

---

# PERSPECTIVAS DE LA CIENCIA Y LA INGENIERÍA

---



UNIVERSIDAD  
**AUTÓNOMA**  
DE QUERÉTARO



FACULTAD  
DE INGENIERÍA



DIPFI  
POSGRADO  
INGENIERÍA



PERSPECTIVAS DE LA  
CIENCIA Y LA INGENIERÍA





# PERSPECTIVAS DE LA **CIENCIA Y LA INGENIERÍA**



UNIVERSIDAD  
**AUTÓNOMA**  
DE QUERÉTARO



FACULTAD  
DE INGENIERÍA



**DIPFI**  
POSGRADO  
INGENIERÍA

# DIRECTORIO

**Dra. Margarita Teresa de Jesús García Gasca**  
Rectora

**Dr. Aurelio Domínguez González**  
Secretaría Académica

**M. A. P. José Alejandro Ramírez Reséndiz**  
Secretaría de la Contraloría

**M. S. P. Sergio Pacheco Hernández**  
Secretaría Administrativa

**M. en I. Alejandro Jáuregui Sánchez**  
Secretaría de Finanzas

**Dra. María Teresa García Besné**  
Secretaría de Extensión Universitaria

**M. en S. Luis Alberto Fernández García**  
Secretaría Particular de Rectoría

**Dra. Ma Guadalupe Flavia Loarca Piña**  
Dirección de Ingeniería y Posgrado

**Dr. Manuel Toledano Ayala**  
Director Facultad de Ingeniería

**Dr. Juan Carlos Jáuregui Correa**  
Jefe de Investigación y Posgrado  
Facultad de Ingeniería

Perspectivas de la Ciencia.

Año 1. Núm. 001, abril de 2018, es una publicación semestral editada y publicada por la **Universidad Autónoma de Querétaro, División de Investigación y Posgrado de la Facultad de Ingeniería.** C.U. Cerro de las Campanas S/N, Col. Las Campanas, C.P. 76010, Tel. (442) 192-12-00, ext. 7035.

Reserva de Derechos al Uso Exclusivo  
No. 04-2017-032412430300-203,  
ISSN: En trámite

Ambos registros en trámite por el Instituto  
Nacional de Derechos de Autor.

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

**QUEDA ESTRICTAMENTE PROHIBIDA LA REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL DEL CONTENIDO E IMÁGENES DE LA PUBLICACIÓN SIN PLENA AUTORIZACIÓN DE LA UNIVERSIDAD.**



## **DIRECCIÓN**

Dr. Manuel Toledano Ayala

# **COMITÉ EDITORIAL**

## **EDITORES RESPONSABLES**

Dr. Juan Carlos Jáuregui Correa  
M.C. Stephanie Virginia Camacho Gutiérrez

## **EDITORES ASOCIADOS**

M.C. Adán Mercado Luna  
Dr. Alejandro Espinoza Calderón  
M.C. Alejandro Moreno Gómez  
Dr. Andrés Torres Acosta  
M.C. Armando Juárez Trujillo  
Dr. Arturo González Gutiérrez  
M.C. Christopher Alexis Cedillo Jiménez  
Dra. Claudia Gutiérrez Antonio  
M.C. Cuauhtémoc Hernández Galeno  
Dr. Eduardo Elizalde Peña  
Dr. Enrique Rico García  
Dra. Genoveva Hernández Padrón  
Dra. Janet Ledesma García  
M.I. Javier García Pérez  
M.I. José Alfonso Balbuena Cruz  
Dr. José Antonio Quevedo Tiznado  
Dr. José de Jesús Pérez Bueno  
Dr. José Luis Reyes Araiza  
Dr. José Roberto Galaviz González  
Dr. Luis Miguel Contreras Medina  
Dr. Marco Antonio Aceves Fernández  
Dr. Miguel A. Pérez Lara y Hernández  
M.C. Tadeo Rodríguez

## **DISEÑO EDITORIAL**

Rodrigo Alonso Hernández Gallegos

---



## BIOSISTEMAS

### **10. CULTIVO DE LA MICROALGA NANNOCHLOROPSIS LIMNETICA EN AGUA RESIDUAL DE INVERNADERO**

Cultivation of microalgae Nannochloropsis limnetica in greenhouse drain water  
Francisco Javier Guiscafré Rodea, Juan Fernando García Trejo, Marieke Vanthoor-Koopmans

## CONSTRUCCIÓN

### **20. COMPORTAMIENTO MECÁNICO A LA COMPRESIÓN DE UN MORTERO CON SUSTITUCIÓN PARCIAL DE ZEOLITA NATURAL EN DIFERENTES GRANULOMETRÍAS**

Strength compressive behavior of a mortar with partial replacement of natural zeolite with different size  
E.D. Perez-Diaz, Juan Bosco Hernández-Zaragoza

## ENERGÍA

### **30. SIMULACIÓN DE SISTEMA DE REFRIGERACIÓN SOLAR POR ABSORCIÓN DE SIMPLE EFECTO USANDO BROMURO DE LITIO-AGUA**

Simulation of single-stage solar absorption refrigeration system using water-lithium bromide  
Juan Manuel García Guendulain, América Eileen Mendoza Rojas, José Manuel Riesco Ávila

## ESTRUCTURAS

### **41. COMPARATIVA DE FORMAS ESTRUCTURALES (TOPOLOGÍA) DE TORRE RETICULAR METÁLICA EN TÉRMINOS DE EFICIENCIA ESTRUCTURAL. CASO: TORRE CONCENTRADORA CAMPO HELIÓSTATOS**

Comparison of structural shapes (Topology) of steel lattice tower according to mechanical efficiency. Case: Main tower heliostat's field  
A. Vera Murillo, J. Horta Rangel, M. Arroyo Contreras, M. Pérez Lara y Hernández

## GEOTECNÍA

### **55. EFECTO DE LA CONTAMINACIÓN CON GASOLINA EN LAS PROPIEDADES GEOTÉCNICAS DE UNA ARCILLA EXPANSIVA**

Effect of gasoline contamination on the geotechnical properties of an expansive clayey soil  
Norma-Patricia Curiel-Iñiguez, Christian-Eduardo Hernández-Mendoza



# ÍNDICE

## HIDROLOGÍA

### **65. AGRUPACIÓN JERÁRQUICA ASCENDENTE PARA LA DELIMITACIÓN DE REGIONES HOMOGÉNEAS APLICADA AL ANÁLISIS DE VARIABILIDAD ESPACIAL DE LA PRECIPITACIÓN EN LA REGIÓN HIDROLÓGICA MEXICANA 10**

Hierarchical Agglomerative Clustering for delimitation of homogeneous regions and its application in the analysis of the spatial variability of precipitation in the Mexican Hydrological Region 10

R. Celic Reséndiz-Mendoza, M. Alfonso Gutiérrez-López

## INGENIERÍA EN CALIDAD Y PRODUCTIVIDAD

### **80. DISEÑO Y DESARROLLO DE PRUEBA DE CONFIABILIDAD PARA EL SISTEMA DE RODAMIENTO POR RUEDAS DE UNA SECADORA DE ROPA DOMÉSTICA**

Development and design of a reliability test for a rolling bearing system of a clothes dryer

Jesús Esqueda, Eric Leonardo Huerta

## MECATRÓNICA

### **90. ANÁLISIS DE SEÑALES DE CORRIENTE PARA DIAGNÓSTICO DE CORTOCIRCUITO ENTRE ESPIRAS DE TRANSFORMADOR BASADO EN TRANSFORMADA WAVELET**

Analysis of current signals for diagnostics of short-circuited turns in a transformer based on Wavelet transform

Gustavo Álvarez-Monroy, Arturo Mejía-Barrón, Martín Valtierra-Rodríguez, Juan Pablo Amézquita-Sánchez, David Granados-Lieberman, Juan C. Olivares-Galván, Rafael Escarela-Pérez

## NANOTECNOLOGÍA

### **104. SOL-GEL SYNTHESIS OF THE DOUBLE PEROVSKITE $Sr_2FeMoO_6$ ASSISTED BY MICROWAVE TECHNIQUE**

Síntesis por Sol-Gel de la perovskita doble  $Sr_2FeMoO_6$  asistida por la técnica de microondas.

J. Valdés, A. Cuan, O. Navarro, R. Nava, B. Aguilar



# **CULTIVO DE LA MICROALGA NANNOCHLOROPSIS LIMNETICA EN AGUA RESIDUAL DE INVERNADERO**

---

Cultivation of microalgae *Nannochloropsis limnetica* in  
greenhouse drain water

Francisco Javier Guiscafré Rodea<sup>1</sup>, Juan Fernando García  
Trejo<sup>1</sup>, Marieke Vanthoor-Koopmans<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Universidad Autónoma de Querétaro,  
Cerro de las campanas S/N, Santiago de Querétaro,  
Querétaro, 76010, México

\*Autor de correspondencia  
franco\_vam@hotmail.com

## RESUMEN

La microalga *Nannochloropsis limnetica* es la única especie de su género que es de agua dulce y presenta la peculiaridad de contener un alto contenido de ácidos grasos poliinsaturados Omega 3 del tipo eicosapentaenoico (EPA). Los ácidos grasos EPA han demostrado un gran impacto en enfermedades cardiovasculares, enfermedades inflamatorias, funcionamiento cerebral y salud mental lo que les da un alto valor económico. El objeto de la presente investigación fue evaluar la factibilidad de cultivar la microalga *N. limnetica* en aguas residuales provenientes de un invernadero hidropónico de producción de jitomate, con la finalidad de reducir costos de producción. Al terminar la investigación, se comprobó que esta microalga si puede ser cultivada en agua residual de invernadero, obteniéndose inclusive mejores resultados que un medio comercial (BG11) conocido por ser eficiente en el cultivo de microalgas de agua dulce. Además se pudo comprobar que la microalga puede crecer en el agua residual a lo largo de todo el año de la producción hortícola del invernadero.

### Palabras clave

Microalgas, agua residual, invernadero, omega 3, ácido eicosapentaenoico, cultivo.

### ABSTRACT

The microalgae *Nannochloropsis limnetica* is the only species of its genus that is freshwater and has the peculiarity of containing a high content of Eicosapentaenoic acid (EPA), which is a polyunsaturated fatty acid. EPA fatty acids have shown to have major impact on cardiovascular diseases, inflammatory diseases, brain function and mental health, which gives them a high economic value. The objective of the present investigation was to evaluate the feasibility of cultivating *N. limnetica* in wastewater from a hydroponic

greenhouse of tomato production, in order to reduce production costs. At the end of the research, it was verified that this microalgae can be cultivated in greenhouse wastewater, obtaining even better results than a commercial medium (BG11) known to be efficient in the cultivation of freshwater microalgae. In addition, it was verified that microalgae can grow in the wastewater throughout the year of the horticultural production of the greenhouse.

### Keywords

Microalgae, wastewater, greenhouse, omega 3, eicosapentaenoic acid, culture.

## 1. INTRODUCCIÓN

Las microalgas son organismos unicelulares con una gran variedad de usos, como es el caso de biofertilizantes, biocombustibles, alimentación animal, alimentación humana, medicina, farmacéutica, nutracéutica y cosmética todas de gran importancia en la salud humana (Hernandez y Labbe, 2014). Otro uso de las microalgas es el tratamiento de aguas residuales de distintas fuentes como son industrial, doméstico y agrícola, ya que pueden crecer de manera adecuada en los altos niveles de nutrientes presentes en estas aguas (Park *et al.*, 2011a, Park *et al.*, 2011b, Abdel-Raouf *et al.*, 2012). De no ser tratadas, estas aguas pueden ocasionar graves problemas de eutrofización, que es una consecuencia de la elevada concentración de nutrientes, como es el caso de nitratos y fosfatos.

Debido a esto, es indispensable que se desarrollen nuevas tecnologías que permitan una mejor reutilización de los residuos, que sean de bajo costo y disminuyan el impacto ambiental ocasionado por este tipo de residuos. Entre estas tecnologías, los cultivos de microalgas adquieren gran importancia, ya que, pueden remover de una manera muy eficiente y rápida contami-



nantes tanto de medios líquidos como gaseosos (Olguín, 2003, Dominic et al., 2009, Doušková et al., 2010, León y Chaves, 2010, González-López et al., 2011, Rawat et al., 2011), incorporándolos a su metabolismo generando biomasa de alto valor comercial (Markou y Georgakakis, 2011). La microalga *N. limnetica* es un microorganismo fotosintético, unicelular, que pertenece a un pequeño grupo de algas de la clase Eustigmatophyceae. Presenta una forma esférica u ovalada con un tamaño de 1.5-6 X 2.5- 6µm y es la única especie del genero *Nannochloropsis* de agua dulce. Descubierta en Alemania en 1998 presenta la peculiaridad como todo el género de contener ácidos grasos poliinsaturados Omega 3 del tipo EPA. (Kriemitz, et al., 2000). Los ácidos grasos omega (en especial omega 3 y 6) han sido altamente reconocidos como beneficiosos en la salud humana. (Grimm et al., 1994; Ruxton et al., 2004; Tacon y Metian 2013). De manera particular el ácido docosahexaenoico (DHA, 22:6n-3) y el ácido eicosapentaenoico (EPA, 20:5n-3) que han demostrado un gran impacto en enfermedades cardiovasculares, enfermedades inflamatorias, funcionamiento cerebral y salud mental, siendo incorporados en fórmulas lácteas debido a que ayudan al desarrollo adecuado de los infantes (Ruxton et al., 2004), de ahí su importancia en poder cultivarla a bajo costo y con un alto nivel de calidad. El género *Nannochloropsis* ya ha sido probado que crece de manera satisfactoria en aguas residuales como es el caso de Lins, et al. (2014) y Sirin y Sillanpa, (2015), pero la especie *N. limnetica* de manera particular ha sido poco estudiada. La finalidad de la presente investigación es comprobar la factibilidad del crecimiento de la microalga *N. Limnetica* en aguas residuales provenientes de la producción hortícola de invernadero.

## 2. METODOLOGÍA / MATERIALES Y MÉTODOS

### 2.1 Aclimatación de la microalga.

*N. limnetica* CCMP2260 fue adquirida del laboratorio Bigelow en el estado de Main, USA. Para su aclimatación, *N. limnetica* se inoculó en botellas Simax de 1 L con un diámetro de 10 cm, en medio BG11 de laboratorios Sigma. Medio y botellas fueron esterilizados en autoclave por 20 min a 121°C. La aireación de las botellas se realizó con material de acuario, como son, bombas de aire, válvulas, mangueras de silicón y difusores, todo el material también fue esterilizado en autoclave. Las botellas fueron colocadas dentro del laboratorio a una temperatura promedio de 21°C. La iluminación administrada fue artificial con luz blanca a 53 lumen/W en un ciclo de luz/obscuridad de 12/12. El pH se controló usando CO<sub>2</sub> atmosférico (350ppm). La microalga se dejó aclimatar por un periodo de un mes.

### 2.2 Experimento agua residual de invernadero vs medio comercial BG11.

El experimento se llevó a cabo bajo las mismas condiciones en las que se realizó la aclimatación de la microalga, es decir, se agregó el inóculo en botellas de un litro, controlando luz, aireación, pH, fotoperiodo y temperatura. Se prepararon dos medios: agua destilada estéril y medio BG11 al 2% como control y agua residual del invernadero. El experimento se realizó por duplicado, por lo que se pusieron 2 botellas con cada medio. Antes del experimento las botellas fueron esterilizadas en autoclave por 20 min a 121°C y como desinfección adicional se colocaron por 30 min en una cámara con luz UV. Las mediciones fueron tomadas una vez al día, a las 9:00am. El volumen de muestra tomado diariamente fue de 3mL y no se agregó más medio para no diluir la concentración en las botellas. Para cuantificar el crecimiento se utilizó un espectrofotómetro marca Lamote, midiéndose la absorbancia a una longitud de onda de 750 nm, realizándose la medición por triplicado. De acuerdo a

la ley de Lambert y Beer, cuando el valor de la absorbancia estaba por encima de 0.8 se realizaron diluciones para llevarlo a un valor entre 0.3 y 0.8 y disminuir el error en la medición. El pH fue ajustado a 8.4 con NaOH y HCL solo inicialmente después de inoculada las botellas. Para verificar la concentración de nutrientes inicial y asegurar que esto no sería una limitante, se midió nitratos ( $\text{NO}_3$ ) y fosfatos ( $\text{PO}_4$ ). El primero con un medidor laquatwin de la marca Horiba modelo B-340 y el segundo con un medidor de la marca Hanna Instruments modelo HI 736. Todas las botellas fueron inoculadas a una densidad óptica inicial de 0.2. Se realizó observación diaria a microscopio, para asegurar que las botellas no estuvieran contaminadas con otros microorganismos que pudieran afectar el experimento.

### 2.3 Experimento nutrientes.

Para poder evaluar si la microalga *N. limnetica*, podía ser cultivada en el agua residual del invernadero de la producción de jitomate a lo largo de las variaciones de todo el año, se verificó con datos proporcionados por la empresa de la cual se obtuvo el agua residual, el comportamiento de los nutrientes ( $\text{NO}_3$  y  $\text{PO}_4$ ) en el agua del 2012 al 2016. La empresa analiza su agua residual quincenalmente mandando sus muestras al laboratorio Relab den Haan en los países bajos. Se obtuvo la concentración para  $\text{NO}_3$  y  $\text{PO}_4$  que aparecía con mayor frecuencia "moda", el valor máximo y el valor mínimo. Con base a los datos obtenidos se llevó a cabo el experimento. *N. limnetica* fue inoculada por duplicado en las tres concentraciones (máximo, mínimo y moda) y se evaluó el comportamiento. Para preparar las concentraciones se utilizó la misma fórmula que se utiliza en el invernadero, para mantener la misma proporción de nutrientes y se realizaron diluciones. De igual manera que el experimento anterior, el resultado se llevó a cabo bajo condiciones controladas y estériles, en botellas de un litro. Se realizó observación diaria a microscopio,

para asegurar que las botellas no estuvieran contaminadas con otros microorganismos que pudieran afectar el experimento.

### 2.4 Crecimiento de la microalga.

Para poder evaluar el aumento en el crecimiento promedio de las microalgas se calculó la tasa de crecimiento a partir de la pendiente de la regresión lineal en la fase del crecimiento exponencial.

$$k = (\ln N - \ln N_0) / (t - t_0) \quad (1)$$

Donde  $k$  ( $\text{d}^{-1}$ ) es la tasa de crecimiento en la fase de crecimiento exponencial,  $N_0$  es la densidad óptica al inicio de la fase exponencial ( $t_0$ ) y  $N$  representa la densidad óptica al tiempo ( $t$ ) de la fase exponencial.

También se evaluó el tiempo de duplicación de las microalgas ( $T$ ), es decir, el tiempo en días en que tarda una célula en duplicarse.

$$T = \ln 2 / k \quad (2)$$

## 3. Resultados y discusiones

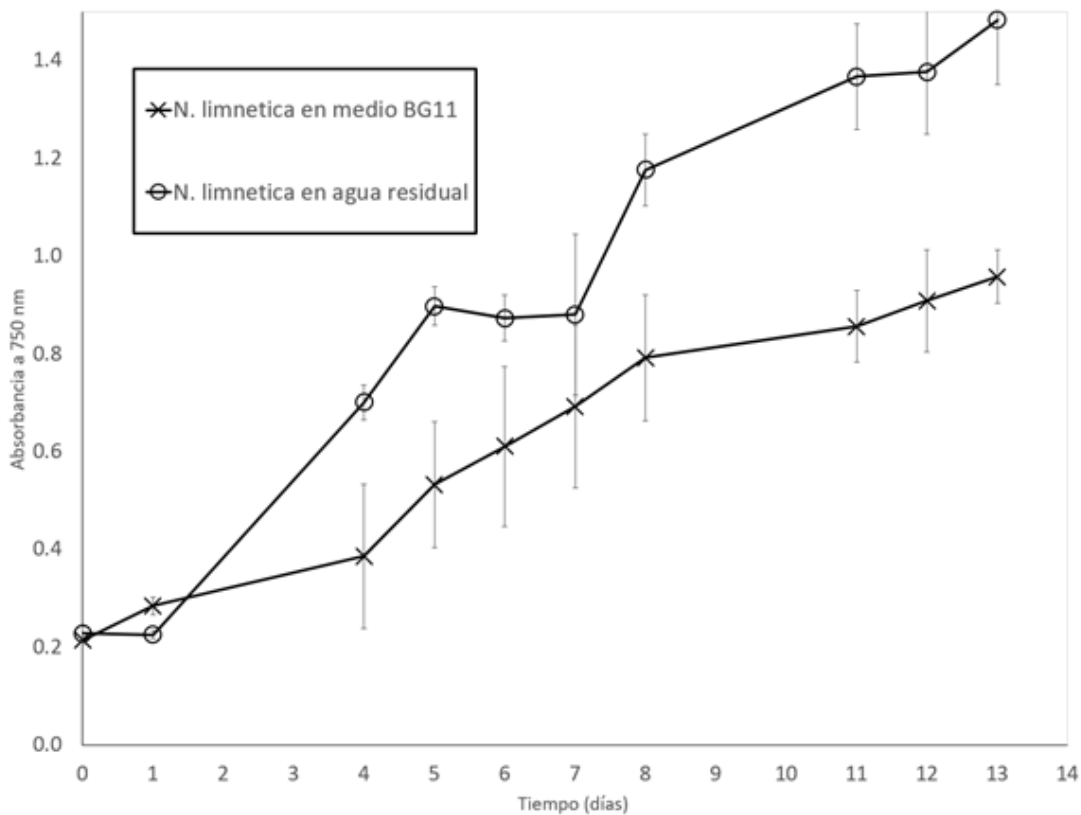
*N. limnetica* CCMP2260 pudo ser cultivada en el agua proveniente del cultivo de jitomate de un invernadero hidropónico como puede observarse en la figura 1. Comparándose el desarrollo en el agua residual contra el medio BG11, se obtuvo mejor crecimiento en el agua residual, con una tasa de crecimiento de 0.14 y 0.11  $\text{d}^{-1}$  respectivamente y un tiempo de duplicación para *N. limnetica* en agua residual de 4.95 y en medio BG11 de 6.3. Yubin, et al (2014), al igual que el presente experimento, evaluaron la tasa de crecimiento de 9 cepas de *Nannochloropsis*, entre ellos *N. limnetica*, inoculándola también en medio BG11, obteniendo una tasa de crecimiento de 0.07  $\text{d}^{-1}$ , lo que nos ayuda a corroborar la eficiencia del uso del agua residual del invernadero para cultivar la microalga *N. limnetica*. Esto se puede explicar por la cantidad de nutrientes disponibles en el



medio. Como todos los organismos, las microalgas tienen un mejor crecimiento cuando la concentración de nutrientes es óptima para ellas y varía dependiendo de la especie. Esto quiere decir que a una concentración de nutrientes alta o baja el crecimiento disminuye. Makareviciene (2011) cultivando *Chlorella* sp. en medio BG11, encontró, que a tres diferentes concentraciones de nitrato de 203, 544 y 1094.21 ppm, el crecimiento fue afectado, considerando los 10 primeros días de cultivo, obtuvo un mayor crecimiento en el menos concentrado, siguiéndole la segunda y tercera concentración. Esto indica en nuestro caso, que la concentración de nutrientes existentes en el medio de agua residual de invernadero del cultivo de jitomate es más adecuada para la microalga *N. limnetica*, que la que le proporciona el medio BG11.

Por otro lado es también importante considerar la proporción de los nutrientes en el medio. Para el caso de nitrógeno y fósforo, una proporción de 16:1 es la más adecuada (Oswald, 1998), aunque varía dependiendo de la especie y de las condiciones externas como luz o temperatura, ya que de estas dependerán los requerimientos de la microalga. Una proporción alta de nitrógeno, respecto a fósforo, sugiere una limitación de fósforo, y una proporción baja, sugiere una limitación de nitrógeno.

Por lo tanto, limitaciones o excesos, de estos dos nutrientes, pueden afectar el crecimiento de las microalgas (Borowitzka, 1998). Esto lo podemos corroborar con lo encontrado por Mayers, (2014). Observo que proporciones de N:P mayores a 32:1 afectan gravemente la productividad, ya que las células comien-



**Figura 1.** Promedios del crecimiento de la microalga *Nannochloropsis limnetica* cultivada en dos medios: Agua residual de invernadero de producción hortícola y en un medio comercial BG11.

zan a tener problemas para dividirse debido a la falta de Fosforo. En nuestro experimento la concentración de  $\text{NO}_3$  y  $\text{PO}_4$  y sus proporciones, se describen en la siguiente tabla:

La proporción tan alta entre nitrógeno respecto a fosforo, que hay en el medio BG11 como se indica en la tabla 1, sugiere que la limitación de fosforo puede ser la razón principal por la que se obtuvo un mejor crecimiento en el agua residual de invernadero. Aunque algunos autores lo utilizan para evaluar el crecimiento de microalgas de agua dulce (Makareviciene, 2011., Yubin et al., 2014), el medio BG11, debe ser usado más para mantener cultivos y no para crecer microalgas de manera óptima. De los datos analizados mencionados en la sección 2.3, se obtuvo la proporción de N:P en el agua residual a lo largo del año. La que aparece con más frecuencia es 5:1, lo que concuerda con

la proporción obtenida en este experimento, pero va desde 4:1 hasta 25:1. Sin embargo estas proporciones siguen dentro del rango requerido por las microalgas. Para el medio de agua residual de invernadero, una proporción de N:P de 5:1, parece ser adecuado para el crecimiento de *N. limnetica*, aunque se requiere una investigación posterior, para encontrar el óptimo de crecimiento.

Ya que se pudo constatar que la microalga *N. limnetica* puede crecer en agua residual de invernadero de producción de jitomate, el siguiente paso fue comprobar, que puede ser cultivado a las diferentes concentraciones de nutrientes que se dan a lo largo de todo el año, ya que varían considerablemente, como se puede constatar en la tabla 2, donde se observa la concentración mínima, máxima y la moda para  $\text{NO}_3$  y  $\text{PO}_4$ .

	<b>NO3 (ppm)</b>	<b>PO4 (ppm)</b>	<b>Proporción N:P</b>
<b>BG11</b>	1094	5.25	124:1
<b>Agua residual de invernadero</b>	830	120	5:1

**Tabla 1.** Concentración y proporción N:P, de  $\text{NO}_3$  y  $\text{PO}_4$  en el medio BG11 y en el agua residual de invernadero de cultivo de jitomate.

	<b>Nitratos (ppm)</b>	<b>Fosfatos (ppm)</b>
<b>Máximo</b>	2347.9	337
<b>Moda</b>	886	160
<b>Mínimo</b>	664.5	93

**Tabla 2.** Valores máximos, mínimos y moda, de nutrientes encontrados en las aguas residuales de producción hortícola de invernadero del 2012 al 2016.



Los tres medios preparados a partir del histórico del agua residual del invernadero del 2012 al 2016 se muestran en la tabla 3.

Como se puede observar en la figura 2, una vez más la microalga *N. limnetica* pudo ser cultivada en agua residual de invernadero de manera satisfactoria y crecer a las diferentes concentraciones de nutrientes existentes en el agua residual a lo largo de todo el año de producción de jitomate. Sin embargo se obtuvo un mejor crecimiento en la moda, siguiéndole la mínima y la máxima. Las tasas de crecimiento y tiempo de duplicación se observan en la tabla 4.

Si se compara la tasa de crecimiento obtenida en el experimento 1, con las de este ex-

perimento, en este fueron más altas. Esto se atribuye a la temperatura, ya que fue la única variable que no se pudo controlar completamente, ya que se tenía a temperatura del laboratorio.

Los datos encontrados arrojan información valiosa para ser utilizada en el escalamiento a una escala comercial, ya que como en cualquier producción, los nutrientes son uno de los costos más elevados, por lo que de poderse suprimir este gasto, se podrán reducir los costos operativos de manera importante. Además del beneficio adicional que brindan las microalgas, como es, el reducir el impacto ambiental, por el tratamiento que se le da al agua.

	<b>Nitratos (ppm)</b>	<b>Fosfatos (ppm)</b>
<b>Máximo</b>	2112.8	302.5
<b>Moda</b>	1052	238
<b>Mínimo</b>	618	121.55

**Tabla 3.** Medios preparados para evaluar si la microalga *N. limnetica* puede crecer en las variaciones de nutrientes existentes en el agua residual del invernadero del cultivo de jitomate.

	<b>Tasa de crecimiento <math>d^{-1}</math></b>	<b>Tiempo de duplicación</b>
<b>Máximo</b>	.21	3.35
<b>Moda</b>	.24	2.94
<b>Mínimo</b>	.22	3.12

**Tabla 4.** Tasas de crecimiento y tiempo de duplicación para la microalga *Nannochloropsis limnetica*, a tres concentraciones diferentes en agua residual de invernadero de producción de jitomate.

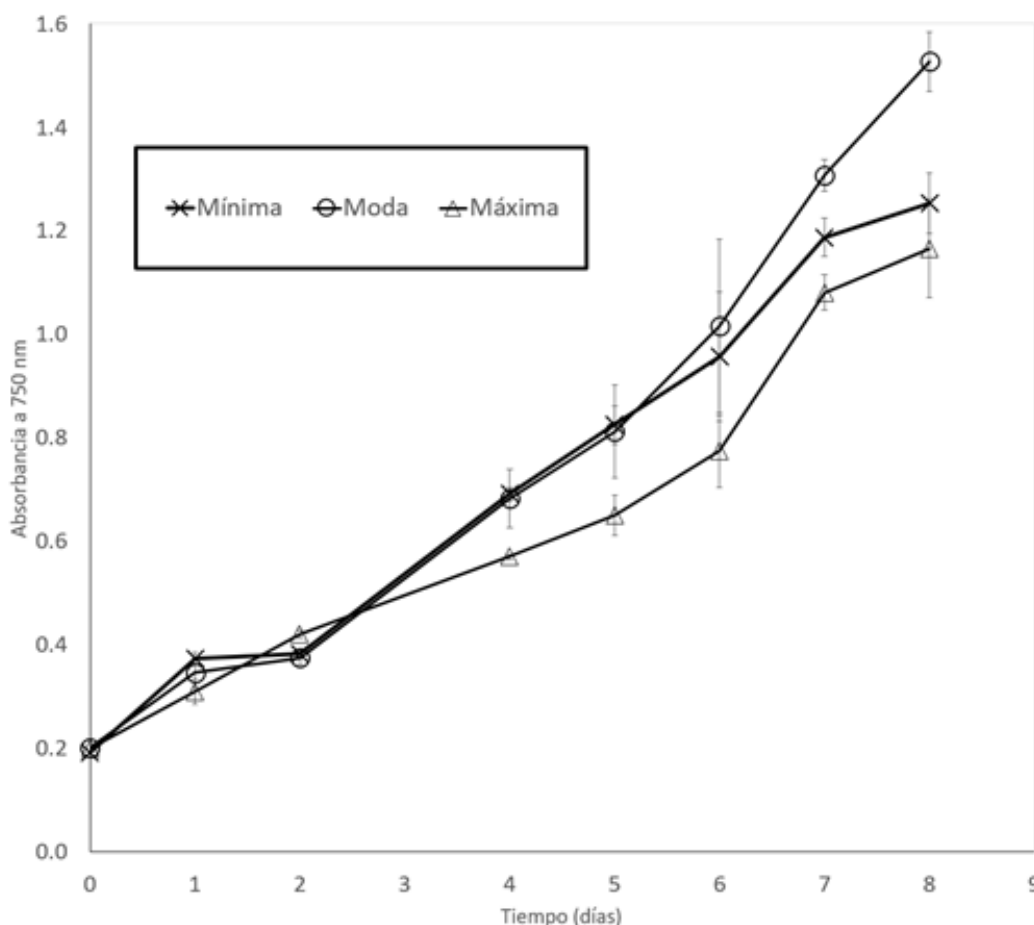


## 4. CONCLUSIÓN

La microalga *N. limnetica* puede ser cultivada en el agua residual de invernadero de una producción hortícola de jitomate. Comparando el crecimiento con el medio BG11 usado actualmente de manera comercial para cultivar microalgas de agua dulce, presenta una mejor tasa de crecimiento y menor tiempo de duplicación en el agua residual del invernadero. A diferentes niveles de nutrientes como son los encontrados en el agua residual a lo largo del año de la producción de jitomate, una concentración en el agua residual de alrededor de 886 ppm de nitratos y 160 ppm de fosfatos produce la mayor tasa de crecimiento lo que favorece

el cultivo ya que es la que se presenta con mayor frecuencia a lo largo de todo el año. Sin embargo, la microalga *N. limnetica* puede crecer a niveles tan bajos como 618 ppm de nitratos y 121 ppm de fosfatos o tan altos como 2347 ppm de nitratos y 337 ppm de fosfatos.

Esta investigación ofrece la posibilidad de disminuir los costos de producción de microalgas en el mundo debido a que los nutrientes no generan un costo al ser obtenidos del residuo de otra operación, ofreciendo la posibilidad de obtener un nuevo producto de alto valor comercial y reduciendo el impacto negativo en el ambiente al reducir los altos niveles de nutrientes contaminantes.



**Figura 2.** Crecimiento en el tiempo de la microalga *Nannochloropsis limnetica* en tres concentraciones diferentes de agua residual de invernadero de producción de jitomate.



## AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Autónoma de Querétaro de manera especial al Dr. Juan Fernando García Trejo por su apoyo y dirección en la investigación. A la Dra. Marieke Koopmans por iniciarme en el mundo de las microalgas y a la empresa Finca Ahuehuetes por el apoyo financiero en la investigación.

