño de un heliostato forma parte de un proyecto de desarrollo en la Universidad Tecnológica del Suroeste de Guanajuato, de manera que se logre un aprendizaje de esta tecnología que servirá de base para un desarrollo regional en fuentes renovables de energía. Se pretende contar con una plataforma solar que permita, además de probar la tecnología de torre central, usar y evaluar otras formas de concentración solar y aplicaciones específicas; principalmente, orientado al sector industrial, de generación de energía eléctrica, de refrigeración, y de secadores solares. En el presente trabajo se documenta el análisis estático estructural y dinámico mediante el Método de Elemento Finito (MEF), con el objetivo de determinar los esfuerzos, desplazamientos y factor de seguridad, así como el análisis modal, las frecuencias naturales y modos de respuesta de la estructura de un heliostato. Finalmente se pretende demostrar si la estructura propuesta para el equipo es segura durante su operación.

### Heliostato, análisis, método, energía, solar

**Citación:** LEDESMA-JAIME, Reynaldo, RODRÍGUEZ-SÁNCHEZ, Marcos, FERRER-ALMARÁZ, Miguel Ángel y RAMOS-LÓPEZ, Humberto. Análisis dinámico estructural de un heliostato concentrador de energía solar. Revista de Energía Química y Física. 2016, 3-8: 1-11.

### Abstract

A heliostat is a device used for the reception and reflection of sunlight in order to channel them to a hub located in a tower. As part of an investigation into a solar plant central tower, the design of a heliostat is part of a development project at the Universidad Tecnológica del Suroeste de Guanajuato, so learning this technology as a basis is achieved for regional development in renewable energy sources. It is intended to have a solar platform that also allows to test the central tower technology, use and evaluate other forms of solar concentration and specific applications; mainly oriented industrial sector, power generation, cooling, and solar dryers. In this paper the structural and dynamic static analysis using the Finite Element Method (FEM), with the objective of determining the stresses, displacement, the safety factor and modal analysis, natural frequencies and modes of response is documented for the structure of a heliostat. Finally it is intended to show whether the proposed structure of the team is safe during operation.

### Short circuit CC IEC Standards - NOM

\*Correspondencia al Autor (Correo electrónico: rledesma@utsoe.edu.mx)

†Investigador contribuyendo como primer autor

## Introducción

La gran demanda de los combustibles fósiles a nivel mundial con el paso de los años se ha convertido en un grave problema, debido a que estos generan contaminación y tienen impacto en directo el medio ambiente.

Desde ya hace algunos años se han buscado alternativas para poner un alto a los diversos problemas que se han generado. Una de estas posibles soluciones que ha tomado fuerza y en la cual se ha trabajado es en el desarrollo y aprovechamiento de otro tipo de energías, tales como la eólica, la solar, celdas de combustible, entre otras.

El uso de energías renovables ha tomado una importancia significativa frente a combustibles fósiles. En particular la energía solar que tiene la característica de ser una energía limpia y renovable, y que ha demostrado múltiples beneficios en una amplia variedad de usos, tales como; el calentamiento de agua industrial y doméstico y la generación de energía eléctrica.

En México, en el año 2003 se tenían instalados más de 570,000 m<sup>2</sup> de calentadores solares, y para el 2012 y 2013 se alcanzaron 600 000 m<sup>2</sup> en todo el territorio nacional. A pesar de ser un país privilegiado en cuanto a incidencia de radiación solar, lo cual conlleva a tener mejores oportunidades de aprovechamiento, en México no se ha desarrollado tecnología al respecto.

Se conocen diversas aplicaciones directas de la energía solar:

1. Fotoquímicas
2. Fotovoltaicas
3. Fototérmicas
4. Híbridas

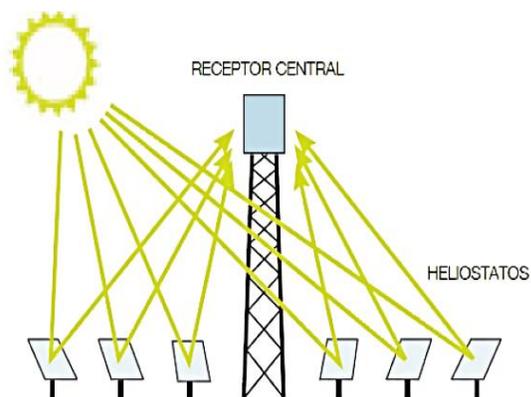
Dentro de las tecnologías térmicas se encuentran dos grupos generales: sin concentración y con concentración, que se basan en dispositivos que amplifican la intensidad de la radiación sobre una superficie absorbadora. (Hernandez, 2013). De estos últimos se conocen los sistemas de alta temperatura, que operan a temperaturas mayores a los 300°C y su uso más común es para generar electricidad, y que se diferencian como de torre central y hornos solares.

Los sistemas solares de torre central están formados por espejos planos o levemente convexos, denominados heliostatos, los cuales se encuentran distribuidos de forma que reflejen la radiación solar hacia la parte superior de la torre, donde generalmente se coloca el receptor. Ver figura 1. El principio de funcionamiento es relativamente simple, aunque requiere que el equipo de recepción o el heliostato, siempre reciba los rayos del sol y los dirija de forma precisa a la torre central, lo cual representa cierta complejidad en el sistema de orientación. Ver Figura 2.



**Figura 1** Sistema de torre central

Los factores de concentración en los sistemas de este tipo son muy elevados, tomando valores entre 200 y 1000. El rango de potencias unitarias abarca de 10 a 200 MW.



**Figura 2** Principio de funcionamiento

Respecto de investigaciones relativas al tema, en México se presenta la misma tendencia, son pocos los esfuerzos para el desarrollo de tecnología que permita aprovechar de manera satisfactoria la energía solar, tanto para calentadores solares, como para la producción de electricidad.

Existe un desarrollo tecnológico importante para mejorar el rendimiento, la calidad, durabilidad y costo de los equipos y sistemas, además de poder abarcar aplicaciones térmicas donde se requieran niveles de temperatura comprendidos entre 200°C y 350 °C.

Actualmente se cuenta con instalaciones de investigación y desarrollo para el aprovechamiento de la energía solar en México. Entre las que se destacan: el horno solar de alto flujo en el estado de Morelos y el campo de pruebas de heliostatos en Sonora.

Refiriéndose a investigaciones sobre el tema de interés, se han reportado diversos estudios relativos al diseño y análisis sistemas similares, así como del estudio y análisis de esfuerzos en sistemas se soporte se heliostatos, abordando distintas situaciones de trabajo y configuraciones.

En un estudio realizado por Griffith (2012), se reportó un análisis modal para un heliostato con condiciones muy concretas de operación, en el que realizan un análisis por el MEF para la estructura principal y se validan resultados mediante un sistema de adquisición de datos experimentales. La estructura bajo análisis cuenta con un sistema de paneles independientes en cuanto a la rotación. En otro artículo se documenta la metodología para el diseño de un heliostato empleando técnicas computacionales que muestra el diseño de algunos componentes por medio de uso de software de CAD y que incluye el análisis mediante elementos finitos de un componente crítico, el soporte del cristal reflectante (Chacón, 2011).

Kribus (2004), reporta resultados de su trabajo desarrollado para el diseño de heliostatos y principalmente enfocando esfuerzos en el apartado de sistemas de control para el posicionamiento y seguimiento de trayectorias precisas.

Por otro lado, en Torres (2015) tras una revisión de la evolución de los heliostatos, sus fundamentos físicos y geométricos y sus aplicaciones, propuso en su artículo el desarrollo e implementación un nuevo sistema heliostático polar simple de polígono deformable con un grado de libertad, que se regula mediante una sola variable en función del tiempo.

Mientras que en Behar (2013), se presentó un estudio amplio respecto del uso y aplicaciones de sistemas de concentración de energía solar, así como de sus propósitos, brindando un panorama muy completo sobre la evolución y la importancia de uso de este tipo de sistemas de aprovechamiento de energía.

## Métodología

El MEF ha adquirido una gran importancia en el diseño y análisis de elementos y/o sistemas mecánicos sometidos a cargas, en el campo de la ingeniería, de la física, etc., ya que permite resolver casos que hasta hace poco tiempo eran prácticamente imposibles de resolver por métodos matemáticos tradicionales.

Esta circunstancia obligaba a realizar prototipos virtuales, ensayarlos e ir realizando mejoras de forma iterativa, lo que traía consigo un elevado costo tanto económico como en tiempo de desarrollo.

La técnica tradicionalmente utilizada por Solidworks® para el análisis por medio del MEF es de acuerdo a lo siguiente: pre-procesamiento, análisis, post-procesamiento y análisis de resultados.

En el pre-procesamiento se elabora el modelo de la estructura del heliostato, se le asignan materiales, se pasa al ambiente de análisis, se asignan cargas, condiciones de frontera y malla.

Una vez hecho esto, se procede a ejecutar el análisis, no sin antes parametrizar las condiciones en base a las cuales el software lo va ejecutar, tipo de solver, tipo de elementos, entre otros.

Posteriormente en el post-procesamiento, Solidworks® devuelve imágenes de la estructura en forma de mapas de colores, mostrando también la escala de valores de resultados, para esfuerzos de Von Mises, desplazamientos, deformaciones unitarias (strains) y factor de seguridad.

Por último, en la fase de análisis de resultados corresponde al encargado del proyecto analizar los resultados obtenidos y determinar si son satisfactorios de acuerdo a las condiciones de operación, de los materiales y de los requerimientos de los equipos durante el funcionamiento, y el cual requiere de la experiencia, habilidad y tiempo del especialista.

## Modelo

Para propósitos de análisis se utilizó el modelo mostrado en la Figura 3, el cual está formado por un pedestal con soportes anclados al piso, un sistema de posicionamiento que incluye un mecanismo de biela manivela con un sistema de corona sin fin y un actuador lineal, y por último, la estructura de soporte del cristal formada a partir de perfiles estructurales en acero ASTM A-36. El marco principal de la estructura soporte se propuso de PTR de 1.5" x 1.5" en cédula de 1/8", y para las divisiones de refuerzo en el interior de cada sección se utilizó PTR de 1" x 1" en cédula de 1/8". El brazo de soporte central para la rotación de la estructura es de tubo industrial de 4" de diámetro nominal y cedula 80. Las placas laterales de soporte para fijar el brazo de soporte a la estructura son de placa de 1/2".

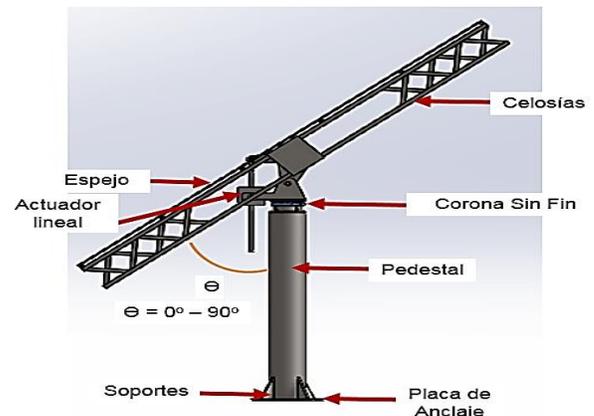
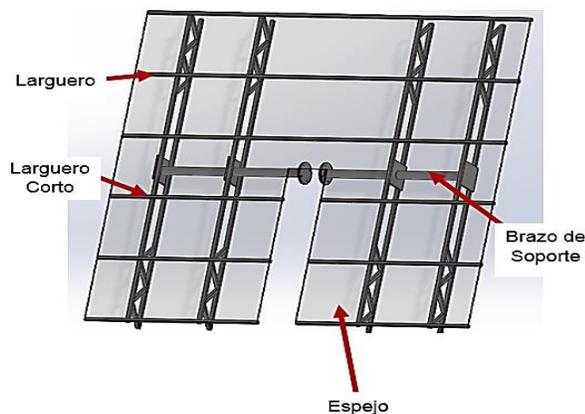


Figura 3 Propuesta de diseño conceptual

En la Figura 4 se muestra un modelo sólido de la estructura superior, que será sujeto de estudio. Para propósitos de simplificación se tomó por separado del heliostato considerando que dada la propuesta de su configuración y de la función a desarrollar, será el componente crítico. En la parte central inferior se corta para poder posicionar de manera vertical y que no interfiera con el mecanismo de posicionamiento de biela manivela.



**Figura 4** Descripción de la estructura soporte de espejos

### Consideraciones iniciales

Las propiedades del acero estructural ASTM A 36 son: esfuerzo de fluencia: 248 MPa, resistencia última a la tensión: 400 – 551 MPa, % de elongación en 8" min: 20, módulo de elasticidad de 200 MPa y una densidad de 0.00000785 kg/cm<sup>3</sup>.

Todas las uniones son soldadas con soldadura E7018.

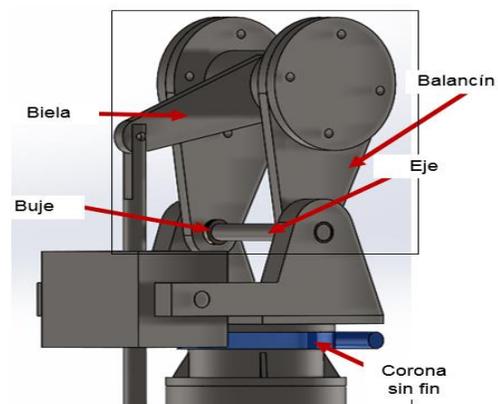
Las cargas de trabajo se determinaron en base al peso de los componentes de trabajo, del cristal, y de la carga de trabajo máxima durante la operación.

### Condiciones de frontera

Al modelo bajo análisis se le asignarán dos condiciones de apoyo, ver Figuras 4 y 5: la primera en los extremos de los brazos de soporte del balancín o del sistema de biela manivela en la parte inferior donde se une al pedestal por medio de bujes de bronce prelubricado, está se consideró del tipo articulación o de bisagra rígida. La otra unión se ubicó en el orificio en el extremo de la biela, del tipo articulación o bisagra rígida. Cabe mencionar que las partes mencionadas para los apoyos o condiciones de frontera, forman parte del sistema de orientación y posicionamiento, ver Figura 5, y por propósitos explicativos se muestran por separado. En el modelo a utilizar en el análisis si se integraron en un solo modelo.

### Mallado

La malla generada para poder realizar el análisis por MEF se asignó primero por default, posteriormente se hicieron refinamientos en algunas zonas de interés donde se tenía una concentración crítica de esfuerzos y tomando en consideración la curvatura en los vértices de los elementos constructivos propuestos.



**Figura 5** Sistema de orientación y posicionamiento

Solidworks® genera la malla utilizando como elementos base los tetraedros, para elementos en 3D. La malla generada presentó un total de 1720488 nodos y 883326 elementos, con un tamaño mínimo de 0.22 in por lado en la zona de interés. Ver Figura 6.

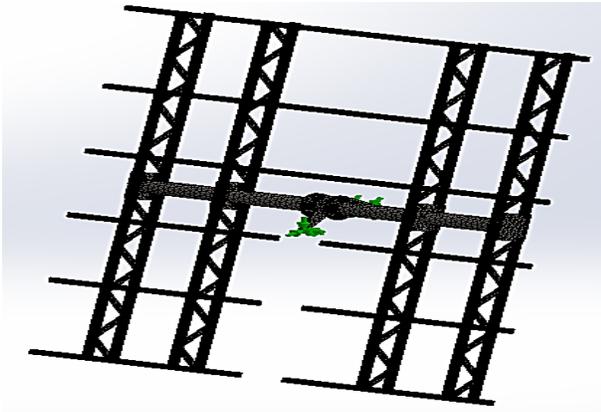


Figura 6 Malla asignada en Solidworks

### Análisis estático

Primeramente se realizó un cálculo estático de la estructura, considerando que las cargas se aplican a una velocidad relativamente baja, de tal forma que no influya en los resultados finales. Un análisis lineal asume que las deformaciones debidas a las cargas aplicadas son despreciables por que los esfuerzos y las deformaciones están dentro del límite elástico del material. Por lo tanto se eligió un análisis lineal. Todos los contactos son del tipo unión rígida con una tolerancia de 0.1 mm, tomados de forma automática simulando las uniones soldadas entre elementos.

Para efectos de análisis se consideraron dos posiciones críticas, en base a las magnitudes de las cargas; la primera con la estructura de forma horizontal y la segunda en posición vertical.

### Posición horizontal

Esta posición del heliostato no se presentará durante la operación de orientación hacia la torre central, y siguiendo la trayectoria del sol, sin embargo se analizó como primera opción para cuantificar los efectos de la carga de los espejos sobre la estructura (1100 N), tomando en cuenta también que si se presentará de esta manera cuando se realicen labores de mantenimiento e instalación, incluso suponiendo que una persona se puede encontrar sobre o debajo de la superficie de soporte de los cristales. También cuando se presente una velocidad del viento excesiva, de más de 45 km/h, en cuyo caso, se contempla un sistema de plegado rápido como parte del sistema de control y posicionamiento.

En las Figuras 7 a 9 se indican la distribución de esfuerzos de en base al criterio de falla de Von Misses, los valores críticos obtenidos para esfuerzos en la zona crítica o más cargada, y factor de seguridad respectivamente.

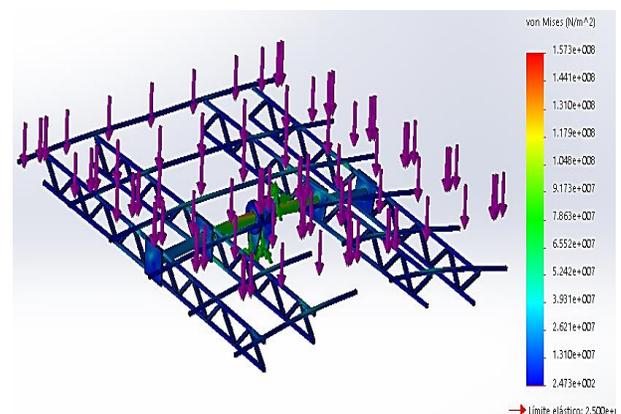
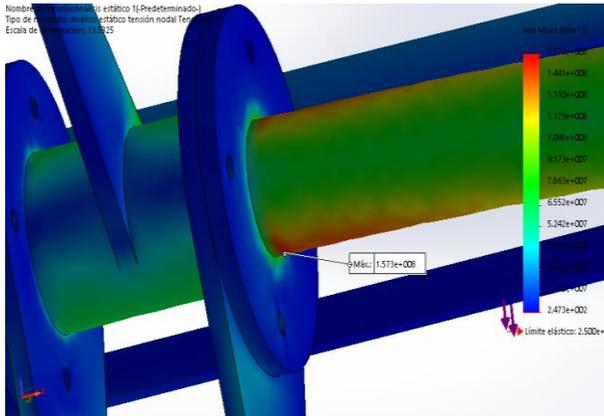
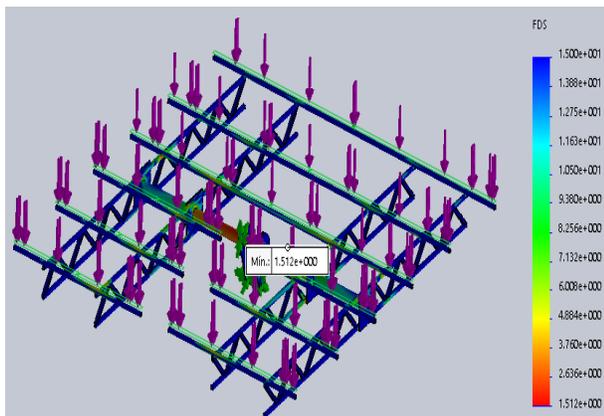


Figura 7 Esfuerzos de Von Misses



**Figura 8** Zona crítica con esfuerzos máximos



**Figura 9** Factor de seguridad en la configuración

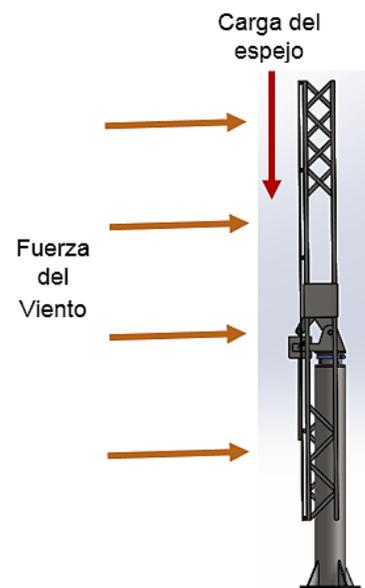
Para esta posición el factor de seguridad es de 1.5, lo cual permite incluso compensar excesos de carga temporales que pueden ser producto de condiciones inestables de operación.

### Posición vertical

Con base en el funcionamiento del heliostato, una de las posiciones críticas se presenta cuando la estructura principal se encuentra en posición vertical con referencia al suelo.

Si bien es cierto que durante la operación difícilmente se alcanzará esta posición para el seguimiento de los rayos solares, si se puede presentar durante otro tipo de actividades como lo son: montaje y desmontaje, limpieza, mantenimiento y con el efecto de las fuerzas del viento. Para esta posición, las cargas de trabajo que se presentan son, ver Figura 10:

1. Las debidas a la masa de los espejos reflectores, que en conjunto proporcionan 1100 N en dirección vertical y aplicadas sobre los elementos transversales de la estructura, donde se ubican los soportes de los espejos.
2. Las ocasionadas por la aceleración de la gravedad, en función del material y la masa de la estructura.
3. Las fuerzas de viento, mismas que se tomaran para una velocidad crítica de operación máxima de 45 km/h. Después de este valor de velocidad, deberá entrar en operación un sistema de plegado automático, el cual mandará la estructura a una posición horizontal.



**Figura 10** Segunda configuración de análisis

Los resultados para esta configuración se muestran en las figuras 11, 12 y 13. La distribución de los esfuerzos de Von Mises es muy discreta, ubicándose una zona crítica muy próxima a los apoyos de la estructura.

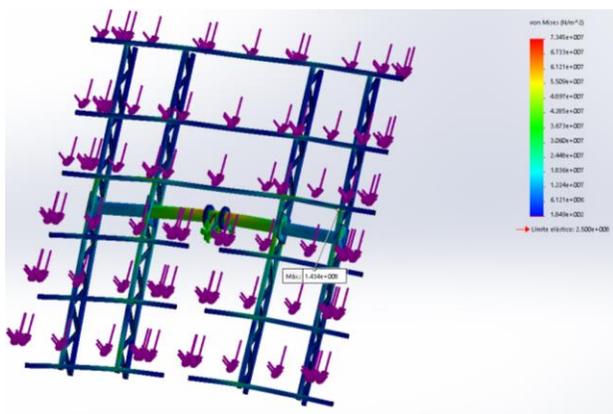


Figura 11 Esfuerzos de Von Mises

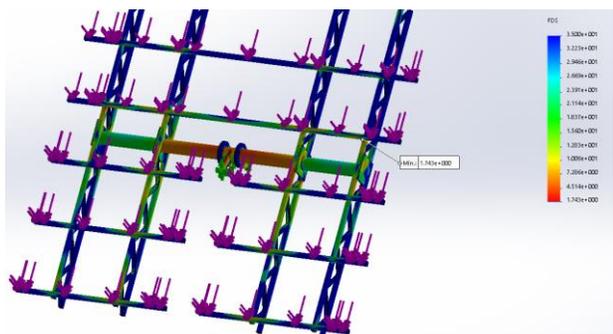


Figura 12 Factor de seguridad

El factor de seguridad también se muestra de manera uniforme, indicándose en la figura 12, que la mayor parte de la estructura trabaja y que la carga se transfiere desde el lugar de aplicación hasta una zona muy próxima a los apoyos, lo que disminuye también de manera significativa el efecto de rigidización.

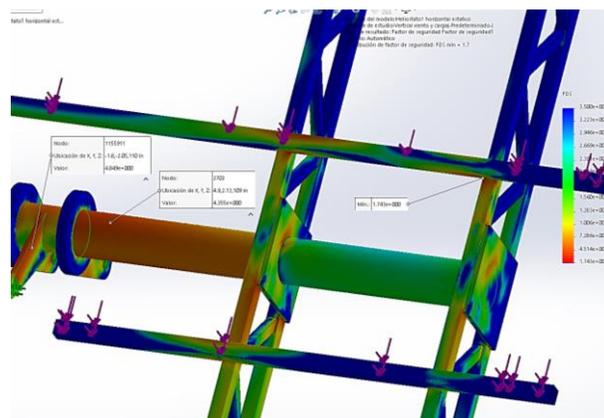


Figura 13 Detalle de zona crítica con factor de seguridad mínimo de 1.7

Los resultados nos indican que la estructura es segura desde el punto de vista de aplicación de carga estática. Un factor de seguridad de 1.7 indica que los componentes van a estar trabajando por debajo de su esfuerzo de fluencia.

### Análisis modal

El análisis modal consiste en la determinación de las características dinámicas inherentes de un sistema en forma de frecuencias naturales, factores de amortiguamiento y las formas de modos, y se formula un modelo matemático para este comportamiento dinámico.

Durante el funcionamiento del heliostato en el cual se presentan movimientos de rotación alrededor de dos ejes, y con los cuales se sigue la trayectoria del sol para maximizar la eficiencia de captación, la estructura estará sometida a fuerzas ocasionadas por la gravedad, por la interacción entre componentes (partes y motores), y por factores climáticos, principalmente las ocasionadas por el viento.

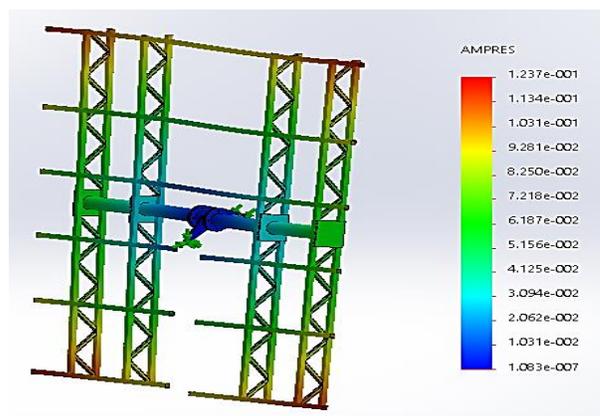
De acuerdo con sus condiciones de operación se ve afectado por excitaciones con una frecuencia característica, las que al coincidir con una frecuencia natural del modelo ocasionaran el fenómeno de resonancia. También es importante la comparación de estos modos de frecuencia natural del equipo, con las frecuencias ocasionadas por fenómenos tales como sismos y de ráfagas de viento.

En Solidworks se utilizó la siguiente configuración para el análisis: 9 modos, de 0 a 50 Hz como rango de frecuencia, la estructura solo se consideró con apoyos y sin cargas de operación, y todos los contactos del tipo “rígido” para simular uniones soldadas.

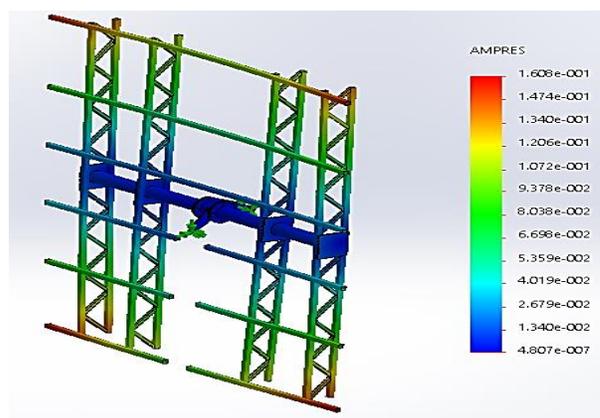
Las frecuencias naturales y algunos de los modos propios son mostrados en la Tabla 1 y en las Figuras 14 a 17. En estas imágenes también se muestran los valores de los desplazamientos totales de acuerdo a los modos correspondientes, que si bien están exagerados, muestran el comportamiento de la estructura.

No	Frecuencia, Hz	Periodo, s
F1	8.5857	0.11647
F2	17.016	0.05877
F3	18.826	0.053118
F4	20.293	0.049278
F5	21.691	0.046103
F6	25.028	0.039955
F7	28.526	0.035056
F8	31.167	0.032086
F9	40.101	0.024937

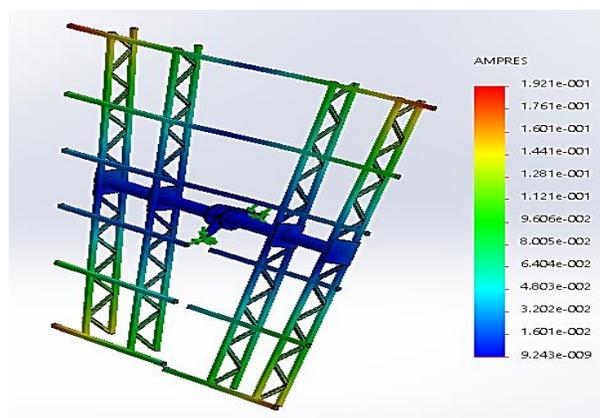
**Tabla 1** Valores de frecuencias de la estructura



**Figura 14** Primer modo a 8.58 Hz



**Figura 15** Segundo modo a 17.016 Hz



**Figura 16** Tercer modo a 18.82

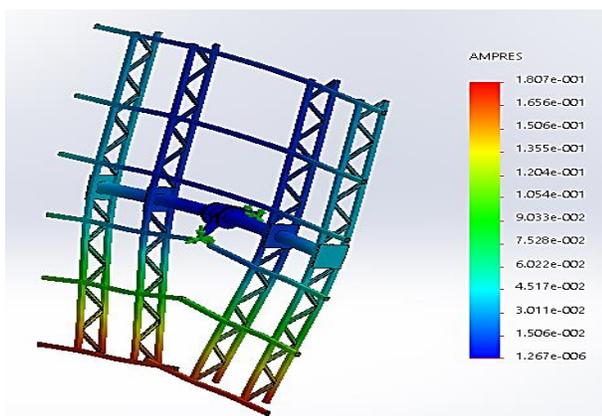


Figura 17 Cuarto modo a 20.29 Hz

## Resultados y discusión

De los resultados obtenidos para las distintas condiciones de carga incluyendo la aplicación de carga estática y análisis modal permiten afirmar que la estructura propuesta puede ser segura para su operación. Bajo condiciones de carga estática se obtuvieron factores de seguridad superiores a 1.5 en las posiciones críticas, esto brinda un factor de seguridad adicional, ya que en cualquiera de las posiciones intermedias de viaje del heliostato siguiendo la trayectoria del sol se presentarán condiciones de carga inferiores.

En cuanto al análisis modal se cuantificaron las frecuencias naturales de la estructura, mismas que resultaron en valores altos, por encima de frecuencias ocasionadas por los accionamientos motorizados y por los efectos del viento al mover la estructura e incluso de sismos. Para validar los datos obtenidos en esta prueba se deja como recomendación para trabajos futuros y una vez que se construya el prototipo, la realización de una prueba experimental de medición de frecuencias naturales en base a excitaciones comunes, lo que permitirá también descartar daños en las uniones de los componentes por los efectos del fenómeno de resonancia.

También se debe poner especial atención a las secciones de la estructura más alejadas del centro o de los apoyos, son las más propensas a presentar daños por vibraciones.

En general se puede mencionar que el prototipo virtual obtenido tiene buen comportamiento bajo condiciones críticas de operación.

## Conclusiones

En este trabajo se puso especial atención en el análisis de las características estáticas y dinámicas de la estructura de soporte para los cristales de un heliostato. Para el caso del análisis estático lineal la distribución de esfuerzos, deformaciones y factor de seguridad se determinaron en base a cargas originadas por condiciones especiales de operación, sistemas auxiliares de trabajo y la carga operativa.

Es conveniente, para trabajos futuros, también realizar un proceso de optimización de material debido a que en algunas regiones de la estructura de soporte se observa que los esfuerzos están muy por debajo del valor de referencia, de fluencia de los materiales considerados, lo que daría pie a reducir materiales principalmente en cuanto a cédulas se refiere para las secciones más alejadas de los soportes. En cuanto al análisis modal se observó que es recomendable poner especial atención en el proceso de manufactura de las secciones inferiores, ya que los desplazamientos son críticos en estas zonas, y con lo cual se contribuye a disminuir movimientos de la plataforma de cristales y en los soportes principales. Inicialmente se proyectó tomando en cuenta las características de equipos ya construidos y que de alguna manera son funcionales.

Finalmente, de acuerdo a lo reportado en este artículo y a los resultados de la ingeniería de detalle, se considera que un heliostato construido bajo estas especificaciones puede ser seguro para su operación en campo, quedando pendiente el diseño del sistema de control para el posicionamiento.

## Referencias

Behar O, Khellaf A, Mohammedi K. (2013), A review of studies on central receiver solar thermal power plants, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 23, pp.12–39.

Chacón, R., Provenzano, S., Dávila, L. y Barboza, S. (2011), Diseño de un heliostato empleando técnicas computacionales, *Revista Ciencia e Ingeniería*. Vol. 32, No. 1, pp. 17-22.

Griffith, D. T., Ho, C. K., Hunter, P. S., Sment, J., Moya, A. C., & Menicucci, A. R. (2012), Modal analysis of a heliostat for concentrating solar power. In *Topics in Modal Analysis I*, Volume 5, pp. 415-423. Springer New York.

Hernandez M. I. (2013), Diseño de un microhorno solar y campo de heliostatos para diversas aplicaciones. Tesis para obtener el título de Ingeniero mecánico. Universidad Nacional Autónoma de México.

Kribus A, Vishevetsky I, Meri M, Yogev A y Sytnik A. (2004), Continuous Tracking of Heliostats, *Solar Energy Eng.* Volume 126, Issue 3, pp.842-850.

Torres M., López Luque, M. Varo. (2015), Design of an innovative and simplified polar heliostat for integration in buildings and urban environments. *Solar Energy* 119. 159-168.

## Aplicación del método de hilo caliente en la determinación de la resistencia térmica de bloques de concreto-material reciclado

ROBLES-SOLÍS, Manuel\*†, VEJAR-RUIZ, Set, LOZANO-MANDUJANO, David y GUTIÉRREZ-VILLEGAS, Carlos

*Universidad Politécnica de Zacatecas*

Recibido Julio 15, 2016; Aceptado Septiembre 30, 2016

### Resumen

En este artículo se presentan los resultados de la aplicación del método de hilo caliente sobre bloques de concreto adicionados con materiales de reciclaje, con el objetivo de determinar cuál de las muestras posee las mejores propiedades térmicas (capacidad de aislamiento). Los tipos materiales de reciclado utilizados en los bloques son PET y papel respectivamente, los cuales fueron adicionados independientemente en diferentes proporciones (25, 50 y 75 %). El método aplicado se calibró y validó utilizando materiales de control (ladrillo y block común de hormigón), obteniendo valores de conductividad térmica aproximados a los reportados en la literatura para este tipo de materiales. Los resultados muestran que el valor de la conductividad térmica disminuye proporcionalmente con el incremento de la cantidad de material reciclable en el bloque, así mismo se observa un comportamiento similar para la densidad. Los bloques prototipo con un agregado de 75 % de ambos materiales reciclados incrementaron su resistencia térmica respecto al bloque de control en el orden de 3.24 veces para el concreto-PET y de 4.35 para el Concreto-Papel. Por otro lado, la densidad disminuyó en una proporción similar en el orden de 3.20 para el concreto-PET y de 4.20 para el concreto-papel.

**Conductividad térmica, aislamiento térmico, bloques de concreto-PET, bloques de concreto-papel**

### Abstract

This article presents the results of applying the Method of Hot Wire in concrete blocks added with recycled materials, in order to determine which sample has the best thermal properties (insulating capacity). The recycling materials used in the manufacturing process of concrete blocks were paper and PET respectively. These materials were added in different proportions (25, 50 and 75%). This method was calibrated and validated by using reference samples (brick and concrete block common). As a result, thermal conductivity values were obtained and the rates were similar to those reported in the literature. The final results show that the value of thermal conductivity decreases proportionally to the percentage of recycled material added to the block. A similar behavior was observed for density. Both prototypes added with a 75% of recycled materials, increased heat resistance in comparison to the reference sample in the proportion of 3.24 times for concrete-PET blocks and 4.35 for Concrete-Paper blocks. In the other hand, density decreased at a similar rates in order of 3.20 for the concret-pet blocks and 4.20 for concrete-paper blocks.

**Thermal conductivity, thermal insulation, concrete-pet block, concrete-paper block**

**Citación:** ROBLES-SOLÍS, Manuel, VEJAR-RUIZ, Set, LOZANO-MANDUJANO, David y GUTIÉRREZ-VILLEGAS, Carlos. Aplicación del método de hilo caliente en la determinación de la resistencia térmica de bloques de concreto-material reciclado. Revista de Energía Química y Física 2016, 3-8: 12-24.

\*Correspondencia al Autor (Correo electrónico: jmrobles@upz.edu.mx)

† Investigador contribuyendo como primer autor

## Introducción

El acondicionamiento térmico en las viviendas y edificios en general debe ser agradable a los seres vivos que los habitan. Partiendo del hecho de que el ser humano tiene que mantener una temperatura corporal en promedio de 37 °C (1), al entrar en contacto con diferentes condiciones climáticas es obligado a implementar medidas de regulación térmica, tanto fisiológicas como externas en el medio ambiente que le rodea. Para lograr un clima confortable desde un enfoque térmico, es importante considerar el equilibrio que se debe de mantener entre las pérdidas y aportes energéticos en el recinto.

Para el estudio de esta área de la ingeniería surge una nueva disciplina denominada “bioclimatización” (2), la cual se define como el uso eficiente de la energía para mantener el recinto a una temperatura adecuada considerando entre otros aspectos, la temperatura del lugar y los materiales de construcción.

Por su parte, la arquitectura bioclimática considera: el diseño del proyecto arquitectónico y el uso eficiente de la energía para mantener el recinto a una temperatura adecuada. Todo esto considerando el clima del lugar, los materiales de construcción, la iluminación y la orientación de la construcción.

Atendiendo al clima del lugar de estudio de este trabajo, la Cd. de Fresnillo Zacatecas, la cual se sitúa entre los 43° 45' de latitud Norte y los 41° 45' de latitud Sur.

En dicha ciudad, de acuerdo a los registros de los últimos 10 años, se sabe que debido a su ubicación en invierno se han alcanzado temperaturas de hasta de -10 °C y en verano se han registrado hasta de 35 °C.

Por lo anterior, en esta ciudad, como en otras con las mismas características, es importante la implementación de nuevos materiales para la construcción que posean una mayor resistencia térmica en comparación a los utilizados actualmente, lo cual contribuirá directamente en la reducción de los consumos energéticos para la climatización en las edificaciones.

En la actualidad existen una serie de materiales para la industria de la construcción. Uno de los principales elementos constructivos utilizado como material para división de áreas es el denominado bloque, el cual está fabricado a base de cemento y arena (piedra con tamaño de grano inferior a 10 mm).

Debido a su importancia, en años recientes han surgido una serie de alternativas para la construcción en términos sustentables, algunas de las propuestas están enfocadas en la fabricación de estos bloques con una mezcla de concreto y materiales reciclables los cuales se ha demostrado agregan propiedades acústicas, térmicas y mecánicas, las cuales no han sido completamente evaluadas ni cuantificadas (3) (4) (5) (6) (7) (8). Por lo que la investigación aquí presentada queda justificada.

## Marco teórico

### Conductividad y resistividad

La conductividad térmica (k) se describe como el flujo de calor que, en régimen estacionario, atraviesa un material de caras plano-paralelas y de espesor unitario, durante una unidad de tiempo, cuando la diferencia de temperatura entre sus caras es de una unidad (9).

Por otro lado, la resistividad es el inverso de la conductividad ( $1/k$ ) y por lo tanto representa la capacidad del material para resistir el flujo de calor y se expresa en metro grado Celsius por Watt ( $m^{\circ}C/W$ ).

En algunos estudios el valor de la resistencia térmica de una capa de material se explica como la diferencia de temperatura que se requiere para producir una unidad de flujo de calor por unidad de superficie (10).

Conductividad térmica: métodos de cálculo.

Los métodos de medición de la conductividad térmica pueden ser clasificados en dos categorías, estáticos y dinámicos, dependiendo de si la distribución de la temperatura en el interior de la muestra es función del tiempo.

Los métodos estáticos involucran el uso de la ecuación de calor de Fourier y es necesario determinar la densidad de flujo de calor y el gradiente de temperatura a lo largo de la normal de la superficie isotérmica.

Por otra parte, los métodos dinámicos en general determinan la difusividad y requieren de medir variaciones de temperatura con respecto al tiempo a lo largo de una distancia conocida.

El calor específico y la densidad deben ser conocidas para obtener la conductividad térmica, aunque en algunos métodos dinámicos también se utilizan para determinar el calor específico (11).

Para el caso específico de materiales compuestos para la construcción A. Bonakdar, (3) en 2013 realizó una investigación en la cual contempla la inclusión de fibras cortas de polipropileno como refuerzo a bloques de hormigón celular conocido también como concreto aligerado (mezcla de cemento portland, ceniza u otras fuentes de sílice, cal viva, yeso, agua, y aluminio en polvo o pasta, como se describe en el ACI 523.2R3), realizando el proceso de curado a temperatura ambiente, caracterizando los bloques en relación a sus propiedades físicas y mecánicas, evaluando el efecto del contenido de las fibras sobre las características mecánicas obteniendo para los prototipos de más alta concentración una resistencia a la compresión de aproximadamente 3 MPa, resistencia a la flexión de 0.56 MPa, la flexión de más de 25 Nm, y una conductividad térmica de 0.15 W/Km. La determinación de esta última se realizó considerando el procedimiento de placa caliente guardada, como una versión modificada de la norma ASTM C-17 720.

El experimento se realizó de manera similar a los trabajos realizados por Ng (12) y Othuman (13). Se probaron dos bloques de 300 x 300 x 20 mm simultáneamente con seis termopares para cada muestra: tres en la superficie superior y tres en la superficie inferior. Los datos de temperatura se recopilaron mediante un sistema de adquisición de datos. Esta prueba se ejecuta hasta alcanzar un estado de equilibrio. Este procedimiento se aplica considerando un flujo de calor unidimensional  $q_x$  a través de un espécimen de una sección transversal A, para producir un gradiente de temperatura a través del espesor  $\left(\frac{dT}{dx}\right)$ , obteniendo la conductividad térmica k del material en W/mK al utilizar la ley de Fourier (ecuación 1).

$$q = -kA \frac{dT}{dx} . \quad (1)$$

Además, examinaron la precisión del método de ensayo calibrando con materiales de prueba con valores de conductividad conocidos. Por otra parte, Kann (14) señala que para el cálculo de la conductividad térmica, ésta depende del grado de humedad presente en el material, es decir, cuanto mayor es el contenido de humedad, mayor es el coeficiente de conductividad térmica. Por lo tanto es importante tener en cuenta el contenido de humedad cuando se realicen las pruebas de propiedades térmicas y disponer de procedimientos de secado antes de la prueba.

### Métodos dinámicos para la medición de la conductividad térmica

Los métodos dinámicos pueden ser divididos en dos categorías, periódicos o transitorios, dependiendo de si la energía térmica se suministra a la muestra de forma modulada con un periodo fijo o simplemente se suministra un flujo de calor. La técnica del hilo caliente se clasifica dentro de los métodos dinámicos transitorios ya que emplea un flujo transitorio de calor para determinar la conductividad térmica. Estos métodos se basan en la transferencia de calor de una fuente controlada hacia un material y la medición del cambio de temperatura provocado por la disipación del calor a través de la muestra para determinar las propiedades térmicas de transporte del material.

El modelo matemático desarrollado para el método del hilo caliente (15), considera una fuente lineal de calor, delgada, infinitamente larga y con una distribución de temperatura uniforme, que disipa un flujo de calor por unidad de longitud en un medio homogéneo e infinito.

En la realidad se hace una aproximación de estas condiciones empelando un hilo delgado, de longitud finita e inmersa en un medio de prueba de dimensiones conocidas. La suposición general es que la transferencia de calor hacia el medio es solamente por conducción y por lo tanto se incrementan en el tiempo la temperatura de la fuente y la del medio de prueba.

El hilo es eléctricamente calentado por efecto Joule, el cambio en su resistencia eléctrica es medido en función del tiempo, generalmente empleando un sistema de adquisición de datos. Finalmente, el valor de la conductividad térmica es determinado considerando la potencia disipada por el hilo y la pendiente de la curva  $\Delta T$  contra  $\ln(t)$ . La ecuación que gobierna este fenómeno se deriva de la ecuación general de difusión de calor de Fourier, que en coordenadas cilíndricas para la componente radial,  $r$ , se expresa como en la ecuación 2

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

Donde,  $T = T_0 + \Delta T$  es la temperatura del medio a cualquier tiempo  $t$ ,  $T_0$  es la temperatura inicial de la fuente y el medio y  $\Delta T$  es la diferencia de temperatura entre el medio y la temperatura inicial. Las condiciones de frontera a las que está sujeta la solución de la ecuación en este caso son:

$$\lim_{r \rightarrow 0} \left\{ r \left( \frac{\partial T}{\partial r} \right) \right\} = -\frac{q}{2\pi k} \text{ para } t = 0 \text{ y } r = 0 \dots \dots \quad (3)$$

$$\lim_{r \rightarrow \infty} \{ \Delta T(r, t) \} = 0 \text{ para } t \geq 0 \text{ y } r = \infty$$

Carslaw y Jaeger (15) demostraron que la solución de la ecuación anterior es:

$$\Delta T = T(r, t) - T_0 = \frac{q}{4\pi k} \int_{r^2}^{\infty} \frac{e^{-u} du}{4\alpha t u} \quad (4)$$

Donde  $k$  y  $\alpha$  son la conductividad y la difusividad térmica del medio respectivamente y  $q$  es el flujo de calor por unidad de longitud de la fuente. La integral que aparece en la ecuación 4, es la función integral exponencial que está dada por:

$$-Ei(-x) = \int_x^{\infty} \frac{e^{-u} du}{u} = -\gamma - \ln x + x - \frac{1}{4}x^2 \quad (5)$$

Donde  $x = \frac{r^2}{4\alpha t}$  y  $\gamma$  es la constante de Euler ( $\gamma=0.5772$ ). Para tiempos suficientemente grandes los términos de orden superior de la ecuación 5 se consideran despreciables con respecto a los primeros dos. Por lo tanto, sustituyendo la ecuación 5 en 4 se obtiene: sustituyendo ecuación 4 en 3:

$$\Delta T = \frac{q}{4\pi k} \left[ -\gamma + \ln \frac{4\alpha t}{r^2} \right] \quad (4)$$

Simplificando esta ecuación se obtiene:

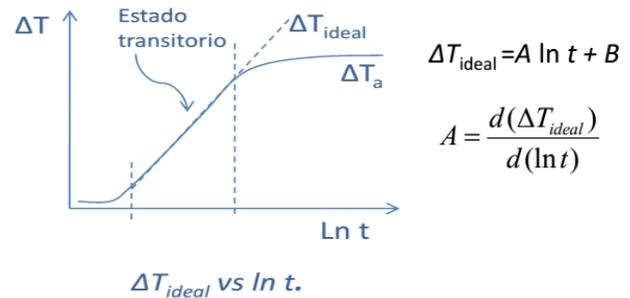
$$\Delta T = \frac{q}{4\pi k} \ln t + \frac{q}{4\pi k} \ln \frac{4\alpha}{r^2} - \frac{q}{4\pi k} \gamma \quad (5)$$

Derivando con respecto  $\ln t$  se obtiene la ecuación 6:

$$\frac{d\Delta T}{d(\ln t)} = \frac{q}{4\pi k} \quad (6)$$

Y por último despejando la conductividad térmica  $k$  se obtiene:

$$k = \frac{q}{4\pi A} ; k = \frac{q}{4\pi} \left[ \frac{d\Delta T}{d(\ln t)} \right]^{-1} \quad (7)$$



**Gráfico 1** Gráfica sobre el comportamiento del modelo matemático para obtener la conductividad térmica (16)

Por lo anterior, si la temperatura del medio se mide en función del tiempo en cualquier posición radial fija, incluso en contacto con la fuente, la conductividad térmica del medio, es proporcional al flujo de calor de la fuente e inversamente proporcional a la pendiente, del gradiente de temperatura en relación con el logaritmo natural del tiempo, como se muestra en la Ecuación 7 y el Gráfico 1.

## Análisis experimental

### Montaje experimental

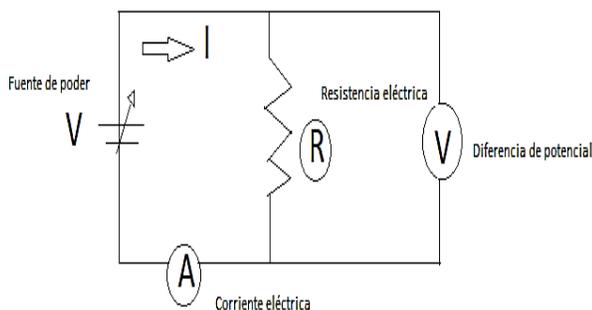
El diseño y la integración del sistema experimental se conforman por una serie de lineamientos definidos por el modelo matemático de método de medición. La teoría indica que el sistema debe ser tal que permita la realización de dos funciones básicas: (1) aplicar a la muestra una perturbación térmica consistente en la generación de calor con intensidad constante a lo largo de una línea contenida en la muestra, medición simultánea de la intensidad de generación de calor por unidad de longitud; (2) medir y registrar como función del tiempo el incremento de la temperatura producido por la perturbación térmica en un punto localizado a una distancia conocida de la fuente de calor.

Para realizar la primera función se emplea lo que en adelante se denomina como el sistema de calentamiento, mientras que para efectuar la segunda función se necesita un sistema de medición y registro de temperatura.

#### Subsistema de calentamiento.

Los componentes del sistema de calentamiento son un calentador de resistencia eléctrica, una fuente de corriente alterna y dos multímetros digitales. El calentador desempeña en el sistema experimental la función de la fuente lineal de calor del modelo conceptual. La relación entre longitud calentada y el diámetro del calentador es igual a 50. Blackwell (17) ha demostrado que fuentes de calor reales con relación de longitud a diámetro mayor o igual a 30 se comportan para fines prácticos como una fuente de calor lineal ideal (relación longitud a diámetro infinita), tal como lo requieren las bases conceptuales del método de medición. La resistencia del calentador es del orden de los 9 ohm, el voltaje que se le suministro a esta resistencia fue de 10 y de 26 voltios aproximadamente, obteniéndose dos potencias de 55 y 90 watts aproximadamente. La corriente y voltaje que se le aplica al calentador proviene de un transformador conectado a una fuente de voltaje de 120 voltios. El esquema se muestra en la

Figura 1.



**Figura 1** Sistema de calentamiento

Para determinar la potencia disipada por unidad de longitud en el calentador es necesario medir la caída de voltaje a través del calentador o bien, la intensidad de corriente circulante. En el caso particular del presente experimento se midieron tanto voltaje como intensidad de corriente.

Sistema de medición y registro de temperatura.

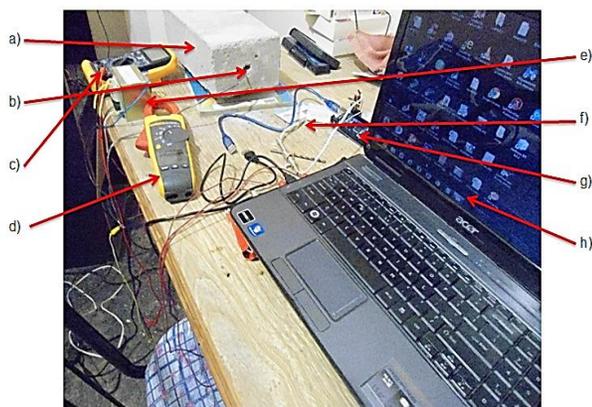
Los principales componentes son: el termopar tipo k, la tarjeta de adquisición de datos arduino, el módulo MAX6675, y el ordenador que se encarga de procesar los resultados obtenidos en el experimento. Para la captura y el almacenamiento de los datos temperatura-tiempo se hace uso de un adquirente computarizado que opera bajo el control de un programa de adquisición de datos. La frecuencia máxima de captura de datos que puede alcanzarse es de 4 eventos por segundo, lo que cubre holgadamente los requerimientos al respecto para los fines de aplicación del método experimental.