## REFERENCIAS

Abdel-Raouf, N., A.A. Al-Homaidan, I.B.M. Ibraheem. 2012. Microalgae and wastewater treatment. *Saudi Journal of Biological Sciences* 19: 257-275.

Borowitzka, M.A. 1998. Limits to growth, in *Wastewater treatment with algae*, Y.-S. Wong and N.F.Y. Tam, Editors. Springer Verlag. p. 203–226.

Dominic, V.J., S. Murali and M.C. Nisha. 2009. Phycoremediation efficiency of three algae *Chlorella vulgaris*, *Synechocystis salina* and *Gloeocapsa gelatinosa*. *Academic Review* 16(1- 2): 138-146.

Doušková, I., F. Kaštánek, Y. Maléterová, P. Kaštánek, J. Doucha and V. Zachleder. 2010. Utilization of stillery stillage for energy generation and concurrent production of valuable microalgal biomass in the sequence: Biogas-cogeneration- microalgae-products. *Energy Conversion and Management* 51: 606-611.

González-López, C.V., F.G. Acién, J.M. Fernández-Sevilla y E. Molina. 2011. Uso de microalgas como alternativa a las tecnologías disponibles de mitigación de emisiones antropogéni-

cas de CO<sub>2</sub>. *Revista Latinoamericana de Biotecnología Ambiental Algal* 2(2): 93-106.

Grimm, H., A. Tibell, B. Norrlind, C. Blecher, S. Wilker, y K. Schwemmler. 1994. Immunoregulation by parental lipids: impact of the n-3 to n-6 fatty acid ratio. *JPEN-Parenter. Enter.*, 18, 417–421.

Hernandez-Perez, A., y J.I. Labbe. 2014. Microalgas, cultivo y beneficios. *Revista de Biología Marina y Oceanografía*, 49, 157-173.

Krienitz, L., H. Dominik, H.B. Stich, and W. Weiler. 2000. *Nannochloropsis limnetica* (Eustigmatophyceae), a new species of picoplankton from freshwater. *Phycologia*, Volume 39 (3), 219-227.

León, C., y D. Chaves. 2010. Tratamiento de residual vacuno utilizando microalgas, la lenteja de agua *Lemna aquinoctiales* y un humedal subsuperficial en Costa Rica. *Revista Latinoamericana de Biotecnología Ambiental Algal* 1(2): 155-177.

Lins, L., D.H. Silveria, E. Andrade, and L.Wessels. 2014. Cultivation of *Nannochloropsis* sp. in brackish groundwater supplemented with municipal wastewater as a nutrient source. *Brazilian Archives of Biology and Technology*, 57 No.2.

Makarevičienė, V., Andrulevičiūtė, V., Skorupskaitė, V., and J. Kasperovičienė. 2011. Cultivation of Microalgae *Chlorella* sp. and *Scenedesmus* sp. as a Potential Biofuel Feedstock. *Environmental Research, Engineering and Management* No. 3(57), P. 21 – 27.

Markou, G., and D. Georgakakis. 2011. Cultivation of filamentous cyano-

bacteria (blue-green algae) in agro-industrial wastes and wastewaters: A review. *Applied Energy* 88: 3389-3401.

Mayers, J., K.J. Flynn, and R.J. Shields. 2014. Influence of the N:P supply ratio on biomass productivity and time-resolved changes in elemental and bulk biochemical composition of *Nannochloropsis* sp. *Bioresource Technology*, 169, 588-595.

Olguín, E.J. 2003. Phycoremediation: key issues for cost-effective nutrient removal processes. *Biotechnology Advances* 22: 81-91.

Oswald, W.J. 1988. Micro-algae and waste-water treatment, in *Micro-algal biotechnology*, M.A. Borowitzka and L.J. Borowitzka, Editors. Cambridge University press: Cambridge. p. 305-328.

Park, J., R. Craggs, and A. Shilton. 2011a. Wastewater treatment high rate algal ponds for biofuel production. *Bioresource Technology* 102: 35-42.

Park, J., R. Craggs, and A. Shilton. 2011b. Recycling algae to improve species control and harvest efficiency from a high rate algal pond. *Water Research* 45: 6637-6649.

Rawat, I., R. Ranjith-Kumar, T. Mutanda, and F. Bux. 2011. Dual role of microalgae: Phycoremediation of domestic wastewater and biomass production for sustainable biofuels production. *Applied Energy* 88: 3411-3424.

Ruxton, C.H.S., S.C. Reed, M.J.A., Simpson, and K.J. Millington. 2004. The health benefits of omega-3 polyunsaturated fatty acids: a review of the evidence. *J. Hum. Nutr. Diet.*, 17, 449-459.

Sirin, S., and M. Sillanpa. 2015. Cultivating and harvesting of marine alga *Nannochloropsis oculata* in local municipal wastewater for biodiesel. *Bioresource Technology*, 191, 79-87.

Tacon, A.G., and M. Metian. 2013. Fish matters: importance of aquatic foods in human nutrition and global food supply. *Rev. Fish. Sci.*, 21, 22-38.



# COMPORTAMIENTO MECÁNICO A LA COMPRESIÓN DE UN MORTERO CON SUSTITUCIÓN PARCIAL DE ZEOLITA NATURAL EN DIFERENTES GRANULOMETRÍAS

---

Strength compressive behavior of a mortar with partial replacement of natural zeolite with different size

E.D. Perez-Diaz<sup>1\*</sup>, Juan Bosco Hernández Zaragoza<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidad Autónoma de Querétaro,  
Cerro de las campanas S/N, Santiago de Querétaro,  
Querétaro, 76010, México

\*Autor de correspondencia  
eperez60@alumnos.uaq.mx

## RESUMEN

En este estudio, se analiza la influencia que tiene el tamaño de partícula de la zeolita natural en el comportamiento puzolánico. La zeolita empleada proviene del estado de San Luis Potosí, región centro-norte de México, y se presentan dos granulometrías distintas, una en polvo (pasa malla No. 200) y otra arena (30-100). El objetivo principal del presente trabajo es comparar, en distintas concentraciones, el carácter puzolánico de una zeolita natural en dos granulometrías, mediante un método indirecto sobre mezclas de mortero endurecido. En la metodología experimental, la resistencia a la compresión de morteros con sustitución parcial de 0, 10 y 15% es evaluada acorde a la normativa ASTM C-109. Se evidencia que una granulometría de este material puzolánico en el orden de 0.6 a 0.15 mm (malla 30-100) no presenta una contribución significativa en la resistencia mecánica a la compresión, alejando la posibilidad de una actividad puzolánica en cualquier concentración de zeolita natural. Esta zeolita natural en polvo se ha seleccionado para una caracterización fisicoquímica y puzolánica más profunda para posteriores investigaciones.

### Palabras Clave

Cemento puzolánico, Clinoptilolita, Material Puzolánico, Mortero binario, Reactividad Puzolánica, Zeolita natural.

### ABSTRACT

In this work, the influence of particle size of the natural zeolite on the pozzolanic behavior is analyzed. The zeolite used comes from the state of San Luis Potosí, central-north region of Mexico, and two different granulometries are presented, one powder (pass mesh No. 200) and another sand (30-100). The main objective of the present work is to compare, in different concentrations, the pozzolanic character of a natural zeolite in two granulometries, by an indirect method on hardened mortar mixtures. In the experimental metho-

dology, the compressive strength of mortar with partial substitution of 0, 10 and 15% is evaluated according to the ASTM C-109 standard. It is evident that a granulometry of this pozzolanic material in the order of 0.6 to 0.15 mm (30-100 mesh) does not present a significant contribution in the mechanical resistance to the compression, taking away the possibility of a pozzolanic activity in any concentration of natural zeolite. This natural zeolite powder has been selected for a deeper physicochemical and pozzolanic characterization for further investigations.

### Keywords

Pozzolanic cement, Clinoptilolite, Pozzolanic material, Binary cement, Pozzolanic reactivity, Natural zeolite.

## 1. INTRODUCCIÓN

La tendencia de la tecnología de materiales de construcción obedece a la investigación de nuevos elementos, métodos, técnicas y materiales que aporten mayor eficiencia y rendimiento a la construcción y a su vez de prevenir, compensar y mitigar los daños causados al ambiente, esto siguiendo la política ambiental actual, donde establece reducir la cantidad de cemento necesaria en una mezcla de concreto, ya que su producción es ambientalmente desagradable debido al alto consumo de energía y las emisiones de CO<sub>2</sub> atmosférico concomitantes (Gerilla et al., 2007). La atmósfera y el medioambiente en general, en las instalaciones de las industrias del cemento, está sujeta a una dura carga contaminante provocada por la emisión de partículas y agentes contaminantes, debido a las diferentes operaciones y métodos que son implementados (Cabrera and Romero, 2012). La producción de cemento Portland consume una alta cantidad de energía y materiales crudo, esta industria es responsable de las grandes cantidades de CO<sub>2</sub> emitidas cada año, en un valor aproximado del 7% del total causadas por el hombre (Liguori et al., 2015).



Aproximadamente a comienzos del siglo XX, con el objetivo de disminuir la cantidad de cemento Portland, las puzolanas se han estado utilizando para la producción de mezclas de cementos, en los cementos pulzolánicos, donde, el papel del material volcánico es reaccionar con la portlandita ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ), componente formado por la hidratación del Clinker del cemento, para producir silicato de calcio hidratado adicional, mejorando de esta manera la resistencia del mortero endurecido (Taylor, 1997). Las tobas zeolíticas producto de la reacción de la ceniza volcánica depositada en lagos salinos son consideradas como un material natural con características puzolánicas (Rosell et al., 2010). La Asociación internacional del Concreto (Cement and Concrete Terminology and Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, 2002) define a las puzolanas naturales como un material compuesto por sílice y aluminio, los cuales por sí mismos no poseen propiedades aglomerantes, pero con un proceso de obtención de partículas más finas y con adición de agua se puede obtener un material con propiedades mecánicas benéficas para el cemento, el cual ayuda a obtener resistencias a la compresión mayores que las del concreto hidráulico convencional (Costafreda Mustelier et al., 2011). La ceniza volante, el humo de sílice, ceniza de bagazo de caña, ceniza de cascara de arroz, arcilla activada (e.g. metakaolin), entre otros, han sido otros de los componentes adicionales al cemento como material puzolánico que se han descubierto en el transcurso del pasado y presente siglo (Massazza, 2003), sin embargo, estos productos requieren de un tratamiento, en algunos casos de molienda, calcinación y/o procedimiento químico para su activación, elevando el costo del producto cementante.

La zeolita natural como material puzolánico para la sustitución parcial del cemento Portland se ha estudiado en los últimos años, convirtiéndose en un tema de considerable interés para la aplicación tecnológica de ma-

teriales en distintas disciplinas, industrias y en el medioambiente (Liguori et al., 2015). En la industria del cemento la zeolita natural ha sido aceptada como una excelente mezcla cementicia suplementaria. Al mezclar la zeolita con el cemento por la alta cantidad de sílice ( $\text{SiO}_2$ ) y alúmina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) reactiva que se combinan químicamente con el hidróxido de calcio, que es producido por la hidratación del cemento, para formar gel CSH (Silicato de Calcio Hidratado) y aluminatos adicionales (Ahmadi and Shekarchi, 2010), y con la reducción del contenido de poros por el mejoramiento de la zona de transición entre la zeolita mezclada en una pasta de cemento y agregados del concreto endurecido producen mejoras en la estructura del concreto (Feng et al., 1988). En este sentido, este material puzolánico permite mejorar propiedades mecánicas, resistencia a agentes químicos como el ataque de sulfatos, incrementar la durabilidad del material y su aplicabilidad permite reducir costos, lo anterior ha sido comprobado por algunos autores (Janotka and Krajči, 2008; Najimi et al., 2012; Uzal and Turanlı, 2012; Kocak et al., 2013; Valipour et al., 2013).

La pasada edición del atlas de los tipos de estructuras de la zeolita (Baerlocher et al., 2007), expone 176 únicos tipos de zeolita, donde, alrededor de 40 son naturales (Tschernich, 1992) y el resto han sido diseñadas y obtenidas en laboratorios para el uso de distintas industrias. Respecto a la tecnología del concreto en la construcción, los tipos de zeolitas más usados son encontrados en tobas sedimentarias zeolíticas dispersas alrededor del mundo, como lo son clinoptilolita, mordenita, fillipsita y chabazita (Colella et al., 2001). Los diferentes tipos, purezas y estructuras de la zeolita natural influyen en la durabilidad y en el desarrollo de la resistencia mecánica de la matriz de concreto en diferentes maneras y puede en algunos casos conducir a resultados contradictorios en estudios experimentales (Markiv et al., 2016). Sin embargo, las propiedades del concreto

con la adición de diferentes tipos de zeolita localizadas en varias regiones del mundo son parcialmente investigadas, pero en México las investigaciones acerca de las reactividad puzolánicas como las propiedades mecánicas y de durabilidad en una matriz de concreto no han sido suficientemente fuertes y relevantes para lograr el objetivo de ser aplicadas como material puzolánico en la preparación de mezclas cementantes, tales como, pastas, morteros y concretos en general, a pesar de que el territorio de México, en una proporción aproximada del 50%, es formada por secuelas volcánicas del tipo plioceno (Jimenez, 2004), el cual germina en diferentes estados del país presentando 30 depósitos de zeolita natural (Ortiz, 2001). De aquí la importancia de desarrollar investigaciones contundentes, que dejen de una manera precisa y clara la funcionalidad, la rentabilidad y la sustentabilidad de aplicar una sustitución parcial óptima de zeolita natural por cemento Portland en mezclas cementicias.

El objetivo principal del presente trabajo preliminar es comparar, en distintas concentraciones, el carácter puzolánico de una zeolita natural en dos granulometrías, mediante la resistencia a la compresión de mezclas de mortero endurecido. En la metodología experimental, la resistencia a la compresión de morteros con sustitución parcial del 0, 10 y 15% de zeolita natural para cada granulometría es evaluada acorde a la normativa ASTM C-109. De los resultados obtenidos se determinará la necesidad de una caracterización puzolánica más profunda por medio de investigaciones posteriores.

## **2. METODOLOGÍA / MATERIALES Y MÉTODOS**

### **2.1. Materiales**

El material utilizado en este estudio incluye una arena comercial extraída en minas de la región de Querétaro, la arena fue usada como agregado fino para las mezclas de

mortero, se trabajó con un Cemento Portland Compuesto (CPC) 30R comercialmente disponible, con una gravedad específica de 3.14, la composición química se muestra en la tabla 1. Agua potable libre de impurezas fue utilizada para la preparación de las mezclas de mortero. La zeolita natural usada en este proyecto proviene de la Mina San Francisco ubicada en el estado de San Luis Potosí, centro-norte de México. La reactividad puzolánica depende entre otros factores de la granulometría del material puzolánico, de la mina se tomaron dos tipos de granulometrías, la zeolita en un aspecto de polvo, con un tamaño de partícula muy fino (pasa malla No. 200) y una zeolita en un aspecto de arena (30-100), el objetivo de la selección de zeolitas en diferentes granulometrías es evidenciar una reacción puzolánica en base a los resultados obtenidos en la resistencia mecánica a la compresión. Las composiciones químicas de los materiales son mostradas en la tabla 1. Un análisis químico es realizado a la zeolita mediante la técnica de Difracción de Rayos X (DRX), este análisis fue realizado por el Servicio Geológico de México y es reportado por la Mina San Francisco (tabla 2), el difractor de rayos X empleado es de la marca Bruker, modelo D8 Advance Da Vinci.

### **2.2. Métodos y preparación de muestras de cemento**

En este estudio, el cemento fue usado para la preparación de mezclas con zeolita y muestras de referencia. De acuerdo a la literatura, con el objetivo de observar una percolación posible, entre la matriz del mortero y la zeolita, que indique una reactividad puzolánica, se tomaron las siguientes concentraciones de zeolita natural: 0, 5, 10 y 15% con respecto al peso del cemento. Un total de 7 mezclas de mortero diferentes fueron realizadas y llamadas como C, Z5, Z10 y Z15 respectivamente para la zeolita en polvo y ZA5, ZA10 y ZA15 respectivamente para la zeolita en granulometría tipo arena.



Óxidos	Zeolita <sup>±</sup> (%)	CPC 30R (%)
SiO <sub>2</sub>	64.46	12.37
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	12.28	2.26
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.13	8.80
CaO	2.59	62.71
MgO	0.50	0.62
SO <sub>3</sub>	-	4.28
FeO	1.23	-
Na <sub>2</sub> O	0.54	0.06
K <sub>2</sub> O	3.07	1.92
Cl	-	0.04
Sc <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	6.81
MnO	-	0.15

**Tabla 1.** Composición química de la zeolita y el cemento (peso/peso). Nota: análisis semi-cuantitativo. \*fuente: Mina San Francisco.

De acuerdo al análisis químico mostrado, el principal componente mineralógico de la zeolita es identificado como clinoptilolita rica en potasio y sodio, además, la toba zeolítica también contiene, en menor cantidad, impurezas como lo es el cuarzo. La alta cantidad de fase cristalina activa, i.e. clinoptilolita, confirma una actividad puzolánica para esta zeolita natural. De acuerdo a las especificaciones de la ASTM C-618 el contenido mínimo en la sumatoria de SiO<sub>2</sub> mas Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> mas Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> debe ser 70% para lograr catalogarse como material puzolánico. Conforme

Proporción (%)	Mineral	Composición química
Mas de 25	Clinoptilolita	(Na,K) <sub>6</sub> (Si,Al) <sub>36</sub> O <sub>22</sub> ·2H <sub>2</sub> O
	Heulandita	CaAl <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>18</sub> ·6H <sub>2</sub> O
De 10 a 25	Estilbita	(Ca,Na) <sub>13</sub> (Si,Al) <sub>9</sub> O <sub>18</sub> ·8H <sub>2</sub> O
	Albita	NaAlSi <sub>3</sub> O <sub>8</sub>
De 1 a 10	Anorthoclasa	(Na <sub>0.7</sub> K <sub>0.3</sub> )(Al <sub>1.02</sub> Si <sub>2.98</sub> O <sub>8</sub> )
	Montmorillonita sódica	Na <sub>0.3</sub> (Al,Mg) <sub>2</sub> Si <sub>4</sub> O <sub>10</sub> OH <sub>2</sub> ·xH <sub>2</sub> O
	Cuarzo	SiO <sub>2</sub>
De 0.1 a 1	Magnetita	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>
	Biotita	K(Fe,Mg) <sub>3</sub> AlSi <sub>3</sub> O <sub>10</sub> (OH,F) <sub>2</sub>

\*fuente: Mina San Francisco.

**Tabla 2.** Composición mineralógica de la zeolita

a la tabla 1 la zeolita contiene una suma de 77.87%, por lo tanto, este material en este estudio muestra químicamente ser una puzolana adecuada para reaccionar con el cemento. Al introducir clinoptilolita, que contiene grandes cantidades de SiO<sub>2</sub> y Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, en una mezcla de cemento se produce una reacción puzolánica que permite modificaciones de la composición de fases de productos de hidratación de cemento con la formación de una cantidad extra de hidrosilicatos de calcio (CSH y CSAH), mejorando la estructura de poros de la mezcla de cemento y en consecuencia las propiedades mecánicas y de durabilidad (Markiv et al., 2016; Janotka and Krajči, 2008). Por lo tanto, La resistencia a la compresión es un parámetro capas de valorar de forma indirecta una actividad puzolánica, debido al observar cambios en las propiedades mecánicas del material.

### 2.2.1. Resistencia a la compresión

Una muestra de CPC fue realizada como referencia (C). las siguientes cantidades son las proporciones utilizadas para un lote de seis especímenes de mezcla de mortero, utilizada en la prueba de resistencia a la compresión, 500 g de CPC, 1325 g de agregado fino y una relación de agua-cemento de 0.5. El mezclado es realizado con una máquina revolvedora conforme a la ASTM C-305. Las



mezclas con zeolita natural guardan las mismas proporciones anteriormente mencionadas más una dosis de agua adicional para mantener una fluidez similar a la mezcla de control, la cantidad de agua fue controlada mediante el ensayo de la mesa de fluidez.

Las proporciones de las mezclas de mortero son presentadas en la tabla 3. Los morteros fueron preparados en moldes cúbicos de 50x50x50 mm conforme a la ASTM C-109. Los especímenes fueron guardados por 24 h. Al final de esta duración, los especímenes fueron desmoldados y curados acordes a la norma ASTM C-192. Los especímenes fueron ensayados a compresión acorde a la ASTM C-109 a una edad de curado de 28 días.

Los resultados de las muestras binarias serán comparados como un porcentaje de la resistencia de la muestra de control según la Ec. (1).

$$\left(\frac{A}{B}\right) \times 100 \quad (1)$$

Donde:

A = promedio de la resistencia a la compresión de las mezclas puzolánicas, MPa, y

B = promedio de la resistencia a la compresión de la muestra de control, MPa.

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 3.1. Resistencia a la compresión

La resistencia en morteros es una importante propiedad que determina su calidad como material apto para la construcción. La resistencia a la compresión de las distintas muestras de mortero binario son mostradas en la Figura 1, junto con los resultados de la muestra control. En el eje de las ordenadas se encuentran los valores máximos de resistencia a la ruptura en MPa, y en la abscisa x se encuentran las distintas muestras ensayadas a 28 días de edad de curado.

De los resultados obtenidos se destacan tres puntos importantes: en primer lugar, la resistencia a la compresión de la muestra de control a los 28 días de edad es mayor a

Identificación de mezclas	Zeolita* (g)	Cemento (g)
Control	0	500
Z5	25	475
Z10	50	450
Z15	75	425

**Tabla 3.** Proporción de mezclas.

\*Especificaciones iguales para las dos granulometrías. Nota: las siguientes especificaciones son válidas para todas las mezclas: a/c = 0.5, arena= 1325 g. fuente: datos propios.



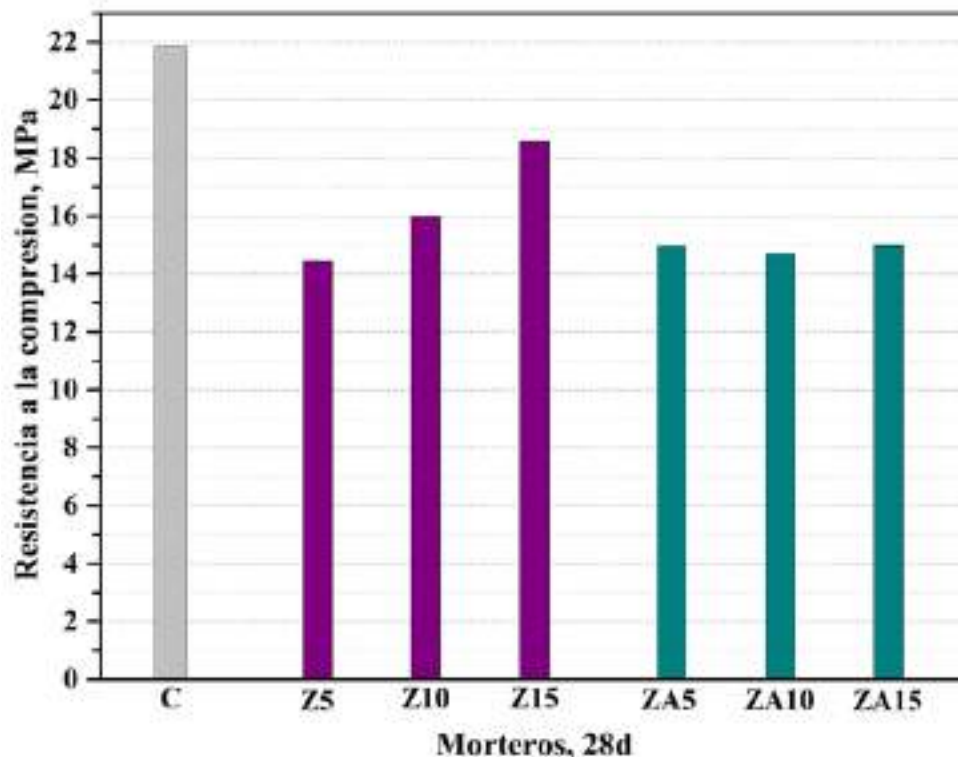
los valores obtenidos por cualquier sustitución parcial ensayada. En segundo punto, se observa que la resistencia a la compresión, sobre las muestras Z5, Z10 y Z15, tiene un incremento debido a la sustitución parcial de cemento por zeolita natural. En la Figura 1 se evidencia un comportamiento de relación proporcional, al aumentar la concentración de zeolita natural un incremento en la resistencia mecánica es observado, logrando un posible umbral de percolación en un 15% de sustitución aproximadamente e incitando una reacción puzolánica. Como tercer punto, una sustitución de zeolita natural granular con tamaño de partículas del orden de 0.6 a 0.15 mm (malla 30-100) no presentó un cambio significativo en la resistencia, con una sustitución del 5% se obtuvo un valor similar en la resistencia con concentraciones del 10 y 15%, este comportamiento se debe posiblemente a que la partícula de zeolita está trabajando como un agregado fino y no como material puzolánico en su totalidad.

Conforme con la norma ASTM C-311 un ma-

terial puzolánico natural en una sustitución del 20% debe alcanzar como valor mínimo el 75% de la resistencia de una muestra de control a los 7 o 28 días de edad. Acorde a lo anterior la muestra de control alcanzó una resistencia de 21.86 Mpa en promedio, valor máximo entre todos los especímenes.

La zeolita de granulometría polvo para un porcentaje de 15% logró desarrollar un 85% (calculado con Ec. (1)) de la resistencia mecánica de la muestra de referencia ensayada a los 28 días. El resultado alcanzado no asegura que una sustitución del 20% se encuentre por arriba del mínimo valor de resistencia establecido por la normativa internacional, sin embargo, una actividad puzolánica es producida por el incremento de zeolita pasando de 66% para Z5 hasta 85% para Z15. Se estima un incremento de esta propiedad al alcanzar una concentración del 20%.

Distintos investigadores reportan que una sustitución de zeolita entre el 10 y 20% contribuye a la mejora de las propiedades mecánicas superando a la muestra de referencia



**Figura 1.** Resistencia a la compresión de morteros binarios a base de zeolita natural y mortero de cemento convencional.

(Najimi et al., 2012), dependiendo de la reactividad puzolánica de la zeolita natural y su contenido de sílice y alúmina reactiva (entre 65% y 80%).

La teoría de percolación señala un cambio en las propiedades a partir del 17.5% (umbral de percolación) para materiales de forma esférica (Yin, 2000), por lo tanto, acorde a los resultados obtenidos será necesario en posteriores estudios analizar el comportamiento de esta propiedad mecánica con un número mayor concentraciones iniciando en 10 o 15% de zeolita natural en polvo, además evaluar el comportamiento a distintas edades de curado. En este sentido, una caracterización sobre las propiedades de durabilidad del material es requerida una vez se determinen las óptimas concentraciones de zeolita natural en términos mecánicos.

Para sustituciones mayores al 20% la trabajabilidad de la mezcla disminuye, la cantidad de agua mínima para alcanzar a reaccionar el cemento es afectada con el aumento de la zeolita, el requerimiento de agua para mantener una fluidez similar a una muestra convencional aumenta conforme crece el porcentaje de zeolita sustituido (Uzal and Turanli, 2012; Janotka and Krajci, 2008).

La finura o área superficial de la zeolita es un factor que incide en la demanda de agua afectando las propiedades anteriormente mencionadas, la zeolita en su estructura porosa con micro cavidades definidas y tiene una finura mayor que el cemento, consecuentemente, el uso de aditivo fluidificante podría ser un elemento indispensable para sustituciones mayores al 20% favoreciendo la reducción de agua sin alterar las propiedades mecánicas.

#### 4. CONCLUSION

La resistencia promedio a la compresión de la muestra control fue superior a los resultados obtenidos por la sustitución parcial de CPC por zeolita natural en las granulometrías

y concentraciones estudiadas.

Sin embargo, se logra destacar que la sustitución parcial de un 5, 10 y 15% de zeolita natural (polvo), en una mezcla de mortero de cemento Portland compuesto, aumenta el desempeño mecánico de un valor de 66% hasta un 85% respectivamente, demostrando con este resultado una reacción puzolánica.

De acuerdo al incremento de la resistencia la zeolita natural de granulometría polvo, tipo clinoptilolita, presenta una reactividad puzolánica evaluada de forma indirecta mediante la determinación del desempeño mecánico.

Por otra parte, no existe una reacción puzolánica significativa para un tamaño de partícula granular entre 0.6 y 0.15 mm de zeolita natural, debido a que este material se encuentra dentro de la matriz cementante como agregado fino sin lograr un consumo significativo de portlandita.

La relación agua-cemento incrementa con el aumento de la cantidad de zeolita natural (polvo), sin embargo, se evidencia el aumento de la resistencia mecánica en las concentraciones del 5 al 15%. La trabajabilidad de la mezcla de mortero disminuye con el incremento de zeolita natural (polvo), aumentando así, la relación agua-cementante, en concentraciones mayores el uso de un fluidificante sería una alternativa para mantener una relación de agua-cemento constante y analizar el comportamiento puzolánico sin una posible afectación en la resistencia mecánica.

El consumo de cemento Portland compuesto se logra disminuir en un 15% con la sustitución de zeolita natural en granulometría polvo, logrando resistencias a la compresión aceptables para la normativa internacional ASTM.

En otro sentido, en distintos lugares de Mé-



xico el acceso a las materias primas es muy fácil, el transporte de materiales a los sitios de construcción no es un factor que influye en el alzado del presupuesto de la obra, mientras que el cemento comercial es uno de los insumos más costosos en este país, por lo que las puzolanas naturales extraídas de las minas como materia prima para mezclas de cemento suelen ser económicas y abundantes, por lo tanto, es esencial tomar recursos cercanos. La zeolita natural y puzolana en general enfocada en materiales para la construcción está aumentando, debido a la demanda de edificios modernos y el comercio en general, una aplicación a esta puzolana es la realización de mezclas de cemento como estuco naturales o morteros en cualquier tipo de vivienda.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por su apoyo en el transcurso de esta investigación. Los autores están agradecidos con la Mina San Francisco por el apoyo con el material y estudios químicos otorgados.

## REFERENCIAS

Ahmadi, B., and M. Shekarchi. 2010. Use of natural zeolite as a supplementary cementitious material. *Cem. Concr. Compos.* 32:134–141.

Baerlocher, C., L. B. McCusker, and D. H. Olson. 2007. *Atlas of Zeolite framework types*. Sixth. Elsevier Ltd, Amsterdam, The Netherlands.

Cabrera, H. R., and J. L. Romero. 2012. Mejoras en los impactos ambientales. *Univ. y Soc.* 4:1–8.

Cement and Concrete Terminology,

C., and I. Instituto mexicano del Cemento y del Concreto. 2002. *Terminología del cemento y del concreto: ACI 116R-00*. Instituto mexicano del Cemento y del Concreto. Available from: [https://books.google.com.mx/books?id=E1K\\_YgEACAAJ](https://books.google.com.mx/books?id=E1K_YgEACAAJ)

Colella, C., M. De Gennaro, and R. Aiello. 2001. Use of Zeolitic Tuff in the Building Industry. *Rev. Mineral. Geochemistry.* 16:551–586. doi:10.2138/rmg.2001.45.16.

Costafreda Mustelier, J. L., B. Calvo Pérez, and J. L. y Alfaro. 2011. Contribución de la zeolita natural a las resistencias mecánicas de cementos, morteros y hormigones.

Feng, N., Y. Li-hong, and Z. Hsiaming. 1988. the strength effect of mineral admixture on cement concrete. *Cem. Concr. Res.* 18:464–472.

Gerilla, G. P., K. Teknomo, and K. Hokao. 2007. An environmental assessment of wood and steel reinforced concrete housing construction. *Build. Environ.* 42:2778–2784.

Janotka, I., and L. Krajčí. 2008. Sulphate resistance and passivation ability of the mortar made from pozzolan cement with zeolite. *J. Therm. Anal. Calorim.* 94:7–14. doi:10.1007/s10973-008-9180-2.

Jimenez, M. 2004. *caracterización de minerales zeolíticos mexicanos*. universidad autónoma del estado de México.

Kocak, Y., E. Tasci, and U. Kaya. 2013. The effect of using natural zeolite on the properties and hydration characteristics of blended cements. *Constr. Build. Mater.* 47:720–727.

Liguori, B., F. Iucolano, B. De Gennaro, M. Marroccoli, and D. Caputo. 2015. Zeolitized tuff in environmental friendly production of cementitious material: Chemical and mechanical characterization. *Constr. Build. Mater.* 99:272–278.

Markiv, T., K. Sobol, M. Franus, and W. Franus. 2016. Mechanical and durability properties of concretes incorporating natural zeolite. *Arch. Civ. Mech. Eng.*

Massazza, F. 2003. Pozzolana and Pozzolanic Cements. *Lea's Chem. Cem. Concr.* 15:471–635.

Najimi, M., J. Sobhani, B. Ahmadi, and M. Shekarchi. 2012. An experimental study on durability properties of concrete containing zeolite as a highly reactive natural pozzolan. *Constr. Build. Mater.* 35:1023–1033.

Ortiz, L. E. 2001. Criterios y especificaciones concernientes a la exploración y valoración de minerales en la República Mexicana.

Rosell, M., R. Galloso, and B. Calvo. 2010. Zeolita como aditivo mineral activo en hormigones de altas prestaciones. *Boletín Geológico y Min.* 117:783–792.