#### Procedimiento de aplicación del método.

El procedimiento para generar los datos temperatura-tiempo es como se describe a continuación: Haciendo las veces de medio infinito se emplea una muestra de bloque de 9.5 x 14.3 x 28 cm, en el cual en la parte central de su sección transversal se barrena de lado a lado. Un calentador de resistencia eléctrica de 0.5 cm de diámetro por 25 cm de longitud se inserta ajustadamente dentro de un orificio de igual diámetro que como se menciona anteriormente se taladra paralelamente al eje axial de la muestra. Este calentador desempeña satisfactoriamente en el sistema la función de fuente lineal de calor que estipula el modelo conceptual del método.

A cierta distancia radial se inserta un termopar en un barreno de 0.5 cm de diámetro por 5 cm de profundidad. El termopar se dispone de manera que la junta sensora del mismo quede en contacto directo con el material del fondo del barreno. Se le aplica energía al calentador en forma de corriente alterna de intensidad constante, durante un lapso de 20 minutos. Durante ese tiempo se mide y se registra continuamente el aumento de temperatura como función del tiempo en el punto de emplazamiento del termopar, obteniéndose de esta forma la historia temperatura-tiempo requerida para determinar la conductividad térmica del material. Simultáneamente también se monitorea constantemente el voltaje y la intensidad de corriente para obtener la potencia disipada por unidad de longitud, con los que se obtienen los datos experimentales requeridos para aplicar el método, en la

Figura se muestra el experimento con todos sus componentes.



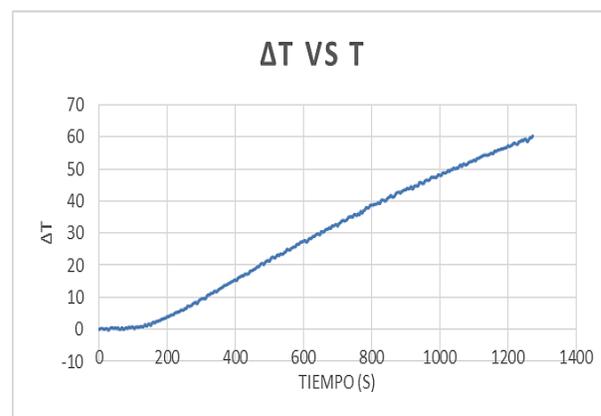
**Figura 2** Componentes del sistema experimental: a) muestra, b) calentador, c) multímetro para medir voltaje, d) multímetro para medir intensidad de corriente, e) fuente de alimentación, f) termopar tipo k, g) tarjeta de adquisición de datos y h) ordenador

Validación y calibración del sistema de medición con materiales de referencia.

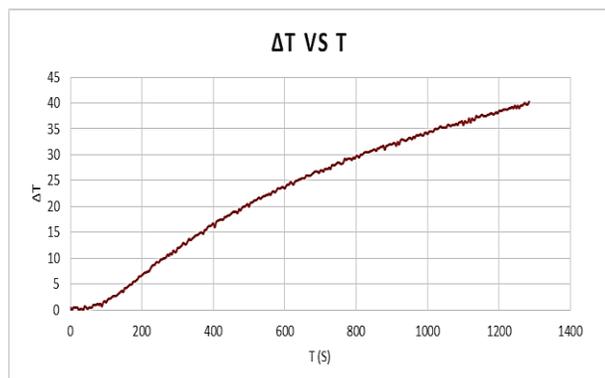
Para realizar la calibración y verificar el correcto funcionamiento del instrumento basado en la técnica del hilo caliente, se realizó la medición de la conductividad térmica de dos materiales de referencia (ladrillo y block común de hormigón), en el anexo IV se incluyen los valores de referencia para la conductividad térmica de estos materiales. Las mediciones se realizaron por un periodo de aproximadamente 25 minutos y la frecuencia de adquisición fue de una vez cada cuatro segundos aproximadamente para contar con suficientes puntos para la determinación de la conductividad térmica.

En los Gráficos 2 y 3 se muestra las gráficas  $\Delta T$  contra tiempo (t) obtenidas a partir de los datos experimentales adquiridos durante la medición.  $\Delta T$  representa la diferencia de temperatura entre la temperatura a un tiempo determinado y la temperatura al tiempo inicial de las muestras.

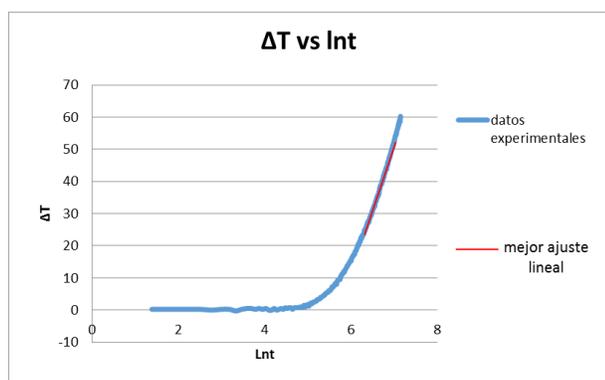
Una vez obtenida la gráfica  $\Delta T$  contra t de acuerdo con la ecuación 6 se gráfica  $\Delta T$  contra logaritmo natural del tiempo ( $\ln t$ ) y se realizar un ajuste de mínimos cuadrados sobre la región lineal de la curva obtenida como se muestra en las Figuras 4 y 5.



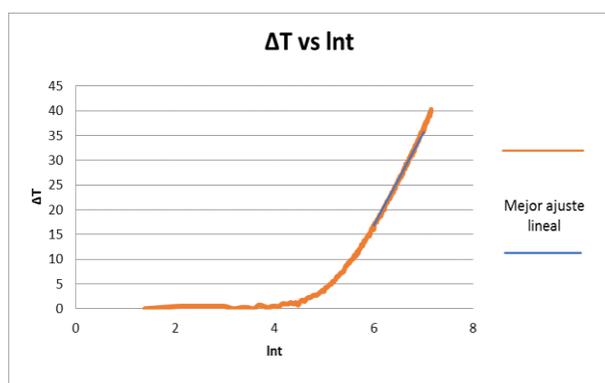
**Figura 2** Gráfica de temperatura contra tiempo, para una muestra estándar de ladrillo



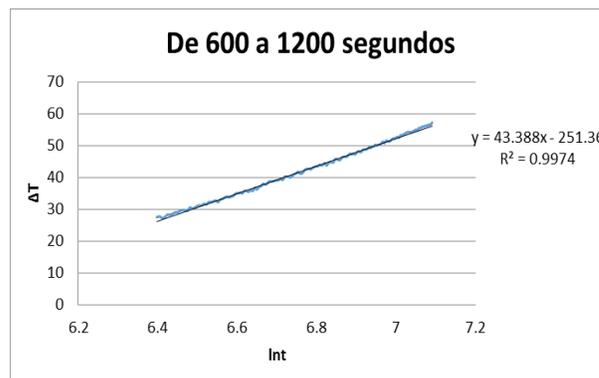
**Gráfico 3** Gráfica de la temperatura contra tiempo, para una muestra del bloque estándar de hormigón



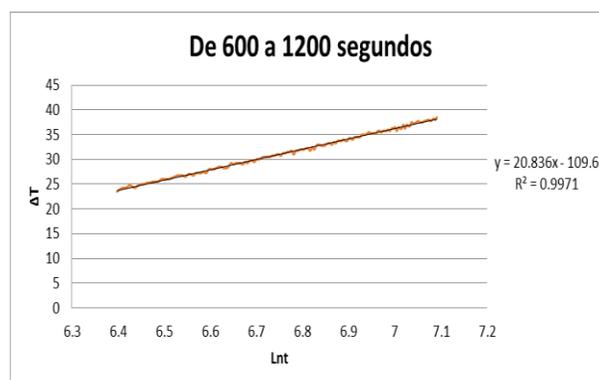
**Gráfico 4** Gráfica del aumento de la diferencia de temperatura contra logaritmo natural del tiempo para el ladrillo.



**Gráfico 5** Gráfica del aumento de la diferencia de temperatura contra logaritmo natural del tiempo para el bloque de hormigón.



**Gráfico 6** Pendiente A= 43.388 mediante el uso del método de mínimos cuadrados para el ladrillo.



**Gráfico 7** Pendiente A= 20.836 mediante el uso del método de mínimos cuadrados para el bloque de hormigón

A partir del ajuste lineal se obtiene el valor de la pendiente (A), Gráficos 6 y 7. Por otro lado, conociendo la longitud del alambre (L), corriente suministrada (I) y voltaje suministrado (V) se calcula la potencia disipada por unidad de longitud (q).

$$q = \frac{V * I}{L} = \frac{[(26.5V)(3.7A)]}{\frac{0.25m}{392.2W}} \text{ para el ladrillo}$$

$$q = \frac{V * I}{L} = \frac{[(26.2V)(3.5A)]}{0.25m} = \frac{366.8W}{m} \text{ para el bloque de hormigón}$$

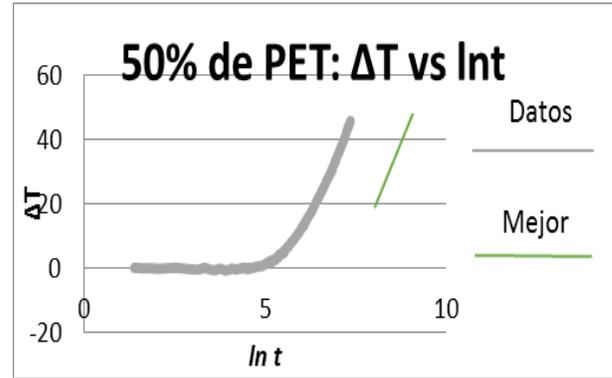
Una vez obtenidos los parámetros involucrados en la ecuación 7 se calcula la conductividad térmica (k)

$$k = \frac{q}{4\pi A} ; k = \frac{q}{4\pi} \left[ \frac{d\Delta T}{d(\ln t)} \right]^{-1}$$

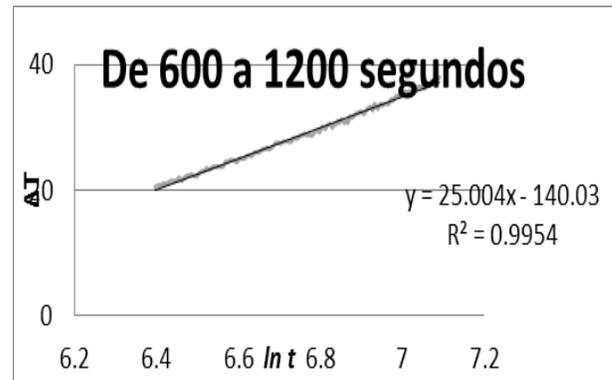
Por lo tanto para el ladrillo  $k = 0.6998$  W/m°C. Valor de la conductividad térmica que se aproxima al 0.7 W/m°C reportado en la literatura para el ladrillo. Por otro lado, para el bloque de hormigón se obtiene un valor de  $k = 1.4008$  W/m°C, el cual coincide con el reportado en la literatura de 1.4 W/m°C para el bloque de hormigón.

**Resultados**

Con el fin de ilustrar el procedimiento aplicado para la determinación experimental de la conductividad térmica, en este apartado sólo se incluirá a detalle las pruebas para un bloque con 50% de PET, ya que se aplicó de la misma manera para todos los especímenes. En el Gráfico 8 se presenta la gráfica  $\Delta T$  contra t obtenida a partir de datos experimentales adquiridos durante la medición. En el Gráfico 9 se muestra la gráfica de  $\Delta T$  contra  $\ln t$  con un ajuste de mínimos cuadrados sobre la región lineal de la curva obtenida. Los resultados deberán ser por sección del artículo.



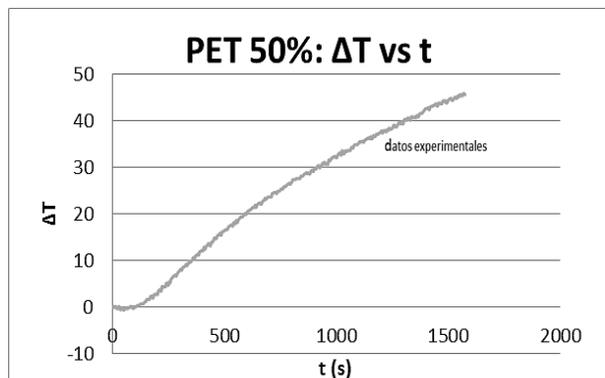
**Gráfico 9** Gráfica de la temperatura contra logaritmo natural del tiempo, para 50% de PET



**Gráfico 10** Obtención de la pendiente “A” mediante el uso del método de mínimos cuadrados

A partir del ajuste lineal en el rango de 600 a 1200 segundos (Gráfico 10), se obtiene el valor de la pendiente  $A=25.004$ . Por otro lado, se calcula la potencia disipada por unidad de longitud (q) a partir de la longitud del alambre (L), corriente suministrada (I) y voltaje suministrado (V)

$$q = \frac{V * I}{L} = \frac{[(26.2V)(3.6A)]}{0.25m} = 377.28W/m$$



**Gráfico 8** Gráfica de la temperatura contra tiempo para una muestra de bloque de 50% de PET

Con lo anterior se determina el valor de conductividad ( $k$ ) a partir de la ecuación 7

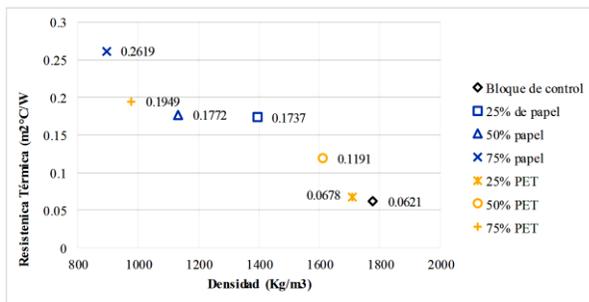
$$k = \frac{q}{4\pi A} = \frac{377.28}{4\pi * 25.004} = 1.2007W/m^{\circ}C$$

**Tabla de resultados**

En la Tabla 1 se presentan los resultados de conductividad térmica obtenidos para las muestras analizadas en las que se incluye la Resistencia Térmica que resulta del inverso de la conductividad térmica multiplicado por el espesor (14.3cm = 0.143m)

Muestra	Voltaje (V)	Intensidad de corriente (A)	Potencia (q/4πL)	Valor de A	Conductividad térmica (w/m°C)	Resistencia térmica (m²C/W)
Bloque de control (arena y cemento)	21.1	3.8	32.795	13.798	2.375	0.06021
25% de papel	26.35	2.95	24.743	30.054	0.8232	0.1737
50% de papel	26.6	3.1	26.2478	32.338	0.8066	0.1772
75% de papel	10.78	1.5	3.147	9.4273	0.3439	0.2619
25% de PET	26.5	3.7	30.385	14.606	2.109	0.0678
50% de PET	26.2	3.6	30.0229	25.004	1.2	0.1191
75% de PET	10.69	1.5	3.3167	7.2455	0.7337	0.1949
Block comm (arena, cemento y árido)	26.1	3.4	28.2468	26.603	1.061	0.1347
Ladrillo	26.5	3.6	30.3667	43.388	0.6998	0.2043

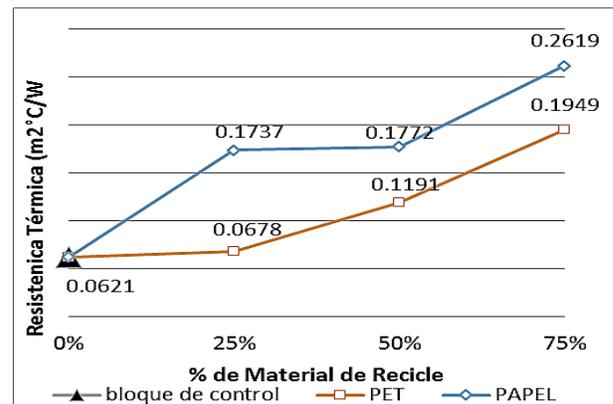
**Tabla 1** Resultados sobre la conductividad térmica de las muestras analizadas



**Gráfico 11** Resistencia térmica en función de la densidad

En la el Gráfico 11 se observa el efecto que tiene la densidad de las muestras sobre la resistencia térmica, resaltando que en comparación con el bloque de control, las muestras de 75% de PET y 75% de papel son las que presentan mayor resistencia térmica, por lo tanto son las de menor densidad.

Además, en el Gráfico 12 se puede observar el efecto del contenido de material reciclable en función de la resistencia térmica. Para el PET se presenta un incremento de resistencia sólo de  $5.2 \times 10^{-3} m^2C/W$  para una concentración de material reciclable del 25%, respecto al valor de esta propiedad para el bloque de control (bloque fabricado con el método tradicional). Para concentraciones de 50% y 75% se mantiene una pendiente casi constante, incrementándose poco más del doble el valor de la resistencia térmica para una concentración del 50% y cerca del triple para una concentración del 75%. Un comportamiento distinto presentan las muestras de concreto-papel ya que en este caso el incremento en la resistividad se observa en el intervalo de 0% a 25% manteniendo un cambio casi nulo en el intervalo de 25% a 50%, volviendo a incrementar de manera considerable para el intervalo de 50% a 75%. Quizá por la distribución geométrica del material reciclado en la muestra. La diferencia de resistencia térmica entre los materiales reciclados utilizados (papel= ----, PET= ) explica el por que los prototipos de concreto-papel presentan una resistencia térmica superior a los de concreto-PET



**Gráfico 12** Resistencia Térmica contra % de Material Reciclable

Por otro lado, analizando los datos anteriores se puede concluir que en comparación con el bloque de control las muestras de 75% de PET y 75% de papel son las que presentan menor conductividad térmica, por lo tanto el incremento neto en su resistencia térmica es la que se presenta en la Tabla 2:

¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.Muestra	Incremento de Resistencia térmica respecto al Bloque de control
25% de papel	2.80
50% de papel	2.85
75% de papel	4.22
25% de PET	1.09
50% de PET	1.92
75% de PET	3.14

**Tabla 1** Incremento neto de Resistencia térmica

### Agradecimiento

La presente investigación fue parcialmente financiada por la Fundación Educación Superior Empresa a través del proyecto “Manufactura y Caracterización de Bloques de Concreto con materiales Reciclados para Uso en Arquitectura Bioclimática”. Se agradece al CIATEQ sede Aguascalientes por las facilidades brindadas para el desarrollo del proyecto.

### Conclusiones

Se logró la validación de las pruebas al obtener valores cercanos a los reportados en la literatura para el ladrillo y el bloque de hormigón, asegurando así la obtención de datos confiables en los materiales ensayados.

Los mejores valores de resistencia térmica 0.1949 y 0.2619 m<sup>2</sup>°C/W, se obtienen al agregar 75 %, PET y papel respectivamente, siendo muy cercanos al valor reportado para el ladrillo 0.2043 m<sup>2</sup>°C/W.

Los prototipos con un agregado de 75% de material reciclado incrementaron su resistencia térmica respecto al bloque de control en el orden de 3.24 veces para el concreto-PET y de 4.35 para el Concreto-Papel.

Por su parte los valores obtenidos para la muestra sin agregado de material reciclado fue de 0.0621 m<sup>2</sup>°C/W siendo este un valor bajo comparado con el reportado para los bloques comunes (0.1347m<sup>2</sup>°C/W).

### Referencias

1. U.S. National library of Medicine. MedLine Plus. [Online] National Institutes of health, 01 22, 2013. [Cited: 05 01, 2014.] <http://www.nlm.nih.gov/medlineplus/ency/article/001982.htm>.
2. Senosiain, J. Bio-Arquitectura, En busca de un Espacio. México : Limusa A. de C.V. p. 156.
3. Physical and mechanical characterization of Fiber-Reinforced Aerated Concrete (FRAC). Bonakdar, A., Babbitt, F. and Mobasher, B. s.l.: Cement and Building Materials, April 2013, Vol. 38, pp. 82-91.
4. Preliminary analysis of concrete reinforced with waste bottles PET fibers. Foit, D. 4, 2011, Vol. 25, pp. 1906-15.
5. Foti, Dora. 4, s.l. : Construction and Building Material, Vol. 25, pp. 1906-1915.
6. Material and structural performance evaluation of recycled PET fiber reinforced concrete. Kim, Sung Bae, et al., et al. 3, s.l. : Cement and Concrete Composites, March 2010, Vol. 32, pp. 232-240.

7. Flexural, shear and bond strength of polymer concrete utilizing recycled resin obtained from post consumer PET bottles. Mahdi, Fareed, Abbas, H. and Khan, Asif Ali. s.l. : Construction and Building Materials, July 2013, Vol. 44, pp. 798-811.
8. On the mechanical properties of concrete containing waste PET particles. Rahmani, E., et al., et al. s.l. : Construction and Building Materials, October 2013, Vol. 47, pp. 1302-1308.
9. sol.arq. Características térmicas básicas. [Online] julio 16, 2012. <http://www.sol-arq.com/index.php/caracteristicas-materiales/caracteristicas-basicas>.
10. Características térmicas básicas. [Online] julio 15, 2012. [Cited: diciembre 8, 2014.] <http://www.sol-arq.com/index.php/caracteristicas-materiales/caracteristicas-basicas>.
11. Ramirez, Ing. Salvador Alvarado. tecnica del hilo caliente. [Online] enero 2011. [Cited: diciembre 2, 2014.]
12. Thermal conductivity of newspaper sandwiched aerated lightweight. Ng, S. C., Low, K. S. 2010, Energy and Buildings, Vol. 42, pp. 2452–2456.
13. Elevated-temperature thermal properties of lightweight foamed concrete. Othuman, M. A., Wang, Y. C. 2011, Construction and Building Materials, Vol. 25, pp. 705–716.
14. Factors Affecting the Thermal Properties of Concrete and Applicability of Its Prediction Models. Khan, M. I. 2002, Building and Environment, Vol. 37, pp. 607-614.
15. H. S. Carslaw, J. C. Jaeger. Conduction of Heat in Solids. London : Oxford univ. Press, 1959.
16. Duarte, Saúl García. Medición de conductividad térmica de fluidos. [Online] noviembre 18, 2009.
17. Tippens, Paul E. Conductividad termica . Fisica conceptos y aplicaciones septima edicion. Cd. Mexico : McGraw-Hill, 2007, p. 372.
18. eoi.es. Arquitectura Bioclimática: Introducción y antecedentes. [Online] febrero 27, 2012. [Cited: octubre 1, 2014.] [http://www.eoi.es/wiki/index.php/Arquitectura\\_Bioclim%C3%A1tica:\\_Introducci%C3%B3n\\_y\\_antecedentes\\_en\\_Ecomateriales\\_y\\_construcci%C3%B3n\\_sostenible](http://www.eoi.es/wiki/index.php/Arquitectura_Bioclim%C3%A1tica:_Introducci%C3%B3n_y_antecedentes_en_Ecomateriales_y_construcci%C3%B3n_sostenible).
19. inspiration. Material reciclado. [Online] agosto 16, 2010. [Cited: octubre 1, 2014.] <https://www.inspiration.org/cambio-climatico/reciclaje/material-reciclado>.
20. Bot G, P.A. Greenhouses Climate: From physical processes to dynamic model. PhD thesis, Wageningen Agricultural University : the Netherlands, 1983. p. 240, PhD thesis. PhD thesis.
21. Use of recycled waste pet bottles fibers for the reinforcement of concrete, . Foti, , Dora. s.l. : Composite Structures, February 2013, Vol. 96, pp. 396-404.
22. Garzon, B. Arquitectura Sostenible Bases y casos demostrativos. Bogota Colombia : Nokubosa, 2011.

23. Polymer concrete with recycled PET: The influence of the addition of industrial waste on flammability. Guerra, Karina. s.l. : Construction and Building Materials, March 2013, Vol. 40, pp. 378-389.

24. Properties and durability of concrete containing polymeric wastes (tyre rubber and polyethylene terephthalate bottles): An overview. Pacheco-Togal, F., Ding, Yining and Jalali, Said. s.l. : Construction and Building Materials, May 2012, Vol. 30, pp. 714-724.

25. Use of plastic waste as aggregate in cement mortar and concrete preparation: A review. Saikia, Nabajyoti and de Brito, Jorge. s.l. : Construction and Building Materials, September 2012, Vol. 34, pp. 385-401.

26. Tylor, Charmaine R. Alternative Building Books. [Online] 1999. [Cited: Junio 2014, 20.] [www.papercrete.com](http://www.papercrete.com)

## Comparación de puntos de equilibrio de sistemas de potencia con modelos de carga estática dependiente de voltaje

GARCÍA-GUZMÁN, José Miguel†, OLIVARES-NEGRETE, Leonardo, ORTEGA-HERRERA, Francisco Javier y FIGUEROA-GODOY, Fernando

*Instituto Tecnológico Superior de Irapuato*

Recibido Agosto 10, 2016; Aceptado Septiembre 29, 2016

### Resumen

En este trabajo se presenta una comparación de los puntos de equilibrio de estado estacionario de sistemas eléctricos de potencia (SEPs) con los modelos de carga estática dependiente de voltaje. Estos modelos de carga estática son integrados en el análisis de Flujos de Potencia (FP) para comparar los puntos de operación de SEPs de prueba y reales con el fin de estudiar cómo afecta este modelado a los resultados asociados con el punto de operación o equilibrio de los sistemas de potencia. Los modelos de carga estática considerados son el exponencial y el compuesto. Diversos casos de estudio son llevados cabo con el SEP de prueba de 5 nodos y con SEP de Nueva Inglaterra de 39 nodos. Los resultados muestran que al integrar los modelos de las cargas dependientes de voltaje en el análisis de FP el punto de equilibrio cambia, ya que el voltaje nodal aumenta modificando la distribución de los flujos de potencia, las pérdidas y la generación de potencia, tanto activa como reactiva.

**Puntos de equilibrio, operación de estado estacionario, flujos de potencia, cargas estáticas**

### Abstract

This paper presents a comparison of steady-state equilibrium points of electric power systems (EPS) with voltage dependent static models. These static load models are integrated into Power Flow (PF) analysis to compare the steady-state operation of real and test power systems in order to study the effects of the load modelling in results associated with the equilibrium points of power systems. The static load models considered here are the exponential and composed. Several study cases are carried out with the IEEE test power system of 5 nodes and realistic New England Power System. The results show that when the voltage dependent loads models are integrated into power flow formulation, the equilibrium point is different due to an increase of nodal voltage, which modifies the power flow distribution, the power losses and the power generation, both active and reactive power.

**Equilibrium points, steady-state operation, power flow, static loads**

**Citación:** GARCÍA-GUZMÁN, José Miguel, OLIVARES-NEGRETE, Leonardo, ORTEGA-HERRERA, Francisco Javier y FIGUEROA-GODOY, Fernando. Comparación de puntos de equilibrio de sistemas de potencia con modelos de carga estática dependiente de voltaje. Revista de Energía Química y Física 2016, 3-8: 25-33.

\*Correspondencia al Autor (Correo Electrónico: migarcia@itesi.edu.mx)

† Investigador contribuyendo como primer autor

## Introducción

El problema de FP consiste en determinar el punto de operación de estado estacionario de un Sistema Eléctrico de Potencia. Tal punto de operación consiste en obtener los voltajes y ángulos de bus, además de la potencia activa y reactiva que fluye a través de los distintos elementos de transmisión del sistema eléctrico. Los estudios de flujos de potencia constituyen una herramienta indispensable en la planeación, operación, control e intercambio de potencia entre distintos sistemas eléctricos (Saadat, 1999), además, esta información es esencial para el continuo monitoreo del estado actual del sistema y para analizar la efectividad de planes alternos para futuras expansiones del sistema para satisfacer el incremento de la carga demandada (Kothari & Nagrath, 2003).

Las cargas eléctricas se pueden definir como elementos o dispositivos conectados al SEP que elementos pueden consumir, generar o controlar potencia activa o reactiva y además son afectadas por variaciones del voltaje nodal (Rifaat, 2004). En estudios de FP convencionales las demandas de potencia activa y reactiva son consideradas como valores constantes, sin embargo, las cargas que normalmente se encuentran en los SEPs, son del tipo residencial, industrial y comercial, y son dependientes de las variaciones de la magnitud del voltaje nodal y de la frecuencia (El-Hawary & Dias, 1987).

Algunos investigadores han mostrado que los modelos de cargas tienen efectos muy significativos en los puntos de equilibrio de estado estacionario obtenidos mediante el análisis de FP, por lo que, el uso de un modelo de carga real es muy importante para mejorar la calidad de los estudios llevados a cabo en los SEP's (Haque, 1996).

Los modelos de carga tradicionalmente son clasificados en dos principales categorías: modelos de carga estática y modelos de carga dinámica (Kundur *et al*, 1994). Los modelos de carga estática consideran solo características de dependencia del voltaje nodal y su principal aportación es hacia los análisis de estado estacionario de sistemas de potencia, los cuales pueden ser por ejemplo, análisis de flujos de potencia convencional, flujos de potencia óptimos, mercados eléctricos, entre otros. Generalmente, las cargas estáticas son representadas mediante modelos exponenciales (Murty, 1977) y modelos compuestos, los cuales son conocidos también como modelos Impedancia-Corriente-Potencia constante o modelos ZIP (Kundur, 1994).

Mientras que los modelos de carga dinámica consideran, además de características de dependencia del voltaje nodal, las variaciones de la frecuencia del SEP, por lo que, estos modelos son ampliamente utilizados en el análisis de estabilidad de voltaje y contingencias del sistema (Kepka *et al*, 2005).

Es muy importante conocer la composición exacta de las cargas en el momento de interés para poder implementar los modelos de cargas eléctricas, lo cual es muy difícil de estimar, ya que el cambio continuo de muchos dispositivos y aparatos del cliente se ve reflejado en la composición de la carga.

Incluso conociendo exactamente esta composición, es impráctico representar cada componente de forma individual debido a que son miles de ellos (Concordia & Ihara, 1982). Por este motivo, los modelos de las cargas se expresan en función del voltaje y de ciertos parámetros que hacen más exacto el modelado de las cargas en condiciones reales.

Esto ha llamado la atención de muchos investigadores alrededor del mundo, quienes se han dedicado a estimar los parámetros de los modelos de cargas eléctricas para poder representarlas de una forma más apegada a la realidad, basándose principalmente en dos enfoques establecidos: enfoque basado en mediciones y enfoque basado en componentes (Armas, 1995; Ranade & Mechenbier, 2001; García *et al*, 2013; Nam *et al*, 2013; Chang & Huang, 2014; Patel *et al*, 2014; Rodríguez *et al*, 2015). Desde la década de 1980 se han reportado muchos estudios donde se han implementado los modelos carga estática para llevar a cabo análisis de estado estacionario de SEPs (El-Hawary & Dias, 1987; Price *et al*, 1988, El Hawary, 1982; Dias, 1985), sin embargo, no se han evaluado explícitamente los modelos estáticos en forma separada ni se ha reportado una comparativa de los puntos de equilibrio de estado estacionario de sistemas de potencia con dichos modelos de cargas.

En el contexto antes mencionado, en éste trabajo se integran los modelos de carga estática en el análisis de FP utilizando el método de Newton-Raphson con el fin de obtener los puntos de equilibrio de estado estacionario y realizar una comparativa entre ellos que permita determinar explícitamente la influencia de cada modelo de cargas dependientes de voltaje en tales puntos.

### Formulación del análisis de Flujos de Potencia

El análisis de FP establece que en cualquier nodo  $i$  de un SEP la suma de la potencia generada ( $P_{Gi}$ ,  $Q_{Gi}$ ) la potencia demandada ( $P_{Di}$ ,  $Q_{Di}$ ) y la potencia inyectada por los  $j$  elementos de transmisión del sistema de potencia ( $\sum P_i^{iny j}$ ,  $\sum Q_i^{iny j}$ ) es cero. De manera que el balance de potencia activa y reactiva en el nodo  $k$  se puede modelar como sigue:

$$\Delta P_i = P_{Gi} - P_{Di} - \sum_{j=1}^{N_b} P_i^{iny j} = 0 \quad (1)$$

$$\Delta Q_i = Q_{Gi} - Q_{Di} - \sum_{j=1}^{N_b} Q_i^{iny j} = 0 \quad (2)$$

En las expresiones anteriores los términos de las sumatorias de potencia activa y reactiva son dados por (3) y (4), respectivamente.

$$P_i = \sum_{j=1}^n Y_{ij} V_i V_j \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (3)$$

$$Q_i = -\sum_{j=1}^n Y_{ij} V_i V_j \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (4)$$

Donde  $Y_{ij}$  y  $\theta_{ij}$  representan, en forma respectiva, la magnitud y ángulo del elemento ( $i, j$ ) de la matriz de admitancia de bus;  $V_m$  es la magnitud y  $\delta_m$  el ángulo del voltaje en el nodo  $m$  ( $m=i, j$ ). Las ecuaciones anteriores son no lineales, de manera que el sistema de ecuaciones (1)-(2) es no lineal y es resuelto aquí mediante el método de Newton-Raphson como sigue:

$$\begin{bmatrix} J_1 & J_2 \\ J_3 & J_4 \end{bmatrix}^k \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta V \end{bmatrix}^k = \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix}^k \quad (5)$$

$$\delta^{k+1} = \delta^k + \Delta \delta^k; \quad V^{k+1} = V^k + \Delta V^k \quad (6)$$

Los jacobianos de la matriz jacobiana principal de la Ecuación (5) están dados por las expresiones siguientes:

$$J_1 = \frac{\partial P_i}{\partial \delta_i}; \quad J_2 = \frac{\partial P_i}{\partial V_i}; \quad J_3 = \frac{\partial Q_i}{\partial \delta_i}; \quad J_4 = \frac{\partial Q_i}{\partial V_i}; \quad (7)$$

Mientras que los términos de la derecha,  $\Delta P$  y  $\Delta Q$ , son calculados en cada nodo  $i$  mediante (1) y (2) considerando que en los nodos donde se conectan los generadores se conoce la potencia  $P_{Gi}$  y en los nodos de carga se conoce tanto  $P_{Di}$  como  $Q_{Di}$ . Se debe mencionar que en el método de Newton-Raphson la potencia  $P_i$  y  $Q_i$  se calculan en cada iteración  $k$  hasta que el balance de potencia activa en el nodo  $i$  sea menor a una tolerancia de convergencia especificada.

### Modelos estáticos de carga dependientes de voltaje

Como se mencionó, las cargas eléctricas estáticas dependen del voltaje en que se consume potencia, de modo que este tipo de cargas son representadas mediante modelos exponenciales y compuestos que intentan reproducir el comportamiento de dichas cargas lo más cercano posible a la realidad. En el presente trabajo solo se consideran los modelos de carga estática debido a que el principal interés es la evaluación del comportamiento de estado estacionario del sistema de potencia.

### Modelo exponencial

El modelo exponencial para la potencia activa y reactiva demandada en el nodo  $i$  en función del voltaje es dado por (8) y (9), en forma respectiva, como sigue (Kundur, 1994):

$$P_{Di} = P_{Di,0} \left( V_i/V_{i,0} \right)^\alpha \quad (8)$$

$$Q_{Di} = Q_{Di,0} \left( V_i/V_{i,0} \right)^\beta \quad (9)$$

Donde  $\alpha$  y  $\beta$  son los parámetros de la carga exponencial y el subíndice 0 indica valor nominal. Estos parámetros de tipo potencia constante, corriente constante e impedancia constante, respectivamente.

Los exponentes  $\alpha$  y  $\beta$  pueden tener un amplio rango de valores, pero para este estudio se considera el valor de 1.38 y 3.22, respectivamente, con la única finalidad de comparar los puntos de equilibrio que se obtienen con ambos modelos (Nam *et al*, 2013).

### Modelo compuesto

El modelo compuesto representa la carga dependiente voltaje como una combinación de una carga de impedancia constante (Z), una carga de corriente constante (I) y una carga de potencia constante (P), por lo que, también es conocido de manera común como modelo ZIP. Este modelo expresa la potencia activa y reactiva demandada en el nodo  $i$  en función del voltaje nodal como se muestra enseguida (Kundur, 1994):

$$P_{Di} = P_{Di,0} \left( p_1 \left( V_i/V_{i,0} \right)^2 + p_2 \left( V_i/V_{i,0} \right) + p_3 \right) \quad (10)$$

$$Q_{Di} = Q_{Di,0} \left( q_1 \left( V_i/V_{i,0} \right)^2 + q_2 \left( V_i/V_{i,0} \right) + q_3 \right) \quad (11)$$

Al igual que en el modelo anterior, en este caso 0 indica valor nominal, mientras que  $p_n$  y  $q_n$  ( $n=1, 2, 3$ ) representan los coeficientes de impedancia, corriente y potencia constante para la potencia activa y reactiva, respectivamente. La selección del valor de los coeficientes de este modelo depende del porcentaje de elementos conectados a cada sistema en particular. Con el fin de comparar los puntos de equilibrio de estado estacionario se toman los siguientes valores para los coeficientes asociados con las cargas activas:  $p_1=0.35$ ,  $p_2=0.13$ ,  $p_3=0.52$ ; mientras que para los coeficientes de las cargas reactivas se consideran los siguientes valores:  $q_1=0.56$ ,  $q_2=0.08$ ,  $q_3=0.36$  (Nam *et al*, 2013). Se debe notar que la suma de los coeficientes  $p_n$  y  $q_n$  es igual a 1.

Incorporación de los modelos de cargas dependientes de voltaje en el análisis de FP.

La incorporación de los modelos de cargas exponenciales dependientes de voltaje en la solución de FP modifica los elementos de la diagonal principal de los jacobianos  $J_2$  y  $J_4$  de acuerdo a (12) y (13), ya que dichos jacobianos son expresados mediante derivadas parciales respecto a la magnitud del voltaje  $V_i$ .

$$\frac{\partial P_{Di}}{\partial V_i} = \frac{\partial}{\partial V_i} \left( P_{Di,0} \left( V_i/V_{i,0} \right)^\alpha \right) \quad (12)$$

$$\frac{\partial Q_{Di}}{\partial V_i} = \frac{\partial}{\partial V_i} \left( Q_{Di,0} \left( V_i/V_{i,0} \right)^\beta \right) \quad (13)$$

De manera similar, la integración de los modelos compuestos de carga en la formulación de flujos de potencia modifica la diagonal de los jacobianos mencionados de acuerdo a las derivadas parciales siguientes.

$$\frac{\partial P_{Di}}{\partial V_i} = \frac{\partial}{\partial V_i} \left( P_{D0} \left( p_1 (V/V_0)^2 + p_2 (V/V_0) + p_3 \right) \right) \quad (14)$$

$$\frac{\partial Q_{Di}}{\partial V_i} = \frac{\partial}{\partial V_i} \left( Q_{D0} \left( q_1 (V/V_0)^2 + q_2 (V/V_0) + q_3 \right) \right) \quad (15)$$

Además de la modificación de la matriz jacobiana, la incorporación de los modelos de las cargas hace necesario que las Ecuaciones (8)-(9) y (10)-(11) se sustituyan en las expresiones de balance de potencia (1)-(2), dependiendo del modelo de carga a utilizar, es decir, para el caso del modelo exponencial se sustituye (8) en (1) y (9) en (2), mientras que para el modelo compuesto se sustituye (10) y (11) en (1) y (2), respectivamente.

## Resultados

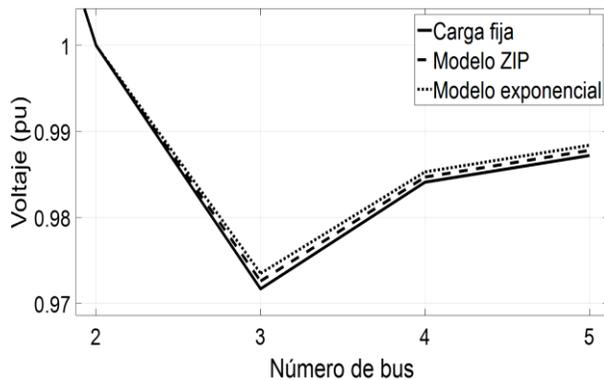
El sistema eléctrico de potencia de prueba de 5 nodos (Stagg & El-Abiad.1968) y el sistema de Nueva Inglaterra de 39 nodos (Pai, 1989) son utilizados para llevar a cabo diversos casos de estudio donde se determina la operación de estado estacionario de estos sistemas de potencia, a partir de lo cual es posible comparar los puntos de equilibrio de dichos sistemas con los dos modelos de carga dependiente de voltaje considerados en este trabajo. La tolerancia de convergencia considerada en los casos de estudio es de  $1 \times 10^{-9}$ .

Una comparación del punto de equilibrio de estado estacionario del sistema de 5 nodos con los dos modelos de carga dependiente de voltaje y con carga constante se presenta en la Tabla 1.

Bus	Modelo exp.		Modelo ZIP		Carga constante	
	V	$\theta$ (°)	V	$\theta$ (°)	V	$\theta$ (°)
1	1.060	0.000	1.060	0.000	1.060	0.000
2	1.000	-1.958	1.000	-1.997	1.000	-2.061
3	0.974	-5.551	0.973	-5.629	0.972	-5.765
4	0.985	-4.807	0.985	-4.862	0.984	-4.957
5	0.988	-4.501	0.988	-4.550	0.987	-4.637

**Tabla 1** Punto de equilibrio de estado estacionario del sistema de potencia 5 nodos

La Tabla 1 muestra que para este sistema los voltajes nodales se incrementan con los modelos de las cargas dependientes de voltaje, sin embargo, es importante notar que en el caso del modelo exponencial los voltajes son mayores que con los otros dos casos, tal como se muestra en el perfil de magnitud de los voltajes nodales del Gráfico 1. En esta figura solo se grafican los voltajes de los nodos de carga, ya que la magnitud de voltaje en el nodo slack y los nodos de generación permanece constante



**Gráfico 1** Perfil de voltaje en los nodos de carga del sistema de 5 nodos

La Tabla 2 muestra un resumen comparativo de resultados del punto de equilibrio del sistema de potencia de 5 nodos con los modelos de carga dependiente de voltaje. Los datos de la tabla muestran que para este sistema de potencia en particular el incremento del voltaje nodal provoca una disminución de las pérdidas y la potencia demandada, por lo que, la generación de potencia también se ve disminuida. Este comportamiento se presenta tanto para la potencia activa como para la reactiva. En este caso, el punto de equilibrio con el modelo exponencial se puede considerar mejor, ya que al tener voltajes mayores tiene menos pérdidas, menos demanda de potencia y menor generación.

Resultados (en totales)	Sistema de 5 nodos		
	Modelo exp.	Modelo ZIP	Carga cte.
Generación (MW)	167.154	168.458	171.122
Generación (MVAR)	26.792	27.946	29.223
Demanda (MW)	161.291	162.696	165.000
Demanda (MVAR)	38.386	39.367	40.000
Pérdidas (MW)	5.863	5.963	6.122
Pérdidas (MVAR)	-11.594	-11.275	-10.777

**Tabla 2** Resumen de resultados en el punto de equilibrio del sistema de potencia 5 nodos

Los casos de estudio muestran que la anterior operación de estado estacionario se presenta solo en los SEPs pequeños. En los casos de estudio con el sistema de potencia de Nueva Inglaterra, el cual es un sistema real de gran escala, la operación varía con cada uno de los modelos de carga, tal como lo muestra el resumen de resultados de la Tabla 3.

Resultados (en totales)	Sistema de Nueva Inglaterra		
	Modelo exp.	Modelo ZIP	Carga cte.
Generación (MW)	6140.787	6151.251	6146.848
Generación (MVAR)	162.037	227.876	241.635
Demanda (MW)	6097.071	6102.149	6097.100
Demanda (MVAR)	1375.371	1397.277	1408.900
Pérdidas (MW)	51.234	51.686	52.387
Pérdidas (MVAR) (-)	1102.384	1104.827	1101.912

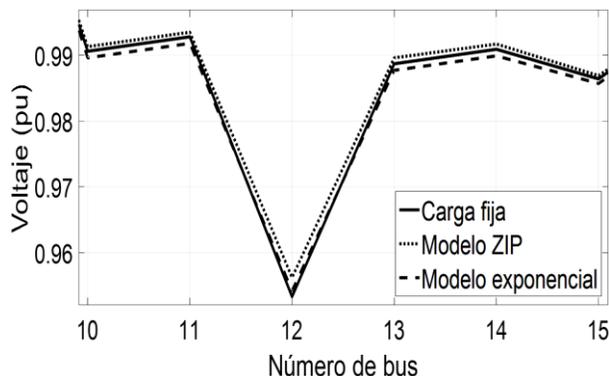
**Tabla 3** Resumen de resultados en el punto de equilibrio del sistema de potencia de Nueva Inglaterra

La tabla anterior muestra que con el modelo exponencial se tiene un punto de equilibrio con menores pérdidas, menos generación y menor demanda de potencia activa con respecto al modelo compuesto y carga constante, lo cual representa un comportamiento aparentemente lógico.

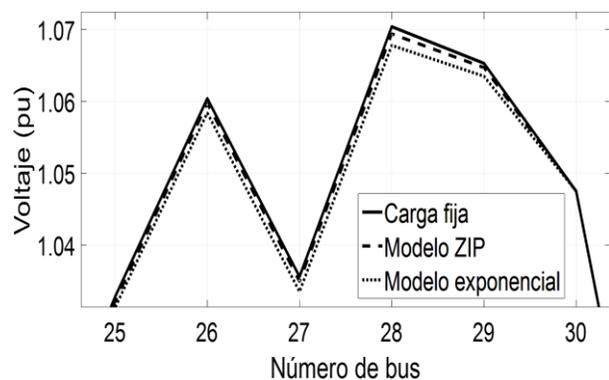
Sin embargo, en el caso del punto de equilibrio con el modelo compuesto o ZIP las pérdidas de potencia activa son menores que con carga constante, pero la generación y la potencia demandada son mayores, lo que no corresponde a una operación lógica, ya que se espera que con el aumento de las pérdidas se incremente la generación de potencia.

De esta manera, es posible inferir que en los puntos de equilibrio de los SEPs la generación de potencia obedece a la demanda de MW, es decir, con el incremento de la potencia demandada se incrementa la potencia generada y viceversa sin importar las pérdidas de potencia activa en los elementos de transmisión.

Además, con el aumento del voltaje nodal disminuyen las pérdidas de potencia activa, pero la potencia demandada puede aumentar o disminuir dependiendo del nivel de voltaje en el nodo donde se conecte y de la no linealidad del modelo de carga que se haya incorporado en la formulación de FP. Este comportamiento de la operación en el punto de equilibrio se puede generalizar para el caso de la potencia reactiva y para cualquier sistema de prueba o real de gran escala. En los gráficos 2 y 3 se muestran, respectivamente, los perfiles de voltaje de los buses 10-15 y 25-30 del sistema de Nueva Inglaterra con el fin de apreciar el comportamiento del voltaje nodal en cada punto de equilibrio con los distintos modelos de carga.



**Gráfico 2** Perfil de voltaje en los nodos de carga 10-15 del sistema de Nueva Inglaterra.



**Gráfico 3** Perfil de voltaje en los nodos de carga 25-30 del sistema de Nueva Inglaterra

En el Gráfico 2 se puede observar que en los nodos 10-15 el voltaje del modelo compuesto es mayor a los otros dos voltajes. Sin embargo, en los nodos 10-11 y 13-15 el voltaje del modelo exponencial es menor al voltaje con carga constante, mientras que en el nodo 12 se presenta lo contrario. Se debe notar que en estos nodos el voltaje del modelo exponencial siempre es menor al modelo compuesto, situación que cambia en los nodos 25-30 del Gráfico 3, donde los voltajes en orden decreciente son siempre carga fija, modelo compuesto y exponencial. Lo anterior muestra que la variación del voltaje con cada modelo de carga es diferente entre sí, lo cual se debe a la zona del sistema donde se encuentre el nodo y a la forma no lineal del modelo de carga dependiente de voltaje en sí.

## Conclusiones

Una comparación de los puntos de equilibrio de estado estacionario de sistemas eléctricos de potencia con los modelos de carga estática dependiente de voltaje se ha presentado. Los modelos de carga exponencial y compuesto se implementaron en la solución de FP para obtener los puntos de equilibrio de un sistema de potencia de prueba y real de gran escala. Los casos de estudio mostraron que con los modelos de carga dependiente de voltaje los puntos de equilibrio se modifican por el cambio en la magnitud de los voltajes nodales. La variación del voltaje con cada modelo de carga es diferente entre sí, lo cual se debe a la zona del sistema donde se encuentre el nodo y a la forma no lineal del modelo de carga dependiente de voltaje en sí. Este cambio en el voltaje nodal provoca una redistribución de flujos de potencia cambiando las pérdidas en los elementos de transmisión, la generación y la demanda de potencia activa y reactiva.

Además, en los puntos de equilibrio de los SEPs la generación de potencia obedece a la demanda de potencia, ya sea activa o reactiva, sin importar las pérdidas de potencia en los elementos de transmisión. Este comportamiento de la operación en el punto de equilibrio se puede generalizar para cualquier sistema de prueba o real de gran escala.

## Referencias

- Armas Brito, G. E. (1995). Características de frecuencia y voltaje de la carga para estudios de sistemas eléctricos de potencia. (Doctoral dissertation, QUITO/EPN/1995).
- Chang, C. L., & Huang, P. H. (2014). Load Modeling Study Using Measurement Data for Taiwan Power System, *Journal of Marine Science and Technology*, 22(5), 643-649.
- Concordia, C., & Ihara, S. (1982). Load representation in power system stability studies, *IEEE transactions on power apparatus and systems*, 969-977.
- Dias, L. G. (1985). Load Modelling and Incorporation in Load Flow Studies. (Doctoral dissertation, Technical University of Nova Scotia).
- El-Hawary, M. E. (Enero, 1982). Power system load modeling and incorporation in load flow solutions, *Proceedings of the Third Large Systems Symposium, University of Calgary*.
- El-Hawary, M. E., & Dias, L. G. (1987). Incorporation of load models in load-flow studies: form of model effects, *IEE Proceedings C-Generation, Transmission and Distribution* 134(1), 27-30.
- El-Hawary, M. E., & Dias, L. G. (Julio, 1987). Bus sensitivity to load-model parameters in load-flow studies, *IEE Proceedings C-Generation, Transmission and Distribution*, 134(4), 302-305).
- García, L. F. R., Londoño, S. M. P., & Flórez, J. J. M. (2013). Estimación de parámetros de un modelo de carga de recuperación exponencial empleando técnicas metaheurísticas, *Scientia Et Technica*, 18(3), 453-462.
- Haque, M. H. (1996). Load flow solution of distribution systems with voltage dependent load models, *Electric Power Systems Research*, 36(3), 151-156.
- Kepka, J. (2005). Load Modeling for Power System Analysis, *Proceedings of International Conference on Environment and Electrical Engineering*, 1(1), 1-4.
- Kothari, D.P. & Nagrath, I.J. (2003). *Modern power system analysis*. New Delhi: Tata McGraw-Hill Education.
- Kundur, P., Balu, N.J. & Lauby, M.G. (1994). *Power system stability and control*. New York: McGraw-Hill.
- Murty, P. S. R. (1977). Load modelling for power flow solution, *J. Inst. Eng. (India)*, 58(3), 162-165.
- Nam, S. R., Kang, S. H., Lee, J. H., Choi, E. J., Ahn, S. J., & Choi, J. H. (2013). EMS-data-based load modeling to evaluate the effect of conservation voltage reduction at a national level, *Energies*, 6(8), 3692-3705.
- Pai, M. A. (1989). *Energy Function Analysis for Power System Stability*. Norwell: Kluwer Academic Publishers.

Patel, A., Wedeward, K., & Smith, M. (2014). Parameter estimation for inventory of load models in electric power systems. Proceedings of the World Congress on Engineering and Computer Science.

Price, W. W., Wirgau, K. A., Murdoch, A., Mitsche, J. V., Vaahedi, E., & El-Kady, M. (1988). Load modeling for power flow and transient stability computer studies, IEEE Transactions on Power Systems, 3(1), 180-187.

Ranade, S. J., Ellis, A., & Mechenbier, J. (2001). The development of power system load models from measurements, Transmission and Distribution Conference and Exposition, 1(1), 201-206.

Rifaat, R. M. (2004). On composite load modeling for voltage stability and under voltage load shedding, Power Engineering Society General Meeting, 1603-1610.

Rodríguez-García, L., Pérez-Londoño, S., & Mora-Flórez, J. (2015). Measurement-based exponential recovery load model: Development and validation, Dyna, 82(192), 131-140.

Saadat, H. (1999). Power system analysis. Boston: WCB/McGraw-Hill.

Stagg, G.W. & El-Abiad A. H. (1968). Computer Methods in Power System Analysis. USA: McGraw-Hill.