Taylor, H. F. W. 1997. *Cement Chemistry*. Thomas Telford. Available from: <https://books.google.com.mx/books?id=1BOETtwi7mMC>

Tschernich, R. W. 1992. *Zeolites of the World*. Harbinger House.

Uzal, B., and L. Turanli. 2012. Blended cements containing high volume of natural zeolites: Properties, hydration and paste microstructure. *Cem. Concr. Compos.* 34:101–109.

Valipour, M., F. Pargar, M. Shekarchi, and S. Khani. 2013. Comparing a natural pozzolan, zeolite, to metakaolin and silica fume in terms of their effect on the durability characteristics of concrete: A laboratory study. *Constr. Build. Mater.* 41:879–888.

Yin W., and Tao R. 2000. Algorithm for finding two-dimensional site percolation backbones. *Elsevier Science, Physica B* 279: 84-86.



# **SIMULACIÓN DE SISTEMA DE REFRIGERACIÓN SOLAR POR ABSORCIÓN DE SIMPLE EFECTO USANDO BROMURO DE LITIO-AGUA**

---

Simulation of single-stage solar absorption refrigeration system using water-lithium bromide

Juan Manuel García Guendulain<sup>1\*</sup>, América Eileen Mendoza Rojas<sup>2</sup>,  
José Manuel Riesco Ávila<sup>1</sup>

<sup>1</sup>División de Ingenierías Campus Irapuato-Salamanca,  
Universidad de Guanajuato, Carretera Salamanca-Valle de Santiago km  
3.5+1.8 Comunidad de Palo Blanco, Salamanca, 36885 Guanajuato, México

<sup>2</sup>División de Investigación y Posgrado, Facultad de Ingeniería,  
Universidad Autónoma de Querétaro, Cerro de las campanas S/N, Santiago  
de Querétaro, Querétaro, 76010, México.

\*Autor de correspondencia  
jm.garciaguendulain@ugto.mx

## RESUMEN

En el presente trabajo se ha desarrollado un análisis y simulación de un sistema de refrigeración por absorción operado con mezcla de bromuro de litio-agua (LiBr-H<sub>2</sub>O), y a través de una fuente de energía solar. Una verificación del modelo desarrollado en el software computacional EES (Engineering Equation Solver) para la estimación de las propiedades de la mezcla ha sido realizada. Los resultados muestran que se puede aprovechar el uso de la energía solar en la ciudad de Guanajuato, Gto., México, en un sistema de refrigeración por absorción. Se presenta una gráfica donde muestra la zona en la que el proceso de cristalización de la mezcla se lleva a cabo, con la finalidad de obtener un rendimiento aceptable sin la necesidad de estar en dicha zona. Se ha obtenido un coeficiente de rendimiento de 0.8 aproximadamente y un coeficiente de rendimiento solar de 0.4, lo cual coincide con los valores obtenidos en la literatura.

### Palabras Clave:

Bromuro de litio-agua, Colector solar, Cristalización, Energía solar, Refrigeración por absorción, Simulación.

## ABSTRACT

In this work an analysis and simulation of absorption refrigeration system operating with water-lithium bromide as working fluid using solar energy, has been realized. A verification of the developed model was made in a computational software, EES (Engineering Equation Solve), to determine properties of working fluid. Results show it is possible to take advantage of solar energy of Guanajuato city in Mexico for an absorption refrigeration system. A property chart of the brine is shown with the aim to obtain an acceptable performance avoiding the crystallization zone. The coefficient of performance of 0.8 and a solar coefficient of performance of 0.4

were obtained, these values are agree with literature review.

### Keywords:

Water-lithium bromide, Solar collector, Crystallization, Solar energy, Absorption refrigeration, Simulation.

## 1. INTRODUCCIÓN

Los sistemas de refrigeración por absorción ofrecen una alternativa más favorable para el medio ambiente como sustitutos de los tradicionales sistemas de compresión de vapor debido a que emplean refrigerantes naturales, lo que provoca la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero tales como el CO<sub>2</sub> (Riffat *et al.*, 1997; Dincer *l.*, 2003; S.B. Riffat *et al.*, 1998).

Un sistema de refrigeración por absorción difiere en dos aspectos principalmente a los sistemas de compresión de vapor convencionales (Moran M. J. *et al.*, 2011). El primero, en lugar del uso de un sistema de compresión de vapor de refrigerante entre el condensador y el evaporador, el refrigerante es absorbido por una sustancia secundaria (absorbente) para formar una solución líquida que posteriormente pasa a través de un sistema de bombeo para elevar la presión hasta la presión de condensación del refrigerante. En segundo aspecto, requiere de una fuente de alta temperatura para llevar a cabo la separación del refrigerante del absorbente, comúnmente se usa gas natural pero actualmente fuentes alternativas, como energía solar, son usadas para este propósito. Diversas sustancias han sido utilizadas como absorbentes. En los sistemas de refrigeración por absorción se pueden encontrar dos principales mezclas de fluidos de trabajo: amoníaco-agua (NH<sub>3</sub>-H<sub>2</sub>O) y bromuro de litio-agua (LiBr-H<sub>2</sub>O), (Karamangil *et al.*, 2010). Soluciones de NH<sub>3</sub>-H<sub>2</sub>O son usadas en aplicaciones donde se requieren bajas temperaturas de enfriamiento. Mientas que, LiBr-H<sub>2</sub>O son utilizados en aplicaciones que requieren



temperaturas moderadas (aplicaciones de aire acondicionado). Este trabajo se enfoca al análisis de este segundo fluido de trabajo debido a su aplicación residencial.

Xu and Wang demostraron que un sistema de refrigeración solar por absorción es una buena solución para evitar el uso de torres de enfriamiento en sistemas tipo chiller, sin embargo, existe un riesgo de producir problemas de cristalización. Assilzadeh et al., 2005, han desarrollado estudios de sistemas de enfriamiento solar de simple efecto de LiBr-H<sub>2</sub>O, operado mediante colectores solares de tubos de vacío desarrollado en TRNSYS, donde la capacidad de enfriamiento óptima de 3.5 kW necesita 35 m<sup>2</sup> de área de colectores solares, con un tiempo de trabajo de 5 h por día. Syed et al., 2005, analizaron un sistema LiBr-H<sub>2</sub>O de simple efecto en Madrid, donde el coeficiente de desempeño (COP) máximo instantáneo y el COP promedio obtenido en un día fue de 0.6 y 0.42, respectivamente. Lizarte et al., 2012, analizaron un sistema de colectores solares de placa plana de tubos de vacío para 4.5 kW en Madrid obteniendo un COP promedio y COP solar de 0.53 y 0.06, respectivamente. Mazloumi et al., 2008, analizaron un colector parabólico de 14.5 kW por medio de simulación., el chiller trabajó 12 h por día con un COP de 0.67 a 0.76. Por otro lado, Xu and Wang, 2017, obtuvieron un COP de 0.88 para el chiller y un COP solar de 0.35 para una capacidad de enfriamiento de aproximadamente 50 kW. Por otro lado, Chen et al., 2017 han demostrado experimentalmente que existe una influencia significativa de la temperatura ambiente en el rendimiento del sistema de enfriamiento tipo chiller y la capacidad de enfriamiento, variando en este caso de 8.93 a 5.78 cuando la temperatura se incrementa de 28°C a 35°C, mientras el COP varía de 0.68 a 0.6, respectivamente.

Diversas simulaciones han sido realizadas para el análisis de sistemas de refrigeración por absorción para ambos fluidos de traba-

jo (NH<sub>3</sub>-H<sub>2</sub>O y LiBr-H<sub>2</sub>O) (Karamangil et al., 2010), (Mostafavi and Agnew, 1996; Bulgan, 1997; Horuz, 1998; Manu and Chandrashekar, 2016; Wageiallah Mohammed and Yanling, 2017), las cuales se basan en relaciones termodinámicas para cada componente, sin embargo, la mayoría de estos modelos no consideran la zona de cristalización como una limitante para el funcionamiento de un sistema de absorción de mezcla LiBr-H<sub>2</sub>O.

En este estudio se pretende analizar el potencial de uso de energía solar para la activación de un sistema de refrigeración por absorción LiBr-H<sub>2</sub>O en la ciudad de Guanajuato, Gto, México, el coeficiente de desempeño del sistema de absorción y el coeficiente de desempeño solar compuesto por colectores solares como fuente de generación, considerando las propiedades límite para evitar la cristalización de la mezcla. El modelo desarrollado en este trabajo y su comparación con otro modelo de la literatura ha sido llevado a cabo y los resultados y las ecuaciones utilizadas se muestran en las siguientes secciones.

## 2. METODOLOGÍA

Un modelo termodinámico para el sistema de refrigeración por absorción de simple etapa mostrado en la Figura. 1 ha sido desarrollado basado en el modelo propuesto por Karamangil et al., 2010, bajo las siguientes consideraciones:

- Flujo permanente en estado estable.
- La caída de presión es considerada únicamente en válvulas de expansión y la bomba.
- La temperatura de condensación (T<sub>c</sub>) y evaporación (T<sub>e</sub>) corresponden a las temperaturas T<sub>3</sub> y T<sub>5</sub> de la Figura 1.
- La temperatura de absorción (T<sub>a</sub>) corresponde a la temperatura T<sub>8</sub> de la Figura 1.
- La temperatura de generación (T<sub>g</sub>) corresponde a las temperaturas T<sub>1</sub> y T<sub>12</sub> de la Figura 1.



- Condiciones de saturación están presentes a la salida del condensador y evaporador (puntos 3 y 6, respectivamente).
- No existe transferencia de calor en intercambiadores de calor, válvulas de expansión y la bomba.

Soluciones de bromuro de litio-agua (LiBr-H<sub>2</sub>O) y amoníaco-agua (NH<sub>3</sub>-H<sub>2</sub>O) han sido simuladas para su comparación con datos obtenidos en la literatura. En la primera solución el agua actúa como medio refrigerante, mientras que el LiBr es el fluido de absorción, para el caso de la segunda solución, el amoníaco actúa como refrigerante. Para cada una de estas mezclas se ha realizado un balance de masa en el generador basado en la concentración de LiBr o NH<sub>3</sub> presente en el agua, como se muestra a continuación.

A partir de estas ecuaciones se puede obtener una expresión en función de las concentraciones y el fluido refrigerante:

$$\begin{aligned} \dot{m}_{11} &= \dot{m}_1 + \dot{m}_{12} && \text{(Masa total)} && (1) \\ X_{11}\dot{m}_{11} &= X_{12}\dot{m}_{12} && \text{(Balance LiBr)} \\ X_{11}\dot{m}_{11} &= \dot{m}_1 + X_{12}\dot{m}_{12} && \text{(Balance NH}_3\text{)} \end{aligned}$$

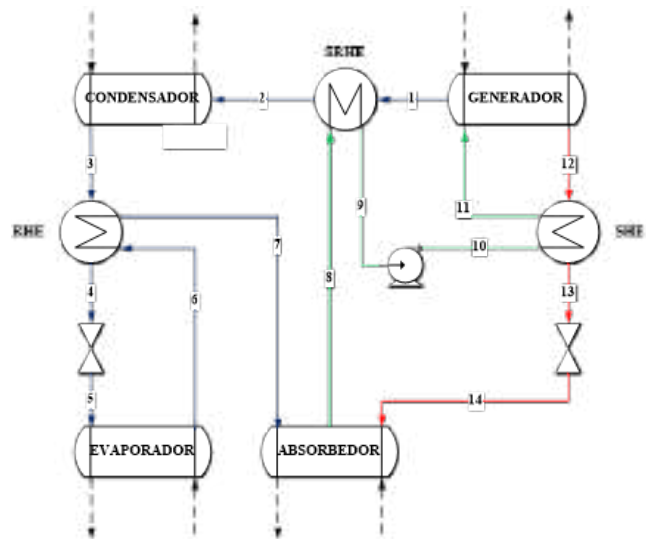
$$\begin{aligned} \dot{m}_{12} &= \frac{X_{11}}{X_{12} - X_{11}} \dot{m}_1 && \text{(para: LiBr - H}_2\text{O)} && (2) \\ \dot{m}_{11} &= \frac{X_{12}}{X_{12} - X_{11}} \dot{m}_1 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \dot{m}_{11} &= \frac{1 - X_{12}}{X_{12} - X_{11}} \dot{m}_1 && \text{(para: NH}_3\text{ - H}_2\text{O)} && (3) \\ \dot{m}_{12} &= \frac{1 - X_{12}}{X_{11} - X_{12}} \dot{m}_1 \end{aligned}$$

Un parámetro FR puede ser definido como la relación entre el flujo másico de la bomba con respecto al flujo másico del fluido de trabajo.

$$FR = \frac{X_{12}}{X_{12} - X_{11}} \quad \text{(para: LiBr - H}_2\text{O)} \quad (4)$$

$$FR = \frac{1 - X_{12}}{X_{12} - X_{11}} \quad \text{(para: NH}_3\text{ - H}_2\text{O)} \quad (5)$$



**Figura 1.** Sistema de refrigeración por absorción de simple etapa con intercambiadores de calor intermedios.

Las ecuaciones (6-9) muestran el balance de masa realizado en los componentes evaporador, condensador, generador y absorbedor respectivamente (Incropera and DeWitt, 1996; Karamangil et al., 2010; Moran M. J. et al., 2011).

Las ecuaciones (10-12) presentan el balance de energía realizado al intercambiador de calor de la solución (solution heat exchanger SHE) (Incropera and DeWitt, 1996; Karamangil et al., 2010; Moran M. J. et al., 2011).

$$Q_e = h_6 - h_5 \quad (6)$$

$$Q_c = h_2 - h_3 \quad (7)$$

$$Q_g = h_1 + (FR - 1)h_{11} - FRh_{12} \quad (8)$$

$$Q_a = FRh_8 - (FR - 1)h_{14} - h_7 \quad (9)$$

$$T_{13} = \epsilon_{SHE}T_{10} + (1 - \epsilon_{SHE})T_{12} \quad (10)$$

$$h_{11} = h_{10} + (h_{12} - h_{13})\frac{FR-1}{FR}Q \quad (11)$$

$$Q_{SHE} = (h_{12} - h_{13})(FR - 1) = (h_{11} - h_{10})FR \quad (12)$$

El balance de energía en el intercambiador de calor del refrigerante (refrigerant heat exchanger, RHE) es presentado a través de las ecuaciones (10-12) (Incropera and DeWitt, 1996; Karamangil et al., 2010; Moran M. J. et al., 2011).



$$h_7 = h_6 + \varepsilon_{RHE}(h_{7(T3)} - h_6) \quad (13)$$

$$h_4 = h_3 - \varepsilon_{RHE}(h_{7(T3)} - h_6) \quad (14)$$

$$Q_{RHE} = h_3 - h_4 = h_7 - h_6 \quad (15)$$

Un balance de energía realizado al intercambiador de calor de la mezcla solución-refrigerante (solution-refrigerant heat exchanger, SRHE) (Incropera and DeWitt, 1996; Karamangil et al., 2010; Moran M. J. et al., 2011), puede ser determinado por:

$$h_2 = h_1 - \varepsilon_{SRHE}(h_1 - h_{2(T8)}) \quad (16)$$

$$h_9 = h_8 + \frac{\varepsilon_{SRHE}}{FR}(h_1 - h_{2(T8)}) \quad (17)$$

$$Q_{SRHE} = h_1 - h_2 = (h_9 - h_8)FR \quad (18)$$

donde  $h_7(T3)$  y  $h_2(T8)$  son las entalpías del refrigerante evaluada a la temperatura del condensador y a la temperatura del absorbedor, respectivamente.

La potencia de la bomba puede ser determinada mediante la ecuación (19), a su vez la ecuación (20) muestra la definición de eficiencia isentrópica. Combinando las ecuaciones (19) y (20) se puede determinar la entalpía en el estado 10 con la ecuación (21).

$$W_P = FR(P_C - P_E) \frac{v}{\eta_P} \quad (19)$$

$$\eta_P = \frac{h_{10,s} - h_9}{h_{10,a} - h_9} \quad (20)$$

$$h_{10,a} = h_9 + (P_C - P_E) \frac{v}{\eta_P} \quad (21)$$

La ecuación (22) representa el coeficiente de desempeño (COP) del sistema.

$$COP = \frac{Q_E}{Q_G + W_P} \quad (22)$$

Para determinar el coeficiente de desempeño solar (COP solar) se puede utilizar la ecuación (23),

$$COP_{solar} = \frac{Q_E}{\int IA dt} \quad (23)$$

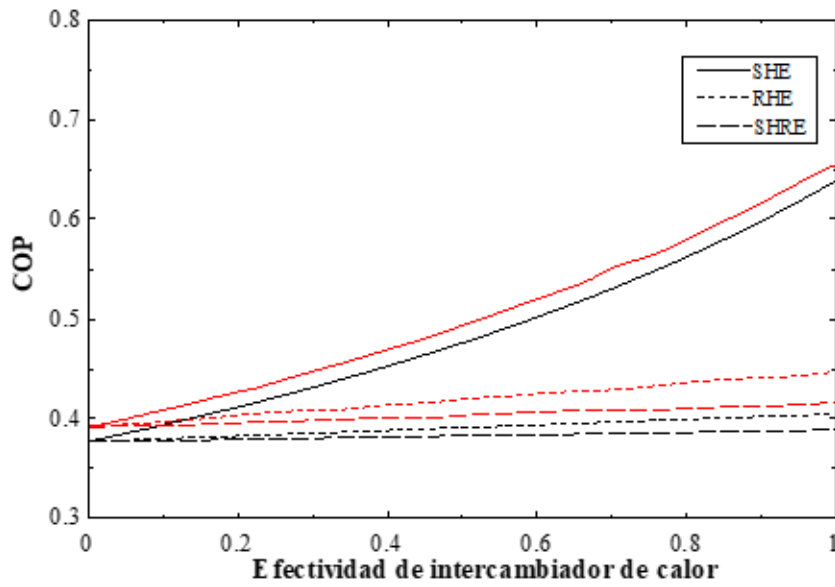
donde  $I$  representa la radiación solar y  $A$  es el área total correspondiente a los colectores solares. A continuación, se presenta la verificación del modelo y los resultados obtenidos a través del mismo.

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

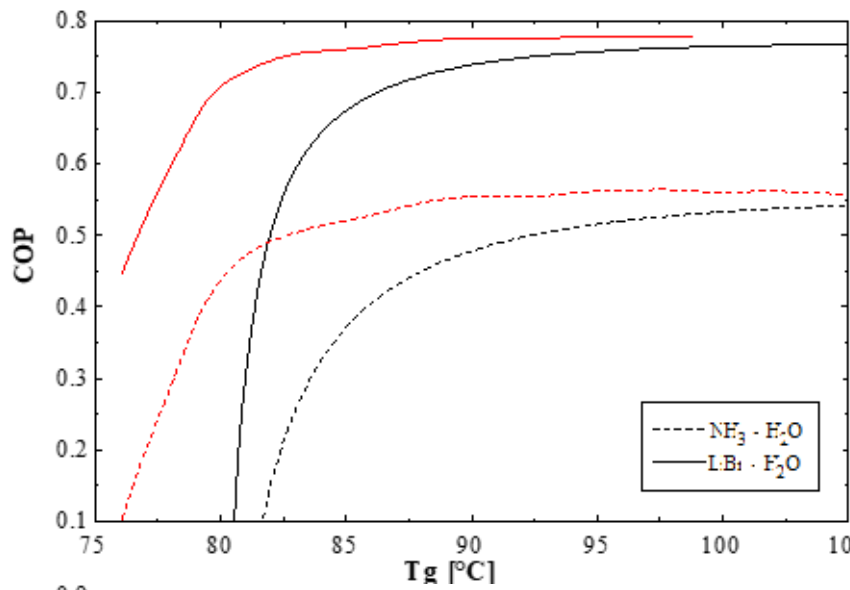
#### 3.1 Verificación del modelo

El presente modelo ha sido resuelto a través del software Engineering Equation Solver (EES) y los valores obtenidos han sido comparados con los resultados presentados por Karamangil et al., 2010, empleando las mismas condiciones de este trabajo, algunos parámetros de entrada son requeridos para poder resolver el sistema de ecuaciones obtenido de las expresiones anteriores, los cuales constan de: temperaturas de evaporador, condensador, absorbedor y generador; así como las efectividades de los intercambiadores de calor y la eficiencia de la bomba. Para este efecto tres casos de estudios fueron analizados, los cuales constan de: análisis del efecto de los intercambiadores de calor en el COP, análisis del sistema en el COP y el parámetro FR para diferentes temperaturas del evaporador y del generador para ambas soluciones, LiBr-H<sub>2</sub>O y NH<sub>3</sub>-H<sub>2</sub>O.

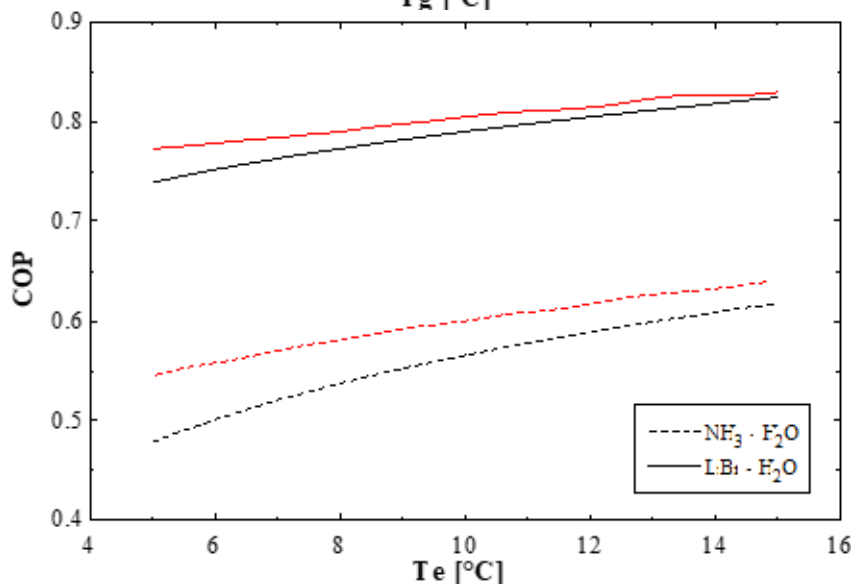
Las Figuras 2-4 muestran la comparación de los resultados obtenidos con el modelo desarrollado en EES y los obtenidos por Karamangil et al., 2010. El mismo comportamiento cualitativo es obtenido para los tres casos de estudio, sin embargo, diferencias cuantitativas han sido encontradas al examinar dichas figuras, las cuales pueden ser atribuidas al hecho de que la base de datos utilizada en ambos modelos para el cálculo de las propiedades de las mezclas utilizadas es distinta.



**Figura 2.** Comparación del desempeño del ciclo de absorción para diferentes valores de efectividad de los intercambiadores de calor. Presente modelo (líneas negras), modelo de Karamangil et al., (2010) (líneas rojas).



**Figura 3.** Comparación del desempeño del ciclo de absorción para diferentes valores de temperatura del generador. Presente modelo (líneas negras), modelo de Karamangil et al., (2010) (líneas rojas).



**Figura 4.** Comparación del desempeño del ciclo de absorción para diferentes valores de temperatura del evaporador. Presente modelo (líneas negras), modelo de Karamangil et al., (2010) (líneas rojas).



Las Figuras 2 y 4 muestran que no existe una diferencia considerable en ambos modelos en cuanto al coeficiente de rendimiento para una variación en temperatura de evaporación o las efectividades de los intercambiadores. Sin embargo, la Figura 3 muestra que ambos modelos presentan diferencias cuantitativas significativas para bajas temperaturas del generador, esto puede deberse a que el software EES cuenta con una base de datos para las propiedades de la mezcla LiBr-H<sub>2</sub>O más actualizada comparada con la utilizada por Karamangil et al., 2010.

El problema de cristalización de la mezcla LiBr-H<sub>2</sub>O limitan la aplicación práctica de este tipo de sistemas, debido a que provoca la formación de fango (slush) en la tubería, al cual se solidifica formando incrustaciones dentro de la misma limitando el paso del fluido. La línea de cristalización para bromuro de litio agua se encuentra muy cerca de las concentraciones requeridas para propósitos prácticos (Liao and Radermacher, 2007), como es muestra en la Figura 5.

En este trabajo se ha procurado que las propiedades de la solución LiBr-H<sub>2</sub>O se encuentren alejadas de la curva de cristalización, para el caso de estudio mostrado en la siguiente sección.

### 3.2 Desempeño del sistema de refrigeración solar.

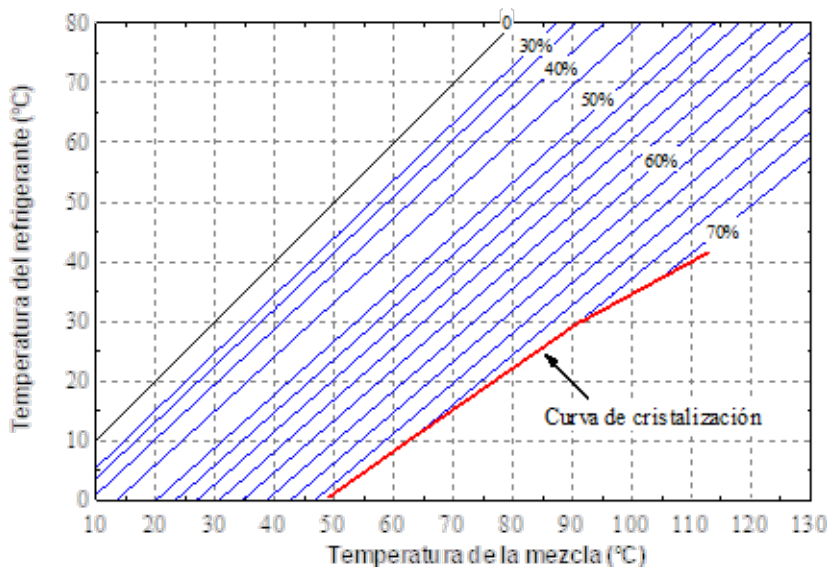
En este trabajo se ha analizado la influencia de la energía solar en un sistema de colectores solares, bajo las condiciones de operación obtenidas de la literatura Xu and Wang, (2017). Este sistema comprende de un área total 200 m<sup>2</sup> y un flujo volumétrico de agua de 20 L/min. Para llevar a cabo las simulaciones se requiere del conocimiento de la radiación solar y la temperatura ambiente; en este trabajo se ha utilizado la información proporcionada para el mes de abril por (Pición-Núñez et al., 2014). La Figura 6 muestra la información solar obtenida.

Con esta información se puede obtener la potencia térmica debida a la radiación, así como la potencia absorbida por el colector solar, considerando que dicho colector trabajó bajo una eficiencia térmica del 60%. La Figura 7 muestra la potencia útil del colector solar y que posteriormente es suministrada al sistema de refrigeración por absorción.

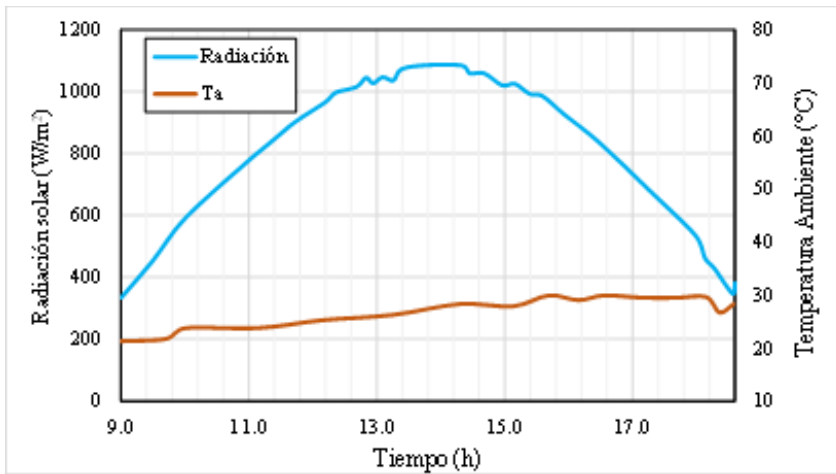
Con esta energía solar absorbida por el colector se obtiene una capacidad de enfriamiento mostrada en la Figura 8 para tres diferentes temperaturas de enfriamiento de 14, 10 y 4°C. Donde una mayor capacidad de enfriamiento es obtenida para una mayor temperatura de enfriamiento esto debido a que se requiere una gran cantidad de energía en el evaporador para llevar a cabo el cambio de fase de la mezcla de líquido-vapor a vapor sobrecalentado. Esto provoca también un incremento en el coeficiente de desempeño (COP) y por ende un mayor coeficiente de desempeño solar (COP solar), como se puede ver en la Figura 9 y 10, respectivamente.

La Figura 8 muestra que la capacidad de enfriamiento depende fuertemente de la radiación solar y no de la variación de la temperatura ambiente, esto debido a que el sistema de enfriamiento es de mayores dimensiones comparado con el sistema analizado por Chen et al., 2017, donde la capacidad de enfriamiento varía de 8.93 kW a 5.78 kW cuando la temperatura varía de 28 a 35°C, respectivamente.

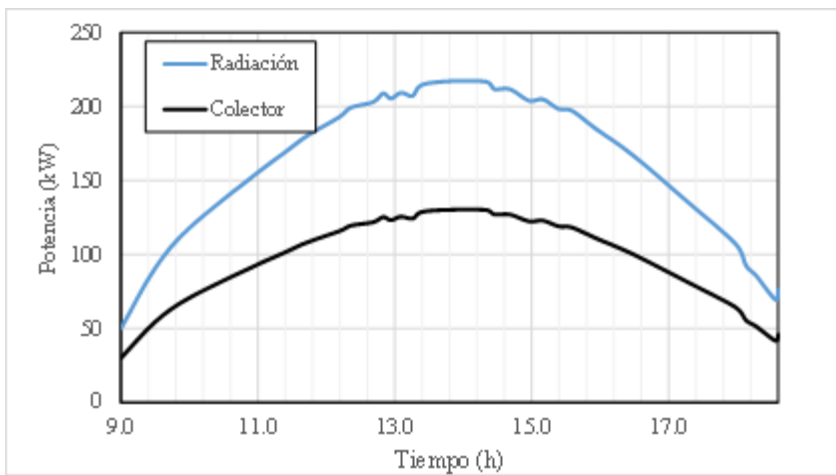
Puede notarse que para las Figuras 8 a 10, los parámetros son evaluados en un rango de 10.5 h y 16.7 h; esto debido a que la concentración antes y después de este rango provoca el fenómeno de cristalización en el sistema, por lo que, el límite de operación para este caso queda definido por este intervalo de tiempo. Estos valores varían dependiendo del área de colectores y condiciones ambientales. Esto demuestra que existe potencial para aprovechar la energía solar en la ciudad de Guanajuato en un sistema de refrigeración solar.



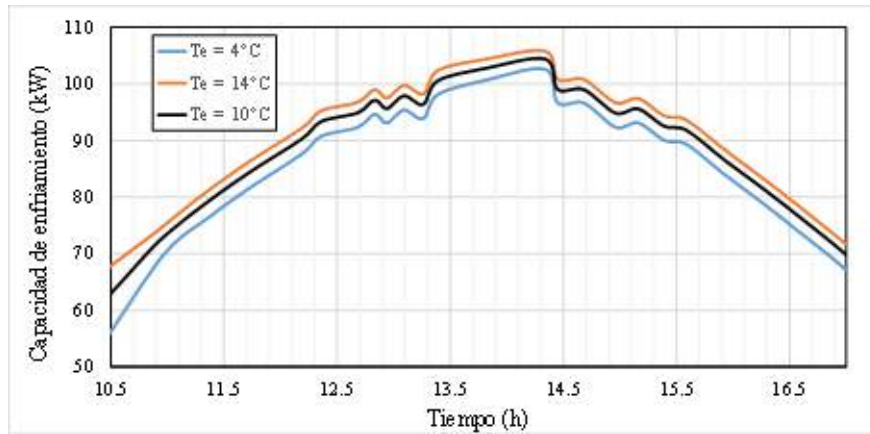
**Figura 5.** Diagrama de propiedades para la mezcla LiBr-H<sub>2</sub>O con curva de cristalización.



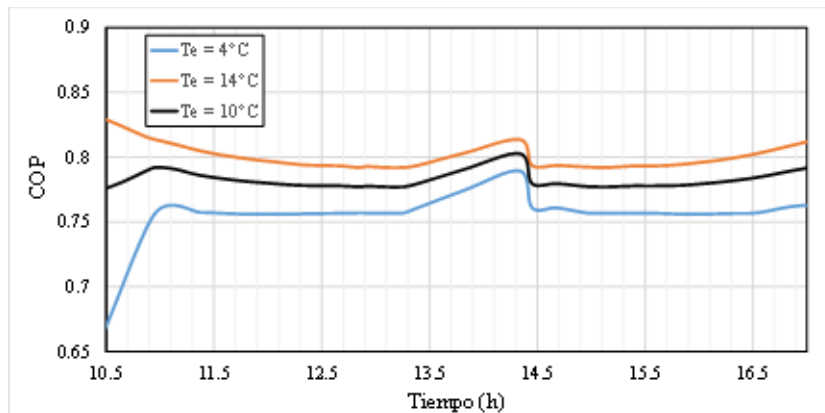
**Figura 6.** Radiación solar y temperatura ambiente para un día en el mes de abril en la ciudad de Guanajuato, México (extraída de (Picón-Núñez et al., 2014)).