Wedeward, K., Adkins, C., Schaffer, S., Smith, M., & Patel, A. (2015). Inventory of load models in electric power systems via parameter estimation. Engineering Letters, 23(1), 20-28.

## Construcción de un foto-reactor para medir el desempeño de un geopolímero fotocatalítico

GASCA-TIRADO, J. R.\*†, HERRERA-DÍAZ, E. I, VÁZQUEZ-LANDAVERDE, P. A.´ y GÓMEZ-LUNA, B. E.

*Universidad de Guanajuato*

*Centro de Investigaciones y de Estudios Avanzados del I.P.N. Unidad Querétaro, Querétaro*

Recibido Julio 25, 2016; Aceptado Septiembre 30, 2016

### Resumen

A diferencia de una o dos generaciones anteriores, nosotros pasamos entre un 80 y 90% del tiempo en lugares cerrados. Por consecuencia, el aire del interior es nuestra principal fuente de exposición a los contaminantes ambientales. Dentro de los químicos que suelen estar presentes en los interiores se encuentran los compuestos orgánicos volátiles que son causantes del desarrollo de asma, alergias e incluso aumentan los riesgos de padecer enfermedades cardiovasculares y cáncer. En el presente documento se describe la construcción y operación de un foto-reactor diseñado para degradar 2-butanona a través de la acción de la luz ultravioleta sobre un geopolímero fotocatalítico. Se describe el proceso de operación, el acoplamiento del fotorreactor al cromatógrafo y se muestran los resultados de estabilización y de la reacción de la 2-butanona.

### Fotorreactor, geopolímero, 2-butanona

**Citación:** GASCA-TIRADO, J. R., HERRERA-DÍAZ, E. I, VÁZQUEZ-LANDAVERDE, P. A.´ y GÓMEZ-LUNA, B. E. Construcción de un foto-reactor para medir el desempeño de un geopolímero fotocatalítico. Revista de Energía Química y Física 2016, 3-8: 34-39.

### Abstract

Nowadays people stay in indoor places around 80 to 90 % of time. As a consequence, the indoor air is the main exposition to pollutants. The volatile organic compounds which are present in the air, may contribute to increase prevalence of asthma, allergies and cancer. In this document it is described the construction and operation of a photocatalytic reactor. It is described the construction, operation, the coupling between the reactor and the chromatograph and the early results obtained to degrade 2-Butanone by a photocatalytic geopolymer.

### Photoreactor, geopolymer, 2-butanone

\*Correspondencia al Autor (Correo Electrónico: ragatsi99@yahoo.com)

† Investigador contribuyendo como primer autor

## Introducción

A diferencia de una o dos generaciones anteriores, nosotros pasamos entre un 80 y 90% del tiempo en lugares cerrados. Por consecuencia, el aire de estos lugares es nuestra principal fuente de exposición a los contaminantes ambientales.

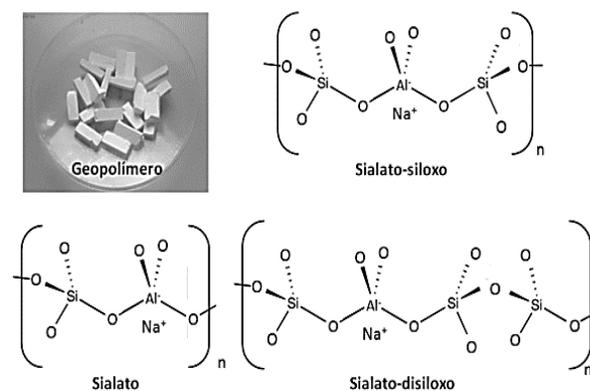
Estos contaminantes surgen a partir de dos fuentes principales: la infiltración del aire exterior y la emisión directa al interior de materiales de construcción, productos químicos empleados en el hogar, contaminantes biológicos y fuentes de combustión (incluyendo el tabaquismo) (G., 2002; Squinazi, 2002; Morrison & Nazaroff, 2002)

Dentro de los químicos que suelen estar presentes en los interiores se encuentran los compuestos orgánicos volátiles (VOC, por sus siglas en inglés) que son causantes del desarrollo de asma, alergias e incluso aumentan los riesgos de padecer enfermedades cardiovasculares y cáncer (Squinazi, 2002).

Algunos de estos VOC's son bastante inertes, pero otros son tan reactivos que sus enlaces químicos pueden romperse a través de la acción de la luz ultravioleta. Cuando este proceso se lleva a cabo con la asistencia de otro material sólido, podemos hablar de un proceso de fotocatalisis heterogénea.

La fotocatalisis heterogénea, es un proceso en donde el compuesto orgánico volátil se adsorbe en la superficie del material. Se activa el fotocatalizador en la presencia de luz ultravioleta del sol y la humedad el ambiente. Se generan radicales libres (oxidantes) capaces de destruir agentes contaminantes como: virus, bacterias, óxidos de nitrógeno y compuestos orgánicos volátiles y finalmente se liberan las moléculas oxidadas para regresar al ambiente.

De esta manera, los compuestos orgánicos volátiles son destruidos en su totalidad, desapareciendo y eliminando sus olores característicos. Por otro lado, un geopolímero es un compuesto semejante a un polímero orgánico cuya estructura incluye unidades de sialato, sialato-siloxo o sialato-disiloxo, y iones positivos (por ejemplo:  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$  y  $\text{Li}^+$ ) que balancean la carga negativa del  $\text{Al}^{3+}$  en el enlace tetraédrico (Davidovits J., 1991) (figura 1).



**Figura 1** Geopolímero y sus estructuras químicas: sialato, sialato-siloxo y sialato-disiloxo

En el presente documento se describe cómo se construyó y se puso en operación un fotorreactor para evaluar el desempeño de un geopolímero fotocatalítico cuya síntesis se describe brevemente.

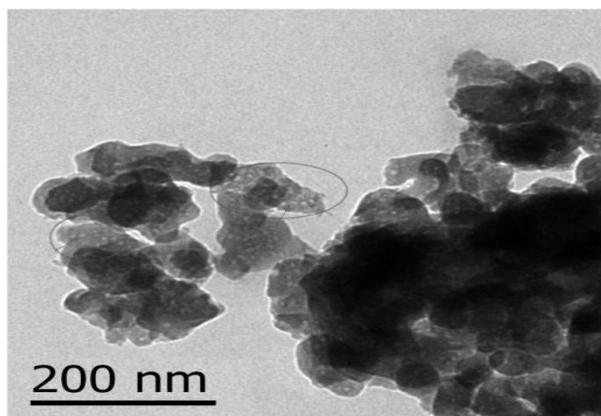
## Materiales y metodos

Para la síntesis del catalizador se utilizó Metacaolín de la empresa BASF, silicato de sodio e hidróxido de sodio de la empresa SIDESA México y, oxalato monohidratado de amonio y titanio de la empresa Sigma Aldrich. Las pruebas de degradación se realizaron con 2-butanona (Sigma-Aldrich) en una mezcla de aire puro 80%  $\text{N}_2$  – 20%  $\text{O}_2$  (Infra México).

Para la fabricación del fotorreactor se empleó un contenedor cilíndrico de aluminio con capacidad de 5 l y dos lámparas de UV (Exo Terra 15 W,  $\lambda=365$  nm) con sus respectivos balastos, una bomba de diafragma, tubería de cobre, mangueras de teflón, conectores y material de aluminio en general.

#### Incorporación del $\text{TiO}_2$ en el geopolímero.

La incorporación del  $\text{TiO}_2$  en el geopolímero se llevó a cabo a través de una reacción química entre el geopolímero no soluble y una solución electrolítica con óxidos de titanio (Gasca-Tirado J.R., 2012). Al reaccionar este sólido con la solución, los iones ( $\text{Na}^+$ ) que balancean la carga negativa del  $\text{Al}^{3+}$  se mueven libremente dentro del material y son reemplazados por los iones liberados por el oxalato. Este intercambio de  $\text{Na}^+$  por óxidos de titanio, permite que dentro de los poros del geopolímero (alrededor de los 15 nm) se ubiquen partículas de  $\text{TiO}_2$  con tamaños nanométricos (figura 2). El tamaño de estas partículas genera un incremento de área en los sitios activos donde las moléculas contaminantes se pueden adherir y degradar, dándole al geopolímero la propiedad de eliminar compuestos orgánicos volátiles.



**Figura 2** Las partículas de  $\text{TiO}_2$  de una muestra de geopolímero se distinguen como puntos claros en las zonas encerradas

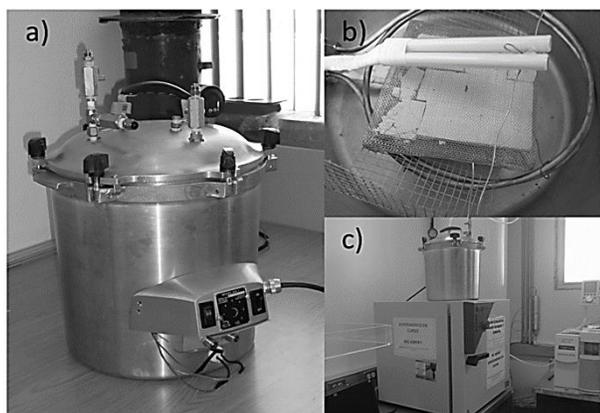
#### Construcción del foto reactor

El sistema de prueba de degradación se integró por tres secciones principales: Un fotorreactor, un sistema de recirculación de gases y un automuestreador.

El fotorreactor se construyó con un recipiente de aluminio al que se le instalaron un manómetro para medir la hermeticidad del conjunto y conexiones de 1/4" NPT que permitieran la entrada, salida y purga de los gases. Cada conexión contaba con una llave de paso y una unión a la tubería de teflón (figura 3a). En su interior; se contaba con dos lámparas de luz ultravioleta dispuestas sobre y por debajo del geopolímero fotocatalítico, un serpentín de calentamiento y una malla que fungía como soporte para el geopolímero (figura 3b).

Por otro lado, el sistema de recirculación de gases estaba basado en una bomba de diafragma (CHEMKER 400 1/6HP) que arrastraba los gases del interior del reactor hacia el muestreador (figura 4) y de regreso al fotorreactor de manera que se mantuviera una atmósfera constante en el conjunto. El muestreador fue fabricado con las mismas dimensiones de un vial, con un septo perforable, y con dos conexiones para la entrada y salida de gases.

Por otro lado, el automuestreador se colocó en el cromatógrafo de gases marca Agilent, modelo 890A (Agilent Technologies Inc., Santa Clara, CA) de manera que cada 23 minutos se tomaba una muestra del vial metálico colocado sobre éste. El gas acarreador empleado en el cromatógrafo fue Helio de alta pureza y los picos cromatográficos se identificaron con un espectrómetro de masas marca Agilent, modelo 5975C VL (Agilent Technologies).



**Figura 3** a) Foto-reactor con sus conexiones, b) conjunto: geopolímero fotocatalítico, lámparas UV y serpentín de calentamiento, y c) acoplamiento del fotorreactor al cromatógrafo de gases

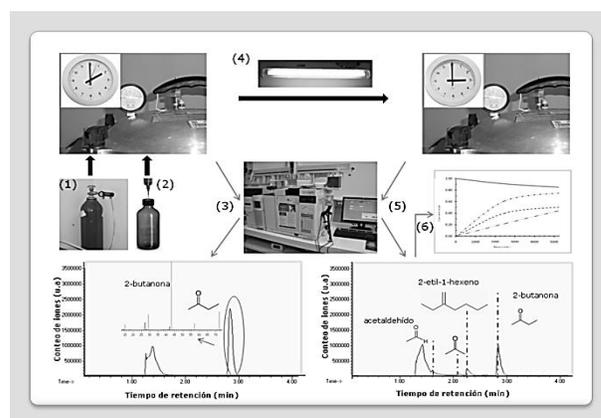


**Figura 4** Vial metálico colocado sobre la charola de automuestreo

Prueba de degradación de la 2-butanona en el foto-reactor.

En la figura 5 se esquematiza el proceso de operación del fotorreactor. 1) Se instaló el geopolímero fotocatalítico en el interior del fotorreactor, se cerró herméticamente y se hizo pasar una mezcla de aire seco (80% Nitrógeno - 20% Oxígeno), 2) Se inyectó 2-butanona a través del vial metálico y se hizo recircular el gas dentro del sistema: fotorreactor, tuberías y muestreador.

En esta etapa (3) se aseguró la estabilidad de las condiciones del equipo como temperatura, flujo y concentración de la 2-butanona a lo largo del tiempo, 4) Se prendieron las lámparas y se inició el proceso de degradación sobre el geopolímero fotocatalítico, 5) Se tomaron muestras de los gases a intervalos constantes de tiempo y finalmente en la etapa 6, se obtuvieron los cromatogramas y se generó la gráfica de concentración contra tiempo.



**Figura 5** Esquema del proceso de experimentación

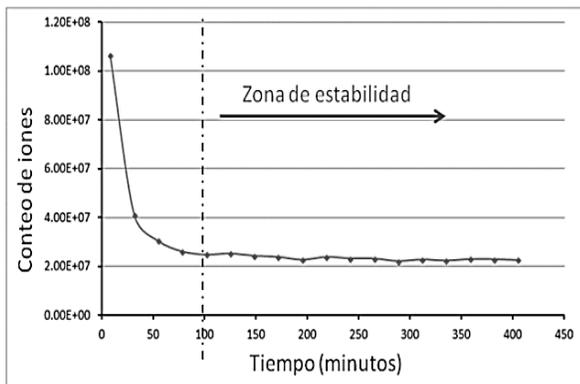
## Resultados y conclusiones

En el primer resultado obtenido se obtuvo el tiempo de estabilización de la atmósfera interior del sistema sin la acción de la luz UV.

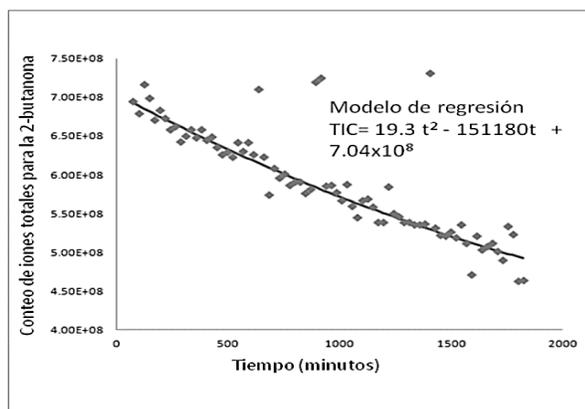
A través de una gráfica de control (Gráfico 1) se definió que a partir de los 100 min posteriores a la inyección de la 2-butanona el sistema alcanza la estabilidad y está listo para realizar las pruebas de degradación.

El error estimado en esta prueba (inyección de 10  $\mu$ l de 2-butanona) fue de  $1.87785 \times 10^{-5} \pm 5.1318 \times 10^{-6}$  mol/L

Por otro lado, una vez logrado la estabilidad del sistema, se prendieron las lámparas de luz UV y se observó una disminución de la concentración de la 2-butanona a lo largo del tiempo (Gráfico 2). En esta misma figura se muestra el modelo de regresión para el comportamiento de la concentración de la 2-butanona.

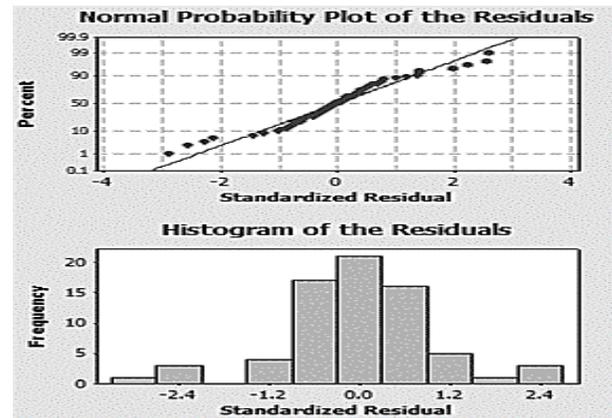


**Gráfico 1** Estabilización de la concentración de la 2-butanona en el reactor



**Gráfico 2** Degradación de la 2-butanona a través del tiempo y modelo de regresión

Finalmente, el modelo fue probado estadísticamente a través de la prueba de la normalidad de los residuales y su respectivo histograma (Gráfico 3)



**Gráfico 3** Resultados de la prueba de normalidad del modelo de degradación de la 2-butanona por el geopolímero fotocatalítico

Los resultados obtenidos demostraron que el diseño propuesto de un fotorreactor acoplado a un cromatógrafo de gases a través del sistema vial-automuestreador es robusto y permite seguir la fotólisis de la 2-butanona.

Dicha prueba se puede ampliar con diferentes compuestos orgánicos volátiles sin afectar la estabilidad del sistema y lograr así determinar la cinética de degradación del compuesto que se quiera probar.

## Referencias

G., I. (2002). Free radical chemistry and its concern with indoor air quality: an open problem. *Microchemical journal*, 73, 221-236.

Gasca-Tirado J.R., M.-R. A.-M.-V.-C.-Á. (2012). Incorporation of photoactive  $\text{TiO}_2$  in an aluminosilicate inorganic polymer by ion exchange. *Microporous and Mesoporous Materials*, 153, 282-287.

J., Davidovits. (1991). Geopolymers: Inorganic Polymeric New Materials. *Journal of Thermal Analysis*, 37, 1633-1656.

Morrison, G., & Nazaroff, W. W. (2002). Ozone interactions with carpet: Secondary emissions of aldehydes. *Environmental Science Technology*, 36, 2185-2192.

Squinazi, F. (2002). La pollution de l'aire a l'interior de batiments (allergenes exclus). *Revue Francaise d'Allergologie et d'immunologie clinique*, 248-255..

## Determinación de los factores que influyen en la recuperación de Oro y Plata de soluciones del proceso de cianuración mediante Electrocoagulación, aplicando diseño de experimentos 2<sup>3</sup>

GARCÍA-CARRILLO, María Cristina\*†, PARGA-TORRES, José Refugio', MORENO-CASILLAS, Héctor Aurelio y PAREDES-SOTO, Jesús

*Instituto Tecnológico de la Laguna  
Instituto Tecnológico de Saltillo*

Recibido Julio 29, 2016; Aceptado Septiembre 18, 2016

### Resumen

El proceso convencional para la producción de oro y plata es la cianuración. El uso de soluciones acuosas de cianuro recibe mucha atención, pues el proceso resulta ser económico, eficiente y de fácil control. Se han estudiado y utilizado diversos procesos para la recuperación de oro y plata poscianuración; y la electrocoagulación (EC) aparece como una novedosa y prometedora alternativa. La metodología experimental utilizada en la presente investigación se enfocó en la aplicación del proceso de EC a muestras industriales de soluciones del proceso de cianuración. Para la realización se utilizó un diseño de experimentos factorial 2<sup>k</sup>, designándose tres factores de estudio: pH de la solución, reactivo acidificante empleado, y material de los electrodos. Las soluciones fueron analizadas pre- y postelectrocoagulación, y los resultados fueron examinados mediante el software Minitab 17; para determinar estadísticamente los factores que influyen en la recuperación de oro y plata mediante EC, y así poder concluir, con qué valores de los parámetros probados, se logra la mayor eficiencia en la remoción de dichos metales.

**Electrocoagulación, Cianuración, Diseño Experimental**

### Abstract

The conventional process for the production of gold and silver is the cyanidation. The usage of aqueous cyanide solutions gets plenty of attention, since it is economically viable, efficient, and easy to control. Various processes have been used for the recovery of gold and post-cyanidation; and using electrocoagulation (EC) appears to be a promising and innovating alternative. The experimental methodology used in this research was focused in applying the process of electrocoagulation to industrial samples of that were preciously treated with the cyanidation process. In order to perform EC on the samples an experimental factorial design 2<sup>k</sup> was used, designating three factors: pH of the solution, acidifying reactant employed, and the material of the electrode. The solutions were analysed before and after electrocoagulation, and the data was examined using the Minitab 17 software in order to statistically determine the factors that influence in the recovery of gold and silver using EC; hereby being able to conclude which of the tested parameters values achieves the greatest efficiency in the recovery of these precious metals.

**Electrocoagulation, Cyanidation, Experimental Design**

**Citación:** GARCÍA-GUZMÁN, José Miguel, ACEVEDO-ARANDA, Rogelio, ORTEGA-HERRERA, Francisco Javier y GONZÁLEZ-PONCE, María del Refugio. Determinación de los factores que influyen en la recuperación de Oro y Plata de soluciones del proceso de cianuración mediante Electrocoagulación, aplicando diseño de experimentos 2<sup>3</sup>. Revista de Energía Química y Física 2016, 3-8: 40-49.

\*Correspondencia al Autor (Correo Electrónico: mcgarciac@correo.itlalaguna.edu.mx)

† Investigador contribuyendo como primer autor

## Introducción

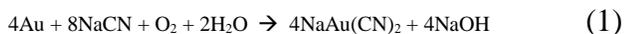
Muchos de los procesos que en la actualidad se utilizan para extraer y recuperar oro y plata a partir de concentrados minerales, están basados en técnicas que se han conocido o fueron establecidas hace ya algunos siglos.

Concentración gravimétrica, amalgamación, lixiviación con cianuro, cloración, precipitación (o cementación) con zinc y adsorción sobre carbón activado son algunos de los procesos que han sido empleados por más de 100 años, y la combinación de estos continúa en la actualidad siendo la base del proceso de extracción de oro y plata.

La predominancia de la cianuración como principal proceso de extracción de oro desde fines del siglo XIX, y la aceptación comercial de otros importantes procesos hidrometalúrgicos lixiviación en pilas y adsorción sobre carbón activado en los años de 1970 a 1980 —, divide la historia de la extracción del oro en cuatro eras principales:

- Precianuración: antes de 1888.
- Cianuración: 1889 – 1971.
- Desarrollo tecnológico: 1972 – 2000.
- Inicio del siglo XXI.

La reacción más aceptada para explicar el fenómeno de la disolución del oro en soluciones de cianuro es la Reacción de Elsner:



La disolución del oro ocurre a través de una serie de reacciones electroquímicas en las cuales el oxígeno se reduce en una parte de la superficie metálica (zona catódica), mientras que el metal se oxida (en la zona anódica).

De acuerdo a esta reacción, a bajas concentraciones de cianuro, la tasa de disolución del oro es función de la concentración de cianuro; mientras que a altas concentraciones de cianuro, la tasa de disolución es función de la concentración de oxígeno.

La reacción de disolución del oro es una reacción heterogénea que es controlada por la difusión de las dos especies que reaccionan ( $\text{O}_2$  y  $\text{CN}^-$ ) a través de la capa límite de Nernst. La tasa de disolución del metal se incrementa linealmente con el incremento de la concentración de cianuro hasta que se alcanza una tasa de disolución máxima después de la cual hay un ligero efecto de retroceso. La tasa de disolución es normalmente controlada por transporte de masa en soluciones de cianuro, con una energía de activación de 8 a 20 KJ/mol.

La formación de precipitados sobre la superficie de los granos de oro es un factor importante que determina la cinética de la lixiviación y de igual manera la plata sigue un proceso similar. El proceso utilizado en la presente investigación para la recuperación de oro y plata es la Electrocoagulación (EC). El proceso de EC ha sido considerado como un proceso de aceleración de corrosión, donde el óxido verde o green rust (GR) por sus siglas en inglés, es un producto intermediario responsable para la eliminación de contaminantes (sólidos suspendidos y disueltos, metales, compuestos orgánicos, etc.).

El mecanismo de la EC involucra oxidación, reducción, descomposición, depositación, coagulación, absorción, adsorción, precipitación y flotación. El principio de operación de la EC es que hidroliza a los cationes producidos electrolíticamente desde un ánodo de hierro y/o aluminio mejorando la coagulación de los contaminantes de un medio acuoso.

Los ánodos metálicos de sacrificio son usados continuamente para producir cationes metálicos polivalentes en la vecindad del ánodo. Estos cationes facilitan la coagulación por medio de la neutralización de las partículas con carga negativa que son llevadas hacia los ánodos por movimiento electroforético siendo éste un método de separación de moléculas según su capacidad para moverse a través de un campo eléctrico.

El proceso de electrocoagulación (EC) ha sido considerado como un proceso de aceleración de corrosión, donde el óxido verde o green rust (GR) por sus siglas en inglés, es un producto intermediario responsable para la eliminación de contaminantes (sólidos suspendidos y disueltos, metales, compuestos orgánicos, etc). La EC es un proceso prometedor para la recuperación de oro y plata; dado que no necesita reactivos químicos, haciéndolo una técnica económicamente viable. La revisión de la literatura muestra el potencial de la EC como una alternativa para la recuperación de metales preciosos (plata y oro) aún por explorar. (Parga, J.R. et al 2012).

Diferentes procesos empleados para la recuperación de oro y plata son comparados en la Tabla 1.

Metodo	Ventajas	Desventajas
Merrill-crowe	<ul style="list-style-type: none"> <li>- bajo capital y costos de operación.</li> <li>- manipulación de soluciones con una alta contenido de plata y oro.</li> <li>- altamente eficiente (99.5%).</li> <li>-también puede tratar soluciones de alto grado producidas por elución de carbono.</li> <li>- alternativa para electrolítico.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- las soluciones de estado necesitan clarificación y desoxigenación.</li> <li>- bajas concentraciones de metales incrementa la cantidad de zinc.</li> <li>- depende del ph y de la concentración de cianuro libre.</li> <li>- el precipitado contiene cianuros como cobre y arsénico.</li> </ul>

Adsorción con carbón activado	<ul style="list-style-type: none"> <li>- no requiere pretratamiento de la solución de estado.</li> <li>- no depende de la concentración de los metales</li> <li>- gran superficie específica</li> <li>- la pulpa necesita no estar clarificada</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- el carbón contaminado necesita ser regenerado por calor.</li> <li>- gran inventario de carbón.</li> <li>- la solución de estado necesita pasar a través de 5 a 6 columnas.</li> <li>- alto costo de operación.</li> </ul>
Resinas de intercambio iónico	<ul style="list-style-type: none"> <li>- no necesita: lavado, revitalización o tratamiento térmico.</li> <li>- alta resistencia a la abrasión en tanque de adsorción.</li> <li>- alta selectividad.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- alto costo del proceso.</li> <li>- baja capacidad de carga</li> <li>- pago de regalías.</li> <li>- las resinas deben ser regeneradas mediante un ácido.</li> </ul>
Extracción por solventes	<ul style="list-style-type: none"> <li>- alta selectividad</li> <li>- no necesita: lavado, revitalización o tratamiento térmico.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- alto costo del proceso.</li> <li>- tecnología nueva.</li> <li>- dificultad de extracción.</li> </ul>
Electrocoagulación	<ul style="list-style-type: none"> <li>- bajo tiempo de residencia (minutos).</li> <li>- no utiliza reactivos químicos.</li> <li>- manipulación de soluciones conteniendo bajas o altas concentraciones de plata y oro.</li> <li>- costo de energía por m<sup>3</sup> en soluciones de estado son más bajos que los sistemas de tratamiento convencionales.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ánodos de sacrificio deben ser reemplazados periódicamente.</li> <li>- el ph inicial debe tener un control muy preciso.</li> <li>- nueva tecnología</li> <li>- el producto es alto en hierro.</li> </ul>

**Tabla 1** Ventajas y desventajas de métodos para recuperación de oro y plata *Fuente: (Mollah 2004; Parga, Valenzuela y Cepeda 2007; Emamjomeh y Sivakumar 2009)*

La presente investigación estuvo enfocada en la aplicación del proceso de EC (desde una hasta tres etapas) a muestras industriales del proceso de cianuración.