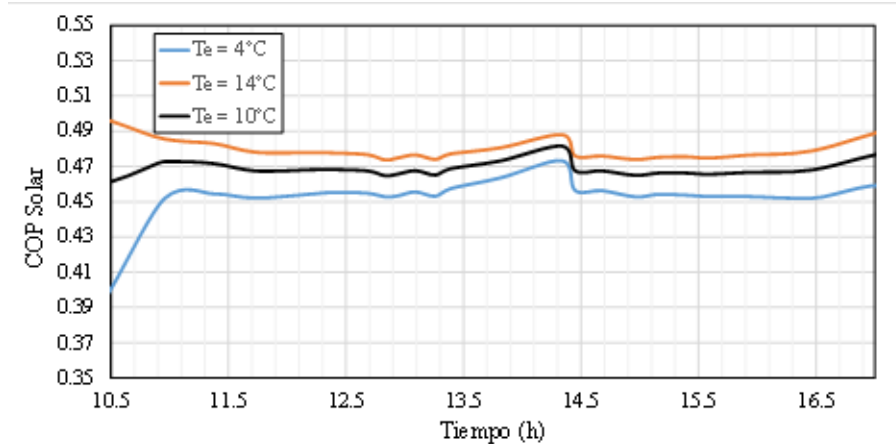
**Figura 7.** Flujo de energía solar por radiación y absorbida por el colector.



**Figura 8.** Capacidad de enfriamiento para distintas horas de funcionamiento del sistema de refrigeración por absorción.



**Figura 9.** Coeficiente de desempeño del sistema de refrigeración por absorción.



**Figura 10.** Coeficiente de desempeño solar para el sistema de refrigeración por absorción.

El valor máximo instantáneo de capacidad de enfriamiento, COP y COP solar ha sido determinado y se muestran en la Tabla 1. Estos valores son muy similares a los obtenidos por Xu and Wang, 2017, los cuales corresponden a un COP promedio de 0.88 y un COP solar promedio de 0.3, con una máxima capacidad de enfriamiento de aproximadamente 120 kW.

#### 4. CONCLUSIONES

En este trabajo una simulación de un sistema de refrigeración por absorción LiBr-H<sub>2</sub>O operado con energía solar ha sido desarrollada. Los resultados muestran que el modelo es capaz de predecir el comportamiento térmico del sistema operado mediante colectores

$T_e$ (°C)	$COP_{prom}$	$COP_{solar,prom}$	$COP_{max}$	$COP_{solar,max}$	$Q_{e,prom}$ (kW)	$Q_{e,max}$ (kW)
4	0.75	0.45	0.79	0.47	85.14	102.60
10	0.78	0.47	0.80	0.48	88.32	104.40
14	0.80	0.48	0.83	0.50	90.21	105.80

**Tabla 1.** Capacidad de enfriamiento y coeficiente de desempeño máximo y promedio para tres temperaturas de enfriamiento.

solares que puede llevarse a cabo bajo condiciones de radiación perteneciente al estado de Guanajuato.

- El modelo ha sido verificado con resultados obtenidos en la literatura mostrando un comportamiento cualitativo aceptable con ello, la diferencia cuantitativa obtenida puede ser atribuida al cálculo de las propiedades de la mezcla LiBr-H<sub>2</sub>O.
- El modelo desarrollado, a diferencia de otros modelos de la literatura, considera la zona de cristalización, condición no deseable en mezclas LiBr-H<sub>2</sub>O, con esto se establece el rango de operación apropiado para el sistema.
- La capacidad de enfriamiento depende fuertemente de la radiación solar y no de la temperatura ambiente debido a las grandes dimensiones del sistema analizado (para este caso con un área de colectores de 200 m<sup>2</sup> se obtiene una capacidad de enfriamiento entre 60 kW y 105 kW).
- El COP y COPsolar obtenidos son de magnitudes comparables a datos experimentales obtenidos de la literatura. Lo anterior demuestra que el modelo desarrollado, a pesar de estar basado en relaciones termodinámicas, es capaz de arrojar buenos resultados comparado con datos experimentales (valores máximos de 0.8 y 0.5 para COP y COPsolar, respectivamente). Estos valores son más bajos que los que se obtienen con un sistema de compresión de vapor, sin embargo, el uso de una fuente renovable de energía y la sustitución del compresor del sistema de refrigeración convencional dismi-

nuye la emisión de gases de efecto invernadero al no requerir de un gran consumo de energía eléctrica.

- El modelo puede ser utilizado como punto de partida para el análisis del potencial de uso de energía solar si se cuenta con la información de las condiciones ambientales para localidades distintas a la analizada en este trabajo.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por su apoyo durante el desarrollo de esta investigación.

## REFERENCIAS

Assilzadeh, F., S. A. Kalogirou, Y. Ali, and K. Sopian. 2005. Simulation and optimization of a LiBr solar absorption cooling system with evacuated tube collectors. *Renew. Energy*. 30:1143–1159. doi:10.1016/j.renene.2004.09.017.

Bulgan, A. T. 1997. Use of low temperature energy sources in aqua-ammonia absorption refrigeration systems. *Energy Convers. Manag.* 38:1431–1438. doi:10.1016/0196-8904(95)00351-7.

Chen, J. F., Y. J. Dai, and R. Z. Wang. 2017. Experimental and analytical study on an air-cooled single effect LiBr-H<sub>2</sub>O absorption chiller driven by evacuated glass tube solar collector for cooling application in residential buildings. *Sol. Energy*. 151:110–118. doi:10.1016/j.solener.2017.05.029.

Dincer I. 2003. Refrigeration systems



and applications. John Wiley and Sons.

Horuz, I. 1998. A comparison between ammonia-water and water-lithium bromide solutions in vapor absorption refrigeration systems. *Int. Commun. Heat Mass Transf.* 25:711–721. doi:10.1016/S0735-1933(98)00058-X.

Incropera, F. P., and D. P. DeWitt. 1996. *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. 4th ed. John Wiley & Sons, USA.

Karamangil, M. I., S. Coskun, O. Kaynakli, and N. Yamankaradeniz. 2010. A simulation study of performance evaluation of single-stage absorption refrigeration system using conventional working fluids and alternatives. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 14:1969–1978. doi:10.1016/j.rser.2010.04.008.

Liao, X., and R. Radermacher. 2007. Absorption chiller crystallization control strategies for integrated cooling heating and power systems. *Int. J. Refrig.* 30:904–911. doi:10.1016/j.ijrefrig.2006.10.009.

Lizarte, R., M. Izquierdo, J. D. Marcos, and E. Palacios. 2012. An innovative solar-driven directly air-cooled LiBr–H<sub>2</sub>O absorption chiller prototype for residential use. *Energy Build.* 47:1–11. doi:10.1016/j.enbuild.2011.11.011.

Manu, S., and T. K. Chandrashekar. 2016. A simulation study on performance evaluation of single-stage LiBr–H<sub>2</sub>O vapor absorption heat pump for chip cooling. *Int. J. Sustain. Built Environ.* 5:370–386. doi:10.1016/j.ijsbe.2016.08.002.

Mazloumi, M., M. Naghashzadegan, and K. Javaherdeh. 2008. Simulation of solar lithium bromide–water absorption cooling system with parabolic trough collector. *Energy Convers. Manag.* 49:2820–2832. doi:10.1016/j.enconman.2008.03.014.

Moran M. J., Howard N. S., Daisy D. B., and Margaret B. B. 2011. *Fundamentals of engineering thermodynamics*. 7th ed. John Wiley and Sons.

Mostafavi, M., and B. Agnew. 1996.

The effect of ambient temperature on the surface area of components of an air-cooled lithium bromide/water absorption unit. *Appl. Therm. Eng.* 16:313–319. doi:10.1016/1359-4311(95)00006-2.

Picón-Núñez, M., G. Martínez-Rodríguez, and A. L. Fuentes-Silva. 2014. Design of solar collector networks for industrial applications. *PRES'13 Process Integr.* 70:1238–1245. doi:10.1016/j.applthermaleng.2014.05.005.

Riffat, S. B., C. F. Afonso, A. C. Oliveira, and D. A. Reay. 1997. Natural refrigerants for refrigeration and air-conditioning systems. *Appl. Therm. Eng.* 17:33–42. doi:10.1016/1359-4311(96)00030-0.

S.B. Riffat, S.E. James, and C.W. Wong. Experimental analysis of the absorption and desorption rates of HCOOK/H<sub>2</sub>O and LiBr/H<sub>2</sub>O. *Int J Energy Res.* 22:1099–1103.

Syed, A., M. Izquierdo, P. Rodríguez, G. Maidment, J. Missenden, A. Lecuona, and R. Tozer. 2005. A novel experimental investigation of a solar cooling system in Madrid. *Int. J. Refrig.* 28:859–871. doi:10.1016/j.ijrefrig.2005.01.007.

Wageiallah Mohammed, O., and G. Yanling. 2017. Comprehensive Parametric Study of a Solar Absorption Refrigeration System to Lower Its Cut In/Off Temperature. *Energies.* 10:1746. doi:10.3390/en10111746.

Xu, Z. Y., and R. Z. Wang. 2017. Simulation of solar cooling system based on variable effect LiBr-water absorption chiller. *Renew. Energy.* 113:907–914. doi:10.1016/j.renene.2017.06.069.

Xu, Z. Y., and R. Z. Wang. Comparison of absorption refrigeration cycles for efficient air-cooled solar cooling. *Sol. Energy.* doi:10.1016/j.solener.2018.04.004. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X18303499>



# COMPARATIVA DE FORMAS ESTRUCTURALES (TOPOLOGÍA) DE TORRE RETICULAR METÁLICA EN TÉRMINOS DE EFICIENCIA ESTRUCTURAL. CASO: TORRE CONCENTRADORA CAMPO HELIÓSTATOS

---

Comparison of structural shapes (Topology) of steel lattice tower according to mechanical efficiency. Case: Main tower heliostat's field

A. Vera Murillo<sup>1\*</sup>, J. Horta Rangel<sup>1</sup>, M. Arroyo Contreras<sup>1</sup>,  
M. Pérez Lara y Hernández<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Querétaro,  
Cerro de las campanas S/N, Santiago de Querétaro, Querétaro,  
76010, México

\*Autor de correspondencia  
avera2718@gmail.com



## RESUMEN

La definición de la topología es un paso importante en el proceso de optimización de una torre reticular. Con una forma estructural predefinida el costo final será menor, los tiempos de construcción disminuirán y la estructura tendrá una mayor funcionalidad. En la generación de las distintas formas estructurales se especifican criterios de carga y estructuración. Se proponen para el caso de estudio tres distintas topologías que serán comparadas con la finalidad de obtener el mejor arreglo estructural tomando en consideración diversos criterios de diseño y funcionalidad bajo la premisa del menor peso posible, otros aspectos a considerar han sido los desplazamientos horizontales, la capacidad que tienen de ser estructuras modulares, el tamaño de los miembros y las facilidades de transporte y montaje.

La forma estructural elegida es una torre reticular de forma hexagonal, estructurada mediante marcos con contraventeos. Esta topología es la del peso mínimo de las opciones, amplias facilidades de construcción, una estructuración eficiente y práctica de ser optimizada. La elección se basa en tanto en criterios de eficiencia y peso mínimo, como de facilidades en aspectos constructivos que permiten la modulación del sistema.

El trabajo expresado en este artículo es la primera parte de un proyecto dividido en dos fases, se muestra en el presente trabajo la elección de la conformación estructural de la torre, y posteriormente en la fase dos se optimizará el resultado de la fase uno mediante la aplicación del método de algoritmos genéticos.

### Palabras Clave:

Campo de Heliostatos, Eficiencia Estructural, Topología Estructural, Torre Concentradora

## ABSTRACT

The definition of the topology is an important step in the lattice towers optimization process. With a predefined structural shape, the final cost will be lower, the construction time's will be minimized and the structure will have a better functionality. In the different structural shapes conception, loads and structuring criteria are specified. Three different topologies are proposed to the studied case, these ones will be compared to get the best structural shape. Many designs and functionality's criteria will be used. Other conditions that will be use are the analysis of horizontal displacement's, topologies capacity of being modular structures, the size of their members and the facilities of their transport and montage.

The structural form chosen is a lattice tower of hexagonal shape. This is constructed through frames with restricted lateral displacement. This option has the lowest weight between all the options, many construction facilities, an efficient structuration and an easy capacity of being optimized. The election is based in efficiencies criteria, minimum weight and the facilities in the constructive time that a modular system allows.

The expressed work in this paper is the first part of a two-phase's divided project. In the present work it is shown the work of the election of the structural shape of the tower. Later in phase two the result of the first phase will be optimized through the application of the Genetic Algorithm's Method

### Keywords:

Heliostat's Field, Main Tower, Structure's Efficiency, Structure's Topology.

## 1. INTRODUCCIÓN

Las torres reticulares son muy populares en el diseño de estructuras de acero esbeltas (Noilublao and Bureerat, 2011), donde el apartado de optimización de las mismas se vuelve una parte esencial. La optimización debe ser basada en una función objetivo multi-variable, donde ésta es la optimización del peso (Prasad Rao et al., 2010).

Un método que es usado comúnmente usado para resolver problemas de búsqueda y optimización es el algoritmo genético (Dede et al., 2011). La optimización de estructuras tipo armaduras con algoritmos genéticos se puede agrupar en tres factores: área transversal de los elementos (sizing), posición de los nodos (configuration) y la topología (topology) (Deb and Gulati, 2011). Para el primer factor, el área transversal de los elementos es modificada mediante el aumento o disminución de las dimensiones o espesores de las secciones utilizadas. La posición de los nodos hace referencia a la longitud que los miembros pueden tomar al modificar de posición las uniones de éstos, y la topología es la forma que tendrá el acomodo de los elementos de la estructura.

El método de elemento finito (MEF) (Gentils et al., 2017), análisis probabilístico (Tessari et al., 2017), ó métodos iterativos (Zwick et al., 2012), ayudan en la optimización a obtener el mejor diseño de la estructura minimizando el costo de las estructuras. Así como se consideran en la optimización las fuerzas últimas de diseño, también deben de tenerse en consideración las características que se dan en la etapa constructiva. Una de las soluciones para minimizar los problemas de éste es el definir la topología de la estructura antes del proceso de optimización iterativa. Rodríguez (de Souza et al., 2016) propone una topología basada en estructuras existentes, donde utiliza alguna de éstas en la optimización para establecer el peso mínimo.

Existen varios métodos de aplicar una optimización multi-objetivo, como el uso de una topología no definida optimizando el área transversal de los perfiles y la posición de los nodos (Sánchez, 2012), o utilizando recursos computacionales para obtener la mejor topología mediante un algoritmo genético (Assimi et al., 2017). El uso de recursos computacionales empleados en la optimización de la topología es mayor a los utilizados en los otros dos factores. Rahami (2008) usa el método energético para pre-optimizar la topología, con esto, al conocer el comportamiento de la estructura y las fuerzas sobre sus elementos, los elementos y nodos principales son determinados de forma sencilla. Para determinar la mejor topología el comportamiento dinámico de la estructura debe ser contemplado mediante un análisis modal para considerar las frecuencias naturales de la misma. Estos resultados se pueden considerar en una topología pre-optimizada (Jin and De-yu, 2006) o en la optimización de una topología ya establecida (Zhu et al., 2017), o mediante un análisis global con eigen valores (Li and Khandelwal, 2017).

En la optimización del diseño de estructuras, el peso no debe de ser el único factor a revisar, también en adición a las consideraciones del distinto tipo de miembros, se deben de considerar los problemas de los tiempos de la etapa constructiva, y contemplar formas más fáciles de producir y construir las estructuras (Jin et al., 2017). Los costos extras del proceso constructivo como un factor de optimización en el algoritmo dentro de un análisis teórico pueden ser determinados y ser añadidos al costo final del peso total de la estructura (Kripakaran et al., 2007). Esto es calculando el número de tipos diferentes de miembros, o usando un algoritmo para homologar perfiles y buscar un acomodo modular de la topología (Durán et al., 2012). Para determinar la estructura modular optimizada la elección de la topología es uno de las cuestiones cruciales. La selección puede ser orientada en cinco factores: conexiones,



tamaño de las piezas de transporte, distancias y tiempos de transporte, los costos al usar o no grúas, y el volumen de material (Salama et al., 2017). Similarmente se puede considerar un proceso de diseño de mecanismo de cuerpo-rígido donde se analiza la funcionabilidad, los grados de libertad y los nodos (Wang et al., 2017). Para tener un mejor diseño de una topología con mejores condiciones, una opción es el considerar unidades modulares para la configuración de la estructura. El hacer lo antes mencionado tiene como ventajas la reducción de los tiempos de diseño y construcción, por lo que se producen menores costos (Generalova et al., 2016).

Como se menciona anteriormente un punto importante en la optimización de las torres reticulares es la consideración acerca de la elección de la mejor topología, el obtener una forma estructural teórica puede resultar en una estructura con un peso propio mínimo. Los extra costos derivados en la anterior propuesta se derivan en los mayores tiempos constructivos, el mayor número de perfiles distintos utilizados que incrementaría los costos, por lo que dicha topología teórica puede no resultar ser la más económica en términos globales.

El pre-definir la forma estructural es una mejor opción, pero no solo considerando en el análisis las topologías existentes en la industria, también se requieren considerar criterios modulares y analizarlos mediante consideraciones de posibles problemas de tiempos y costos en la etapa constructiva.

En este artículo se presentará el análisis de los factores que son importantes en la comparativa entre distintas formas estructurales, donde ésta concluirá con la mejor topología para una torre reticular de heliostatos. Finalmente se mostrarán las conclusiones de la mejor metodología utilizada y sus características propias idóneas para poder ser optimizada.

El caso particular de una torre reticular concentradora de un campo de heliostatos será utilizado en este artículo para esquematizar la metodología a usar.

## 2. TORRE CONCENTRADORA DE ENERGÍA SOLAR DE UN CAMPO DE HELIÓSTATOS

Las plantas termo-solares con torre central concentradora son un sistema dedicado a la captación de energía solar, donde dicha energía captada es transformada en energía eléctrica a través del proceso de un sistema termodinámico.

El sistema es formado por un campo de heliostatos (estructuras con paneles móviles reflejantes de la energía solar) que redirigen la energía solar hacia un receptor que transmite esa energía calorífica hacia un mecanismo termodinámico para transformarla en energía eléctrica. El campo de heliostatos tiene como eje focal una torre concentradora, donde ésta es la que da soporte, altura, posición y protege al receptor antes mencionado. Los elementos de un campo de heliostatos se esquematizan en la Figura 1.

Alrededor del mundo hay varias estructuras utilizadas como torre central receptora de energía solar. Existe un campo de heliostatos en Sevilla, en España, nombrada PS20. Ésta es una torre de concreto de sección constante con extracción de volumen de 165 m de altura (Termosolar, 2009).

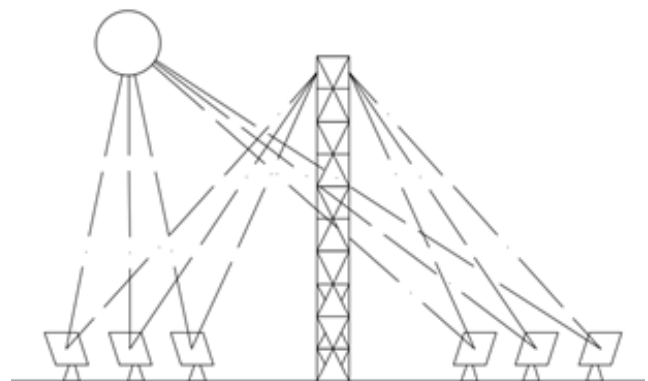


Figura 1. Torre central de campo de heliostatos

En Estados Unidos de Norteamérica, en el desierto de Mojave en California, hay un campo de heliostato de torre central llamado Sistema Generador de Energía Solar Eléctrica Ivanpah (Terrain, 2014), donde la torre central es reticular de acero de 139 m de altura.

En México la investigación de energías renovables es realizada por el Centro de Investigación de Energía (CIE) con el apoyo de Universidades y de otros centros de investigación. En el país existe el Campo Experimental de Energía Termo-Solar de Torre Central en el estado de Sonora, ésta torre tiene una base cuadrada con cuatro lados iguales de altura de 30 m (Monteverde, 2011). La estructural de dicha torre se muestra en la Figura 3.

### 3. METODOLOGÍA

#### 3.1. Modelos matemáticos de las torres de heliostatos

Se propondrán tres formas estructurales distintas que conformarán respectivamente tres torres reticulares que funcionarán como torres concentradoras para un campo de heliostatos. Dichas propuestas tendrán las características de ser estructuras reticulares de acero y modulares. Éstas estarán basadas en torres reticulares existentes, provenientes de la literatura y de propuestas propias.

La estructuración es un factor que determina la complejidad del proceso constructivo, del diseño, desarrollo del proyecto y uso de la estructura, el tipo de estructuración que optimiza y mejor cada uno de los aspectos antes mencionados es la construcción reticular. Las ventajas de este tipo de estructuras son su topología modular, el emplear trabajadores no especializados, el uso de conexiones entre elementos de forma sencilla, la practicidad del transporte de materiales y el peso optimizado que la estructura pudiera tener. El comportamiento de las diferentes topologías se obtendrá a través de los resultados

de la realización de sus respectivos modelos mediante el método de elemento finito (MEF), donde el análisis será estático lineal, con un diseño plástico de los elementos.

El análisis será estático, por lo que, a partir del teorema de potencia y energía, se utilizará una aproximación con el MEF usando valores reales, por lo que el comportamiento se rige por el modelo discreto del método de rigideces ejemplificado en la Ec. (1).

$$\int_{\Gamma} [N]^T P d\Gamma + \int_{Vol} [N]^T \{b\} dVol = \int_{Vol} [B]^T [D] [B] dVol \{U\} \quad (1)$$

Donde: [N]: matriz de las funciones de forma.

Para la creación de los modelos, se utilizará el software SAP 2000 V16, donde se empleará en el módulo de diseño el reglamento del AISC LRFD 99, esto debido a que el reglamento mexicano de estructuras de acero

$P = \tilde{S} n$  ;  $\tilde{S}$ : tensor de Piola – Kirchhoff

$\Gamma$  : valores en la frontera.

$\{b\}$  : vector de fuerzas de cuerpo.

$[B]$  : matriz de derivadas de las funciones de forma.

Vol: volumen del sólido en estudio

$\rho$  : densidad del material

está basado en el LRFD. Las combinaciones de carga se colocan manualmente obtenidas del Reglamento de Construcción del DF (Arnal Simón and Betancourt Suárez, 2004), las cuales se muestran en la Tabla 1.

Donde: Cm hace referencia a la carga muerta. Cv a la carga viva máxima. Cvacc a la carga viva accidental. Wx es el viento que actúa en la dirección x. Wy es el viento que actúa en la dirección y. Sx es el sismo en el sentido x y Sy es el mismo existente en el sentido Y. Los modelos estarán regidos por las normas del reglamento de construcción del país (Arnal Simón and Betancourt Suárez, 2004),



<i>Combinaciones de Servicio</i>	<i>Combinaciones de Diseño</i>
$C_m + C_v$	$1.4 C_m + 1.4 C_v$
$C_m + C_{vacc} + (W_x \text{ ó } W_y)$	$1.1 C_m + 1.1 C_{vacc} + 1.1 (W_x \text{ ó } W_y)$
$0.9C_m + 0.9C_{vacc} + S_x + 0.3 S_y$	$1.1 C_m + 1.1 C_{vacc} + 1.1 S_x + 0.33 S_y$
$0.9C_m + 0.9C_{vacc} + S_y + 0.3 S_x$	$1.1 C_m + 1.1 C_{vacc} + 1.1 S_y + 0.33 S_x$

**Tabla 1.** Combinaciones de carga

tanto en los criterios de diseño por cargas últimas y en las revisiones por servicio. Los desplazamientos horizontales permisibles por motivo de las cargas de viento y que se señalan en el reglamento mexicano, son de 0.005 veces la diferencia de altura (30 m) cuando no hay elementos que puedan ser dañados, o de 0.002 veces la diferencia de altura cuando hay elementos que pueden ser dañados. Por lo anterior, el límite de desplazamientos máximos permitido será el de 0.005 veces la altura, es decir, de 15 cm. Como límite establecido con motivo del buen funcionamiento del receptor de energía solar, se indica un desplazamiento máximo permisible de 10 cm.

Como criterio de diseño todos los elementos trabajarán con una eficiencia mayor al 80% de su capacidad, a menos que el tener elementos con eficiencia menor contribuya a la rigidez de la estructura provocando que otros elementos sean más ligeros y se contribuya a que el peso total de la torre sea menor a que si trabajaran al 80% o más de su eficiencia. Además, se permitirá que su eficiencia sea menor para priorizar una estructuración modular.

### 3.2. Características y cargas aplicadas a los modelos

Para la creación de los modelos de las torres de heliostatos se utilizarán las mismas consideraciones y las mismas cargas para poder tener una comparativa adecuada, además de que se tomarán como requisitos base los

obtenidos por parte de la Universidad Autónoma de Querétaro (UAQ) para el diseño de una torre de heliostatos en su campus Juriquilla.

Buscando homologar comportamientos de los elementos, y al ser el tipo de secciones utilizados para la torre de la UAQ ya mencionada, se utilizarán solo secciones cuadradas y rectangulares del tipo PTR y HSS. El área total útil para la base de la torre es de 6m x 6 m. El factor de esbeltez de la torre debe tener un valor máximo de 5, esto para tener amplificaciones dinámicas en los efectos de viento. Las torres tendrán una altura de 30 m.

El peso propio será incluido dentro del análisis de los modelos matemáticos. En el nivel superior de las torres se colocará un cuarto de máquinas, donde se colocarán los aparatos que convertirán la energía solar en eléctrica, los cuales tendrán un peso total de 2 Tn, el cual será repartido en toda el área efectiva del entrepiso. Para los sistemas de piso del cuarto de máquinas y el de la azotea del mismo, se usará una carga muerta de 50 kg/m<sup>2</sup>, siendo el peso de una rejilla Irving con lámina.

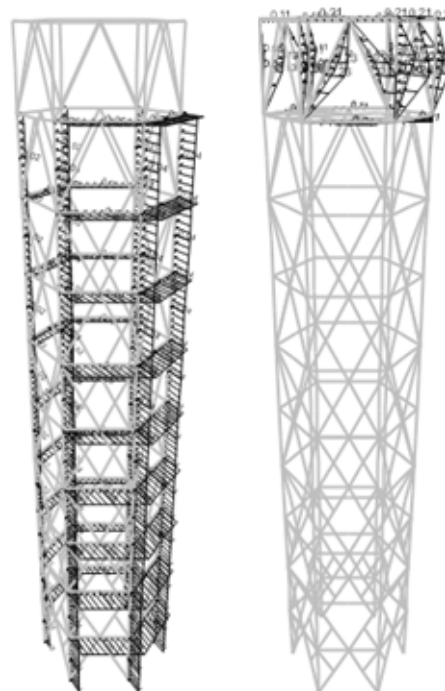
Para el análisis de las cargas vivas, se considerarán las vivas máximas y vivas accidentales, las primeras serán de 40 kg/m<sup>2</sup> para azotea y de 100 kg/m<sup>2</sup> en el cuarto de máquinas. Para las vivas accidentales serán de 20 kg/m<sup>2</sup> en azotea y de 70 kg/m<sup>2</sup> en el cuarto de máquinas. Para dichas cargas se tomaron

como base las especificadas en las Normas Técnicas Complementarias del reglamento de Construcción del Distrito Federal del 2004 (NTC RDF).

Las fuerzas de viento se obtendrán del Manual de Diseño de Obras Civiles de la Comisión Federal de Electricidad de México, considerando que la estructura está en el Grupo B y con un viento del Tipo 1. Se toman las consideraciones regionales de la ciudad de Querétaro, por lo que la presión dinámica de diseño será de 260 kg/m<sup>2</sup> en las áreas cerradas del cuarto de máquinas y de 155 kg/m<sup>2</sup> en las áreas abiertas aplicando sobre las áreas de los elementos. El diseño y revisión de los elementos se realizará de acuerdo a las NTC RDF 2004.

Un resumen de las cargas gravitacionales aplicadas se puede apreciar en la Tabla 2.

La aplicación de las cargas de viento se esquematiza en la Figura 2. En la primera (A) se muestra cómo se aplica la presión de viento sobre el área de los elementos, y en la segunda (B) se toman las áreas correspondientes del total del marco tapado sobre los elementos del cuarto de máquinas.



**Figura 2.** Aplicación de cargas de viento. A) Aplicación en elementos. B) Aplicación en cuarto de máquinas

<i>Cuarto de máquinas</i>	<i>Azotea</i>
Peso propio (incluido en programa)	Peso propio (incluido en programa)
Peso de equipos: 2 Tn/Área efectiva	-----
Sistema de piso: 50 kg/m <sup>2</sup>	Sistema de piso: 50 kg/m <sup>2</sup>
C. Viva max= 100 kg/m <sup>2</sup>	C. Viva max= 40 kg/m <sup>2</sup>
C. Viva acc = 70 kg/m <sup>2</sup>	C. Viva acc= 20 kg/m <sup>2</sup>

**Tabla 2.** Resumen de cargas gravitacionales



### 3.3. Comparativa de las formas estructurales

En la elección de la topología final se usará un criterio de pre-optimización, el cual consiste en analizar y determinar que topología es más ligera que las demás. Esto se realiza mediante un análisis simple, sin la necesidad de algún algoritmo de optimización. Dicho análisis determinará un criterio de peso por área, pero para este caso al tratarse de torres con mismo tamaño de base y altura, el peso total será el parámetro a obtener. Para ello todas las topologías se analizarán usando las mismas fuerzas y las mismas consideraciones en los modelos, todo con el fin de obtener una comparativa viable.

Para cualquier topología utilizada para cualquier tipo de estructura hay varios factores que son determinantes para la elección de la misma. Los factores determinados en variables discretas son: el uso que va a tener la estructura, la capacidad que tengan de ser modulares, las características de sus conexiones, tamaños de miembros individuales, capacidad de transporte y capacidad de ser optimizadas. Los factores determinados en variables continuas son el peso total de la estructura y su desplazamiento máximo horizontal producto de las fuerzas de viento.

Para determinar el mejor uso de la estructura se contemplará el uso que va a tener, se realizará un mayor estudio acerca del estado del arte y de las estructuras existentes que tengan el mismo uso. Se realizará un estudio de las formas estructurales existentes para obtener la mejor topología, donde el análisis contemplará su historia, las provenientes de la zona local, el tipo de fallas que pueden tener y el estudio de éstas, y las topologías realizadas mediante el estudio de la teoría. Se determinará cuáles de ellas tienen una mayor funcionabilidad, los problemas que tienen durante su vida útil, los problemas de su etapa constructiva y principalmente los sobrecostos de la estructura.

Se analizará la capacidad que tenga la topología de ser convertida en una estructura modular, es decir, de poder tener las mismas medidas en elementos del mismo tipo y que se puedan repetir en sus distintos niveles. El tener estructuras modulares incrementan la facilidad de su construcción, minimizando costos y tiempos.

Para determinar si la topología puede ser utilizada como un módulo eficiente se realizará un análisis del tipo de conexión que se van a necesitar, los materiales a utilizar, la capacidad de los trabajadores ante trabajos especializados, conexiones hechas en campo, en taller o ambas.

Se determinarán elementos de la topología con mismos tamaños y mismas secciones para tener una constitución modular. Dentro del análisis se incluirá la practicidad de transporte de módulos o de secciones, ya que a menores tamaños se requieren vehículos de menor embalaje, por lo que se disminuyen los costos de transporte. Así como se realizará el análisis de la necesidad de usar grúas o no para los montajes.

Se determinará el peso propio total de cada una de las formas estructurales, de tal forma que serán variables continuas que podrán ser comparadas de forma sencilla. Al igual que se obtendrán y se compararán los desplazamientos horizontales máximos productos de las cargas de viento.

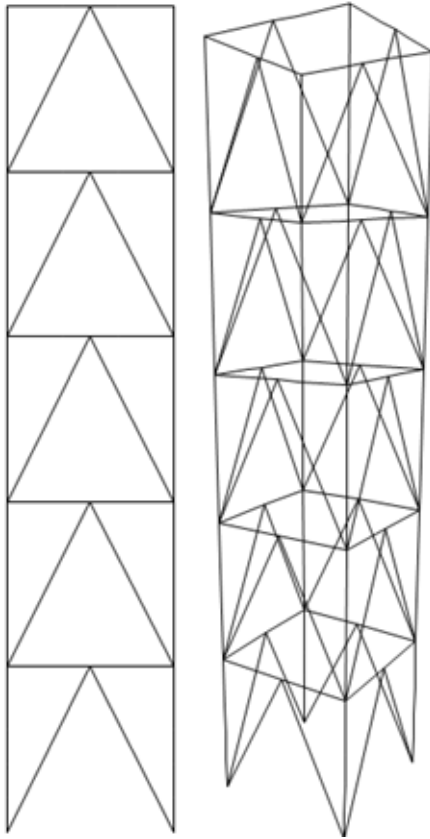
La comparativa se hará mediante todos los puntos antes expuestos, dando un mayor porcentaje de decisión al peso propio de la torre.



## 4. RESULTADOS

### 4.1 Topología Uno

La topología elegida para una de los modelos de la torre de helióstatos será la existente



**Figura 3.** Forma estructural de torre experimental de Sonora

de la torre experimental de Sonora, la cual es la que se observa en la Figura 3. Analizando dicha topología, cuenta con los espacios necesarios para el izaje de equipos y su colocación en el piso de máquinas. Los receptores de la energía solar se pueden colocar en todas sus caras para aprovechar la energía de sus cuatro lados.