Fue empleando un diseño factorial  $2^k$  para determinar, de los factores de estudio planteados, aquellos que estadísticamente influyen en la eficiencia del proceso de recuperación de oro y plata mediante EC para la mayor eficiencia en la remoción de dichos metales; lo anterior con el objeto de posteriormente estimar los parámetros de proceso óptimos.

El diseño experimental es una técnica estadística que permite identificar y cuantificar las causas de un efecto dentro de un estudio experimental.

En un diseño experimental se manipulan deliberadamente una o más variables, vinculadas a las causas, para medir el efecto que tienen en otra variable de interés. El diseño experimental prescribe una serie de pautas relativas sobre qué variables hay que manipular, de qué manera, cuántas veces hay que repetir el experimento y en qué orden, para poder establecer con un grado de confianza predefinido, la necesidad de una presunta relación de causa-efecto.

En estadística, un experimento factorial completo es un experimento cuyo diseño consta de dos o más factores, cada uno de los cuales con distintos valores o niveles, cuyas unidades experimentales cubren todas las posibles combinaciones de esos niveles en todo los factores.

Este tipo de experimentos permiten el estudio del efecto de cada factor sobre la variable respuesta, así como el efecto de las interacciones entre factores sobre dicha variable. Por ejemplo, con dos factores y dos niveles en cada factor, un experimento factorial tendría en total cuatro combinaciones de tratamiento, y se le denominaría diseño factorial de  $2 \times 2$ .

Hay varios casos especiales del diseño factorial, el más importante de estos es el de  $k$  factores, cada uno con solo dos niveles. Estos niveles pueden ser cuantitativos, o cualitativos, los niveles “alto” y “bajo” de un factor, o quizá la presencia o ausencia de un factor. Una réplica completa de este diseño requiere  $2^k$  observaciones y se le llama diseño factorial  $2^k$ . Puesto que solo hay dos niveles para cada factor, se supone que la respuesta es aproximadamente lineal en el rango elegido para los niveles de los factores. Este diseño proporciona el menor número de corridas con las que pueden estudiarse  $k$  factores de un diseño factorial completo y obtener información confiable.

En la sección 2, se hace la explicación de la metodología empleada, así como los materiales, equipos y reactivos necesarios para la realización de las pruebas y el diseño experimental utilizado.

La tercera sección, plasma lo referente al análisis de datos obtenidos de cada una de las pruebas realizadas, donde se da una explicación detallada de los valores obtenidos en cada una de ellas. En la cuarta sección de resultados, se muestra el análisis de datos de cada una de los experimentos, mediante el software Minitab 17, determinándose los factores que afectan significativamente la remoción de oro y plata en los diversos diseños utilizados. También se determina cuál diseño es el que brinda los mejores valores. Además, se presentan las imágenes obtenidas en el microscopio electrónico de barrido, el espectrograma correspondiente así como los porcentajes de los metales.

Por último se establecen las conclusiones, así como las observaciones que se deben considerar para lograr un mayor porcentaje de remoción de oro y plata.

## Metodología experimental

### Diseño experimental factorial 2<sup>k</sup>

Se aplicó un diseño experimental factorial 2<sup>3</sup> considerando los siguientes factores y sus respectivos niveles (alto o 1+, y bajo o 1-): pH inicial de la solución (8 y 9), material de constitución de los electrodos (Fe y Al), y reactivo acidificante (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 1 N y HCl 1 N) y determinar los valores de los parámetros probados que dan la mayor eficiencia en la remoción. El diseño experimental se trabajó a dos réplicas; y este se presenta en la Tabla 2.

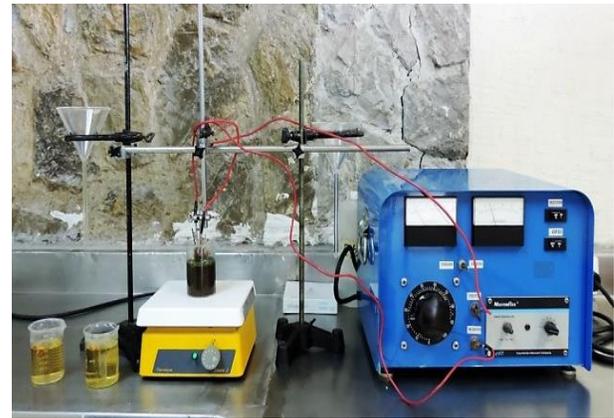
No. Muestra	pH	Acido	Electrodo empleado
1 9	1-	1-	1-
2 10	1+	1-	1-
3 11	1-	1+	1-
4 12	1+	1+	1-
5 13	1-	1-	1+
6 14	1+	1-	1+
7 15	1-	1+	1+
8 16	1+	1+	1+

**Tabla 2** Diseño experimental 2<sup>3</sup> con 2 réplicas. *Fuente: Elaboración propia*

### Arreglo experimental

Se hizo uso de una fuente de poder de corriente directa marca Kaselco, con capacidad máxima de 50 V y 10 A, y de una parrilla de agitación magnética Thermoline Cimarec 2 y barra magnética de 3 cm. Las dimensiones de los electrodos fueron de 3 cm x 6 cm x 0.2 cm.

La evidencia fotográfica del arreglo experimental se presenta en la Figura 1.



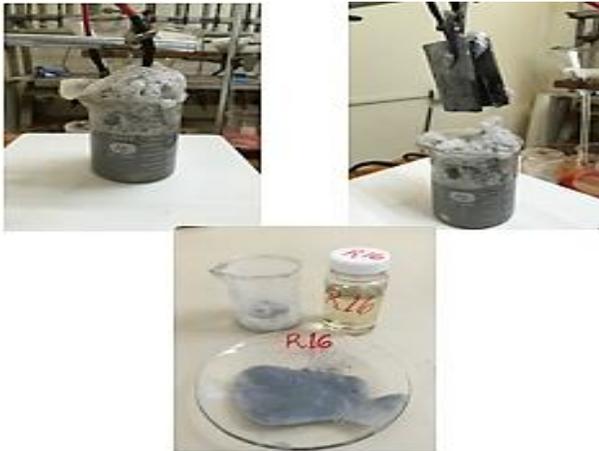
**Figura 1** Arreglo Experimental

### Experimentos de Electrocoagulación

El volumen de muestra ocupado para las pruebas de EC fue de 100 mL. El voltaje aplicado fue de 5 VCD, proporcionando una intensidad de corriente eléctrica aproximadamente 2 A, con un tiempo de residencia de 10 minutos y agitación magnética. El orden de los experimentos se realizó de manera aleatoria por sorteo. En las figuras 2 y 3 se presenta la evidencia fotográfica algunos de los experimentos de EC.



**Figura 2** Diversas vistas de muestras utilizando electrodos de hierro



**Figura 3** Diversas vistas de muestras utilizando electrodos de aluminio

### Caracterización de las muestras procesadas

Se trabajó únicamente con muestras industriales de soluciones del proceso de cianuración, provenientes de una planta minera dedicada a la producción de Au, Ag, Zn, Cu y Pb. Las concentraciones pre- y postelectrocoagulación de Au y Ag fueron determinadas vía Espectrofotometría de Absorción Atómica en un laboratorio externo. El pH de las muestras fue medido utilizando un medidor de mesa ORION 420A.

Las soluciones postelectrocoagulación fueron filtradas a través papel filtro marca Whatman grado 40 (con un diámetro de poro de 8  $\mu\text{m}$ ), y el sólido retenido fue posteriormente caracterizado mediante microscopía electrónica de barrido (MEB).

Se repite la misma metodología a un segundo diseño experimental pero variando el factor experimental de pH, utilizando valores de 6 y 7 y manteniendo los otros dos factores, los datos obtenidos se analizan con el software Minitab 17 y se refinan los modelos.

Con los parámetros que proporcionan los mejores porcentajes de remoción se hace una tercera prueba, solo que aplicando a las muestras la técnica de EC en tres etapas, con tiempo de residencia de 10 minutos cada una y variando nuevamente el factor de pH a valores de 7 y 9, utilizando electrodos de aluminio y ácido clorhídrico.

### Análisis de datos

#### Análisis del primer Diseño Experimental

La Tabla 3 muestra los valores obtenidos en el primer diseño experimental, así como los porcentajes de remoción. Los mejores resultados de remoción para plata y oro, se presentaron cuando se utilizaron electrodos de Aluminio, pH de 8 y Ácido Clorhídrico.

#### Análisis del segundo Diseño Experimental

Al hacer el análisis del segundo diseño experimental, (Tabla 4), se aprecia que los mayores porcentajes de remoción se obtienen utilizando electrodos de aluminio, ácido clorhídrico y pH de 7.

ID	Ag (g/ton)	%	Au (g/ton)	%
Conc. Inicial	498.5	Remoción	63.5	Remoción
Despues EC				
Solucion 1	339.4	31.9	45.6	28.2
Solucion 2	336.0	32.6	44.0	30.7
Solucion 3	327.7	34.3	42.3	33.4
Solucion 4	381.1	23.6	47.9	24.6
Solucion 5	240.9	51.7	37.1	41.6
Solucion 6	315.4	36.7	41.6	34.5
Solucion 7	377.9	24.2	49.1	22.7
Solucion 8	391.5	21.5	50.5	20.5
Solucion 9	333.3	33.1	45.7	28.0
Solucion 10	356.7	28.4	45.3	28.7
Solucion 11	349.5	29.9	44.5	29.9
Solucion 12	363.2	27.1	45.8	27.9
Solucion 13	228.6	54.1	35.4	44.3
Solucion 14	378.3	24.1	47.7	24.9
Solucion 15	345.9	30.6	45.1	29.0
Solucion 16	404.0	19.0	51.0	19.7

**Tabla 3** Porcentaje de remoción de Au y Ag del primer Diseño Experimental. Fuente: Elaboración propia

ID	Ag (g/ton)	%	Au (g/ton)	%
Conc. Inicial	513.4	Remoción	64.1	Remoción
Despues EC				
Solucion R1	253.2	50.7	36.8	42.6
Solucion R2	272.1	47.0	38.9	39.3
Solucion R3	267.3	47.9	38.7	39.6
Solucion R4	276.5	46.1	38.5	39.9
Solucion R5	202.7	60.5	31.3	51.2
Solucion R6	163.0	68.3	31.0	51.6
Solucion R7	265.3	48.3	36.7	42.7
Solucion R8	172.7	66.4	31.3	51.2
Solucion R9	202.4	60.6	30.6	52.3
Solucion R10	268.8	47.6	38.2	40.4
Solucion R11	269.9	47.4	37.1	42.1
Solucion R12	254.3	50.5	38.7	39.6
Solucion R13	191.5	62.7	30.5	52.4
Solucion R14	127.6	75.1	26.4	58.8
Solucion R15	197.6	61.5	32.4	49.5
Solucion R16	199.0	61.2	31.5	50.9

**Tabla 4** Porcentaje de remoción de Au y Ag del segundo Diseño Experimental. Fuente: Elaboración propia

Al hacer el análisis de los datos en las dos pruebas, se observa que los mejores resultados de remoción de oro y plata se obtienen al utilizar electrodos de aluminio y ácido clorhídrico. En la primera prueba el valor de pH para la más alta eficiencia de remoción fue 8 y en la segunda fue de 7. Lo que parece indicar que podría obtenerse una mayor remoción con un pH entre 7 y 8.

Análisis de la tercera prueba. En base a los resultados arrojados en los diseños experimentales 1 y 2, se decidió hacer una tercera prueba y realizarla en tres etapas de electrocoagulación, con los siguientes factores: electrodos de aluminio, ácido clorhídrico y valores de pH de 7 y 9, con un tiempo de residencia de 10 minutos cada una, y dos replicas. Los resultados son mostrados en las Tablas 5 y 6.

pH=7	Concentración Ag (gr/ton)		CONCENT. PROMEDIO (gr/ton)	% REMOCION POR ETAPAS	% REMOCION TOTAL
SOL. INICIAL	520	510	515		
1a. Etapa	359	416	387.5	24.76	24.76
2a. Etapa	227	267	247	36.26	52.04
3a. Etapa	52	47	49.5	79.96	90.39
pH = 9	Concentración Ag (gr/ton)		CONCENT. PROMEDIO (gr/ton)	% REMOCION POR ETAPAS	% REMOCION TOTAL
SOL. INICIAL	520	510	515		
1a. Etapa	419	430	424.5	17.57	17.57
2a. Etapa	369	369	369	13.07	28.35
3a. Etapa	229	187	208	43.63	59.61

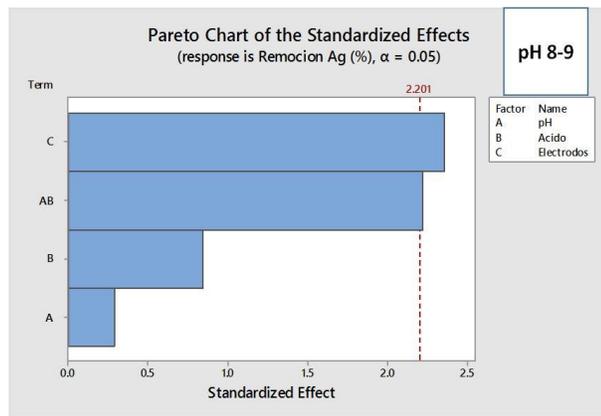
**Tabla 5** Porcentajes de remoción de plata por etapas. Fuente: Elaboración propia

pH = 7	Concentración Au (gr/ton)		CONCENT. PROMEDIO (gr/ton)	% REMOCION POR ETAPAS	% REMOCION TOTAL
SOL. INICIAL	69	67.6	68.3		
1a. Etapa	47.3	53.9	50.6	25.92	25.92
2a. Etapa	34.5	38.9	36.7	27.47	46.27
3a. Etapa	14.4	18.1	16.25	55.72	76.21
pH = 9	Concentración Au (gr/ton)		CONCENT. PROMEDIO (gr/ton)	% REMOCION POR ETAPAS	% REMOCION TOTAL
SOL. INICIAL	69	67.6	68.3		
1a. Etapa	54.5	55.5	55	19.47	19.47
2a. Etapa	48.3	47.4	47.85	13.00	29.94
3a. Etapa	31.3	29.2	30.25	36.78	55.71

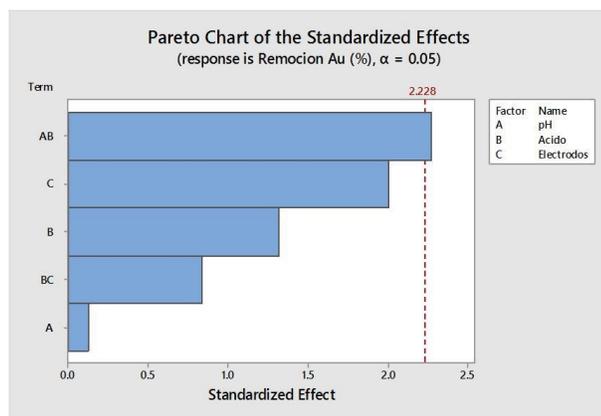
**Tabla 6** Porcentajes de remoción de oro por etapas. Fuente: Elaboración propia

**Resultados**

Los datos de cada una de las pruebas se analizan con el software Minitab 17, encontrando que en la primera prueba o primer diseño experimental, en el cual los factores puestos a prueba son: pH 8 y 9, ácido clorhídrico y sulfúrico y electrodos de fierro y aluminio, el factor que afecta significativamente la remoción de plata es el material del electrodo, y la interacción pH-Acido (Gráfico 1). En cuanto al oro, la interacción pH-Acido es la única que afecta significativamente la remoción (Gráfico 2).

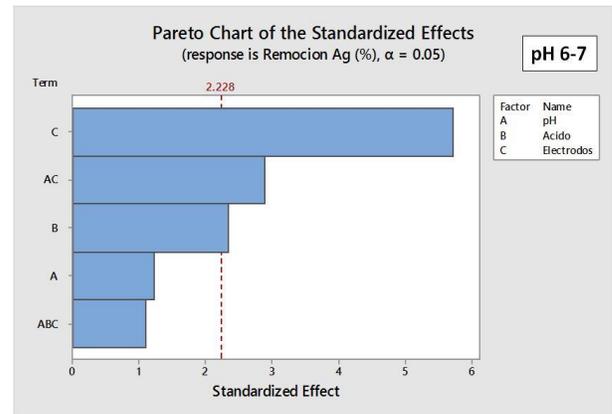


**Gráfico 1** Grafica de efectos para Plata en primer diseño experimental

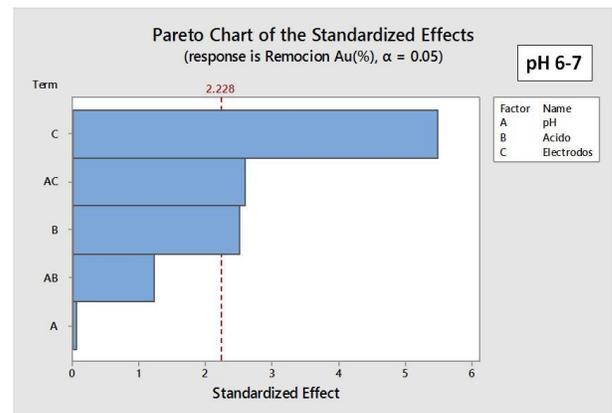


**Gráfico 2** Grafica de efectos para Oro en primer diseño experimental

En la segunda prueba, en el cual únicamente se cambió el pH a valores de 6 y 7; los factores que influyen significativamente tanto en la remoción de la plata como en la de oro son, el material del electrodo, la interacción pH-electrodo y el tipo de ácido (Gráficos 3 y 4).



**Gráfico 3** Grafica de efectos para Plata en segundo diseño Experimental



**Gráfico 4** Grafica de efectos para Oro en segundo diseño Experimental

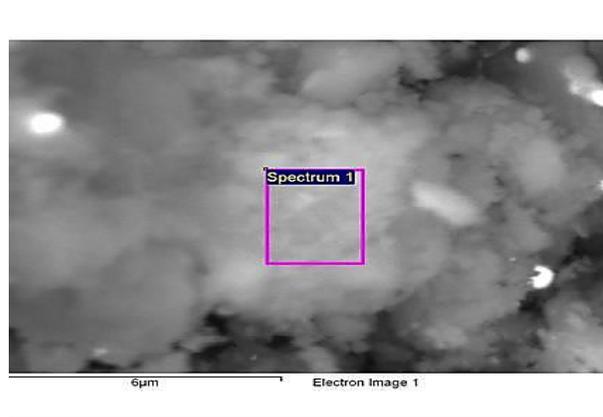
La Tabla 7 muestra la comparativa del porcentaje de remoción de plata y oro obtenidos en los dos diseños experimentales, así como en la tercera prueba, demostrando que el mejor resultado es en la Prueba No. 3, que consistió en aplicar la técnica de EC en tres etapas a la misma muestra, demostrando que el mejor resultado es en la Prueba No. 3, que consistió en aplicar la técnica de EC en tres etapas a la misma muestra, utilizando: electrodos de aluminio, ácido clorhídrico y valor de pH de 7, con un tiempo de residencia de 10 minutos cada una, voltaje aplicado de 5VCD y dos replicas, logrando una remoción de plata y oro de 90.39% y 76.21% respectivamente, superior a los diseños experimentales 1 y 2.

Parámetros	Diseño Experimental 1	Diseño Experimental 2	Prueba 3
Tiempo de residencia	10 min	10 min	30 min
pH	8	7	7
% Remoción Ag	52.9	71.7	90.39
% Remoción Au	42.95	55.2	76.21

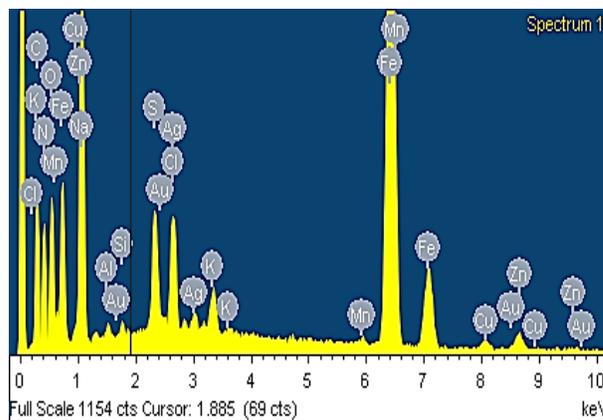
**Tabla 7** Comparativa entre las tres pruebas. *Fuente: Elaboración propia*

El sólido retenido en el papel filtro es analizado en microscopio electrónico de barrido, y con los resultados se corrobora la presencia de oro y plata. La microfotografía y espectrograma generados se muestran en las figuras 4 y 5 y los gráficos 5 y 6.

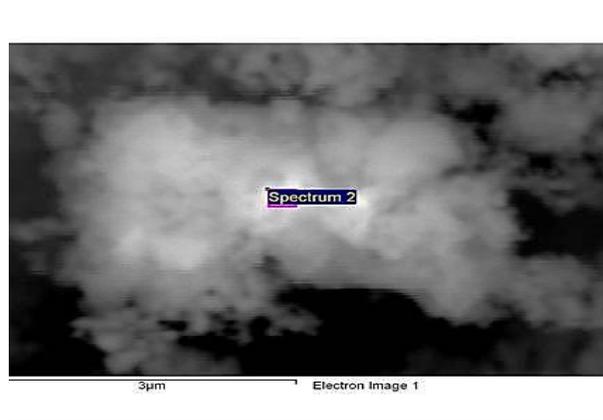
En la tabla 8 se presenta el % en peso obtenido, utilizando electrodos de diferente material, comprobando que los mejores resultados se obtienen utilizando electrodos de aluminio.



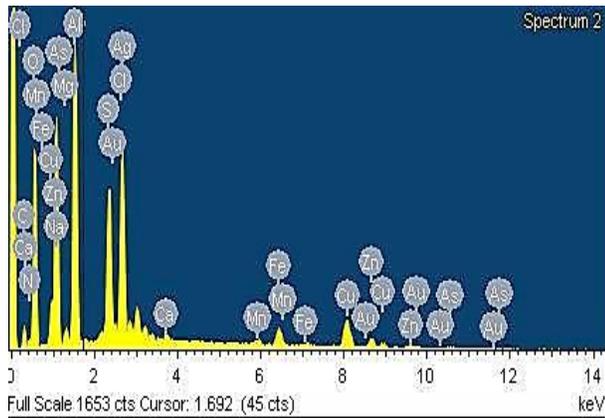
**Figura 4** Microfotografía



**Gráfico 5** Espectrograma obtenido en Microscopio Electrónico de barrido y utilizando electrodos de hierro



**Figura 5** Microfotografía



**Gráfico 6** espectrograma obtenido en Microscopio Electrónico de barrido y utilizando electrodos de aluminio

Material del electrodo	% Peso Ag	% Peso Au
Fierro	0.15	0.83
Aluminio	0.81	2.73

**Tabla 8** Porcentaje en peso obtenido en Microscopio Electrónico de Barrido. Fuente: Elaboración propia

## Conclusiones

Con la investigación realizada se pudieron determinar los factores que influyen en la recuperación de Oro y Plata de soluciones del proceso de cianuración, mediante electrocoagulación, aplicando un diseño de experimentos 2<sup>3</sup>.

Los mejores resultados se obtienen: utilizando electrodos de aluminio, ácido clorhídrico y pH de 7. El porcentaje de remoción de oro y plata se incrementa considerablemente al aplicar la EC en tres etapas, de 10 minutos cada una.

Se recomienda realizar pruebas con pH entre 7 y 8, disminuir la separación entre los electrodos para probar si este factor influye en los resultados, y también hacer las pruebas de

EC con flujo continuo, para confirmar los resultados obtenidos.

## Agradecimientos

Al Tecnológico Nacional de México, al Programa de Mejoramiento del Profesorado (PRODEP), así como al Instituto Tecnológico de Saltillo y al Instituto Tecnológico de la Laguna, que sin su apoyo no hubiera sido posible realizar las pruebas experimentales, los análisis necesarios, así como la elaboración del presente artículo.

## Referencias

Adams, M. . (2016). Advances in Gold Ore Processing, Developments in Mineral Processing, Vol. 15. Amsterdam, The Netherlands: ELSEVIER B. V.

Habashi, F. . (1997). Handbook of Extractive Metallurgy, Vol. III, Precious metals, refractory metals, scattered metals, radioactive metals, rare earth metals. Federal Republic of Germany: WILEY-VCH.

Marsden, J. & House, C.. (2006). The Chemistry of Gold Extraction, Second Edition. Littleton, Colorado, USA: Society for Mining, and Exploration, Inc. (SME).

Montgomery, D.C.. (2008). Diseño y Análisis de Experimentos, Segunda edición. México, D.F.: LIMUSA WILEY.

Parga, J., Rodríguez, M., Valenzuela, J. & Moreno, H.. (2012). Recovery of Silver and Gold from Cyanide Solution by Magnetic Species Formed in the Electrocoagulation Process. Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review, 33, 363-373.

## Incorporación de nanomateriales en el concreto fotocatalítico para la reducción de NOX y CO<sub>2</sub>

FUENTES, Teresa\*†, VAZQUEZ, Cristofer y VAZQUEZ, Kevin

Recibido Julio 20, 2016; Aceptado Septiembre 24, 2016

### Resumen

En el presente estudio se aborda la incorporación de los materiales nanométricos de dióxido de titanio en una matriz de concreto, estos nanomateriales se adicionaron de manera superficial y como ingrediente activo en el concreto, es decir como aditivo para evaluar sus propiedades autolimpiantes. Dado lo anterior, para comprobar las propiedades autolimpiantes y resistentes que aporta el dióxido de titanio (TiO<sub>2</sub>) se realizaron pruebas de difracción por (DRX) y microscopía electrónica de barrido (MEB), se realizaron pruebas de resistencia a la compresión y favoreciendo la degradación de los materiales contaminantes.

**Concreto fotocatalítico, contaminación, fotoquímica y dióxido de titanio**

### Abstract

This work is about nanometric materials incorporation in concrete using titanium dioxide, this materials has been incorporated like additive and on the concrete mix to evaluate his autocleaning properties.

Due to, the techniques used were X-ray diffraction XRD, scanning electron microscopy SEM, strength resistance compressive and analyse degradation of contaminants on air.

**Concrete photocatalytic, pollutions, photochemistry and titanium dioxide**

**Citación:** FUENTES, Teresa, VAZQUEZ, Cristofer y VAZQUEZ, Kevin. Incorporación de nanomateriales en el concreto fotocatalítico para la reducción de NOX y CO<sub>2</sub>. Revista de Energía Química y Física 2016, 3-8: 50-56.

\*Correspondencia al Autor (Correo Electrónico: mayte\_fr@yahoo.com.mx)

† Investigador contribuyendo como primer autor

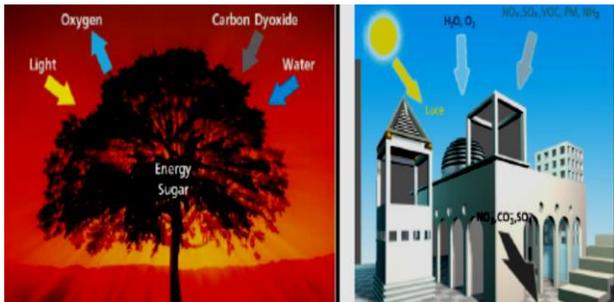
## Introducción

El proceso de fotocatalisis es de gran interés para los procesos biológicos y ambientales.

Debido a que este proceso es comparado de manera directa con la fotosíntesis, sin embargo, existe una diferencia específica que consiste en que la fotosíntesis de las plantas transforma el dióxido de carbono en oxígeno.

Mientras que la fotocatalisis gracias a la energía procedente de la luz, descomponen más rápidamente los agentes contaminantes por lo que acelera los procesos de oxidación que naturalmente son más lentos (Nuñez et al).

La Figura 1 (a) y (b) muestra claramente la diferencia entre ambos procesos.



**Figura 1** (a) Fotosíntesis y (b) fotocatalisis (Nuñez)

La fotocatalisis ha desempeñado un papel muy importante para estos procesos, en un equilibrio ambiental.

Actualmente, la industria de la construcción ha tenido desarrollos innovadores y tecnológicos en las dos últimas décadas, buscando un beneficio para mejorar la calidad de vida del ser humano.

Los efectos autolimpiantes gracias a la fotocatalisis están suficientemente documentados y probados, pero se hace necesario mejorar su efectividad, para ello se hace necesario el estudio de distintos parámetros que se puedan modificar, como mejorar la activación del óxido de titanio, aproximándola más a la radiación visible, mejorando el material de soporte, en este caso cemento, por ello se probaran las propiedades autolimpiantes en distintos morteros de cemento, así como acabados superficiales (Cortés, et al).

Lo que se pretende en la construcción, con este tipo de materiales fotocatalíticos, es conseguir sistemas de acabado a los edificios y accesos viales, por ejemplo; suelos, fachadas o banquetas etc.

Con capacidades autolimpiantes y si puede ser descontaminantes, de manera que el mantenimiento de las mismas se reduzca en gran medida, manteniendo su aspecto prácticamente inalterado a lo largo del tiempo, consiguiendo ahorrar gran cantidad de dinero en costes de conservación y reposición.

Por otro lado también se ha demostrado con diferentes estudios que la utilización del  $\text{TiO}_2$ , consigue reducir en parte la concentración de ciertos contaminantes contenidos en el aire, por los que en grandes ciudades muy industrializadas y con gran cantidad de tráfico, los niveles de  $\text{NO}_x$ ,  $\text{VOC}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{O}_3$ .

## Desarrollo Experimental

Se realizaron síntesis por el método sol-gel de dióxido de titanio nanométrica y con área superficial modificada con el Pluronic F-127.

Posteriormente se realizaron especímenes de forma cubica con dimensiones de 50 x 50 mm, de acuerdo con la norma NMX – ONCCE-414. A los cuales se les incorporaron cada una de las síntesis de dióxido de titanio. Las técnicas de caracterización que se realizaron a las síntesis y los especímenes cúbicos fueron microscopia electrónica de barrido y difracción de rayos X y solo para los especímenes cúbicos resistencia a la compresión y pruebas de degradación utilizando azul de metileno.

## Resultados

### Caracterización de la síntesis de TiO<sub>2</sub>

El análisis de Difracción de Rayos X (DRX o XRD) general para de identificación de fase/composición distingue los compuestos mayores, menores, y de traza presentes en una muestra. Los resultados comúnmente incluyen el nombre (común) de la sustancia, su fórmula química, sistema cristalino, y numero de patrón de referencia de la Base de Datos ICDD. A continuación se presenta los datos y un difractograma con marcadores de patrones de referencia para la comparación visual.

A continuación se muestra en la Gráfico 1 el patrón de difracción del dióxido de titanio TiO<sub>2</sub> cuyas características son significativas son en el ángulo 25, 37, 48, 54,56, 63, 69,72 y 80 2θ el pico característico a la fase mineralógica anatasa con estructura cristalina ortorrómbica.

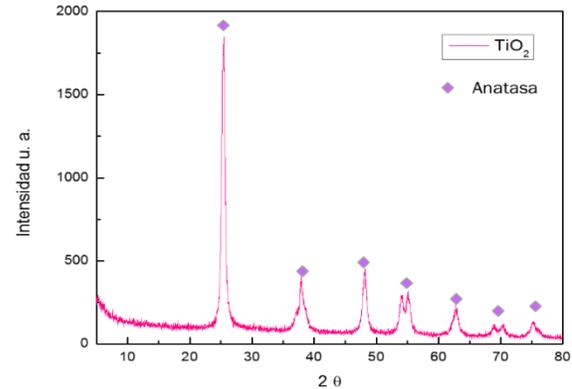


Gráfico 1 Difractograma del dióxido de titanio

En la Figura 2, se observa la morfología de la síntesis de dióxido de titanio, mostrando nanopartículas semiesféricas aglomeradas, dada su naturaleza, se unen de esa manera por ser un material nanoestructurado.

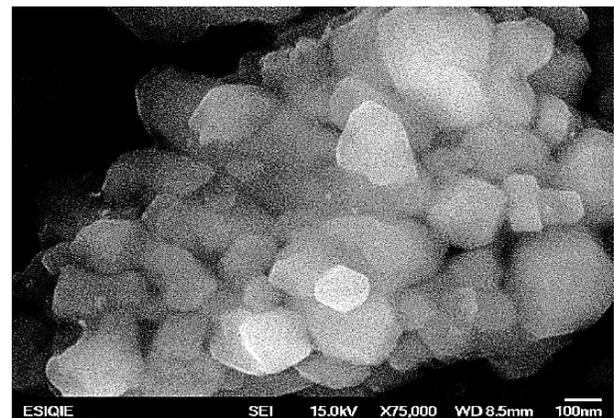
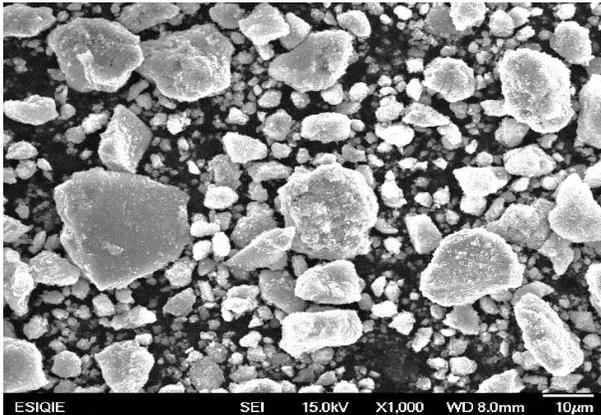
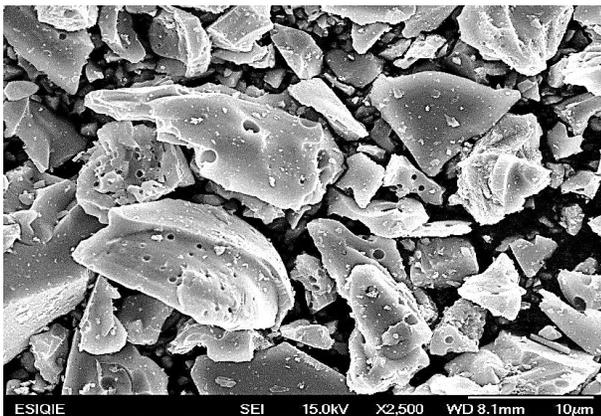


Figura 2 Micrografía del dióxido de titanio

Las Figuras 3 y 5 muestran la morfología de las síntesis modificadas con Pluronic F-127. Se observa claramente el aumento de tamaño de partícula debido a la acción del agente surfactante, así como la porosidad en las partículas, esto favorecerá durante la incorporación de estos nanomateriales dentro de la matriz de concreto.



**Figura 3** Micrografía del dióxido de titanio modificado con Pluronic F-127



**Figura 4** Micrografía del dióxido de titanio modificado con Pluronic F-127, mostrando los poros en las partículas

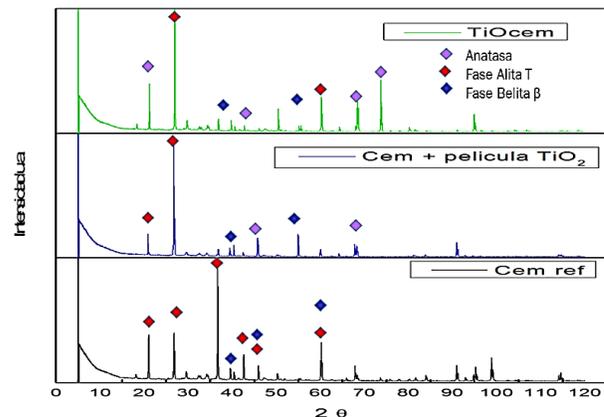
### Caracterización de los especímenes cúbicos

Para el concreto de referencia es importante resaltar que en el proceso “natural” de hidratación del cemento, es decir cuando éste se moja para endurecerse y formar concreto, se favorece la transformación de Alita en Belita, sólo que este cambio ocurre en los primeros meses de fraguado y que se acrecienta aún más con los años.

La Belita es la fase cristalina responsable del aumento en la resistencia a la compresión del concreto.

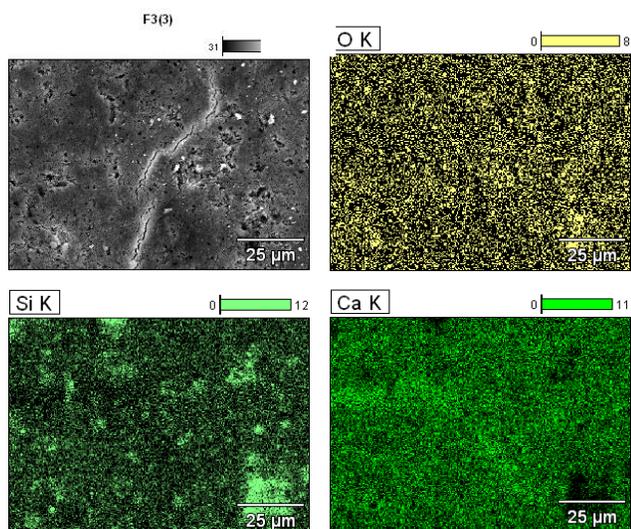
Es importante comprender la mineralogía del concreto se basa generalmente en el cemento ya que es la base ligante en este tipo de materiales, la composición mineralógica típica de los cementos es: 50-70% Alita, 15-30% Belita, 5-10% Celita y 5-10% Felita. Existiendo otras fases mineralógicas minoritarias como son: sulfatos alcalinos, óxido de magnesio y óxido de calcio (cal libre).

En el patrón de difracción que se muestra en el Gráfico 2, se pueden observar las fases alita tricilina, belita  $\beta$  y en la superficie los picos de la fase anatasa correspondiente al dióxido de titanio.

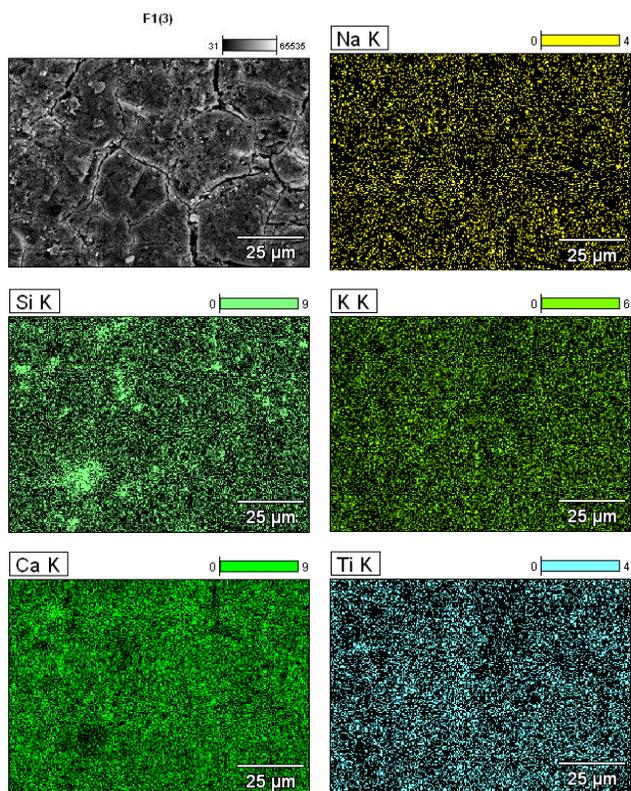


**Gráfico 2** Difractograma del dióxido de titanio y los especímenes con el dióxido de titanio como aditivo y como ingrediente

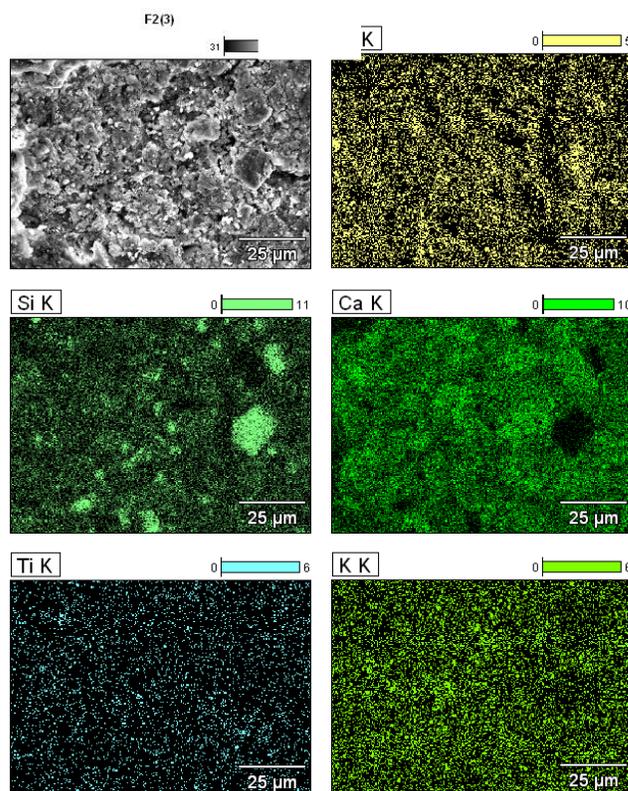
En la Figura 5, 6 y 7 se muestran los mapeos por elemento de los especímenes cúbicos.



**Figura 5** Mapeo por elementos de los especímenes cúbicos sin incorporación de nanomateriales



**Figura 6** Mapeo por elementos de los especímenes cúbicos con incorporación de nanomateriales en la parte superficial



**Figura 7** Mapeo por elementos de los especímenes cúbicos con incorporación de nanomateriales en la mezcla de concreto

Para estos especímenes se observa la presencia de calcio y silicio debido a que son los principales constituyentes del cemento, y la cantidad de titanio depende de la forma de incorporación en el concreto.

En el Gráfico 3 se muestra la resistencia a la compresión de los diferentes concretos fotocatalíticos donde se evaluaron los materiales que fueron modificados en su resistencia a la compresión donde este parámetro es indispensable para la construcción ya que esta prueba determina indirectamente la durabilidad de los materiales.

Se puede observar cómo va evolucionando la resistencia a la compresión de los diferentes especímenes con respecto al tiempo de fraguado.

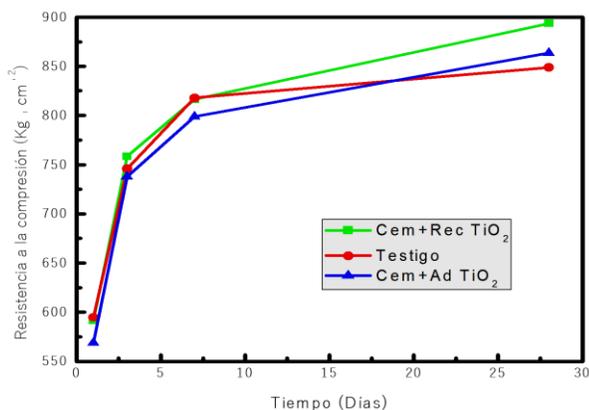
Se puede apreciar que entre los especímenes que contienen dióxido de titanio de manera superficial (Cem + Rec TiO<sub>2</sub>) que presenta una mejora significativa en comparación con el espécimen como aditivo (Cem+ Ad TiO<sub>2</sub>) esto es un hallazgo significativo para dichos materiales.

Debido a que el dióxido al estar sobre la superficie del material es más eficiente ya que incrementa la resistencia a la compresión y se espera que tenga mayores propiedades autolimpiantes por el aprovechamiento del área superficial.

El contenido de dióxido de titanio como aditivo en la gráfica presenta menor resistencia, la cual es aún más elevada que un concreto sin el dióxido de titanio presente podría ser también una opción para mejorar el medio ambiente.

Dados estos resultados la mejor presentación del TIOCEM (nombre comercial que adapta esta invención) para influir en elevar una alta resistencia a la compresión es como recubrimiento superficial.

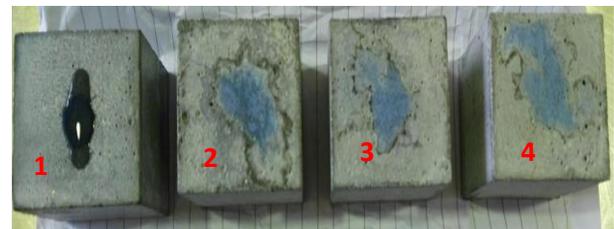
Esto puede ser aplicada como sellador o pintura sobre la superficie del concreto.



**Gráfico 3** Gráfica de la resistencia a la compresión de los diferentes lotes de concreto

El ensayo de autolimpieza mostrado en la Figura 8 se realizó de la siguiente manera:

Se aplica con una pequeña brocha en el centro de las probetas cubicas el colorante para conseguir una zona delimitada donde aplicarlo el centro del espécimen, dejándola secar durante un día. Una vez seca la disolución, se introducen las probetas durante 4 horas en un desecador donde se mantienen las condiciones de humedad y temperatura contantes, esta urna a su vez se tapa para protegerla de la posible radiación solar. Trascorridas las 4 horas el espécimen cubico se somete a condiciones de 20 °C y 70% de humedad HR durante 24 horas en la que se las irradia con luz UV-A de 3,75 w/m<sup>2</sup> ± 0,25.



**Figura 8** Especímenes cúbicos antes de ser sometidos a la radiación UV 1) espécimen de referencia, 2) espécimen con un recubrimiento superficial de TiO<sub>2</sub>, 3) espécimen con recubrimiento superficial de TiO<sub>2</sub> y 4) espécimen con TiO<sub>2</sub> como aditivo

Los especímenes fueron expuestos a la radiación UV durante un periodo de 4 h, en los cuales se puede apreciar que el colorante azul de metileno se fue decolorando. Esto significa que de acuerdo con Rodriguez [2] para que un material sea considerado fotocatalítico la degradación del azul de metileno se debe evidenciar a las 4 horas, lo cual sucedió con todos los especímenes que tienen presente el dióxido de titanio tanto en la superficie como en aditivo.

Esta información en conjunto con la resistencia a la compresión se puede reunir evidencia que el TIOCEM puede estar en ambas presentaciones, es decir como pintura o sellador y como aditivo para concreto. Esto va a diferir dependiendo de su aplicación.

### Agradecimiento

A la Universidad Tecnológica Fidel Velázquez por su apoyo brindado en la elaboración de esta investigación. Al COMECyT por su apoyo brindado. Al Instituto Politécnico Nacional-Escuela Superior de Ingeniería Química e Industrias Extractivas por el apoyo brindado con sus equipos. A la empresa Grace por prestar sus instalaciones para la elaboración de los especímenes cúbicos.

### Conclusiones

El utilizar materiales nacionales para la fabricación de un concreto fotocatalítico, permite al país innovar en la tecnología fotoquímica en la construcción mexicana. El método sol-gel es el método más económico y sencillo para realizar la síntesis de dióxido de titanio. El contenido de dióxido de titanio como aditivo presenta menor resistencia, la cual es aún más elevada que un concreto sin el dióxido de titanio presente podría ser también una opción para mejorar el medio ambiente.

De acuerdo con los resultados de resistencia a la compresión como recubrimiento superficial es recomendado para aplicarse en la superficie de concreto.

Las pruebas de autolimpieza aportan que para poder comercializar el TIOCEM, puede estar dos presentaciones como pintura o sellador y como aditivo para concreto. Esto va a diferir dependiendo de su aplicación.

### Referencias

Cortés, C., Cadenas, J. M., Pérez, A., Costa, A., Santiago, J. G., Irusta, R. y Potti10, J. J. (2011). Aplicación de Nanomateriales Activos en el Aglomerado Asfáltico para la Reducción de Gases de Combustión.

Fujishima, A., Zhang, X., & Tryk, D. A. (2008). TiO<sub>2</sub> photocatalysis and related surface phenomena. *Surface Science Reports*, 63(12), 515-582.

Garcés Giraldo, L. F., Franco, M., Alejandro, E., & Santamaría Arango, J. J. (2012). La fotocatálisis como alternativa para el tratamiento de aguas residuales.

Juan Peña. Apuntes curso Nuevos materiales de construcción Curso, 2007/2008, E.U. Politécnica de Cuenca.

López Fajardo, P.(2008). Preparación de Películas de Oxido de Titanio por CVD y Evaluación de sus Propiedades Fotocatalíticas (Tesis Doctoral).

Núñez Padilla, A. M. (2012). TX Active: principio fotocatalítico contra la contaminación. Ejemplos de edificios construidos.

Rodríguez García, J. R. (2012). Morteros fotocatalíticos: análisis de su autolimpieza en función del tipo de cemento y rugosidad superficial (Doctoral dissertation, Arquitectura\_Tecnica).

Rodríguez, J., Gomez, M., Ederth, J., Niklasson, G. A., & Granqvist, C. G. (2000). Thickness dependence of the optical properties of sputter deposited Ti oxide films. *Thin Solid Films*, 365(1), 119-125.

## Simulación de defectos subsuperficiales con forma irregular y aleatoria para la inspección no-destructiva de objetos mediante Termografía Infrarroja

RAMÍREZ-GRANADOS, Juan Carlos\*†, GÓMEZ-LUNA, Blanca, MORENO-MARTÍNEZ, Jatziri y ALMANZA-ACEVEDO, Jessica

*Universidad de Guanajuato*

Recibido Agosto 10, 2016; Aceptado Septiembre 28, 2016

### Resumen

Presentamos un método para la simulación numérica de objetos que tienen defectos subsuperficiales con forma irregular y aleatoria. Los defectos simulados pueden representar huecos, incrustaciones, delaminaciones, grietas, cambios de densidad, etc. El método consiste en la creación de una sección transversal y un perfil de espesor generados mediante la superposición de gaussianas con medias y anchos aleatorios. El volumen encerrado por la sección transversal y el perfil de espesor es considerado como el material defectuoso. Los objetos defectuosos simulados pueden ser inspeccionados de manera no-destructiva mediante termografía infrarroja pulsada para detectar y caracterizar a los defectos subsuperficiales. Este trabajo contribuye a la elaboración de simulaciones numéricas más realistas del proceso de inspección de objetos complejos mediante termografía infrarroja.

**Defecto subsuperficial, Forma irregular y aleatoria, Inspección no-destructiva, Termografía infrarroja**

### Abstract

We present a method to simulate objects with subsurface defects with irregular and random shape. The simulated defects may represent cavities, incrustations, delaminations, cracks, density changes, etc. The proposed method consist of the generation of a cross section and a thickness profile by means of the superposition of Gaussian curves with random expected value and width. The volume enclosed by the cross section and the thickness profile is the defective material. Then, the defective object may be tested by a nondestructive technique such as Infrared Pulsed Thermography in order to detect subsurface defects and to characterize them. This work contributes to the elaboration of more realistic numerical simulations about the nondestructive testing of complex objects by infrared thermography.

**Subsurface defect, irregular and random shape, Nondestructive testing, Infrared thermography**

**Citación:** RAMÍREZ-GRANADOS, Juan Carlos, GÓMEZ-LUNA, Blanca, MORENO-MARTÍNEZ, Jatziri y ALMANZA-ACEVEDO, Jessica. Simulación de defectos subsuperficiales con forma irregular y aleatoria para la inspección no-destructiva de objetos mediante Termografía Infrarroja. Revista de Energía Química y Física 2016, 3-8: 57-63.

\*Correspondencia al Autor (Correo Electrónico: jcramirez@ugto.mx)

† Investigador contribuyendo como primer autor

## Introducción

La inspección de objetos mediante técnicas no-destructivas es un campo de gran interés para los sectores industriales y de la salud.