Los tamaños de los miembros a pesar de que tienen una longitud de 6 metros en columnas y traveses y 6.7 en diagonales aún son prácticos de transportar, pero ya se necesitarían transportes de mayor tamaño, o por la practicidad se pueden dividir las piezas para tener una mayor facilidad de transporte, aunque significa más conexiones en campo. Para el izaje individual o en módulos de la estructura se requiere el uso de grúa.

Las secciones utilizadas para este modelo se señalan en la Tabla 3. El peso propio de los elementos de la torre da una suma total de 15.79 tn. El desplazamiento máximo existente en la parte superior de la torre por motivo de las fuerzas de viento es de 5.25 cm.

Las características obtenidas de la topología uno se resume en la Tabla 4.

<i>Sección</i>	<i>Elemento</i>	<i>Material</i>	<i>Peso [Tn]</i>
HSS 4"x8"x1/4"	Vigas	A500 Gr B HSS	3.4945
HSS 5"x5" 1/4"	Diagonales	A500 Gr B HSS	6.455
HSS 8"X8"X5/16"	Columnas	A500 Gr B HSS	5.84

**Tabla 3.** Secciones y características de elementos de topología 1



<i>Long. Máx. de miembro</i>	<i>Peso total</i>	<i>Desplazamiento Max.</i>
6.7 mts	15.79 Tn	5.25 cms

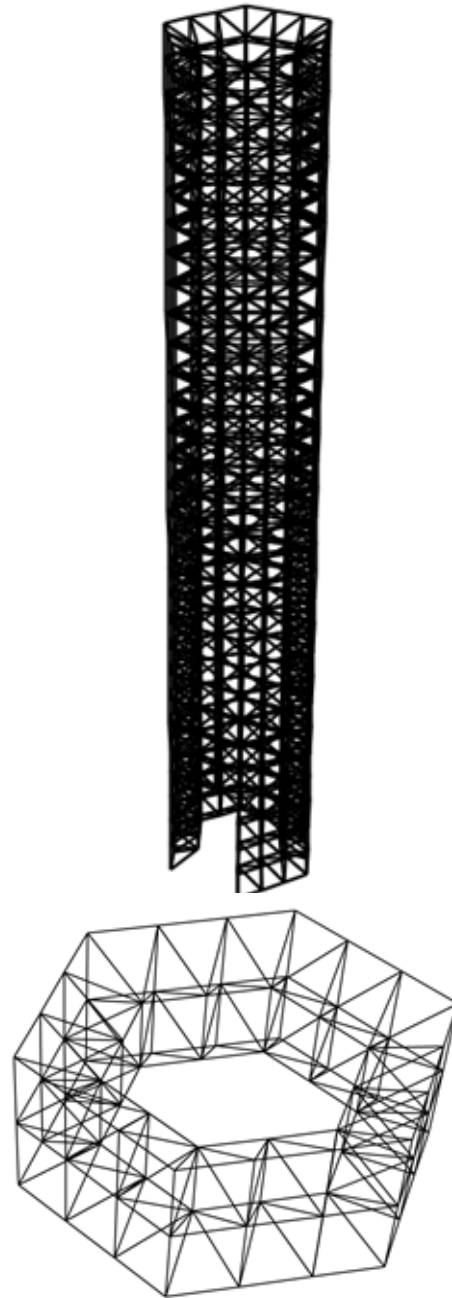
**Tabla 4.** Resultados de la Topología 1

## 4.2 Topología Dos

Para esta opción se utilizará una forma hexagonal de base, esto para propiciar que la energía pueda ser captada desde más ángulos para que la refracción de ésta sea menor a si se tuvieran solo cuatro lados de base. Se probaron torres con bases de mayor número de lados, pero éstas, aunque eran más rígidas el peso total de la torre se incrementaba haciendo más cara la inversión inicial.

La estructuración es a base de doble malla espacial de base hexagonal. El tamaño de la cuadrícula es de un metro y el espaciamiento entre las dos mallas es de un metro por igual. La estructuración se muestra en la Figura 4. Por el tamaño de los elementos (un metro) y las cargas que resisten solo se colocan elementos PTR's cuadrados, por lo que el transporte de éstos es barato y práctico, sus conexiones son sencillas y no se requiere de mano de obra especializada. Además, si se transportan módulos en lugar de elementos individuales, sigue siendo fácil de transportar, fácil de colocar sus conexiones y ligera, de forma que no es indispensable el uso de gruas.

El peso propio de la torre es de 11.88 Ton y el desplazamiento máximo en la parte superior es de 5.14 cm producto de las fuerzas de viento. Los pesos y secciones utilizadas se pueden apreciar en la Tabla 5.



**Figura 4.** Topología dos

<i>Sección</i>	<i>Localización</i>	<i>Material</i>	<i>Peso [Tn]</i>
PTR 2"x2" Cal 14	Otros módulos	A500 Gr A	11.1755
PTR 2.5"x2.5" Cal 7	1º y 2º módulo	A500 Gr A	0.7077

**Tabla 5.** Secciones y características de elementos de topología 2  
Las características obtenidas de la topología dos se resumen en la Tabla 6

<i>Long. Máx. de miembro</i>	<i>Peso total</i>	<i>Desplazamiento Max.</i>
1 m	11.88 Tn	5.14 cms

**Tabla 6.** Resultados de la Topología 2.

<i>Long. Máx. de miembro</i>	<i>Peso total</i>	<i>Desplazamiento Max.</i>
3.35 m	10.25 Tn	5.53 cms

**Tabla 7.** Secciones y características de elementos de topología 3.

<i>Sección</i>	<i>Elemento</i>	<i>Material</i>	<i>Peso [Tn]</i>
HSS 6"x4"x3/16"	Vigas	A500 Gr B HSS	3.2903
HSS 6"x6"x3/16"	Columnas	A500 Gr B HSS	3.9735
PTR 2"x2" Cal 11	Diagonales	A500 GrA PTR	0.2567
PTR 3" Cal 11	Riostras	A500 GrA PTR	2.7288

**Tabla 8.** Resultados de la Topología 3.

### 4.3 Topología Tres

La estructuración de esta torre será a base de módulos compuestos de marcos contraventeados de acero, donde en los primeros niveles los contraventeos tendrán rigidizantes. Los módulos formarán marcos de 3 m x 3 m, donde los elementos de mayor longitud son los contraventeos con 3.35 m de longitud, por lo que el transporte de elementos es bastante práctico. Para el montaje del módulo completo se necesitaría grúa por el tamaño que se manejan. Si el montaje se realiza miembro por miembro, las conexiones son comunes por lo que no se necesita personal altamente capacitado, la gran mayoría de conexiones se pueden tener realizadas des-

de taller. La forma estructural se aprecia en la Figura 5.

En esta topología como en su similar de la topología 2, tiene una forma hexagonal de base, para propiciar que la pérdida de energía solar por la refracción sea mínima y la torre tenga una mayor eficiencia. Las secciones utilizadas y el peso total se pueden apreciar en la Tabla 7. El peso total de la topología es de 10.25 tn, y el desplazamiento máximo producto de las fuerzas de viento es de 5.53 cm.

Las características obtenidas de la topología tres se resumen en la Tabla 8.



## 5. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Uno de los factores importantes es la funcionalidad que puedan tener las topologías, resumiendo las características de las tres topologías expuestas, la primera ya es una existente en el país y la segunda y tercera son propuestas nuevas. La primera tiene amplios espacios para la colocación de escaleras y espacios para el izaje de equipos, pero la forma cuadrada limita la colocación de los receptores a solo cuatro direcciones principales, por lo que las pérdidas por refracción de la energía solar son mayores a las torres hexagonales.

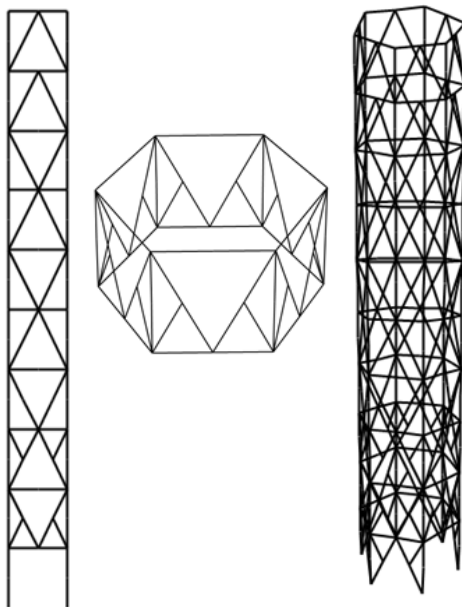
Dentro de la funcionalidad se deben de considerar las áreas útiles dentro de la torre para la colocación de escaleras (no de caracol ni marinas) además de espacios libres para izaje de equipos mecánicos. En este criterio, la de mayor espacio libre para esto es la topología uno, y la de menor es la topología 2, ésta última a causa de que la estructuración es de doble malla espacial por lo que se tiene radio de un metro menos comparada con la tercera topología. La topología tres cumple con los espacios libres para colocar esca-

leras amplias y para una zona de izaje de los equipos.

Para el comportamiento de las conexiones, las que se utilizarán en la topología uno y tres serán muy similares, a base de conexiones a momento en los marcos y los contra-venteos liberados a momento. La diferencia entre éstas dos topologías en sus conexiones radica en la magnitud de los elementos mecánicos que resisten, en la topología uno los momentos y cortantes son mayores al tener marcos de mayor claro y menor número de columnas a donde distribuir las fuerzas. La topología dos solo tendrá conexiones a tensión o compresión, y al ser todas las conexiones iguales, se puede proponer una placa de conexión igual para todas, utilizando uniones soldadas en campo o para simplificar la mano de obra se pueden colocar atornilladas. Las conexiones de la topología dos pueden ser similares a las de las existentes en la tridilosa.

En la etapa de transporte de los elementos, el más caro sería el de la topología uno, al ser la que cuenta con las piezas de mayor longitud, la de menor sería la topología dos por tener los elementos de menor longitud. A pesar de que la topología dos tiene los elementos más cortos, también es la que tiene un mayor número de elementos. La topología tres cuenta con una cantidad un poco mayor de elementos a la topología uno, pero con longitudes mucho menores y más fáciles de transportar.

La topología dos cuenta con una gran cantidad de perfiles, pero al ser una estructura bastante rígida y con comportamiento solo bajo carga axial, los perfiles elegidos para la torre no varían en gran medida, tendiendo a usar los mínimos disponibles, por lo que su capacidad de ser optimizada mediante algún algoritmo evolutivo es baja. Las topologías uno y tres son más susceptibles a ser optimizadas, ya que sus elementos tienen comportamientos a flexo-compresión y una rigidez muy dependiente de cualquier cambio de perfiles, por lo que las posibles com-



**Figura 5.** Alzados de torre completa y módulo con topología 3.

binaciones entre perfiles producen una lista amplia.

El peso total de los elementos de la torre uno es la mayor dentro de las tres propuestas, y siendo la número tres la que tiene el menor peso. A pesar de que la primera forma estructural tiene menor número de elementos, los perfiles tienen una mayor área, esto provocado por la mayor concentración de esfuerzos que tienen. La diferencia de peso entre las topologías uno y tres es de 5.5 tn. La diferencia entre la topología tres y dos es menor, siendo un poco mayor a 1.5 tn.

Los desplazamientos producto de las fuerzas del viento son muy similares en las tres topologías, la diferencia entre la más rígida (topología dos) comparada con la topología más flexible (topología tres) es de solo 3.9 mm. Por lo que se considera que las tres tienen un buen comportamiento ante cargas de servicio.

La topología tres al ser la elegida como la mejor para los fines buscados, será la forma estructural a utilizar en una fase posterior a este trabajo para ser optimización de energía solar, además de espacios útiles y un proceso constructivo más barato y sencillo.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por su apoyo durante toda esta investigación.

## REFERENCIAS

Arnal Simón, L., and M. Betancourt Suárez. 2004. Reglamento de construcción para el Distrito Federal.

Assimi, H., A. Jamali, and N. Nariman-zadeh. 2017. Sizing and topology optimization of truss structures using genetic programming. *Swarm Evol. Comput.* 0–1. doi:10.1016/j.swevo.2017.05.009. Available

from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.swevo.2017.05.009>

Deb, K., and S. Gulati. 2011. Design of Truss-Structures for Minimum Weight using Genetic Algorithms. Elsevier Sci. Volume 37:Pages 447–465.

Dede, T., S. Bekiroglu, and Y. Ayvaz. 2011. Weight minimization of trusses with genetic algorithm. *Appl. Soft Comput. J.* 11:2565–2575. doi:10.1016/j.asoc.2010.10.006.

Durán, O., L. Pérez, and A. Batocchio. 2012. Expert Systems with Applications Optimization of modular structures using Particle Swarm Optimization. 39:3507–3515. doi:10.1016/j.eswa.2011.09.041.

Generalova, E. M., V. P. Generalov, and A. A. Kuznetsova. 2016. Modular Buildings in Modern Construction. *Procedia Eng.* 153:167–172. doi:10.1016/j.proeng.2016.08.098. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2016.08.098>

Gentils, T., L. Wang, and A. Kolios. 2017. Integrated structural optimisation of offshore wind turbine support structures based on finite element analysis and genetic algorithm. *Appl. Energy.* 199:187–204. doi:10.1016/j.apenergy.2017.05.009. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.05.009>

Jin, P., and W. De-yu. 2006. Topology optimization of truss structure with fundamental frequency and frequency domain dynamic response constraints. *Acta Mech. Solida Sin.* 19:231–240. doi:10.1007/s10338-006-0628-2. Available from: <http://dx.doi.org/10.1007/s10338-006-0628-2>

Jin, S. W., H. Ohmori, and S. J. Lee. 2017. Optimal design of steel structures considering welding cost and constructability of beam-column connections. *J. Constr. Steel Res.* 135:292–301. doi:10.1016/j.jcsr.2017.03.020. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jcsr.2017.03.020>

Kripakaran, P., A. Gupta, and J. W. Bau-



gh. 2007. A novel optimization approach for minimum cost design of trusses. *Comput. Struct.* 85:1782–1794. doi:10.1016/j.compstruc.2007.04.006.

Li, L., and K. Khandelwal. 2017. Topology optimization of geometrically nonlinear trusses with spurious eigenmodes control. *Eng. Struct.* 131:324–344. doi:10.1016/j.engstruct.2016.11.001. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2016.11.001>

Monteverde, H. G. 2011. Campo de Pruebas de Helióstatos: impulsa el desarrollo nacional en fuentes renovables. *Gas. USON.* 265:24.

Noilublao, N., and S. Bureerat. 2011. Simultaneous topology, shape and sizing optimisation of a three-dimensional slender truss tower using multiobjective evolutionary algorithms. *Comput. Struct.* 89:2531–2538. doi:10.1016/j.compstruc.2011.08.010. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compstruc.2011.08.010>

Prasad Rao, N., G. M. S. Knight, N. Lakshmanan, and N. R. Iyer. 2010. Investigation of transmission line tower failures. *Eng. Fail. Anal.* 17:1127–1141. doi:10.1016/j.engfailanal.2010.01.008. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.engfailanal.2010.01.008>

Rahami, H., A. Kaveh, and Y. Gholipour. 2008. Sizing, geometry and topology optimization of trusses via force method and genetic algorithm. *Eng. Struct.* 30:2360–2369. doi:10.1016/j.engstruct.2008.01.012.

Salama, T., A. Salah, O. Moselhi, and M. Al-hussein. 2017. Automation in Construction Near optimum selection of module configuration for efficient modular construction. doi:10.1016/j.autcon.2017.03.008.

Sánchez, S. 2012. Optimización estructural y topológica de estructuras morfológicamente no definidas mediante algoritmos genéticos. Universitat Politècnica de Valencia.

de Souza, R. R., L. F. Fadel Miguel, R. H. Lopez, L. F. F. Miguel, and A. J. Torii. 2016. A procedure for the size, shape and topology optimization of transmission line tower structures. *Eng. Struct.* 111:162–184. doi:10.1016/j.engstruct.2015.12.005. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2015.12.005>

Termosolar. 2009. PS20 mayor planta termosolar comercial del mundo con tecnología de torre, de 20 MW de potencia. 7–10.

Terrain, L. 2014. La planta solar mas grande del mundo. METALOCUS. Available from: <https://www.metalocus.es/es/noticias/la-planta-solar-más-grande-del-mundo>

Tessari, R. K., H. M. Kroetz, and A. T. Beck. 2017. Performance-based design of steel towers subject to wind action. *Eng. Struct.* 143:549–557. doi:10.1016/j.engstruct.2017.03.053. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2017.03.053>

Wang, H., W. Yu, and G. Chen. 2017. Computer-Aided Design An approach of topology optimization of multi-rigid-body. *Comput. Des.* 84:39–55. doi:10.1016/j.cad.2016.12.002.

Zhu, M., Y. Yang, J. K. Guest, and M. D. Shields. 2017. Topology optimization for linear stationary stochastic dynamics: Applications to frame structures. *Struct. Saf.* 67:116–131. doi:10.1016/j.strusafe.2017.04.004. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.strusafe.2017.04.004>

Zwick, D., M. Muskulus, and G. Moe. 2012. Iterative optimization approach for the design of full-height lattice towers for offshore wind turbines. *Energy Procedia.* 24:297–304. doi:10.1016/j.egypro.2012.06.112. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2012.06.112>

# EFECTO DE LA CONTAMINACIÓN CON GASOLINA EN LAS PROPIEDADES GEOTÉCNICAS DE UNA ARCILLA EXPANSIVA

---

Effect of gasoline contamination on the geotechnical  
properties of an expansive clayey soil

Norma Patricia Curiel Iñiguez<sup>1\*</sup>,  
Christian Eduardo Hernández Mendoza<sup>2</sup>

<sup>1</sup>División de Investigación y Posgrado, Facultad de Ingeniería,  
Universidad Autónoma de Querétaro, Cerro de las campanas S/N,  
Santiago de Querétaro, Querétaro, 76010, México.

<sup>2</sup>CONACYT- División de Investigación y Posgrado, Facultad de Ingeniería,  
Universidad Autónoma de Querétaro, Cerro de las campanas S/N,  
Santiago de Querétaro, Querétaro, 76010, México.

\*Autor de correspondencia  
nopacu.14@gmail.com



## RESUMEN

El sector de los hidrocarburos se ha convertido en la actividad más importante para el desarrollo económico en todo el mundo, esto ha causado un incremento en las emergencias ambientales causadas por el derrame accidental de hidrocarburos en el suelo, que en el caso de suscitarse puede afectar sus propiedades mecánicas. El objetivo de este artículo consistió en determinar el efecto de la contaminación con gasolina en las propiedades geotécnicas de una arcilla expansiva extraída de un predio ubicado en el estado de Querétaro, para lo cual se determinó su gravedad específica, granulometría y límites de Atterberg del suelo en su estado natural y contaminado. En los resultados se pudo observar una ligera disminución en la gravedad específica y cambios en la granulometría que se asocian a un proceso de oxidación del suelo debido a su interacción con la gasolina. De igual modo, dicho proceso afectó el comportamiento mecánico del suelo, esto se vio reflejado en la modificación de los límites de consistencia del suelo contaminado con respecto a lo observado en el suelo natural. Sin embargo, dichos cambios no tuvieron un impacto significativo en la inicial clasificación de acuerdo al Sistema Unificado de Clasificación de Suelos.

### Palabras Clave:

geotecnia ambiental, suelo contaminado, hidrocarburos, propiedades geotécnicas, suelo expansivo.

## ABSTRACT

Hydrocarbon sector has become as the most important activity for the economic development around the world, causing an increase in the environmental emergencies due to oil spills which can affect the mechanical properties of soils. Thus, the objective of this paper was to determine the effect of gasoline contamination on the geotechnical properties of an expansive clayey soil, obtained

from a place located in the state of Querétaro, Mexico, by determining its specific gravity, granulometry and Atterberg limits in both natural and contaminated condition. The results obtained showed a decrease in the specific gravity and changes in the granulometry of soil that were associated with an oxidation process due to the soil-gasoline interaction. Also, such process affected the mechanical behavior of the expansive soil observed by the modification of the Atterberg limits of the contaminated soil in comparison with those observed for the natural soil. Nevertheless, this did not have a significant impact on its initial Unified Soil Classification System.

### Keywords:

environmental geotechnics, contaminated soil, gasoline, soil index properties, expansive soil.

## 1. INTRODUCCIÓN

La infraestructura de la industria petrolera, integrada por pozos, baterías de separación, refinerías, centrales de almacenamiento y bombeo y redes de ductos, posee riesgos inherentes de fugas, lo cual, en caso de suscitarse, representaría un impacto negativo hacia el ambiente (Ortíz Brito et al., 2003). Debido al aumento en la demanda mundial de productos derivados del petróleo se han incrementado las actividades de extracción, refinamiento y transporte de los hidrocarburos, esto provoca que se incremente el riesgo de contaminación del suelo debido a los derrames de hidrocarburos (Pusadkar and Bharambe, 2014).

Existen muchas maneras mediante las cuales el contaminante puede llegar al suelo, como son las fugas provocadas por daños en tuberías o en las instalaciones de transporte de petróleo, accidentes en los tanques, procesos de perforación y corrosión en los tanques, derrames en los talleres mecánicos durante la reparación y el mantenimiento a los automóviles y maquinaria de construcción, etcé-



tera (Nasehi et al., 2016; Sabat and Mohanta, 2017).

La contaminación del suelo por hidrocarburos es una de las mayores preocupaciones en materia ambiental en México, debido a que los accidentes relacionados con las tomas clandestinas o al mal estado de las instalaciones han llegado a contaminar grandes porciones de terreno (Pérez et al., 2006). En el estado de Querétaro se han llegado a registrar diversas fugas en los ductos de Petróleos Mexicanos que pasan por la entidad (Armas, 2010; Arreola, 2011; Sin Embargo, 2012; Notimex, 2012; Valdez, 2014; Quadratin, 2015a; Quadratin, 2015b; AM de Querétaro, 2016; Romero, 2017) esto ha generado diversas emergencias ambientales en este estado.

Actualmente se sabe que la contaminación de los suelos, provocado por fugas de hidrocarburos, afecta algunas de sus propiedades físicas, químicas y mecánicas, además de estar asociados a muchos problemas ambientales (Pusadkar and Bharambe, 2014; Nasehi et al., 2016). Aunque se han hecho muchos esfuerzos por estudiar las repercusiones de la contaminación de los suelos con hidrocarburos, la mayoría de los estudios efectuados se han centrado únicamente en la variable ambiental y se ha puesto poca atención en el efecto en las propiedades geotécnicas de los suelos contaminados (Pusadkar and Bharambe, 2014; Nasehi et al., 2016).

Martínez M. y López S. (2001) y Bian et al. (2016) analizaron suelos arcillosos contaminados con diferentes hidrocarburos y observaron un cambio aparente en la distribución del diámetro de las partículas del suelo debido a su contaminación. Ambos autores reportan que la granulometría del suelo tendió a hacerse más gruesa debido a la formación de agregados de mayor tamaño, mientras que el contenido de arcillas tendió a disminuir conforme se incrementó la concentración del contaminante.

Rahman et al. (2010) observaron que, en dos

suelos contaminados con diferentes concentraciones de aceite de motor, tanto el límite líquido como el límite plástico presentaron una reducción en comparación con los suelos no contaminados. Un comportamiento similar reportaron Joseph y Hari (2015), quienes estudiaron el efecto de la contaminación en un suelo laterítico, una arena y una arcilla contaminados con diésel al 8%, 12%, 16% y 20% del peso de suelo seco y totalmente saturados. Asimismo, Joseph y Hari (2015) reportaron que el índice de plasticidad en los suelos contaminados ensayados disminuyó respecto a los suelos naturales. En contraste, Pradeepan et al. (2016), quienes estudiaron una arcilla contaminada con diésel al 0%, 4%, 8%, 12% y 16% del peso seco del suelo, observaron que tanto el límite líquido, como el límite plástico y el índice de plasticidad de suelo incrementan con el aumento en el contenido de diésel en el suelo.

Akinwumi et al. (2014) analizaron una arcilla de baja compresibilidad contaminada con diferentes concentraciones de petróleo crudo y encontraron que, al incrementar la concentración del contaminante en el suelo, se presentó una disminución de su gravedad específica en comparación con los valores registrados para el suelo sin contaminar. Echeverri-Ramírez et al. (2015) estudiaron el efecto en las propiedades ingenieriles de un suelo limoso de alta compresibilidad contaminado con gasolina y encontraron que tanto el tamaño de partícula del suelo, como la gravedad específica, el volumen de vacíos, el grado de saturación y la humedad natural no presentaron cambios significativos. Asimismo, mencionan que, a pesar de que se presenta un cambio en los valores de los límites de consistencia del suelo, su contaminación con gasolina no influyó en su clasificación SUCS (por las siglas de Sistema Unificado de Clasificación de Suelos).

Huang y Lu (2014) estudiaron una arcilla contaminada con diésel y petróleo crudo en diferentes porcentajes (i.e., 0%, 1%, 3%, 6% y



ción aumenta la complejidad de su estudio (Huang and Lu, 2014), así como la dificultad de su manejo para fines de construcción (Sabat and Molinari, 2017), y obtuvieron 12% del peso del suelo seco) y presentaron cambios significativos para niveles de concentración del petróleo menores del 3%, su límite plástico disminuyó ligeramente y su índice de plasticidad no tuvo cambios importantes. El estudio de los cambios en las propiedades de los suelos finos contaminados con mayores concentraciones de diésel, Huang y Lu (2014) encontraron que tanto el límite líquido como el límite plástico del suelo disminuyeron y el índice de plasticidad tuvo un aumento no significativo.

Esta falta de conocimiento es la que ha llevado a que en la Universidad Autónoma de Querétaro se realicen estudios en caminados a la botanilla de la alteración en las propiedades geotécnicas y mecánicas en suelos Liu et al. (2015) observaron que, al contaminar una arcilla con diésel, el contenido de agua de la arcilla se redujo y que tanto su límite líquido como su límite plástico disminuyeron conforme se incrementó la concentración del contaminante en el suelo. Nasahi et al. (2012) estudiaron el efecto de la contaminación con gasóleo en una arcilla de baja compresibilidad (CL) un limo de baja compresibilidad (ML) y una arena bien graduada (SP) con diferentes concentraciones de contaminante y observaron en un microscopio electrónico de barrido de emisión de campo, obteniendo algunas partículas de arcilla y limo, observando una disminución en los valores de floculación, mientras que los límites de Atterberg mostraron un incremento en el límite líquido y el límite plástico tanto en la arcilla (CL) como en el limo (ML) así como una disminución en el índice plástico cuando se incrementaba el porcentaje de contaminante. En la revisión de la información relativa al estudio de los suelos contaminados son pocos los enfocados al estudio de los suelos finos y dentro de ellos, prácticamente no se dispone de información para el caso de los suelos expansivos. Además de que para el año 2011 de acuerdo a las estadísticas, se tiene un registro de 58 sitios contaminados en el estado de Querétaro (SEMARNAT, 2012). Los suelos expansivos son suelos problemáticos naturalmente por lo que su contamina-

contaminados con gasolina no se pudieron obtener y el límite líquido del suelo contaminado con diésel disminuyó, mientras que el límite plástico no se pudo obtener, se midió la capacidad de retención de hidrocarburo en el suelo, concluyendo que el suelo tiene mayor retención con el agua que con la gasolina y el diésel, lo que causó una disminución en la succión del suelo.

Así, en este trabajo, continuando con la iniciativa en esta área de investigación en la Universidad Autónoma de Querétaro, se evaluó el efecto de la contaminación con gasolina en las propiedades geotécnicas de un suelo expansivo, empleando para ello una arcilla expansiva extraída de un predio ubicado en el estado de Querétaro, mediante la determinación de su gravedad específica, granulometría y límites de Atterberg del suelo en su estado natural y contaminado.

## 2. METODOLOGÍA

### 2.1 Materiales

#### 1) Suelo

La muestra del suelo se extrajo de un lugar ubicado en el estado de Querétaro en el cual ya se confirmó previamente que el suelo encontrado ahí corresponde a una arcilla expansiva que tiene una clasificación SUCS de arcilla de alta compresibilidad (CH). Es importante señalar que el sitio de muestreo no está contaminado, ni se contaminó durante la realización de este estudio.

#### 2) Gasolina

La gasolina usada para este estudio fue gasolina Magna la que se adquirió en una estación de gasolina perteneciente a Petróleos Mexicanos (PEMEX).

### 2.2 Métodos

#### 1) Muestreo

Se realizó un pozo a cielo abierto a una profundidad de 2.75 m. Se tomaron muestras

alteradas, las cuales fueron transportadas al laboratorio en sacos, una muestra inalterada y algunas muestras fueron tomadas en bolsas para obtener la humedad natural del suelo. Después de transportarse al laboratorio las muestras de suelo alteradas fueron secadas al aire libre, se realizó la homogenización del suelo y se disgregaron las partículas cuidando solo disgregar terrones y no rocas y se procedió a la obtención de sus propiedades geotécnicas.

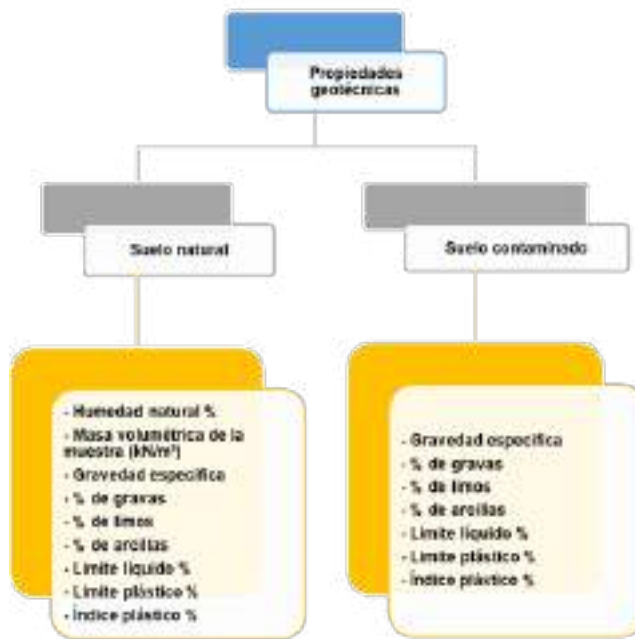
### 2) Contaminación del suelo

La contaminación del suelo se realizó de forma segura y controlada. El suelo se secó en el horno durante un período de 48 horas para asegurar que estaba seco. Después del secado, el suelo se pesó, se disgregó y se procedió a realizar su contaminación de manera manual. Este procedimiento se seleccionó debido a que se mejora la distribución del contaminante en el suelo en comparación con el proceso de lixiviación del contaminante a través del suelo (Ratnaweera y Meegoda, 2006), además de que permite representar el efecto de la contaminación a largo plazo (Meegoda y Rajapakse, 1993). El porcentaje de contaminación elegido para este estudio es el correspondiente a la humedad natural del suelo. Se guardó el suelo contaminado en bolsas de plástico para evitar lo más que fuera posible la pérdida de contaminante. Se dejó reposar el suelo con el contaminante durante un período de 3 semanas, en este periodo se movía el suelo dentro de las bolsas para que el contaminante se impregnara lo mayor posible en el suelo. A pesar de que se ha indicado que basta con que se exponga a los suelos secos a la acción de los contaminantes durante una semana para que su concentración se equilibre (Meegoda et al., 1990), en este caso se amplió este periodo para favorecer el efecto de envejecimiento del suelo. Después del periodo de reposo se procedió a realizar las pruebas correspondientes sobre el suelo contaminado.



## 2.3 Pruebas realizadas

En la Figura 1 se muestran las pruebas que se realizaron en el suelo natural y el suelo contaminado, y en la Tabla 1 se indican las normas que se emplearon para la obtención de las propiedades del suelo. Se utilizaron los métodos estandarizados para suelos naturales para obtener las propiedades del suelo contaminado, esto se hace debido a que aún no existen métodos para la obtención de propiedades en suelos contaminados.



**Figura 1.** Pruebas a realizar en el suelo natural y el suelo contaminado.

Propiedad	Símbolo	Unidad	Valor
Humedad natural	$\omega$	%	33.16
Relación de vacíos	$e$	Adimensional	0.97
Porosidad	$n$	%	49.29
Grado de saturación	$G_s$	%	87.95
Masa volumétrica de la muestra ( $\text{kN/m}^3$ )	$\gamma_m$	$\text{kN/m}^3$	17.16

**Tabla 1.** Normas y procedimientos empleados para la obtención de las propiedades geotécnicas.

## 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Tabla 2 se muestran las relaciones volumétricas y gravimétricas del suelo en estado natural obtenidas de la muestra inalterada, así como la humedad natural.

Propiedad	Procedimiento base
• Humedad natural (%)	- ASTM 2216-10
• Masa volumétrica de la muestra ( $\text{kN/m}^3$ )	- ASTM C128-12
• Gravedad específica	
• % de gravas	- ASTM D 1140-06
• % de limos	- ASTM C 136-06
• % de arcillas	- ASTM D 422-98
• Límite líquido (%)	
• Límite plástico (%)	- ASTM D 4318-10
• Índice plástico (%)	

**Tabla 2.** Relaciones gravimétricas y volumétricas del suelo en estado natural.

El suelo se contaminó con gasolina hasta obtener una concentración equivalente a la humedad natural del suelo, correspondiente al 33.16% del peso del suelo seco. Después de pasar el tiempo de reposo de 3 semanas, se obtuvo el porcentaje de gasolina secando el suelo en el horno a una temperatura de  $110 \text{ }^\circ\text{C} \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$  obteniendo que 5.87% de gasolina fue lo que se retuvo en el suelo.

En la Tabla 3 se muestran los valores de las propiedades geotécnicas obtenidas en el suelo natural y en el suelo contaminado.

La gravedad específica del suelo natural, así como del suelo contaminado, se obtuvo mediante la utilización de un matraz calibrando con agua destilada y se usó agua destilada para la prueba. La gravedad específica del suelo contaminado se obtuvo de dos maneras, sometiendo al suelo contaminado a secado y utilizado el peso después de secado para los cálculos y con el suelo contaminado sometándolo directamente para a prue-

ba, utilizando como peso del suelo para los cálculos el peso del suelo contaminado menos el peso correspondiente al porcentaje del contaminante, para ambos casos se obtuvo el mismo resultado en la prueba.

La granulometría del suelo se realizando un lavado por la malla No. 200 recuperando material que pasa la malla para la prueba del hidrómetro y secando el materia que se retuvo para realizar el análisis granulométrico. En la Figura 2 se muestra el comportamiento de la curva granulométrica del suelo contaminado y no contaminado en el cual se puede observar que el comportamiento granulométrico entre el suelo natural y el contaminado no muestra una diferencia marcada, de la misma forma esto se puede corroborar con los valores de % de grava, % de arena, % de limo y % de arcilla mostrados en la Tabla 3.

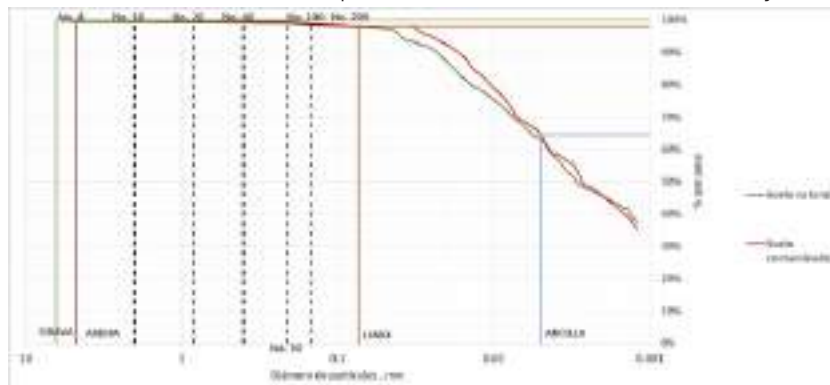
Empero, si se logra apreciar que el suelo contaminado tiende a incrementar el contenido de partículas finas, específicamente se observa un incremento en el contenido de

arcillas. Este resultado concuerda con lo reportado por Martínez M. y López S. (2001) y por Bian et al. (2016) quienes indican que la granulometría presenta una modificación en la cantidad de arenas, limos y arcillas. Este cambio en composición granulométrica del suelo se puede atribuir al efecto que tiene el contaminante sobre las partículas del suelo. Esto, pudo afectar el comportamiento químico de los limos presentes en el suelo, debido a la oxidación del suelo, por lo que una parte de ellos se transformaron en arcillas. Este efecto químico se ve reflejado también en la reducción de la gravedad específica del suelo debido al cambio en su estructura. Esta reducción de la gravedad específica de los sólidos del suelo concuerda con lo reportado por Martínez M. y López S. (2001), Akinwumi et al., (2014) y Pusadkar y Bharambe (2014); sin embargo, difiere con lo observado por Echeverri et al. (2015) quienes usaron un limo de alta compresibilidad contaminado con gasolina y no se presentaron cambios significativos en la gravedad específica.

**Tabla 3.** Propiedades geotécnicas del suelo contaminado y natural.

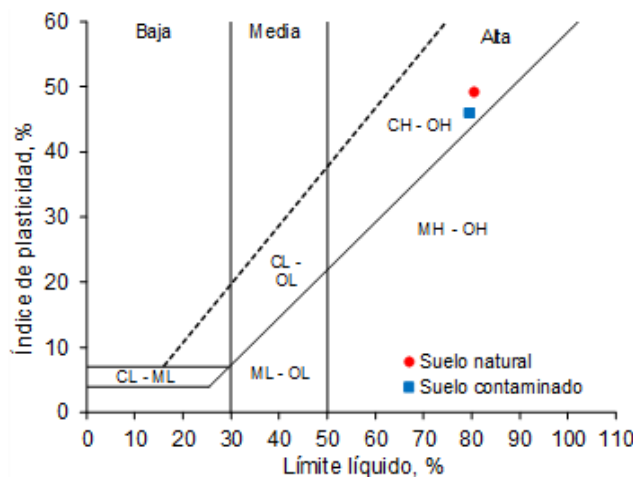
Propiedad	Símbolo	Unidad	Suelo natural	Suelo contaminado
Gravedad específica	$G_s$	Adimensional	2.599	2.531
Gravas	---	%	0.48	0.03
Arenas	---	%	1.44	1.74
Limos	---	%	35.24	33.69
Arcillas	---	%	62.84	64.54
Límite líquido	LL	%	80.74	79.69
Límite plástico	LP	%	31.60	33.72
Índice plástico	IP	%	49.14	45.97
Actividad de las arcillas	A	Adimensional	0.78	0.71

**Figura 2.** Distribución del tamaño de partícula del suelo no contaminado y contaminado.





Respecto a los límites de consistencia se determinó que el suelo natural presentó un índice plástico mayor a 25%, lo cual indica que el suelo tiene un alto potencial expansivo. Asimismo, el suelo natural presenta una actividad comprendida en el rango de 0.75 a 1.25, por lo que se puede clasificar como una arcilla con actividad normal y un potencial de volumen medio, por lo que probablemente se trata de una illita (Crespo, 1979). En el caso del suelo contaminado se observó que los valores del límite líquido y el índice plástico disminuyeron respecto a lo obtenido para el suelo natural. Este comportamiento del suelo concuerda con lo observado por Echeverri et al. (2015). De igual forma, la actividad de la arcilla contaminada se redujo respecto a lo observado para la arcilla natural. Esto implica que el efecto de oxidación química también repercutió en el comportamiento mecánico del suelo contaminado, generando una estabilización temporal debido a la acción del contaminante; es decir, la contaminación del suelo provocó un mecanismo químico-mecánico que alteró sus propiedades ingenieriles.



**Figura 3.** Clasificación SUCS del suelo no contaminado y contaminado.

En la Figura 3 se tiene la carta de plasticidad SUCS ASTM D2487 en la cual se ubican el suelo en estado natural y el suelo contaminado, en donde se puede observar que, independientemente de su estado, el suelo

se clasifica como una arcilla de alta compresibilidad. Esto implica que la contaminación del suelo no afecta su clasificación, tal como lo indica Echeverri et al. (2015).

#### 4. CONCLUSIONES

La contaminación de una arcilla expansiva con gasolina, extraída de un predio ubicado en el estado de Querétaro, presentó los siguientes efectos en sus propiedades geotécnicas. El suelo contaminado con gasolina mostró una ligera disminución en su gravedad específica la cual se puede deber a que la densidad de la gasolina es menor a la del agua, y esta ligera disminución es debido a las moléculas de gasolina que quedan en las partículas del suelo durante la prueba, también se observó una modificación en la distribución de las partículas gruesas y finas que componen el suelo debido a un efecto de oxidación causado por la adición del contaminante al suelo natural seco. Dicho proceso químico afectó el comportamiento mecánico del suelo, lo cual se reflejó en la variación de los límites de consistencia del suelo contaminado respecto a su condición natural, el límite líquido no presenta una variación significativa, sin embargo en el límite plástico se puede apreciar un incremento en el valor, esto puede deberse a que la gasolina cubre las partículas de arcilla y no permite que las moléculas de agua lleguen al agua de doble capa difusa, por lo que provoca que se necesite más agua para que el suelo obtenga propiedades plásticas. No obstante, este proceso químico-mecánico no alteró la clasificación SUCS del suelo.

#### AGRADECIMIENTOS

Se agradece al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo brindado mediante los proyectos CONACYT 266106 y CONACYT 270161, así como por la beca otorgada a Norma Curiel para la realización de sus estudios de maestría.

## REFERENCIAS

Akinwumi, I. I., D. Diwa, and N. Obianigwe. 2014. Effects of crude oil contamination on the index properties, strength and permeability of lateritic clay. *Int. J. Appl. Sci. Eng. Res.* 3:816–824. doi:10.6088/ijasr.030400007 [28 de Abril 2017].

AM de Querétaro (28 de julio de 2016). Localizan fuga en una toma clandestina en Corregidora. Obtenido de: <http://amqueretaro.com/queretaro/2016/07/28/localizan-fuga-en-una-toma-clandestina-en-corregidora> [28 de Abril 2017].

Antonio Zárate, Y. 2014. Evaluación del impacto de la contaminación con diésel en las propiedades mecánicas de un suelo arcilloso. Universidad Autónoma de Querétaro.

Armas, P. d. (27 de septiembre de 2010). Querétaro detecta fuga en ducto de PEMEX. Plaza de Armas. Obtenido de [http://www.plazadearmas.com.mx/noticias/archivo/2010/09/27/queretaro\\_detecta\\_fuga\\_ducto\\_pemex\\_50058\\_1045.html](http://www.plazadearmas.com.mx/noticias/archivo/2010/09/27/queretaro_detecta_fuga_ducto_pemex_50058_1045.html) [28 de Abril 2017].

Arreola, J. (12 de septiembre de 2011). Reportan nuevo derrame de diesel en Querétaro. *El Universal*. Recuperado de <http://archivo.eluniversal.com.mx/notas/792901.html> [28 de Abril 2017].

Bian, H., S. Liu, G. Cai, and Y. Chu. 2016. Influence of diesel pollution on the physical properties of soils. *Japanese Geotech. Soc. Spec. Publ.* 2(14):552–555.

Echeverri-Ramírez, Ó., Y. Valencia-González, D. E. Toscano-Patiño, F. A. Ordoñez-Muñoz, C. Arango-Salas, and S. Osorio-Torres. 2015. Geotechnical behavior of a tropical residual soil contaminated with gasoline. *Comportamiento geotécnico de un suelo residual tropical contaminado con gasolina*. *DYNA*. 82(190):31–37.

Huang, F. X., and H. J. Lu. 2014. Experiment study on the atterberg limits of clay contaminated by oil. *Electron. J. Geotech. Eng.* 19:3037–3046.

Joseph, J., and G. Hari. 2015. Investigation on the Effects of Hydrocarbon Spillage on Soil Properties. *Int. J. Eng. Res. Technol.* 4:136–140.

Liu, Z., S. Liu, and C. Yi. 2015. Engineering property test of kaolin clay contaminated by diesel oil. *J. Cent. South Univ.* 22(12):4837–4843. doi:10.1007/s11771-015-3035-3.

Martínez M., V. E., and F. López S. 2001. Efecto de hidrocarburos en las propiedades físicas y químicas de suelo arcilloso. *Tierra Lat.* 19(1):9–17.

Nasehi, S. A., A. Uromeihy, M. R. Nikudel, and A. Morsali. 2016. Influence of Gas Oil Contamination on Geotechnical Properties of Fine and Coarse-Grained Soils. *Geotech. Geol. Eng.* 34:333–345. doi:10.1007/s10706-015-9948-7.

Ortíz Brito, O., I. Ize, and A. Gavilán. 2003. La restauración de suelos contaminados con hidrocarburos en México. *Gac. Ecológica*. 69:83–92.

Pérez, G. C., R. A. Iturbe, and R. M. S. Flores. 2006. Cambio en las propiedades físicas de un suelo contaminado con hidrocarburos debido a la aplicación de una tecnología de remediación. *AIDIS*. 1(1):1–10.

Pradeepan, V., V. Reethi, and N. Namiatha. 2016. Effect of Diesel Contamination on Geotechnical Properties of Clay Near Bpcl. *Int. J. Civ. Eng. Technol.* 7:152–158. Available from: <http://www.iaeme.com/IJCIET/index.asp%5Cnhttp://www.iaeme.com/IJCIET/issues.asp%5Cnwww.jifactor.com%5Cnhttp://www.iaeme.com/IJCIET/issues.asp?JType=IJCIET&VType=7&IType=2>

Pusadkar, S. S., and P. S. Bharambe. 2014. Performance of Petrol and Diesel Contaminated Black Cotton Soil. 3:536–539.

Quadratin. (16 de agosto de 2015a).



Junto al fraccionamiento La Estancia, se ubicó una fuga de alcantara los 25 m de altura. Quadratin Querétaro. Recuperado de <https://queretaro.quadratin.com.mx/Detectan-toma-clandestina-por-el-Libramiento-Surponiente/> [28 de Abril 2017].

Quadratin. (19 de junio de 2015b). Controlan derrame en ducto de Pemex. Quadratin Querétaro. Obtenido de <https://queretaro.quadratin.com.mx/Controlan-derrame-en-ducto-de-Pemex/>

Rahman, Z. A., U. Hamzah, M. R. Taha, N. S. Ithnain, and N. Ahmad. 2010. Influence of Oil Contamination on Geotechnical Properties of Basaltic Residual Soil. *Am. J. Appl. Sci.* 7:941–948. Available from: <http://scipub.org/fulltext/ajas/ajas77954-961.pdf>

Rodríguez, L. S. 2017. Impacto geotécnico de los derrames de diésel en suelos finos.

Romero M (6 de enero de 2017). Reportan fuga de diésel por robo a ducto de Pemex. Obtenido de <http://www.eluniversalqueretaro.mx/seguridad/06-01-2017/reportan-fuga-de-diesel-por-robo-ducto-de-pemex> [28 de Abril 2017].

Sabat, A. K., and S. Mohanta. 2017. Unconfined compressive strength of dolime fine stabilized diesel contaminated expansive soil. *Int. J. Civ. Eng. Technol.* 8:01–08.

SEMARNAT. 2012. Informe de la Situación del Medio Ambiente en México. Compendio de Estadísticas Ambientales. Indicadores Clave y de Desempeño Ambiental. México. Available from: [http://apps1.semarnat.gob.mx/dgeia/informe\\_12/pdf/Informe\\_2012.pdf](http://apps1.semarnat.gob.mx/dgeia/informe_12/pdf/Informe_2012.pdf)

Sin Embargo. (20 de marzo de 2012). Toma clandestina en Querétaro causa derrame de 4 metros de altura. Sin Embargo. Obtenido de <http://www.sinembargo.mx/20-03-2012/185907> [28 de Abril 2017].

Suárez, L. Y. C. 2015. Análisis comparativo de curvas de retención de suelos contaminados con gasolina y diésel. Universidad Autónoma de Querétaro.

Valdez, D. (13 de marzo de 2014). Moviliza a autoridades fuga en toma clandestina de Polotitlán. Quadratin. Obtenido de <https://edomex.quadratin.com.mx/Moviliza-a-autoridades-fuga-en-toma-clandestina-de-Polotitlan/> [28 de Abril 2017].



# AGRUPACIÓN JERÁRQUICA ASCENDENTE PARA LA DELIMITACIÓN DE REGIONES HOMOGÉNEAS APLICADA AL ANÁLISIS DE VARIABILIDAD ESPACIAL DE LA PRECIPITACIÓN EN LA REGIÓN HIDROLÓGICA MEXICANA 10

---

Hierarchical Agglomerative Clustering for delimitation of homogeneous regions and its application in the analysis of the spatial variability of precipitation in the Mexican Hydrological Region 10

R. Celic Reséndiz-Mendoza<sup>1\*</sup>, M. Alfonso Gutiérrez-López<sup>2</sup>

<sup>1</sup>División de Investigación y Posgrado de la Facultad de Ingeniería,  
Maestría en Ciencias en Hidrología Ambiental,  
Universidad Autónoma de Querétaro, Cerro de las campanas S/N,  
Santiago de Querétaro, Querétaro, 76010, México.

<sup>2</sup>Centro de Investigaciones del Agua, Universidad Autónoma de Querétaro,  
Cerro de las campanas S/N, Santiago de Querétaro, Querétaro, 76010, México.

\*Autor de correspondencia:  
rosacelic@hotmail.com



## RESUMEN

El diseño de obras hidráulicas requiere de información confiable que permita al investigador estimar con precisión el evento de diseño. Sin embargo, la escasez de estaciones de aforo tanto en calidad como en representatividad es un problema común para la planeación y diseño de estas obras. Una solución viable es la aplicación de técnicas regionales, las cuales constan de tres etapas: la primera consiste en aglomerar los objetos que cumplan con un grado de similitud entre ellos, la segunda en la selección de una distribución de frecuencias regional y la última en la transferencia de información de la variable hidrológica de interés de los sitios aforados hacia el sitio no aforado. En este trabajo se realizó un análisis regional en su primera etapa en la región hidrológica número 10. El análisis consistió en la delimitación de regiones homogéneas para un conjunto de 46 estaciones climatológicas por medio de una agrupación jerárquica ascendente empleando el método de Ward. Se obtuvieron tres regiones homogéneas con 24, 8 y 14 estaciones a partir de cinco variables descriptivas de la zona como precipitación media anual, longitud, latitud, altitud de la estación de aforo y distancia al océano. El método utilizado se validó por técnicas de verificación de homogeneidad estadística regional. Los valores obtenidos de 0.169, 0.169 y 0.220 para las tres regiones, no sobrepasaron el valor límite de 0.3 necesario para delimitar factiblemente la variabilidad espacial de la precipitación. Por lo tanto, para la siguiente etapa del análisis la elección de un sitio no aforado podría ser en cualquiera de las tres regiones homogéneas, ya que la técnica utilizada es viable frente a la escasez de registros climatológicos permitiendo la transferencia de información de las estaciones intra-grupo hacia el punto de interés.

**Palabras Clave:** análisis regional, métodos jerárquicos aglomerativos, zonas no aforadas, método de Ward.

## ABSTRACT

The design of hydraulic structures requires reliable information for the researcher to accurately estimate an event design. However, a common problem in the planning and design of such hydraulic structures is the scarcity of quality and representativeness of gauging stations. A plausible solution is the application of regional techniques consisting of three stages: The first one agglomerate objects that satisfy a degree of similarity between them, the second one includes the selection of a regional frequency distribution and the last one transfer subsequent information of the analyzed hydrological variable from the gaged site to the ungaged site. In the present work, a regional analysis in its first stage was developed for the hydrological region 10. The analysis consisted in the delimitation of homogeneous regions using the Agglomerative Hierarchical Technique and the Ward's method to a set of 46 climatological stations. Three homogeneous regions with 24, 8 and 14 stations were obtained from five descriptive variables of the zone as mean annual precipitation, longitude, latitude, gaged elevation and ocean distance. The method was validated by statistical verification techniques of regional homogeneity. The resulting values of 0.169, 0.169 y 0.220 in each region did not exceeded the limit value of 0.3 required to feasibly delimit the spatial variability of precipitation. As result, in the study of the next stage of the regional analysis the choice of an ungaged site could be in any of the three homogeneous regions since the used technique is a feasible method to transfer information from gaged station to any ungaged point from scarce climatological records.

**Keywords:**

regional analysis, hierarchical ascending agglomerative, homogeneity, ungaged zones, Ward's method.

## 1. INTRODUCCIÓN

En el diseño de obras hidráulicas se requiere información histórica de variables climatológicas e hidrométricas, sin embargo, un problema común en países en desarrollo y subdesarrollo es la falta de estaciones de aforo (Saf, 2009). Esta situación es visible desde la etapa de planeación, cuando el hidrólogo se enfrenta a la escasez de estaciones de aforo así como de estaciones que están parcialmente aforadas, es decir, no hay continuidad en los registros históricos en las variables de interés que permitan realizar una estimación confiable del evento de diseño.

Cuando la información histórica de la variable de interés está disponible, es aplicable un Análisis de Frecuencias en el sitio (AF) que permita al hidrólogo conocer la magnitud del evento de diseño dado un periodo de retorno. Si por el contrario, se presenta ausencia en la cantidad y calidad de los registros de las variables, es necesario aplicar un Análisis Regional de Frecuencias (ARF), proceso que además requiere de la estimación de las características descriptivas de la zona de estudio (Mishra *et al.*, 2009).

Una opción viable a este problema, es la transferencia de información por medio de la agrupación de regiones homogéneas, formadas por las estaciones aforadas y la transferencia de información hacia las zonas no aforadas, es decir, la opción viable consiste en aplicar técnicas de regionalización hidrológica.

La regionalización hidrológica consiste en la delimitación de regiones homogéneas dentro de un espacio que se supone heterogéneo debido a la gran cantidad de registros históricos y a la variabilidad de sus características tanto morfológicas como climatológicas, donde por medio de la construcción de ecuaciones regionales creadas a partir de las variables más representativas de la zona, es posible la transferencia de informa-

ción hidrológica pudiendo resultar en zonas sin continuidad geográfica, suponiendo un comportamiento hidrológico semejante.

La regionalización hidrológica es un conjunto de ecuaciones, que permite estimar eventos hidrológicos en sitios con registros escasos o nulos, a sitios que permanecen en condiciones similares, es decir, dentro de una misma región homogénea la respuesta hidrológica es similar. Para comprender qué significa la regionalización hidrológica es necesario identificar todos aquellos procedimientos y técnicas que se ven involucrados en la regionalización y que contribuyen en la estimación precisa de la variable de interés, pero que de manera aislada no cumplen con el propósito de regionalizar un espacio. Las técnicas y procesos antes mencionados constan de cartografía, ponderación espacial, análisis múltiple de frecuencias, interpolación espacial y análisis de extremos.

Mencionado lo anterior, todo proceso de regionalización requiere de seis pasos integrales: 1) caracterizar la variabilidad (espacio-temporal) de las mediciones, 2) identificar las variables que describen el fenómeno a estimar, 3) seleccionar un índice de proximidad, 4) identificar regiones hidrológicamente homogéneas, 5) construir ecuaciones regionales de transferencia de información, y 6) verificar la validez de las ecuaciones regionales.

Actualmente la investigación sobre métodos regionales de transferencia de información hidrológica ha cobrado importancia, donde a la fecha investigadores siguen buscando propuestas de mejora con el propósito de proporcionar métodos eficaces de estimación de crecientes de diseño (Wazneh *et al.*, 2015).

De forma general, el análisis regional consiste de tres aspectos principales: uno radica en la delimitación de regiones homogéneas, el segundo en la determinación de un mé-



todo de estimación regional para diferentes frecuencias de inundación y el tercero en la transferencia de la información hidrológica hacia un sitio de interés (Ouarda *et al.*, 2006; Malekinezhad *et al.*, 2011; Gado y Nguyen, 2016). En la primera etapa, se supone que toda la zona de interés tiene un comportamiento heterogéneo, por lo que en la delimitación de las regiones es necesario dividir la zona en sub-regiones hidrológicas homogéneas (Dodangeh *et al.*, 2014). El objetivo del agrupamiento de las variables hidrológicas es el análisis de la variabilidad espacial de la similitud de características hidrológicas, como las propiedades geográficas, físicas y estadísticas de las observaciones (Sarhadi y Modarres, 2011) que permitan la agrupación de regiones con la misma respuesta hidrológica de manera que la extrapolación de los registros para los efectos de cuantiles de diseño sea más precisa (Nathan y McMahon, 1990; Yu *et al.*, 2002).

Los atributos empleados para la delimitación de regiones homogéneas bajo el enfoque del ARF se clasifican en cinco tipos (Rao y Srinivas, 2006): i) características fisiográficas de la cuenca, ii) ubicación geográfica, iii) medidas de tiempo en la respuesta hidrológica, como el tiempo pico, tiempo de retraso, iv) variables meteorológicas y, v) estadísticos descriptivos en el sitio; aunque este último punto está bajo la observación al ser no recomendado por el hecho de emplear los estadísticos exclusivamente para la revisión de la homogeneidad de las regiones formadas (Hosking y Wallis, 1997; Núñez *et al.*, 2016). En el procedimiento de regiones homogéneas una actividad fundamental consiste en la selección de variables; Nathan y McMahon (1990) proponen como primer paso el análisis de las variables que se relacionen con el objeto de estudio, así como la ponderación las mismas.

En el procedimiento de la formación de regiones homogéneas no se ha desarrollado una metodología universal ya que existen

distintos métodos aplicables, que pueden ser en regiones contiguas geográficamente, regiones no contiguas geográficamente y vecinos hidrológicos (Ouarda *et al.*, 2001; Ouarda *et al.*, 2006; Wazneh *et al.*, 2015). Uno de los métodos más populares y ampliamente usados es el método del análisis de aglomerados (Wazneh *et al.*, 2015), con algoritmos de agrupamiento divisivo o jerárquico ascendente, con este último se obtienen grupos no contiguos espacialmente (Nathan y McMahon, 1990, Burn *et al.*, 1997).

El propósito del análisis de agrupamiento consiste en colocar objetos en grupos de manera que los objetos en cada grupo tengan la mayor similitud entre sí, mientras que los objetos en diferentes grupos tengan la máxima disimilitud (Soltani y Reza, 2006), es decir, cada grupo homogéneo creado en cada paso iterativo, contiene la menor varianza de variables (la disimilitud más pequeña). Se han propuesto varios métodos de ligadura para el análisis de agrupamiento jerárquico, es decir, los criterios de agrupación de los objetos que incluyen la ligadura sencilla, media y completa y el método de mínima varianza de Ward. Existen diversos estudios que involucran la comparación y análisis de los distintos métodos de agrupación, siendo el método de Ward el más empleado con resultados óptimos (Nathan y McMahon, 1990; Sarhadi y Modarres, 2011).

Este método tiene muchas ventajas en el análisis regional ya sea en estudios de caudales máximos y mínimos, análisis de variabilidad espacial de precipitación, análisis de sequías y clasificación de cuencas, por mencionar algunos (Kaufman y Rousseuw, 1990; Nathan y McMahon 1990; Nathan y McMahon, 1992; GREHYS, 1996; Baeriswyl y Rebetz, 1997; Laaha y Blöschl, 2006; Sanborn y Bledsoe, 2006; Soltani y Reza, 2006; Kahya *et al.*, 2008; Lim *et al.*, 2009; Sarhadi y Modarres, 2011; Dodangeh *et al.*, 2014).

En este trabajo se utilizó una técnica de delimitación de agrupación jerárquica ascendente de las estaciones aforadas, con el objetivo de caracterizar la distribución espacial de la precipitación en la Región Hidrológica 10 en Sinaloa, México. El estudio constó de tres partes fundamentales. Primero, la revisión de datos por medio de estadística descriptiva. Segundo, la aplicación de la técnica de agrupación para definir zonas hidrológicamente homogéneas, y tercero, la validación de la homogeneidad regional a través de una prueba estadística.

## 2. METODOLOGÍA / MATERIALES Y MÉTODOS

### 2.1. Selección de variables

El primer aspecto importante en la metodología regional es el análisis de las variables disponibles, en el análisis regional se emplean dos tipos de datos, las características de la zona de estudio o los valores estadísticos de las series de tiempo de las variables hidro-meteorológicas (Campos-Aranda, 2014), aunque este último punto está bajo observación al ser no recomendado por emplear estadísticos exclusivamente para la revisión y medición de la homogeneidad de las regiones formadas (Hosking y Wallis, 1997; Núñez et al., 2016).

The World Meteorological Organization (WMO) recomienda un periodo de 30 años de información mínima para estudios hidro-meteorológicos, sin embargo, diversos estudios enfocados en la regionalización de la precipitación indican la selección de registros que cumplen con un periodo de 10 a 20 años (GREHYS, 1996; Soltani y Reza, 2006; Ouarda et al., 2006; Campos-Aranda, 2014).

### 2.2. Estadística descriptiva

Del total de estaciones que cumplen con la calidad y representatividad de registros históricos, se deben aplicar estadísticos des-

criptivos a cada una de las estaciones climatológicas. Para cada estación climatológica con  $n$  registros los resultados estadísticos de la muestra son media  $\bar{x}$ , varianza sesgada  $S^2$ , coeficiente de asimetría  $C_s$ , curtosis  $K$ , desviación estándar  $S$  y coeficiente de variación  $C_v$  (Ecs. (1-6)) (Chow et al., 1994):

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

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

$$C_s = \frac{n^2 \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^3}{(n-1)(n-2)S^3} \quad (3)$$

$$K = \frac{n^3}{(n-1)(n-2)(n-3)} \cdot \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^4}{\left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2\right)^2} \quad (4)$$

$$S = \sqrt{S^2} \quad (5)$$

$$C_v = \frac{S}{\bar{x}} \quad (6)$$

### 2.3. Método de delimitación de regiones homogéneas

Ward (1963) desarrolló un método de agrupación por medio de la similitud entre los miembros que componen un grupo respecto a las características de los mismos, por medio de una agregación jerárquica de  $N$  miembros que se aglomeran debido al grado de similitud hasta formar  $J$  grupos homogéneos, el proceso concluye hasta llegar a un solo grupo. Para ello es necesario el cálculo de la distancia euclidiana, así como de la inercia entre centros de grupos.

Para la aplicación del método, se supone que se cuenta con  $P$  puntos en el espacio, los  $P$  puntos corresponden a las estaciones aforadas, de las cuales se calcula la matriz de distancia euclidiana al cuadrado, es decir con un índice de Minkowski de 2 (consultar Apéndice), de la siguiente forma:



$$(d(i, k))^2 = \left[ \sum_{j=1}^d |x_i - \bar{x}|^2 \right] \quad (7)$$

El método requiere una matriz inicial de inercia entre todos los P puntos del espacio, tomando en consideración el peso de las variables, así como los centros de gravedad de cada elemento

$$\Delta I_{\min} = (h, h') = \frac{m_h m_{h'}}{m_h + m_{h'}} d^2(g_h, g_{h'}) \quad (8)$$

donde m son las masas de cada elemento h y h', g son los centros de gravedad de cada elemento h y h', h y d<sup>2</sup> es el cuadrado de la distancia euclidiana entre los centros de gravedad. El centro de gravedad, g, se define de la siguiente forma:

$$g = \frac{g_h m_h + g_{h'} m_{h'}}{m_h + m_{h'}} \quad (9)$$

Después de la primera iteración, la agregación jerárquica de elementos considera la inercia adquirida en la formación de las estaciones añadidas.

$$\Delta I_{j,r} = \frac{1}{m_j + m_r} [(m_i + m_r) \Delta I_{i,r} + (m_{i'} + m_r) \Delta I_{i',r} - m_r \Delta I_{i,r}] \quad (10)$$

donde j=i+i', es la agregación del elemento, r es el elemento objetivo con respecto al cual se calcula la inercia, de la misma forma m<sub>j</sub> será el total del peso de la variable debido a la suma de las masas m<sub>i</sub>+m<sub>i'</sub> y m<sub>r</sub> es el peso del elemento r.

En cada paso iterativo se elige como nueva agrupación a aquellos elementos que tengan una menor inercia entre sí, por lo que para el nuevo elemento creado se calcula la inercia que se genera a partir de ese grupo formado respecto a los elementos restantes del análisis, el proceso termina hasta que todos los P puntos queden unidos en un solo grupo.

## 2.4. Validación de homogeneidad

Las pruebas de homogeneidad regional se fundamentan en los estadísticos de la muestra, para lo cual de cada región delimitada se estiman la media, desviación estándar y coeficiente de variación (Nobert et al., 2014) de la siguiente forma:

$$\bar{Q}_i = \frac{\sum_{j=1}^{n_j} Q_{ij}}{n_j} \quad (11)$$

$$\sigma_i = \frac{\sum_{j=1}^{n_j} (Q_{ij} - \bar{Q}_i)^2}{n_j - 1} \quad (12)$$

$$CV_i = \frac{\sigma_i}{\bar{Q}_i} \quad (13)$$

donde  $\bar{Q}_i$  es el caudal medio en el sitio i [m<sup>3</sup>/s], Q<sub>ij</sub> es la tasa del caudal de la estación i en la región j en [m<sup>3</sup>/s],  $\sigma_i$  es la desviación estándar y CV<sub>i</sub> es el coeficiente de variación.

La media regional y la desviación estándar se calculan de la siguiente forma (Nobert et al., 2014):

$$\bar{CV} = \sum_{i=1}^N \frac{CV_i}{N} \quad (14)$$

$$\sigma_{cv} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (CV_i - \bar{CV})^2}{N}} \quad (15)$$

donde N es el número de sitios dentro de la región homogénea.

Teniendo los anteriores parámetros se estima la siguiente expresión con la cual se puede declarar si una región es homogénea o no lo es (Sine y Ayalew, 2004; Nobert et al., 2014):

$$CC = \frac{\sigma_{cv}}{\bar{CV}} \leq 0.3 \quad (16)$$

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 3.1. Caso de estudio

La República Mexicana está dividida en 13 Regiones Hidrológico-Administrativas y en 37 regiones hidrológicas. La zona de estudio seleccionada corresponde a la Región Hidrológica número 10 (RH10) y pertenece a la Región Hidrológico-Administrativa III, denominada Sinaloa y Pacífico Norte, respectivamente.

La RH10 (ver Fig. 1) se encuentra localizada al noroeste de México, tiene una superficie de 103055.56 km<sup>2</sup>, pertenecen a esta zona la totalidad del estado de Sinaloa y parte de los estados de Durango, Chihuahua y Sonora. Las principales corrientes superficiales las representan los ríos: Fuerte, Sinaloa, Mocorito, Culiacán, San Lorenzo, Elota, Piaxtla, Quelite, Presidio, Baluarte, Cañas, Acaponeta y San Pedro.