Este interés se fundamenta por una parte en políticas de reducción de costos de producción y operación de los productos, y por otra parte, en mejorar los servicios de salud mediante técnicas de diagnóstico confiables, seguras y cómodas para el paciente.

En la actualidad está disponible una amplia variedad de técnicas de inspección no-destructivas como las pruebas visuales, por ultrasonido, líquidos penetrantes, corrientes parásitas y las pruebas termográficas, entre otras.

Las técnicas termográficas destacan entre las demás debido a que son pruebas, sin contacto, seguras, rápidas, operan a campo completo y pueden ser aplicadas a prácticamente cualquier tipo de objeto y material [1].

Existen varias técnicas termográficas especialmente diseñadas para la inspección no-destructiva de objetos.

De todas ellas, podríamos decir que las dos técnicas termográficas fundamentales son la termografía pulsada y la termografía lock-in o de amarre de modos [2].

Ambas técnicas son usadas para determinar la respuesta térmica de un objeto al ser irradiado con una señal pulsada o modulada, respectivamente. [3-5]

Uno de los mayores desafíos de las técnicas de inspección termográficas es determinar las características internas de un objeto opaco a partir de la distribución de su temperatura superficial.

Es decir, a través del análisis de la respuesta térmica superficial de un objeto se busca determinar sus características internas tridimensionales tales como su estructura, la presencia de defectos internos, su profundidad, su espesor y su forma, en otros. Este es un reto similar al enfrentado por técnicas tales como la tomografía computarizada y la resonancia magnética pero con la dificultad adicional de que la distribución de temperatura superficial es el resultado de la interacción entre las ondas térmicas y estructuras internas que pueden estar localizadas a diferentes profundidades. El análisis de este tipo de información ha sido un gran reto desde los orígenes de la termografía en los años 70's y lo sigue siendo en la actualidad. [6]

Para evaluar la condición y calidad de un objeto o componente es necesario conocer las características de su estructura interna, es decir, es necesario saber si tiene defectos en su interior y como son éstos. Esta meta puede ser alcanzada si logramos predecir la respuesta térmica que tendrá un objeto cuando en su interior existen defectos.

Determinar la respuesta térmica de los objetos defectuosos mediante métodos analíticos puede ser una tarea muy compleja e incluso imposible en algunos casos, ya que la ecuación de difusión de calor tiene solución exacta sólo para algunas geometrías simples. Sin embargo, los defectos encontrados realmente en el interior de los objetos pueden ser más complejos que simples esferas, cubos y cilindros.

Los defectos internos que podríamos encontrar en la práctica incluyen huecos, incrustaciones, delaminaciones, fracturas, cambios de densidad, etc. Para detectar y caracterizar este tipo de defectos subsuperficiales mediante termografía infrarroja es indispensable conocer la respuesta térmica de los objetos defectuosos.

Por esta razón, en este trabajo presentamos un método para simular numéricamente objetos en cuyo interior hay defectos con forma irregular y aleatoria, justo como ocurriría durante la inspección de un objeto real mediante termografía infrarroja.

El método que proponemos para la simulación numérica de los defectos irregulares y aleatorios consiste en la generación de una sección transversal y un perfil de espesor mediante la superposición de varias curvas gaussianas con valor esperado y ancho aleatorios. El volumen encerrado por la sección transversal y el perfil de espesor es considerado como el volumen defectuoso.

A continuación presentamos los fundamentos del método propuesto para la generación de defectos con forma irregular y aleatoria.

### Marco Teórico

En el área de análisis de ondas son bien conocidas y usadas las series de Fourier. Las series de Fourier (Ec. 1) son una herramienta matemática que nos permite representar a cualquier señal periódica y continua mediante una suma infinita de funciones senoidales y/o cosenoidales más simples dadas por:

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} \left[ a_n \cos\left(\frac{2\pi n t}{T}\right) + b_n \sin\left(\frac{2\pi n t}{T}\right) \right] \quad (1)$$

Donde  $a_n$  y  $b_n$  son coeficientes de Fourier,  $T$  es el periodo y  $f(t)$  es la serie de Fourier. Esta suma de funciones con frecuencias armónicas converge a cualquier función periódica si los coeficientes son los apropiados.

Así pues, una serie de Fourier es una suma o superposición infinita de funciones senoidales y/o cosenoidales cuya frecuencia es un múltiplo de la frecuencia fundamental.

El resultado de esta superposición de ondas es una señal que se asemeja a cualquier tipo de perfil incluyendo cuadrados, triángulos, dientes de sierra e incluso a ondas con perfil asimétrico. Por esto es que las series de Fourier son una herramienta muy útil y valiosa para el análisis y síntesis de funciones complejas a través de otras más simples.

Por otra parte, en el campo de la inspección no-destructiva de materiales a través de técnicas termográficas podemos encontrar dos tipos de problemas: directos e inversos. En los problemas directos son conocidas las características del objeto y determinamos su distribución de temperatura espacial y temporal. Por el contrario, en los problemas de tipo inverso se conoce o se mide la distribución de temperatura y a partir de esa información determinamos las propiedades y características del objeto.

Los problemas de transferencia de calor inversos son considerablemente más difíciles de resolver debido a que en ocasiones la solución no es única y a menudo es necesario implementar métodos numéricos para resolverlos mediante la solución iterativa de casos directos para aproximarnos progresivamente a la solución. Es por esto que la resolución de problemas de transferencia de calor de tipo inverso ha sido y sigue siendo de gran interés para la inspección no-destructiva de materiales mediante termografía infrarroja.

Más aún, los nuevos métodos para el análisis de datos termográficos que son aplicados a la inspección no-destructiva de materiales requieren de simulaciones numéricas que ayuden a comprender y predecir mejor la difusión de calor en objetos complejos como los que podríamos encontrar en la vida real. Por esta razón, proponemos un método para la simulación numérica de defectos internos con forma irregular y aleatoria.

En este método simulamos a los defectos internos mediante la superposición de una serie de funciones simples de manera análoga a la representación de cualquier función continua mediante una serie de Fourier; sin embargo, las funciones que nosotros superponemos son gaussianas de amplitud unitaria como la mostrada en la Ec. 2:

$$f_i(x) = \exp\left[-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right], \quad (2)$$

Donde el subíndice  $i$  denota el número de la curva,  $\mu$  la media y  $\sigma^2$  el ancho (varianza). En nuestro caso,  $\mu$  y  $\sigma^2$  son variables aleatorias y por lo tanto sus valores cambian cada vez que son calculados.

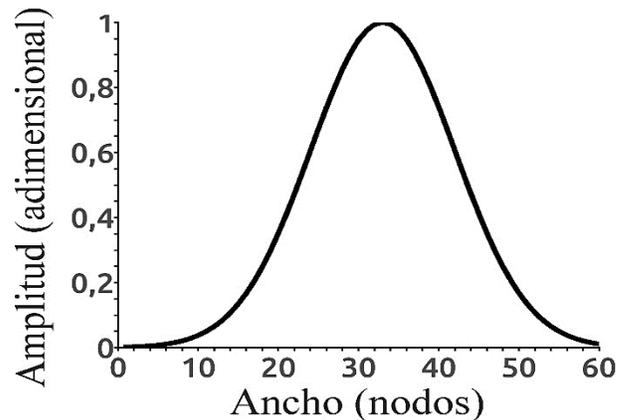
La superposición de una serie finita de estas gaussianas nos permite generar una sección transversal de un defecto con forma irregular y aleatoria. Luego, asociamos un espesor a cada uno de los nodos encerrados por la sección transversal mediante otra función gaussiana bidimensional para darle volumen al defecto.

A este volumen defectuoso le asignamos las propiedades termofísicas correspondientes. En este trabajo, la simulación numérica de objetos con defectos subsuperficiales irregulares fue implementada en Matlab. Cabe mencionar que nuestro algoritmo genera defectos distintos cada vez que es ejecutado debido a la naturaleza estocástica de las funciones superpuestas.

## Resultados

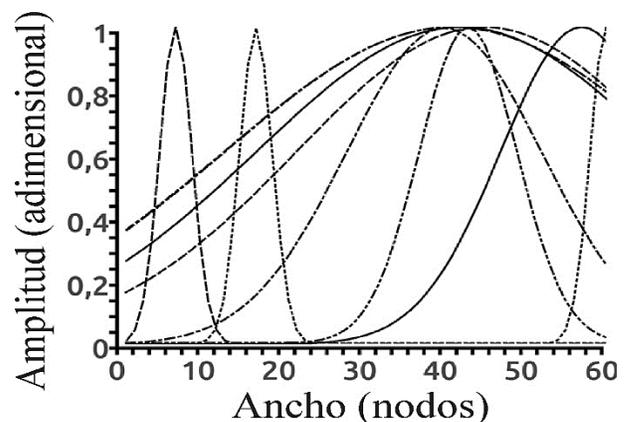
A través del método propuesto modelamos sólidos semi-infinitos con defectos subsuperficiales de forma irregular y propiedades termofísicas distintas a las del resto del material sano.

En este método, el primer paso es la generación de una función gaussiana de amplitud unitaria, con valor esperado y ancho aleatorio como la mostrada en el gráfico 1.



**Gráfico 1** Gaussiana con valor esperado y ancho aleatorio

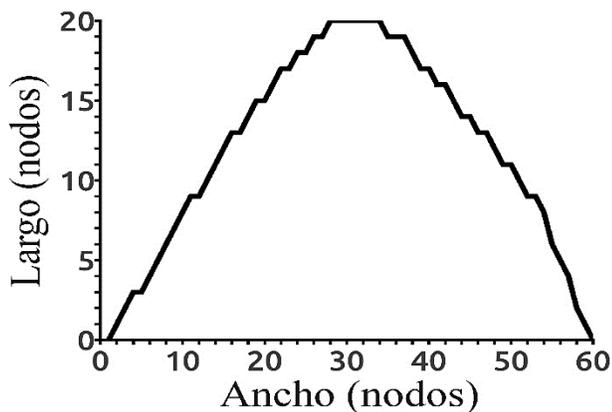
Cada vez que ejecutamos el algoritmo, éste genera una función gaussiana con valor esperado y ancho distinto debido a que definimos estos parámetros como estocásticos. En total generamos diez funciones gaussianas aleatorias como las mostradas en el gráfico 2.



**Gráfico 2** Serie de funciones gaussianas con valor esperado y ancho aleatorio

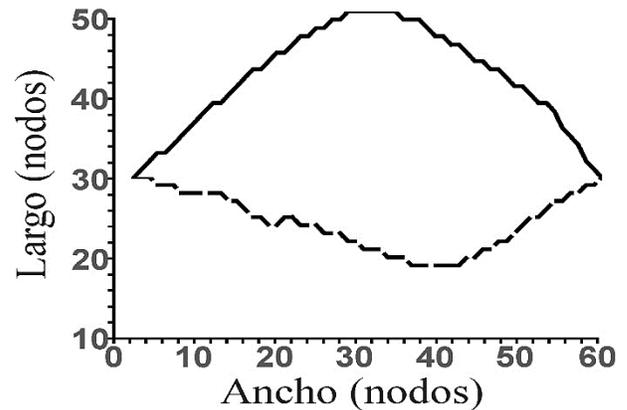
Las funciones gaussianas mostradas en el gráfico 2 son sumadas o superpuestas.

Después, la curva resultante es normalizada y escalada por un factor de magnitud aleatoria. Luego descretizamos la curva o perfil debido a que las dimensiones del defecto deben tener valores enteros cuando lo representamos a través de una malla de nodos. La malla de nodos también es útil para el análisis de difusión de calor que requieren los métodos termográficos de inspección no-destructiva basados en diferencias finitas que son aplicados a objetos con geometrías complejas. El resultado de los pasos anteriores es un perfil con forma irregular y aleatoria como el que presentamos en el gráfico 3.



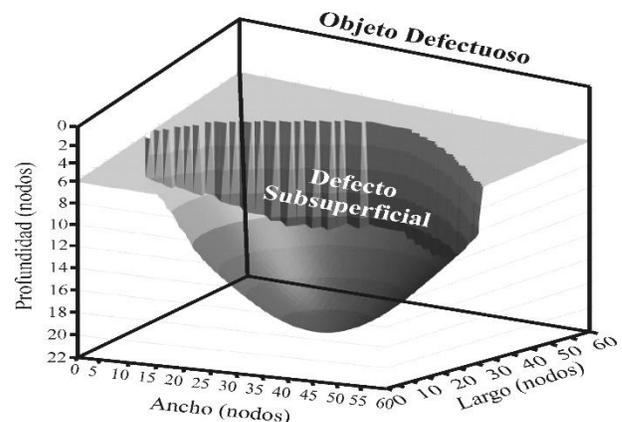
**Gráfico 3** Suma de funciones gaussianas que representa la mitad de una sección transversal del defecto interno

La línea mostrada en el gráfico 3 constituye la mitad de una sección transversal del defecto interno, la otra mitad se genera de manera similar pero con nodos que corresponden a posiciones por debajo de la línea media del defecto. Luego, ambas curvas son unidas para obtener una sección transversal del defecto con forma irregular y aleatoria como la que mostramos en el gráfico 4. Esta sección transversal del defecto interno fue obtenida mediante la superposición de diez funciones gaussianas para el perfil superior (línea continua) y la superposición de otras diez para el inferior (línea discontinua).



**Gráfico 4** Sección transversal con forma irregular y aleatoria de un defecto subsuperficial simulado

En nuestro caso, la sección transversal mostrada en el gráfico 4 representa a la cara plana del defecto más cercana a la superficie del objeto, pero pudiera representar a cualquier otra cara o sección transversal. Luego, a cada posición (x,y) de la sección transversal defectuosa le asignamos un espesor que es determinado mediante una función gaussiana bidimensional para darle volumen al defecto. Esta función gaussiana también puede tener parámetros aleatorios e inclusive puede ser el resultado de la superposición de varias funciones de este tipo. Con el método propuesto obtenemos un defecto tridimensional con forma irregular y aleatoria como el mostrado en el gráfico 5.



**Gráfico 5** Simulación de un sólido semi-infinito con un defecto subsuperficial con forma irregular y aleatoria

Los nodos que se encuentran en el interior del defecto mostrado en el gráfico 5 son considerados nodos defectuosos, y por lo tanto les asignamos propiedades termofísicas correspondientes ese tipo material. Esto implica un conocimiento a prior del material defectuoso que esperamos encontrar en el interior del objeto. El desconocimiento de las propiedades del defecto causa desviaciones en su posición y dimensiones.

Una vez que tenemos la malla que representa al objeto con defectos internos irregulares podemos proceder a simular el proceso de inspección por termografía pulsada. Este proceso consiste en analizar la respuesta térmica superficial del objeto como función del tiempo después de ser irradiado con un pulso de calor. Analizando esta respuesta térmica es posible detectar defectos internos y determinar sus características tales como profundidad, espesor y forma.

### Conclusiones

Presentamos un método para la simulación numérica de objetos opacos con defectos en su interior. A través del método propuesto generamos defectos subsuperficiales con forma irregular y aleatoria. Estos defectos son creados mediante una sección transversal irregular y una función gaussiana bidimensional.

La sección transversal del defecto es obtenida mediante la superposición de funciones gaussianas con valor esperado y ancho aleatorio que dan como resultado un contorno irregular, mientras que la gaussiana bidimensional es usada para darle volumen al defecto.

La asimetría de los defectos que generamos contribuye a modelar el tipo de defectos que podríamos encontrar realmente en el interior de los objetos durante su inspección.

Estas simulaciones numéricas de objetos defectuosos pueden ser empleadas en el modelado del proceso de inspección de objetos mediante técnicas termográficas no-destructivas. La información que proporcionan estas simulaciones permitirán el desarrollo de inspecciones termográficas no-destructivas que contribuyan a la obtención de diagnósticos más certeros y oportunos.

### Agradecimientos

Este trabajo fue realizado con el apoyo de la Universidad de Guanajuato, la Dirección de Apoyo a la Investigación y al Posgrado (DAIP), y el Programa para el Desarrollo Profesional Docente (PRODEP).

### Referencias

- [1] Rodríguez, L. A., Ensayos no destructivos de materiales empleados en obras civiles mediante termografía infrarroja, tesis, Celaya Gto; 2015.
- [2] Borja, F. A., Termografía infrarroja como ensayo no destructivo: detección de defectos en componentes aeroespaciales. Obtenido de <http://www.interempresas.net>, Centro de Tecnologías Aeronáuticas, 2005.
- [3] Maldague, X., Theory and Practice of Infrared Technology for Nondestructive. New York: Wiley Interscience; 2001.
- [4] Marinneti, S., y Maldague X., Procesamiento de imágenes infrarrojas para la detección de defectos en materiales. Obtenido de [http://objetos.univalle.edu.co/files/Procesamiento\\_de\\_imagenes\\_infrarrojas\\_para\\_la\\_deteccion\\_de\\_defectos\\_en\\_materiales.pdf](http://objetos.univalle.edu.co/files/Procesamiento_de_imagenes_infrarrojas_para_la_deteccion_de_defectos_en_materiales.pdf); 2004.
- [5] A. S., "Infrared and Thermal Testing". In Nondestructive Handbook on Infrared Technology Vol. 3. USA: Handbook Series, X. Maldague technical and P. O. Moore eds. 3<sup>rd</sup> edición; 2001.

[6] Ramírez-Granados, J. C.; En J. C. Ramírez-Granados, Detección y Reconstrucción de Defectos Subsuperficiales en 3-D mediante el Análisis de Datos de Termografía Pulsada (págs. 148-165). León, Gto: Centro de Investigaciones en Óptica, A.C., 2011.

[7] Tse, D. P., Smart engineering asset management laboratory. Obtenido de <http://www6.cityu.edu.hk/seam>; 2011. Bellavista, J & Renobell, V, (Coords.), Ciencia, tecnología e innovación en América Latina, Barcelona, Universitat de Barcelona, 1999, p 258

---

## Instrucciones para Autores

---

### [Titulo en Times New Roman y Negritas No.14]

Apellidos en Mayusculas -1er Nombre de Autor †, Apellidos en Mayusculas -2do Nombre de Autor  
*Correo institucional en Times New Roman No.10 y Cursiva*

(Indicar Fecha de Envio:Mes,Dia, Año); Aceptado(Indicar Fecha de Aceptación: Uso Exclusivo de ECORFAN)

---

#### Resumen

Titulo

Objetivos, metodología

Contribución

(150-200 palabras)

**Indicar (3-5) palabras clave en Times New Roman y Negritas No.11**

#### Abstract

Title

Objectives, methodology

Contribution

(150-200 words)

#### Keyword

---

**Cita:** Apellidos en Mayúsculas -1er Nombre de Autor †, Apellidos en Mayusculas -2do Nombre de Autor. Titulo del Paper. Título de la Revista. 2015, 1-1: 1-11 – [Todo en Times New Roman No.10]

---

---

† Investigador contribuyendo como primer autor.

### **Introducción**

Texto redactado en Times New Roman No.12, espacio sencillo.

Explicación del tema en general y explicar porque es importante.

¿Cuál es su valor agregado respecto de las demás técnicas?

Enfocar claramente cada una de sus características

Explicar con claridad el problema a solucionar y la hipótesis central.

Explicación de las secciones del artículo

### **Desarrollo de Secciones y Apartados del Artículo con numeración subsecuente**

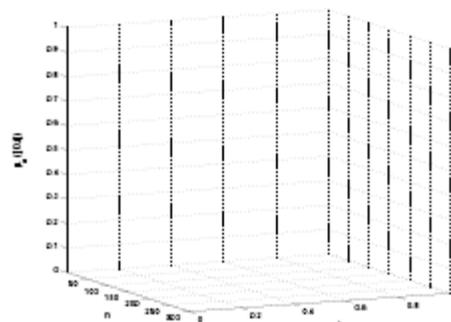
[Título en Times New Roman No.12, espacio sencillo y Negrita]

Desarrollo de Artículos en Times New Roman No.12, espacio sencillo.

### **Inclusión de Gráficos, Figuras y Tablas-Editables**

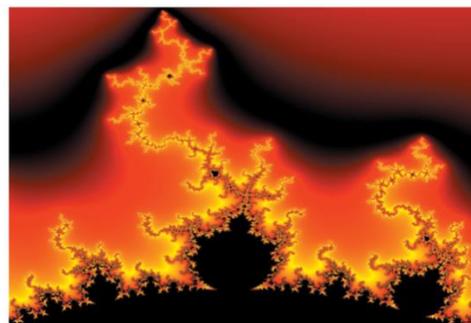
En el *contenido del artículo* todo gráfico, tabla y figura debe ser editable en formatos que permitan modificar tamaño, tipo y número de letra, a efectos de edición, estas deberán estar en alta calidad, no pixeladas y deben ser notables aun reduciendo la imagen a escala.

[Indicando el título en la parte inferior con Times New Roman No.10 y Negrita]



**Grafico 1** Titulo y Fuente (en cursiva).

No deberán ser imágenes- todo debe ser editable.



**Figura 1** Titulo y Fuente (en cursiva).

No deberán ser imágenes- todo debe ser editable.


**Tabla 1** Titulo y Fuente (en cursiva).

No deberan ser imágenes- todo debe ser editable.

Cada artículo deberá presentar de manera separada en **3 Carpetas**: a) Figuras, b) Gráficos y c) Tablas en formato .JPG, indicando el número en Negrita y el Titulo secuencial.

**Para el uso de Ecuaciones, señalar de la siguiente forma:**

$$Y_{ij} = \alpha + \sum_{h=1}^r \beta_h X_{hij} + u_j + e_{ij} \quad (1)$$

Deberán ser editables y con numeración alineada en el extremo derecho.

### Metodología a desarrollar

Dar el significado de las variables en redacción lineal y es importante la comparación de los criterios usados

### Resultados

Los resultados deberán ser por sección del artículo.

### Anexos

Tablas y fuentes adecuadas.

### Agradecimiento

Indicar si fueron financiados por alguna Institución, Universidad o Empresa.

### Conclusiones

Explicar con claridad los resultados obtenidos y las posibilidades de mejora.

### Referencias

Utilizar sistema APA. **No** deben estar numerados, tampoco con viñetas, sin embargo en caso necesario de numerar será porque se hace referencia o mención en alguna parte del artículo.

### Ficha Técnica

Cada artículo deberá presentar un documento Word (.docx):

Nombre de la Revista

Título del Artículo

Abstract

Keywords

Secciones del Artículo, por ejemplo:

1. *Introducción*
2. *Descripción del método*
3. *Análisis a partir de la regresión por curva de demanda*
4. *Resultados*
5. *Agradecimiento*
6. *Conclusiones*
7. *Referencias*

Nombre de Autor (es)

Correo Electrónico de Correspondencia al Autor

Referencia

## Formato de Originalidad



Sucre, Chuquisaca a \_\_\_\_ de \_\_\_\_ del 20\_\_\_\_

Entiendo y acepto que los resultados de la dictaminación son inapelables por lo que deberán firmar los autores antes de iniciar el proceso de revisión por pares con la reivindicación de ORIGINALIDAD de la siguiente Obra.

Artículo (Article):

---

Firma (Signature):

---

Nombre (Name)

**Formato de Autorización**



Sucre, Chuquisaca a \_\_\_\_ de \_\_\_\_ del 20\_\_\_\_

Entiendo y acepto que los resultados de la dictaminación son inapelables. En caso de ser aceptado para su publicación, autorizo a ECORFAN-Bolivia a difundir mi trabajo en las redes electrónicas, reimpresiones, colecciones de artículos, antologías y cualquier otro medio utilizado por él para alcanzar un mayor auditorio.

I understand and accept that the results of evaluation are inappealable. If my article is accepted for publication, I authorize ECORFAN-Bolivia to reproduce it in electronic data bases, reprints, anthologies or any other media in order to reach a wider audience.

Artículo (Article):

\_\_\_\_\_  
Firma (Signature)

\_\_\_\_\_  
Nombre (Name)

# Revista de Energía Química y Física

“Análisis dinámico estructural de un heliostato concentrador de energía solar”

**LEDESMA-JAIME, Reynaldo, RODRÍGUEZ-SÁNCHEZ, Marcos, FERRER-ALMARÁZ, Miguel Ángel y RAMOS-LÓPEZ, Humberto**

*Universidad Tecnológica del Suroeste de Guanajuato*

“Aplicación del método de hilo caliente en la determinación de la resistencia térmica de bloques de concreto-material reciclado”

**ROBLES-SOLÍS, Manuel, VEJAR-RUIZ, Set, LOZANO-MANDUJANO, David y GUTIÉRREZ-VILLEGAS, Carlos**

*Universidad Politécnica de Zacatecas*

“Comparación de puntos de equilibrio de sistemas de potencia con modelos de carga estática dependiente de voltaje”

**GARCÍA-GUZMÁN, José Miguel, OLIVARES-NEGRETE, Leonardo, ORTEGA-HERRERA, Francisco Javier y FIGUEROA-GODOY, Fernando**

*Instituto Tecnológico Superior de Irapuato*

“Construcción de un foto-reactor para medir el desempeño de un geopolímero fotocatalítico”

**GASCA-TIRADO, J. R., HERRERA-DÍAZ, E. I, VÁZQUEZ-LANDAVERDE, P. A. y GÓMEZ-LUNA, B. E.**

*Universidad de Guanajuato*

*Centro de Investigaciones y de Estudios Avanzados del I.P.N. Unidad Querétaro, Querétaro*

“Determinación de los factores que influyen en la recuperación de Oro y Plata de soluciones del proceso de cianuración mediante Electrocoagulación, aplicando diseño de experimentos 2<sup>3</sup>”

**GARCÍA-CARRILLO, María Cristina\*†, PARGA-TORRES, José Refugio, MORENO-CASILLAS, Héctor Aurelio y PAREDES-SOTO, Jesús**

*Instituto Tecnológico de la Laguna*

*Instituto Tecnológico de Saltillo*

“Incorporación de nanomateriales en el concreto fotocatalítico para la reducción de NO<sub>x</sub> y CO<sub>2</sub>”

**FUENTES, Teresa, VAZQUEZ, Cristofer y VAZQUEZ, Kevin**

“Simulación de defectos subsuperficiales con forma irregular y aleatoria para la inspección no-destrucciona de objetos mediante Termografía Infrarroja”

**RAMÍREZ-GRANADOS, Juan Carlos, GÓMEZ-LUNA, Blanca, MORENO-MARTÍNEZ, Jatziri y ALMANZA-ACEVEDO, Jessica**

*Universidad de Guanajuato*