Mediante la metodología expuesta anteriormente se realizó la extracción de datos de precipitación mensual y anual por medio del extractor rápido de información climatológica, ERIC, creado por la Comisión Nacional del Agua (IMTA, 1998; Ouarda *et al.*, 2008). Se consideraron todas las estaciones que cumplieran con un periodo de registro mínimo de 10 años, además de que se eliminaron todas aquellas estaciones que contenían datos faltantes, por lo que un total de 46 estaciones climatológicas cumplieron con el periodo de información definido como aceptable. Para la caracterización fisiográfica de la zona de estudio se extrajeron datos del Instituto Nacional de Estadística y Geografía, INEGI. En la Tabla 1 se muestran las variables empleadas y sus principales características.

**Tabla 1.** Variables empleadas en la delimitación de regiones homogéneas.

Variable	Características de la variable				
	Descripción	Mínimo	Máximo	Unidades	Fuente
Precipitación media anual (PMA)		298.57	1458.78	mm	SMN*
Latitud		23.03	27.40	m	INEGI
Longitud		-105.75	-109.18	m	INEGI
Altitud de la estación de aforo		2.00	2700.00	m	INEGI
Distancia al océano		1.00	224.00	km	INEGI*

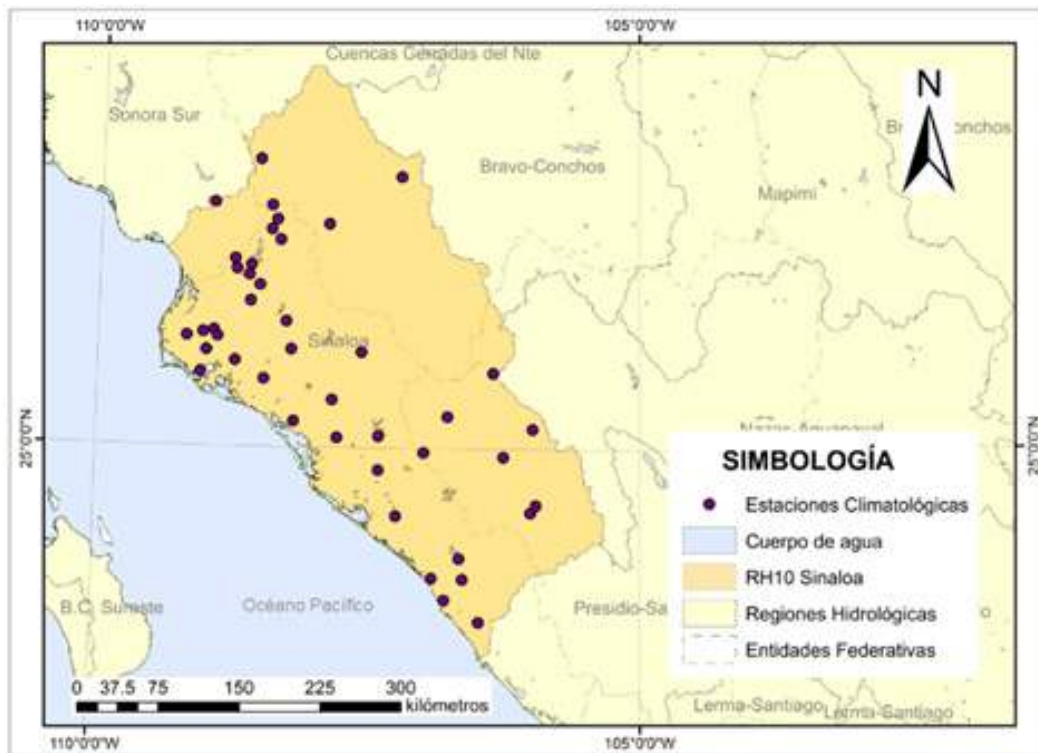


Figura 1. Mapa de ubicación de la Región Hidrológica 10, Sinaloa, México.

### 3.2. Datos estadísticos descriptivos por cada estación

Para cada una de las estaciones climatológicas se aplicaron las ecuaciones descritas en la metodología, en la Tabla 2 se muestra el nombre y clave de las estaciones, así como sus características descriptivas: latitud, longitud, altitud de la estación de aforo, distancia de la estación climatológica al océano y la precipitación media anual (PMA).

### 3.3. Delimitación de regiones homogéneas

Por medio del método de Ward, se realizó una clasificación jerárquica ascendente, donde las estaciones fueron agrupadas en tres regiones distintas. En la

Figura 2 se puede observar la agrupación espacial de las estaciones, mientras que en la Figura 3 se muestra el procedimiento iterativo, en el que se puede ver cómo las estaciones se fueron aglomerando hasta la formación de un solo grupo.

Se definieron tres agrupaciones homogéneas para la región hidrológica (

Tabla 3), la característica de este método es que permite al investigador definir qué cantidad de grupos requiere en función de la distancia de ligadura, para lo cual en este desarrollo se definió una distancia de 30 km, donde el grupo con mayor cantidad de elementos fue el formado para la región 1, que se localiza a una altitud intermedia con respecto a las demás regiones (Figura 4), además, las estaciones cumplen con el criterio de homogeneidad que establece que la relación regional entre la desviación estándar con el coeficiente de variación medio no deben exceder un valor de 0.3, por lo que se verifica la homogeneidad en cada zona (Tabla 3).

En el resultado de las tres regiones homogéneas, al graficar las variables correspondientes a altitud y precipitación media anual, es posible observar que pese a que se incluyeron en el análisis variables de proximidad



Clave	Nombre de la estación	Latitud (°)	Longitud (°)	Altitud (m)	n	D(km)	$\bar{x}$ (mm)	S(-)	$\sigma_s(-)$	K(-)	$\sigma_v(-)$
25001	Acatitán. San Ignacio	24.08	-106.65	130.00	24	30.00	796.77	205.86	0.772	3.882	0.258
25003	Ahome. Ahome	25.92	-109.18	33.00	22	25.00	342.42	119.50	0.552	3.762	0.349
26002	Alamos. Alamos	27.03	-108.95	389.00	20	64.00	683.32	176.68	1.225	7.476	0.259
25007	Bamícori. El Fuerte	26.35	-108.52	152.00	25	76.00	714.08	171.69	0.469	3.337	0.240
25002	Agua caliente. Choix	26.82	-108.42	180.00	16	90.00	734.81	213.33	-0.429	8.992	0.290
10018	El Cantil. Papasquiario	24.93	-106.25	2100.00	32	133.00	1458.78	292.33	0.618	4.234	0.200
26017	Casanate. Álamos	26.57	-108.75	137.00	15	52.00	658.32	145.53	-0.487	4.222	0.221
8167	Chínipas. Chínipas	27.40	-108.53	480.00	18	121.00	979.93	297.23	0.154	3.443	0.303
25017	Choix pueblo. Choix	26.73	-108.33	270.00	13	95.00	814.96	236.65	1.121	7.951	0.290
25011	Concordia	23.27	-106.05	138.00	26	37.00	832.31	201.93	0.601	4.168	0.243
25080	Ruíz Cortines. Guasave	25.72	-108.73	35.00	19	36.00	390.01	130.59	1.955	8.067	0.335
25050	La Cruz. Eloba	23.92	-106.90	23.00	17	4.00	499.05	239.78	1.234	5.876	0.481
25015	Culiacán. Culiacán	24.82	-107.40	40.00	24	52.00	677.65	170.13	1.288	5.112	0.251
25021	Dimas. San Ignacio	23.73	-106.78	12.00	19	4.00	672.73	298.81	0.756	4.874	0.444
25023	El Fuerte. El Fuerte	26.43	-108.67	84.00	23	64.00	638.67	185.54	0.890	5.598	0.291
25038	Guasave. Guasave	25.57	-108.47	20.00	13	30.00	492.74	176.70	1.183	6.086	0.359
25058	Las Habitas. Rosario	23.03	-105.75	80.00	16	35.00	1159.96	224.29	0.907	5.015	0.193
10031	Huahuapan. San Dimas	24.53	-105.95	1150.00	18	122.00	781.94	180.76	0.674	3.650	0.231
25044	Huites. Choix	26.90	-108.37	268.00	26	103.00	828.39	230.66	1.194	5.199	0.278
25045	Ixpalino. San Ignacio	23.91	-106.62	80.00	25	33.00	774.77	184.25	0.751	3.042	0.238
10071	San Miguel de Lobos	25.17	-105.98	2410.00	22	167.00	875.19	208.43	0.799	4.467	0.238
25025	El Mahome. El Fuerte	26.52	-108.60	120.00	25	65.00	617.62	159.96	-0.127	3.443	0.259
25065	Mochicahui. El Fuerte	25.97	-108.93	22.00	19	47.00	298.57	81.01	-0.477	3.937	0.271
25116	Los Mochis. Ahome	25.80	-109.00	14.00	18	21.00	379.02	140.36	0.781	7.074	0.370
8124	San Ignacio. Batopilas	26.87	-107.88	355.00	19	144.00	636.86	144.92	0.702	3.275	0.228
25070	Pánuco. Sinaloa	23.42	-105.93	450.00	18	51.00	1402.99	342.56	-0.284	5.687	0.244
25068	Palo dulce. Choix	27.02	-108.47	237.00	24	105.00	960.99	244.98	0.771	3.366	0.255
25071	Pericos. Mocorito	25.08	-107.78	35.00	24	50.00	655.23	178.64	0.797	3.669	0.273
25030	El Playón. Sinaloa	25.22	-108.18	2.00	18	7.00	611.78	145.50	0.312	4.786	0.238
25031	El Quelite. Mazatlán	23.55	-106.47	60.00	25	13.00	709.17	155.96	0.691	5.236	0.220
25076	Quila. Culiacán	24.43	-107.23	45.00	15	27.00	557.05	150.99	2.262	9.079	0.271
25077	Rosa Morada. Moco rito	25.40	-107.83	300.00	14	55.00	750.89	177.35	1.317	7.982	0.236
25032	El Sabino(El Sabinito)	26.48	-108.73	123.00	17	56.00	555.50	185.77	0.110	3.242	0.334
10079	Sianori. Topia	25.27	-106.78	850.00	18	129.00	1131.53	258.87	0.943	5.250	0.229
25090	Sinaloa de Leyva. Sin.	25.82	-108.22	80.00	12	68.00	554.60	215.51	1.166	9.650	0.389
8138	Siquirichic. Guacho chic	27.27	-107.22	2120.00	19	224.00	493.19	154.29	1.235	8.404	0.313
25086	San Miguel Zapotitlán	25.95	-109.03	38.00	19	35.00	436.58	129.69	1.405	8.548	0.297
25088	Santa Rosa. El Fuerte	25.92	-108.90	28.00	19	52.00	415.93	134.77	1.736	11.204	0.324
25093	Surutato. Badiraguato	25.80	-107.57	1400.00	23	110.00	1263.09	231.47	0.819	4.017	0.183
10082	Tamazula. Tamazula	24.97	-106.98	250.00	38	90.00	989.43	248.95	0.237	2.965	0.252
10026	El Tarahumar. Tepehuanes	25.63	-106.35	2560.00	20	188.00	895.82	219.94	0.925	4.770	0.245
25053	La Tina. El Fuerte	26.22	-108.60	180.00	23	68.00	636.27	210.32	0.952	3.525	0.331
25098	Topolobampo. Ahome	25.62	-109.05	34.00	14	1.00	310.47	137.26	0.895	10.005	0.442
10042	Las Truchas. San Dimas	24.47	-106.00	2700.00	24	116.00	1197.76	226.13	0.637	2.991	0.189
25054	La Vainilla. Sinaloa	26.05	-108.27	185.00	23	90.00	793.18	152.01	0.212	2.985	0.192
25033	El Varejonal. Badiraguato	25.10	-107.40	160.00	25	78.00	908.89	250.47	0.459	3.662	0.278

Donde n: Longitud de registro, D: distancia al océano.

Tabla 2. Características de las estaciones climatológicas de la Región Hidrológica 10.



espacial así como físicas, la correspondencia entre la variabilidad espacial de la precipitación y la altitud están considerablemente ligadas (Figura 4).

En la Tabla 4 se muestra el resumen de los valores regionales, donde el incremento del valor de la precipitación se presentó en la región donde las estaciones climatológicas se encontraban a una mayor distancia al océano (149.00 km) y a una mayor altitud (1911.00 msnm), mientras que en las zonas más cercanas a la costa (28.00 km) el valor de la precipitación fue menor, es decir, con valores de PMA de 1012.00 y 481.00 mm, respectivamente, mientras que el grupo 1 se situó a una altitud intermedia de los dos grupos anteriores (204.00 km) con una PMA de 797.00 mm.

#### 4. CONCLUSIONES

En el diseño de obras hidráulicas se requiere de información confiable y precisa, sin embargo, la escasez de estaciones de aforo es un reto común para el hidrólogo, una opción viable es la delimitación de regiones homogéneas, que permite agrupar las estaciones que cumplen con calidad, cantidad y representatividad de datos específicos.

En el presente estudio se delimitó a las zonas homogéneas dentro de la región hidrológica 10, denominada Sinaloa, para un conjunto de 46 estaciones climatológicas que cumplieron con el requisito de calidad de datos. Se obtuvieron tres regiones homogéneas, en las cuales al graficarlas sobre el espacio es factible visualizar la distribución espacial

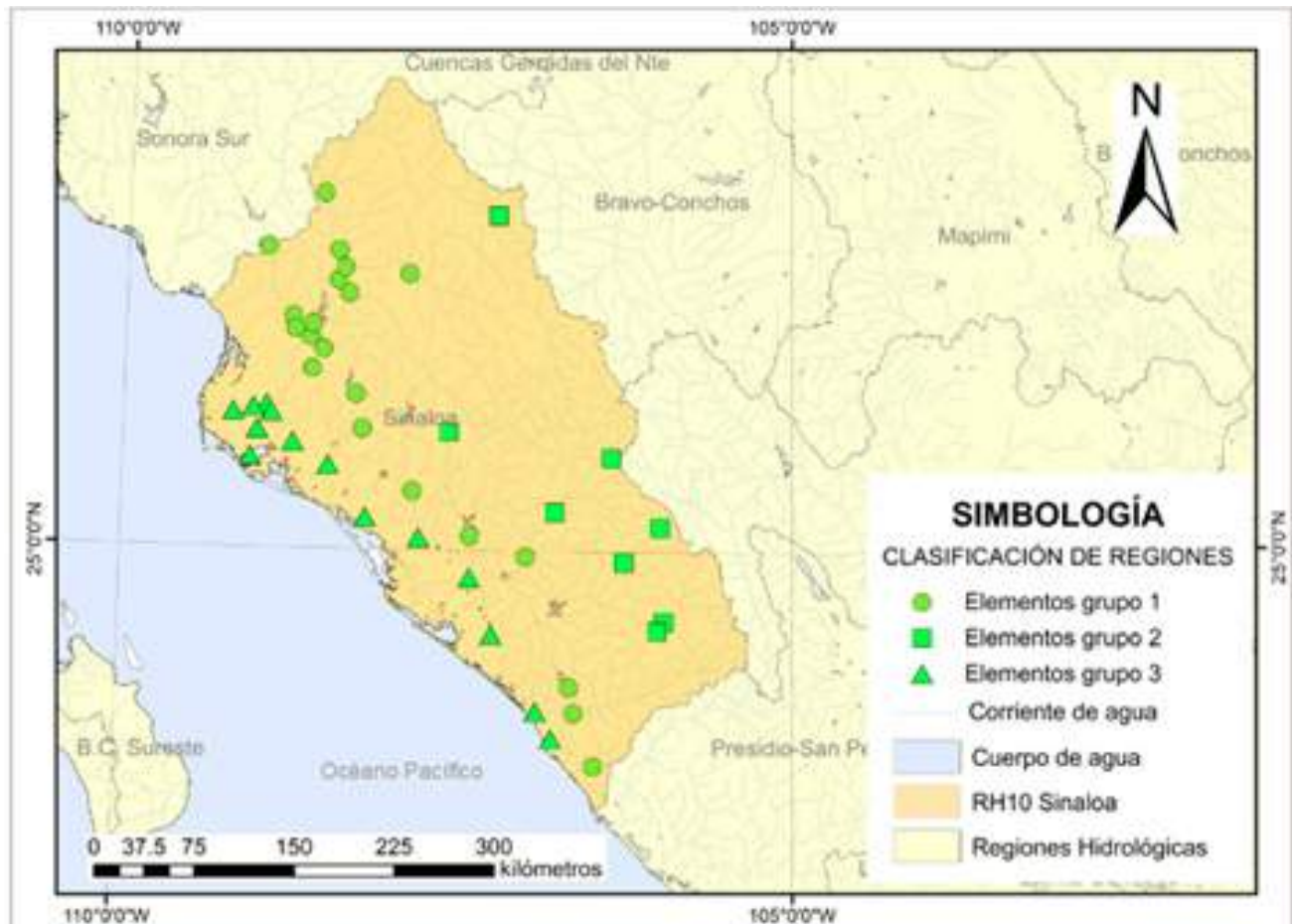


Figura 2. Agrupación de regiones homogéneas en la Región Hidrológica 10, Sinaloa

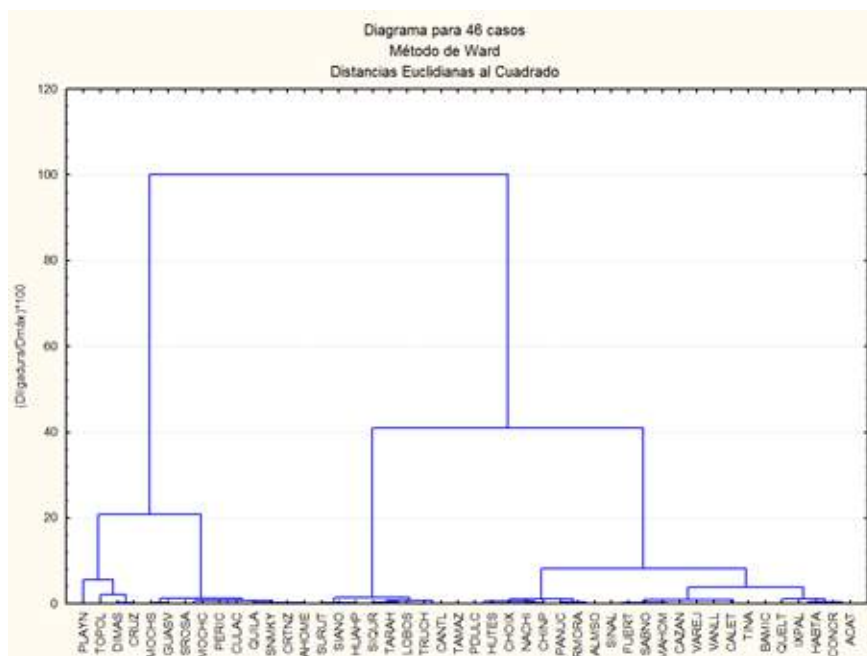


Figura 3. Agrupación jerárquica de las estaciones climatológicas mediante el método de Ward.

N	Región homogénea 1		Región homogénea 2	Región homogénea 3
1	MAHOM	ACAT	CANTL	AHOME
2	NACHI	ALMSO	HUAHP	CRTNZ
3	PANUC	BAMIC	LOBOS	CRUZ
4	PDULC	CALET	SIANO	CULAC
5	QUELT	CAZAN	SIQUR	DIMAS
6	RMORA	CHINP	SURUT	GUASV
7	SABNO	CHOIX	TARAH	MOCHC
8	SINAL	CONCR	TRUCH	MOCHS
9	TAMAZ	FUERT		PERIC
10	TINA	HABTA		PLAYN
11	VANLL	HUTES		QUILA
12	VAREJ	IXPAL		SNMKY
13				SROSA
14				TOPOL
N	24		8	14
CV	0.263		0.229	0.336
$\sigma_{cv}$	0.044		0.039	0.074
CC	0.169		0.169	0.220

Tabla 3. Resumen de las estaciones climatológicas



de la precipitación media anual, empleando para ello la técnica de clasificación jerárquica ascendente con método de ligadura de Ward, el cual permite la aglomeración de las estaciones a través de un algoritmo de inercia por medio de una ponderación de variables, donde las variables empleadas se normalizaron para evitar efectos de agrupación con diferentes escalas de medición.

El resultado final, mostró tres regiones que fueron agrupadas por proximidad espacial y por similitud física debido a las características de las estaciones de aforo, así como del valor de la precipitación. La técnica empleada se verificó a través de un método de validación, el cual permitió identificar si las regiones cumplen con la homogeneidad a través de estadísticos descriptivos regionales.

La presente metodología muestra un resultado satisfactorio, un paso consecutivo permitiría la transferencia de información hidrológica de la variable de interés hacia un punto espacial donde no se cuente con registro de información histórica, por lo que la presente metodología se recomienda en estudios tanto de análisis de distribución espacial de precipitación y en estudios relacionados a la transferencia de información hidrológica.

## APÉNDICE

El índice métrico de Minkowsky  $r$  es de la siguiente forma (Jain y Dubes, 1988):

$$d(i, k) = \left[ \sum_{j=1}^d |x_{i,j} - x_{k,j}|^2 \right]^{1/r} \quad (\text{A.1})$$

donde  $x_{i,j}$  y  $x_{k,j}$  es la  $j$ -ésima característica de la  $i$ -ésima y  $k$ -ésima configuración y  $r \geq 1$ . Hay tres principales índices que comúnmente son empleados y se mencionan a continuación:

La distancia euclidiana, con un índice de

Minkowski de 2, es decir,  $r=2$  es de la siguiente forma:

$$d(i, k) = \left[ \sum_{j=1}^d |x_{i,j} - x_{k,j}|^2 \right]^{1/2} \quad (\text{A.2})$$

Esta distancia tiene también la variante de la distancia Euclidiana al cuadrado:

$$(d(i, k))^2 = \left[ \sum_{j=1}^d |x_i - \bar{x}|^2 \right] \quad (\text{A.3})$$

## REFERENCIAS

Baeriswyl, P. A., y M. Rebetez. 1997. Regionalization of precipitation in Switzerland by means of principal component analysis. *Theor. Appl. Climatol.* 58:31–41.

Burn, D. H., Z. Zolt, y M. Kowalchuk. 1997. REGIONALIZATION OF CATCHMENTS FOR REGIONAL FLOOD FREQUENCY ANALYSIS. *J. Hydrol. Eng.* 2:76–82.

Campos-Aranda, D. F. 2014. Análisis Regional de Frecuencia de Crecientes en la región hidrológica no. 10 (Sinaloa), México. 2. Contraste de predicciones locales y regionales. *Agrociencia* 10:147–158.

Chow, V. Te, D. R. Maidment, y L. Mays. 1994. *Hidrología Aplicada*. Ed. McGraw-Hill. ISBN: 958-600-171-7

Gado, T. A., y V. Nguyen. 2016. Comparison of Homogenous Region Delineation Approaches for Regional Flood Frequency Analysis at Ungauged Sites. *J. Hydrol. Eng.* 21:1–10.

GREHYS. 1996. Presentation and review of some methods for regional flood frequency analysis. *J. Hydrol.* 186:63–84.

Hosking, J. R. M., y J. R. Wallis. 1997. *Regional Frequency Analysis: An approach based on L-moments*. Available from: <https://books.google.com.pe/>



books?hl=es&lr=&id=gurAnfB4nvUC&oi=fnd&pg=PP1&dq=Regional+frequency+analysis+an+approach+based+on+l-moments&ots=7Re17uu4PZ&sig=cQlo-BXfu6O-1BS3wGAj\_pUvSJYI#v=onepage&q&f=false

IMTA, 1998. Extractor rápido de información climatológica (ERIC II), CD, Mexico.

Jain, A.K., y Dubes, R.C., 1988. Algorithms for Clustering Data. Prentice-Hall, Englewood Cliff, NJ.

Kahya, E., S. Kalaycı, y T. C. Piechota. 2008. Streamflow Regionalization: Case Study of Turkey. *J. Hydrol. Eng.* 13:205–214.

Laaha, G., y G. Blöschl. 2006. A comparison of low flow regionalization methods-catchment grouping. *J. Hydrol.* 323:193–214.

Lim, Y. H., M. Asce, y D. L. Voeller. 2009. Regional Flood Estimations in Red River Using L -Moment-Based Index-Flood and Bulletin 17B Procedures. *J. Hydrol. Eng.* 14:1002–1016.

Malekinezhad, H., H. P. Nachtnebel, y A. Klik. 2011. Comparing the index-flood and multiple-regression methods using L-moments.

*Phys. Chem. Earth* 36:54–60. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.pce.2010.07.013>

Mishra, B. K., K. Takara, y Y. Tachikawa. 2009.

Integrating the NRCS Runoff Curve Number in Delineation of Hydrologic Homogeneous Regions. *J. Hydrol. Eng.* 14:1091–1097.

Nathan, R. J., y T. A. McMahon. 1990. Identification of homogeneous regions for the purposes of regionalisation. *J. Hydrol.* 121:217–238.

Nathan, R. J., y T. A. McMahon. 1992. Estimating Low Flow Characteristics in Un-

gauged Catchments. *Water Resour. Manag.* 6:85–100.

Nobert, J., M. Mugo, y H. Gadain. 2014. Estimation of design floods in ungauged catchments using a regional index flood method. A case study of Lake Victoria Basin in Kenya. *Phys. Chem. Earth* 67–69:4–11.

Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.pce.2014.02.001>

Núñez, J., M. Hallack-Alegría, y M. Cadena. 2016. Resolving regional frequency analysis of precipitation at large and complex scales using a bottom-up approach: The Latin America and the Caribbean Drought Atlas. *J. Hydrol.* 538:515–538.

Ouarda, T. B. M. J., C. Girard, G. S. Cavadas, y B. Bobée. 2001. Regional flood frequency estimation with canonical correlation analysis. *J. Hydrol.* 254:157–173.

Ouarda, T. B. M. J., J. M. Cunderlik, A. St-Hilaire, M. Barbet, P. Bruneau, y B. Bobée. 2006. Data-based comparison of seasonality-based regional flood frequency methods. *J. Hydrol.* 330:329–339.

Ouarda, T. B. M. J., K. M. Bâ, C. Diaz-Delgado, A. Cârsteanu, K. Chokmani, H. Ginguas, E. Quentin, E. Trujillo, and B. Bobée. 2008.

Intercomparison of regional flood frequency estimation methods at ungauged sites for a Mexican case study. *J. Hydrol.* 348:40–58.

Rao, R., y V. V. Srinivas. 2006. Regionalization of watersheds by hybrid-cluster analysis. *J. Hydrol.* 318:37–56.

Saf, B. 2009. Regional Flood Frequency Analysis Using L Moments for the Buyuk and Kucuk Menderes River Basins of Turkey. *J. Hydrol. Eng.* 14:783–794.

Sanborn, S. C., y B. P. Bledsoe. 2006. Predicting streamflow regime metrics for ungauged streams in Colorado, Washing-

ton, and Oregon. *J. Hydrol.* 325:241–261.

Sarhadi, A., y R. Modarres. 2011. Flood seasonality-based regionalization methods: A data-based comparison. *Hydrol. Process.* 25:3613–3624.

Sine, A., y S. Ayalew. 2004. Identification and Delineation of Hydrological Homogeneous Regions-The case study of Blue Nile River Basin, In: *Proceedings, Lake Abaya Research Symposium.*

Soltani, S. M., y Reza. 2006. *Journal of Spatial Hydrology* *Journal of Spatial Hydrology.* *J. Spat. Hydrol.* 6:1–14. Available from: [http://www.spatialhydrology.com/journal/paper/2006/small\\_hydel/paper\\_josh.rar](http://www.spatialhydrology.com/journal/paper/2006/small_hydel/paper_josh.rar)

Ward, J. H. 1963. Hierarchical Grouping to Optimize an Objective Function. *J. Am. Stat. Assoc.* 58:236. Available from: <http://www.jstor.org/stable/2282967?origin=crossref>

Wazneh, H., F. Chebana, y T. B. M. J. Ouarda. 2015. Delineation of homogeneous regions for regional frequency analysis using statistical depth function. *J. Hydrol.* 521:232–244. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.11.068>

Yu, P.-S., T.-C. Yang, y C.-W. Liu. 2002. A regional model of low flow for southern Taiwan. *Hydrol. Process.* 16:2017–2034. Available from: <http://doi.wiley.com/10.1002/hyp.399>



# **DISEÑO Y DESARROLLO DE PRUEBA DE CONFIABILIDAD PARA EL SISTEMA DE RODAMIENTO POR RUEDAS DE UNA SECADORA DE ROPA DOMÉSTICA**

---

Development and design of a reliability test for a rolling bearing system of a clothes dryer

Jesús Esqueda<sup>1</sup>, Eric Leonardo Huerta<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidad Autónoma de Querétaro, Cerro de las campanas S/N,  
Santiago de Querétaro, Querétaro, 76010, México.

\*Autor de correspondencia  
jesus.esqueda@mabe.com.mx



## RESUMEN

Este estudio está centrado en el diseño de una prueba de confiabilidad para el sistema de rodamiento por ruedas de secadoras de ropa domésticas. En el mercado actual, se encuentran secadoras de ropa que cuentan con un sistema de rodamiento asistido por ruedas, el cual tiene como propósito dar soporte al tambor o canasta, y servir como superficie de deslizamiento durante el funcionamiento de la secadora. La prueba que se propone es una evaluación acelerada de vida que considera, como factores de esfuerzo, la temperatura ambiente, la acumulación de pelusa, la carga de peso sobre el componente, la velocidad de giro del tambor, y el desalineamiento en el buje de las ruedas.

Los resultados obtenidos en la prueba muestran que, asumiendo un modelo de distribución Weibull, se espera una confiabilidad del 96.5%, con un nivel de confianza del 90%, en un periodo de 10 años. El experimento consideró la evaluación de 40 muestras probadas por 1600 horas bajo condiciones de esfuerzo definidas y simulando las 9.6 millones de revoluciones del tambor correspondiente a los 10 años de vida de una secadora.

### Palabras Clave:

Análisis de degradación, Confiabilidad, Factores de esfuerzo, Ruedas de rodamiento, Parámetro de prueba, Prueba de vida acelerada.

## ABSTRACT

This work focuses in the design of a reliability test for the roller bearing system in clothes dryers. Some modern clothes dryers feature roller bearing system, which serves as drum/basket support and provides a sliding surface during machine's operation. The proposed test is an accelerate life assessment based on temperature, load, spin speed, roller shaft's misalignment and lint accumulation as stress factors.

Results show that, assuming a Weibull distribution model, a 96.5% reliability is expected at ten years with a 90% confidence. The experiment includes forty samples tested during 1600 hours under stress and 9.6 million drum revolutions.

### Keywords:

Degradation analysis, Reliability, Stress factors, Rollers system, Test parameter, Accelerated life test.

## 1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, los fabricantes de electrodomésticos, principalmente de secadoras de ropa domésticas, requieren desarrollar productos de alta calidad que garanticen altos niveles de confiabilidad. Esto ha impulsado a las empresas a desarrollar métodos de prueba donde se someten dichos productos a condiciones de envejecimiento simuladas en laboratorio para determinar medidas que incrementen la confiabilidad de los sistemas, materiales y partes de los componen.

Los métodos precisados se conocen comúnmente como pruebas de vida convencionales, pruebas de vida aceleradas (ALT) y pruebas de degradación acelerada (ADT), los cuales consisten en someter a condiciones controladas al producto para caracterizar la degradación de sus funciones y sus efectos sobre la vida útil del mismo, y con esto, calcular la confiabilidad esperada con los usuarios finales.

Esta investigación se enfoca en el estudio de aquellos factores de esfuerzo que afectan de forma directa la confiabilidad del sistema de rodamiento por ruedas, como uno de los componentes que forman parte de la construcción de una secadora de ropa doméstica. En particular, el estudio tiene como objeto diseñar un método de prueba para evaluar de forma efectiva la confiabilidad del



sistema de rodamientos por ruedas en cuestión aplicando la metodología de pruebas de vida convencionales, ALT y ADT.

### 1.1. Marco teórico.

Es común que los fabricantes de todo tipo de productos lleguen a experimentar un mayor número de reclamos por garantías que el esperado, afectando de esta manera no sólo sus finanzas, sino también, su imagen frente a sus clientes. La causa más frecuente tiene que ver con omisiones o errores durante el proceso de evaluación de la confiabilidad de sus diseños (Meeker et al., 2009). En el proceso de desarrollo de un nuevo producto, se tiene una etapa conocida como diseño de prueba, y si ésta es omitida o no es diseñada correctamente, es muy probable tener como resultado una pobre calidad en el producto final, debido a que ciertas características de los modos de falla de interés no pudieron ser detectados (Yadav et al., 2006).

Como consecuencia de lo anterior, estos errores provocan la falta de inclusión de mecanismos de falla (para reproducir la mayor cantidad de modos de falla posibles) y una mala selección de niveles de esfuerzo en los factores usados durante la realización de una prueba de vida.

Hoy en día, la evaluación de los productos, a través del uso de técnicas tradicionales de pruebas de vida, es decir, por medio de monitorear solamente los tiempos de falla, no es suficiente para determinar su confiabilidad en tiempos razonables durante el proceso de diseño. Por lo que, con el fin de obtener resultados de confiabilidad en tiempos más cortos, investigadores han mezclado pruebas de vida convencionales con el uso de pruebas aceleradas (ALT) y pruebas de degradación acelerada (ADT) en el proceso de evaluación (De Carlo et al., 2014).

En cuanto a estudios recientes de pruebas aceleradas, se encuentran aquellos realiza-

dos por Escobar and Meeker (2006), quienes presentaron una revisión de los modelos utilizados en pruebas aceleradas, con el fin de determinar los niveles de estrés adecuados y entender la relación entre la vida normal y el sobre-esfuerzo de los componentes o productos evaluados.

A pesar que las pruebas ALT y ADT han sido aplicadas en distintos materiales, componentes, y productos para diferentes ramas de la industria, se tienen pocas referencias en cuanto a su aplicación en electrodomésticos. Entre los estudios que son de interés se encuentran el de Borgia et al. (2013) en donde se aborda el uso de pruebas aceleradas y consideraciones necesarias para su aplicación en los electrodomésticos, y como continuación de este estudio De Carlo et al. (2014) se enfocan particularmente en aplicar las pruebas aceleradas al sistema de oscilación (canasta, tina y el resto de los componentes involucrados en el sub ensamble) de una lavadora de ropa doméstica.

Con base en lo anterior, la información encontrada en la literatura no hace referencia a estudios previos que hagan referencia a la aplicación de pruebas de vida para el "sistema de rodamiento por ruedas", por lo que este estudio plantea una metodología en la aplicación de los principios de pruebas de vida al componente en cuestión, para posteriormente, demostrar su confiabilidad.

## 2. METODOLOGÍA / MATERIALES Y MÉTODOS

### 2.1. Antecedentes.

En la figura 1 se muestra el sistema de rodamiento por ruedas en una secadora. Está conformado por 4 ruedas fijadas a los soportes frontal y trasero, y sobre ellas descansa el tambor de la secadora.

En la Figura 2 se observa a detalle el sub-ensamble de una rueda, el cual consiste de 4

componentes conocidos como seguros, eje, buje de rodamiento, y el cuerpo de la rueda. Las ruedas giran sobre su eje debido a la transmisión de movimiento que ejerce el tambor cuando éste es accionado por el motor de la secadora.

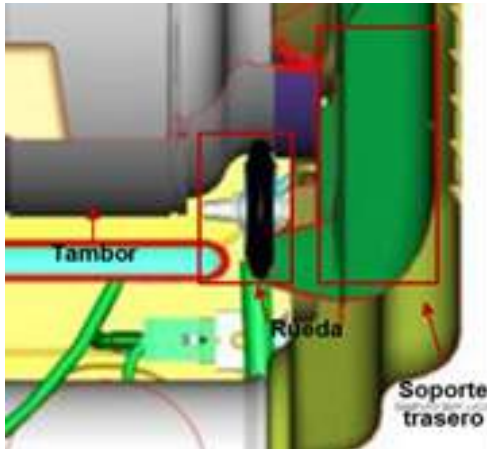


Figura 1. Estructura de sistema de rodamiento por ruedas.

Existen varios posibles modos de falla que pueden presentarse con los usuarios finales, tales como una rueda atascada, floja, ruidosa, desgastada, rota, etc. (de acuerdo a AMEF de diseño mostrado en la Figura 3). Los principales modos de falla en el sub-ensamble son "rueda desgastada" y "rueda rota". Se tiene registro que estos modos también se presentan en secadoras que se encuentran con el usuario final, es decir, en el campo. En la Figura 4 se presenta el gráfico de índice de fallas que se tiene actualmente para una secadora que se produce desde el año 2015.

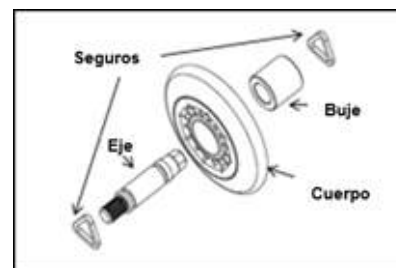


Figura 2. Estructura de sistema de rodamiento por ruedas.

AMEF (Análisis de Modo y Efecto de Falla)											
Parte o bloque del DBE	Función en el DBE	Modo de Falla Potencial - Resultante en la pérdida de la función	Causa potencial del Modo de Falla	Ocurriencia	Efecto potencial del modo de falla en el producto o usuario final	Gravedad	Prevención planeada para causa	Detección planeada para la Causa (Validación)	Detección	S C N	R P R
Seguros de rueda	Definir desplazamiento de rueda sobre su eje	Seguros: Lanza deposición con riesgo de su salida del eje de rotación	Seguro no ajustado correctamente	3	Vibración en tambor de secadora durante giro	7	Plan de control	Pruebas de funcionamiento al final de línea	2	21	42
Seguros de rueda	Definir desplazamiento de rueda sobre su eje	Seguros: Lanza deposición con riesgo de su salida del eje de rotación	Seguros con dimensiones fuera de especificación	1	Vibración en tambor de secadora durante giro	7	Plan de control con proveedor	Inspecciones: análisis de materiales	3	7	21
Cuerpo de rueda	Proveer superficie de contacto con tambor de secadora	Rueda desgastada	Acumulamiento de ciclos de secado (desgaste mecánico)	5	Ruido y vibración por fallado superficie de contacto	8	Curva de gama de contacto especificada en plano (Nispano SPS)	Pruebas confiabilidad a nivel sistema WLT (water injection Wettest)	6	40	240
Cuerpo de rueda	Proveer superficie de contacto con tambor de secadora	Rueda desgastada	Deshidratación de material de lana y envejecimiento por temperatura ambiente	4	Ruido y vibración por fallado superficie de contacto	8	Curva de gama de contacto especificada en plano (Nispano SPS)	Pruebas confiabilidad a nivel sistema WLT (water injection Wettest)	7	32	224
Cuerpo de rueda	Proveer superficie de giro con tambor de secadora	Rueda rota	Exceso de carga en tambor	3	Ruido y secadora atascada	8	Detección por software	Ninguna	10	24	240
Cuerpo de rueda	Proveer superficie de giro con tambor de secadora	Rueda rota	Fractura en lana de rueda por exceso de temperatura	2	Ruido y secadora atascada	10	Detección de temperaturas altas por software	Validación de SW en prueba final de línea	3	20	80

Figura 3. Extracto de AMEF de diseño para el sistema de rodamiento por ruedas en la secadora.

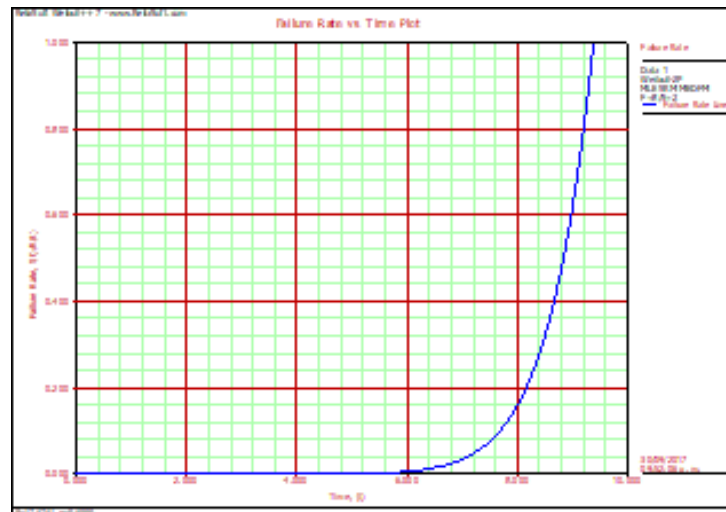


Figura 4. Curva del índice de fallas para el sistema de rodamiento por ruedas en la secadora.

## 2.2. Diseño de prueba de vida acelerada.

Es conocido que los principales modos de falla en los sistemas de rodamientos metálicos o plásticos pueden ser simulados considerando tanto parámetros físicos, tales como: el nivel de esfuerzo por sobre carga, la temperatura de operación, el número de revoluciones o velocidad de giros; así como parámetros materiales: el tipo de metal o plástico seleccionado, y los acabados de las superficies de contacto (Sadeghi et al., 2009).

Tomando en cuenta lo arriba mencionado se define que, para reproducir los modos de falla detectados anteriormente en campo, se tuvo que escoger como parámetros de prueba la superficie de contacto, la temperatura, la carga, la acumulación de pelusa y la velocidad del tambor que transmite el giro a las ruedas, tal y como se muestra en el diagrama de parámetros de la Figura 5.

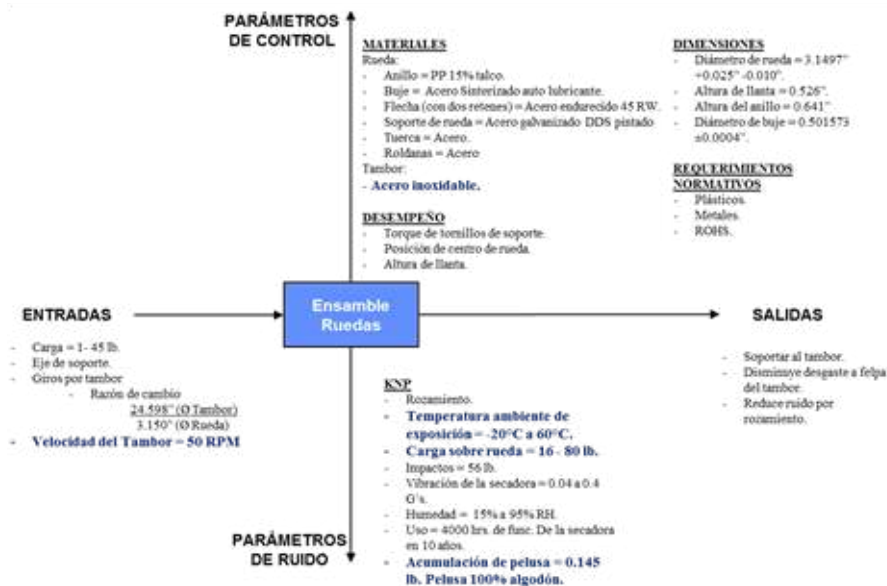


Figura 5. Diagrama de parámetros del sistema de rodamiento por ruedas.

Superficie de contacto	Temperatura	Carga sobre rueda	Acumulación de pelusa	Velocidad de tambor	Activaciones	Tamaño de muestra	Tiempo de prueba
Acero inox.	60°C - 70°C	25 lb.	0.145 lb.	100 RPM	Paros cada 0.4 hrs.	40 muestras	1600 hrs.

**Tabla 1.** Plan de prueba de vida acelerada para sistema de rodamientos por ruedas.

Con base en los parámetros de control y ruido detectados se define un diseño de prueba, en donde se consideran valores que sean capaces de llevar a un esfuerzo considerable durante la prueba de vida acelerada. En la Tabla 1 se muestran los valores de cada uno de los elementos de prueba propuestos.

En donde el tiempo de prueba está dado por:

El total de revoluciones es calculado de acuerdo a la cantidad de giros de tambor que se esperan durante el uso de una secadora doméstica en condiciones de uso normal.

El objetivo de confiabilidad esperado para la validación del diseño del sistema de rodamiento por ruedas, de acuerdo a especificaciones, fue del 96.5%, con un nivel de confianza del 90%, a 10 años de vida (1600 hrs. de prueba). Por disponibilidad de cantidad de muestras para la prueba y para tener cálculos de confiabilidad precisos en un menor tiempo, fue necesario implementar el

principio de degradación acelerada (ADT), en el cual se definió realizar inspecciones en los años 0, 5, 8, 9, y 10 llevando a cabo mediciones del diámetro de ruedas, el cual tiene como especificación 3.1497" + 0.025" y -0.010", y así, precisar el desgaste acumulado durante y al final de la prueba.

### 2.3. Diseño de dispositivo de prueba.

El dispositivo desarrollado para llevar a cabo la prueba acelerada del sistema de rodamiento por ruedas, fue diseñado por el departamento de ingeniería de evaluación con ayuda de herramientas de análisis, tales como Análisis de modo y efecto de falla (AMEF), Diagrama de parámetros, y Diagrama de bloques funcionales (DBF), de tal forma que el dispositivo fuera capaz de incluir los mecanismos de falla necesarios para la reproducción de modos de falla y controlar los parámetros de prueba definidos. En la Tabla 2 se muestran los mecanismos de falla considerados y los niveles de esfuerzo a controlar en el dispositivo.

(1)

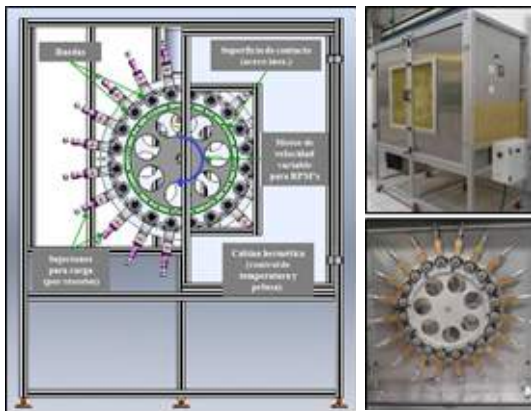
$$\frac{9,600,000 \text{ Revoluciones (cant. giros de tambor en 10 años)}}{100 \text{ RPM (Velocidad de giros de tambor)}} = \frac{96,000 \text{ Minutos}}{60 \text{ Minutos/hr}} = 1,600 \text{ hr}$$

Mecanismo de falla	Parámetros de prueba
Fricción	Acero inox. (superficie tambor)
Peso o carga	0 - 40 lb. sobre rueda
Tiempo de exposición	9.6 millones de RPM del tambor
Contaminación de pelusa	0 - 3 lb. en el ambiente
Velocidad de tambor	0 - 200 RPMs

**Tabla 2.** Definición de mecanismos de falla y rangos de parámetros en dispositivo de prueba.



Los giros del tambor fueron simulados por un motor de velocidad variable que transmite el movimiento a la placa circular en el centro, y ésta a su vez, hace girar las ruedas que están dispuestas en su periferia. El peso, o la carga, fue dada por resortes adaptados a las fijaciones de las ruedas, de tal manera, que la carga puede ser ajustada al comprimirlos o extenderlos, según fuera requerido. El cuerpo del dispositivo fue encapsulado con una cabina hermética, para controlar la temperatura ambiente y la presencia de pelusa en el flujo de aire. En la Figura 6 se puede apreciar el diseño del dispositivo y su construcción final.



**Figura 6.** Esquema de diseño y construcción de dispositivo de prueba acelerada para sistema de rodamiento por ruedas.

Para validar el dispositivo y el método de medición para el diámetro rueda, se realizó una prueba piloto utilizando 10 prototipos, con la participación de 3 evaluadores y realizando 3 mediciones cada uno.

Se realizó un estudio de repetitividad y reproducibilidad (Estudio Gage R&R) en el cual se obtuvo como resultado que el porcentaje de la variación es de 19.63 %, como se muestra en la Figura 7, por lo tanto, el método de medición es aceptable ya que el porcentaje de variación del estudio es menor al 20%.

En trabajos posteriores se buscará mejorar este porcentaje de variación, pero para efectos de este trabajo el método y el equipo, son suficientes para medir la degradación del sistema de rodamiento por ruedas.

Gage R&R			
Source	VarComp	%Contribution (of VarComp)	
Total Gage R&R	0.0000033	3.85	
Repeatability	0.0000033	3.85	
Reproducibility	0.0000000	0.00	
Part-To-Part	0.0000834	96.15	
Total Variation	0.0000867	100.00	

Source	StdDev (SD)	Study Var (6 * SD)	%Study Var (%SV)
Total Gage R&R	0.0018280	0.0109681	19.63
Repeatability	0.0018280	0.0109681	19.63
Reproducibility	0.0000000	0.0000000	0.00
Part-To-Part	0.0091300	0.0547798	98.05
Total Variation	0.0093112	0.0558671	100.00

Number of Distinct Categories = 7

**Figura 7.** Resultados de Estudio Gage R&R para el método y dispositivo de medición de diámetro de rueda.

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La prueba se llevó a cabo bajo las condiciones definidas, se pudieron reproducir los principales modos de falla ("rueda desgastada" y "rueda rota"), sin embargo, no fue posible llevar a la falla todas las muestras expuestas, como se muestra en la Tabla 3. Debido a que no se tenía el tiempo suficiente para llevar todas las muestras a la falla, se aplicó el principio de degradación a las mediciones realizadas al diámetro de las ruedas, de tal manera que, extrapolando aquellos datos censurados (a la derecha) de las muestras sobrevivientes, se pudiera conocer el pronóstico del tiempo en el que se presentaría la falla para cada una de las muestras.

Modo de falla	Tiempo a la falla (hrs)	Años simulados	Muestras
Rueda desgastada	1,440	8.0	1
Rueda desgastada	1,440	9.0	1
Rueda rota	1,588	9.9	1
Rueda desgastada	1,600	10.0	1
No presentan falla*	1,600	10.0	35

(\*) Datos censurados a la derecha.

**Tabla 3.** Modos de falla reproducidos en ruedas evaluadas en prueba acelerada.

El valor crítico de diámetro de rueda se definió como 3.0497", que corresponde al diámetro mínimo permitido por especificación, y que de no cumplirse puede provocar que la rueda no tenga contacto con el tambor de la secadora y, por lo tanto, no llevar a cabo su función.

Se observó en el análisis de degradación del diámetro de la rueda, que la función de densidad de la falla de los datos se distribuye como una exponencial, mostrando como efecto la pérdida de material en la llanta de la rueda a una tasa constante. La función de densidad exponencial está dada por,

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t}, \text{ en donde, } \lambda > 0 \text{ y } t > 0, \quad (2)$$

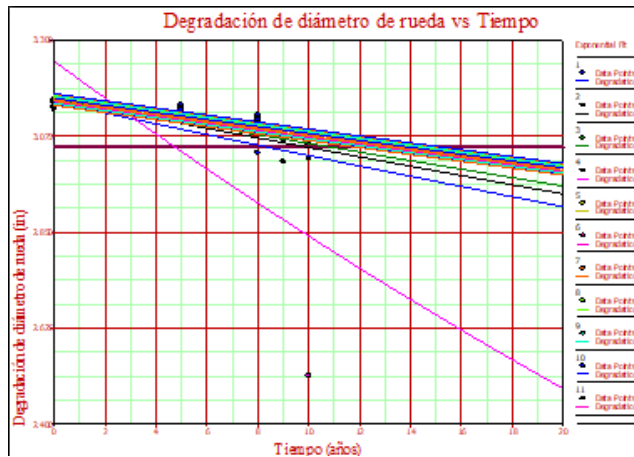
Siendo  $\lambda$  la tasa media de ocurrencia de las fallas y  $t$  el tiempo dado.

Se determinaron los tiempos a la falla de todas las muestras censuradas con ayuda del análisis de degradación, y con estos valores se realizaron los cálculos de confiabilidad pertinentes. Los datos fueron analizados usando una distribución Weibull, en la que su función de densidad (pdf) está dada por:

$$f(t) = \left(\frac{\beta}{\eta}\right) \left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta-1} \exp\left\{-\frac{t^\beta}{\eta}\right\} \quad (3)$$

**Tabla 4.** Tiempos a la falla obtenidos por degradación.

Muestra	Tiempo a la falla (años)	Muestra	Tiempo a la falla (años)	Muestra	Tiempo a la falla (años)	Muestra	Tiempo a la falla (años)
1	8.4	11	14.3	21	14.5	31	12.9
2	9.9	12	14.1	22	14.8	32	11.8
3	10.8	13	14.8	23	12.8	33	14.6
4	4.7	14	15.0	24	12.0	34	12.4
5	13.2	15	13.8	25	12.0	35	15.2
6	12.5	16	12.1	26	13.8	36	12.8
7	12.5	17	12.0	27	13.7	37	13.2
8	12.0	18	12.2	28	14.5	38	14.3
9	12.1	19	14.3	29	13.9	39	14.5
10	12.9	20	14.0	30	12.8	40	13.9

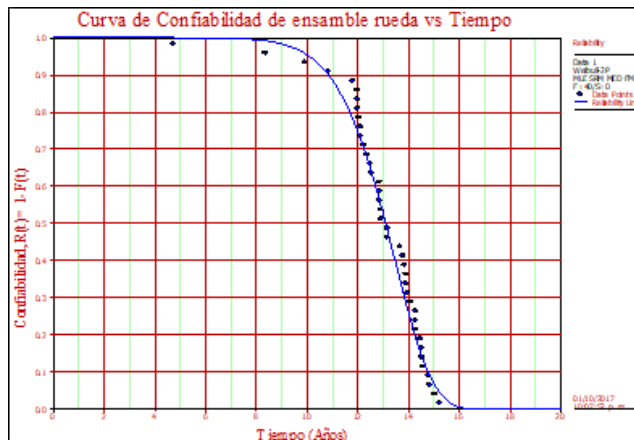


**Figura 8.** Gráfico de degradación de diámetro de rueda vs tiempo de prueba.

En donde  $t > 0$ ,  $\beta > 0$ ,  $\eta > 0$  y su función de confiabilidad está dada por,

$$R(t) = \exp\left\{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta\right\} \quad (4)$$

Con base en las Ecs. (3) y (4), para los tiempos a la falla calculados se presentaron valores en  $\beta = 9.9304$  y  $\eta = 13.5845$ , nos dio como resultado el 97.83% de confiabilidad en el ensamble ruedas, con un nivel de confianza del 90% a 10 años de vida simulados (1600 hrs). Lo anterior, demostró que el objetivo de confiabilidad del ensamble rueda fue cumplido. En la Figura 9 se presenta la curva de confiabilidad.



**Figura 9.** Resultados de la confiabilidad del ensamble rueda.

## 4. CONCLUSIONES

Con esta investigación se logró reproducir, por medio del diseño y desarrollo de una prueba de vida acelerada, los principales modos de falla del sistema de rodamiento por ruedas en secadoras domésticas que se presentan en campo. A través de esta prueba acelerada (ADT) fue posible determinar la confiabilidad del componente usando factores de esfuerzo representativos del uso normal del producto y de las condiciones a las que son expuestos.

En un inicio no se contaba con información de laboratorio referente a la confiabilidad del sistema, lo cual representaba posibles riesgos en el cumplimiento de las garantías del producto. Por tal motivo, la importancia de la aplicación de pruebas aceleradas y de degradación es un factor determinante para validar la calidad a través del tiempo de un sistema o componente.

¿Cómo es posible mejorar la confiabilidad usando pruebas aceleradas o degradación? Primeramente, se deben identificar los modos de falla del componente en cuestión, a través de numerosas pruebas, que por lo general solamente incluyen aspectos que permiten conocer su operación y sus límites. Estas pruebas no sólo consumen tiempo, sino que además suelen ser costosas, pero es un proceso que no puede ser omitido. Una vez identificados los modos de falla se definen los mecanismos de falla involucrados y se incluyen en los métodos de prueba ya establecidos, de tal forma que retroalimenten de forma efectiva los factores de esfuerzo anteriormente definidos. Por último, cuando se hayan completado las pruebas correspondientes, se determina la confiabilidad y es comparada con los objetivos iniciales, si los resultados no son aceptables, es requerido un cambio en el diseño de los componentes. Este proceso debe ser repetido cuantas veces sea necesario hasta asegurar que los cam-



bios hayan solucionado las deficiencias de confiabilidad presentadas.

No se trata de una regla que siempre debe seguirse para el diseño de pruebas, sino que se trata de un proceso vivo en el cual, de acuerdo a las necesidades de cada sistema o componente, todas las actividades de análisis y prueba deben ser completadas antes de la salida a producción de cualquier producto.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por su apoyo durante toda esta investigación. Así mismo se extienden los agradecimientos a la empresa Mabe por su apoyo y soporte para la realización de las pruebas en sus instalaciones.

## FUENTES DE FINANCIAMIENTO

Este proyecto fue solventado mediante el apoyo de la empresa Mabe.

## REFERENCIAS

Borgia, O., F. De Carlo, N. Fanciullacci, and M. Tucci. 2013. Accelerated life tests for new product qualification: a case study in the household appliance. IFAC. Available from: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S147466701535686X>

De Carlo, F., O. Borgia, and M. Tucci. 2014. Accelerated degradation tests for reliability estimation of a new product: A case study for washing machines. *Proc. Inst. Mech.*

Eng. Part O J. Risk Reliab. 228:127–138. doi:10.1177/1748006X13500650.

Available from: <http://journals.sagepub.com/doi/10.1177/1748006X13500650>

Escobar, L. A., and W. Q. Meeker. 2006. A Review of Accelerated Test Models. *Stat. Sci.* 21:552–577. doi:10.1214/088342306000000321.

Available from: <http://projecteuclid.org/euclid.ss/1177334529>

Meeker, W. Q., L. A. Escobar, and Y. Hong. 2009. Using Accelerated Life Tests Results to Predict Product Field Reliability.

*Technometrics.* 51:146–161. doi:10.1198/TECH.2009.0016.

Sadeghi, F., B. Jalalahmadi, T. S. Slack, N. Raje, and N. K. Arakere. 2009. A Review of Rolling Contact. 131:1–15. doi:10.1115/1.3209132.

Yadav, O. P., N. Singh, and P. S. Goel. 2006.

Reliability demonstration test planning: A three dimensional consideration. *Reliab. Eng. Syst. Saf.* 91:882–893. doi:10.1016/j.res.2005.09.001.



# ANÁLISIS DE SEÑALES DE CORRIENTE PARA DIAGNÓSTICO DE CORTOCIRCUITO ENTRE ESPIRAS DE TRANSFORMADOR BASADO EN TRANSFORMADA WAVELET

---

Analysis of current signals for diagnostics of short-circuited turns in a transformer based on Wavelet transform

Gustavo Álvarez-Monroy<sup>1</sup>, Arturo Mejía-Barrón<sup>1</sup>, Martín Valtierra Rodríguez<sup>1\*</sup>, Juan Pablo Amézquita-Sánchez<sup>1</sup>, David Granados Lieberman<sup>2</sup>, Juan C. Olivares Galván<sup>3</sup>, Rafael Escarela-Pérez<sup>3</sup>.

<sup>1</sup>ENAP RG Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Querétaro, Campus San Juan del Río, Av. Río Moctezuma 249, San Cayetano, San Juan del Río, 76807, Querétaro, México.

<sup>2</sup>ENAP RG Departamento de Ingeniería Electromecánica, Instituto Tecnológico de Estudios Superiores de Irapuato, Carretera Irapuato - Silao km 12.5 Colonia El Copal, Irapuato, 36821, Guanajuato, México.

<sup>3</sup>Departamento de Energía, Universidad Autónoma Metropolitana-Azcapotzalco, Av. San Pablo No. 180, Colonia Reynosa Tamaulipas, Del. Azcapotzalco, 02200, Ciudad de México, México.

\*Autor de correspondencia  
martin.valtierra@enap-rg.org

## RESUMEN

Hoy en día, los transformadores son elementos básicos y de gran importancia en los sistemas eléctricos. Desafortunadamente, estos elementos están propensos a fallas, entre las cuales destaca la falla de cortocircuito en los devanados. Debido a esto, existe una necesidad emergente en la propuesta de metodologías que ayuden a detectar y cuantificar esta falla de manera oportuna para evitar daños graves al transformador o dispositivos eléctricos conectados en la red. El presente trabajo propone una metodología para obtener características que ayuden a cuantificar fallas de cortocircuito mediante una técnica basada en la transformada Wavelet-packet, cuya función es descomponer una señal en sus diferentes componentes frecuenciales. El análisis llevado a cabo se basa en señales corriente de energización obtenida de manera experimental en un transformador monofásico, donde la señal de corrientes se divide en dos partes, la primera corresponde a la parte transitoria de la señal y la segunda parte corresponde al análisis del estado estable de la misma. La entropía de Shannon es propuesta como índice para la detección y cuantificación de la falla. Finalmente, diversas condiciones de falla de cortocircuito entre las espiras de los devanados son analizadas de manera experimental, las cuales son de 10, 20, 30 y 40 vueltas cortocircuitadas, además del estado sano del transformador. Los resultados obtenidos demostraron la efectividad de la metodología propuesta.

### Palabras Clave:

corriente de energización, fallas de cortocircuito, diagnóstico de falla, entropía de Shannon, transformada wavelet, transformadores.

## ABSTRACT

Nowadays, transformers are basic elements and of great importance in electrical systems. Unfortunately, these elements are prone to

faults, among which the short-circuit fault in the windings stands out. In this regard, there is an emerging need in the proposal of methodologies that help to detect and quantify this failure in a timely manner, and avoid serious damage to the transformer or connected electrical devices in the network. The present work proposes a methodology to obtain features that help to quantify short-circuit faults by means of a Wavelet-packet transformed technique, whose function is to decompose a signal in its different frequency components. The analysis carried out is based on energizing current signals obtained experimentally in a single-phase transformer so the analysis is divided into two parts, the first part corresponds to the transient part of the signal and the second part corresponds to the analysis of the steady state of the same. The Shannon entropy is proposed as an index for the detection and quantification of the fault. Finally, various short circuit fault conditions between turns of the windings are analyzed in an experimental manner. These conditions are 10, 20, 30 and 40 short circuited turns, in addition to the healthy state of the transformer. The results obtained demonstrated the effectiveness of the proposed methodology.

### Keywords:

energization current, fault diagnostics, Shannon entropy, short-circuit faults, transformers, wavelet transform.

## 1. INTRODUCCIÓN

Los transformadores son dispositivos de gran importancia en los sistemas eléctricos, ya que ayudan en la transmisión y distribución la energía eléctrica de forma económica, eficiente y simple (Golshan, et al., 2015; Yazdani et al., 2015; Dashti et al., 2016; Ashrafian et al., 2014). Desafortunadamente, los transformadores son propensos a fallas las cuales pueden causar interrupciones en el suministro de la energía, además de altos costos de reparación, generando grandes pérdidas



económicas (Oliveira y Cardoso, 2017). Por lo tanto, el diagnóstico de fallas en transformadores es primordial en los sistemas eléctricos para evitar daños a la infraestructura y de esta forma asegurar tanto la estabilidad del sistema de potencia como la calidad del servicio eléctrico (Mao y Aggarwal, 2000). Algunas de las fallas internas que ocurren comúnmente en los transformadores son: el sobrecalentamiento interno, el sobreflujo en el núcleo, la sobrepresión en el tanque, fallas en los contactores y fallas de cortocircuito. Estas últimas ocurren en los devanados o entre espiras, y son causadas debido a la ruptura del aislamiento del devanado, además están comúnmente asociadas a los altos niveles de voltaje y corriente debido a descargas atmosféricas, fallas a tierra o por el deterioro natural. Las fallas de cortocircuito entre las espiras representan el 25% de las fallas del transformador que generalmente comienzan como un pequeño cortocircuito en una de las espiras del devanado, conocidas como fallas incipientes, pero se manifiestan rápidamente en fallas de gran magnitud que implican un mayor número de vueltas cortocircuitadas si no se detectan a una edad temprana (Bhowmick y Nandi, 2015).

En la literatura, las fallas entre las espiras han sido estudiadas en diversos trabajos de investigación. En estos, diferentes métodos para la identificación de las fallas de cortocircuito entre espiras han sido propuestos, tal es el caso de la transformada Wavelet (Olivares et al., 2016), además se han propuesto métodos como ajuste de curvas (Ahmadi et al., 2014), modelos tiempo-frecuencia (Mejía et al., 2017), morfología matemática (Wu et al. 2016), análisis de funciones de transferencia (Lei et al., 2014), componentes simétricos (Faiz et al., 2016), análisis de vibraciones (Zhou et al., 2016) y el análisis de gases disueltos (Bhide et al., 2010). Por otra parte, el ajuste de curvas se ha utilizado para discriminar entre fallas internas y corrientes de energización obteniendo señales residuales entre las curvas ajustadas y una forma de

onda sinusoidal (Ahmadi et al., 2014). Modelos tiempo-frecuencia han sido propuestos para el análisis un transformador monofásico con la finalidad de obtener una herramienta para generar formas de onda con diferentes condiciones de falla de cortocircuito, además de la propuesta de diferentes índices para la identificación de la severidad de la falla (Mejía et al., 2017). Así también, técnicas basadas en morfología matemática se han llevado a cabo con el fin de extraer el gradiente y detalles de simetría de la señal de corriente con diferentes condiciones de falla interna (Wu et al. 2016). En el mismo sentido, se ha realizado análisis de la función de transferencia para observar la energía y la amplitud de la corriente de cortocircuito las cuales dependen de la severidad de la falla (Lei et al., 2014). Además, componentes de secuencia negativa se han analizado para detectar el fallo entre espiras mediante parámetros de amplitud y fase en los que se observa un aumento en la corriente de secuencia negativa con un alto nivel de severidad de falla de cortocircuito (Faiz et al., 2016). Algunos métodos de análisis alternativos basados en el análisis de vibraciones junto con el análisis de la fuerza electromagnética se han llevado a cabo para la detección de fallas (Zhou et al., 2016). También el análisis de gases disueltos ha sido propuesto, el cual se basa en el análisis de la composición química de gas en un transformador, estos gases son generados comúnmente por las tensiones térmicas o eléctricas en el aceite del transformador y el aislamiento del devanado (Bhide et al., 2010). Finalmente, se han propuesto diferentes metodologías para el estudio de fallas en los devanados, sin embargo, no todas las metodologías mencionadas tienen validación experimental, además, debido a la importancia de tal falla, la necesidad de nuevas metodologías con sustento experimental se encuentra latente. Es importante mencionar que la mayoría de las metodologías se han enfocado al análisis de señales ya sea en la parte transitoria, p. ej. el diseño de metodologías orientadas a pro-

tecciones diferenciales, o en la parte estable, la cual se enfoca principalmente en la detección de fallas; en este sentido, metodologías que analicen estos dos estados pueden, por un lado, ser propuestas como medida de la versatilidad de la técnica propuesta o, por otro lado, hacer una metodología más robusta y con mayor campo de aplicabilidad. En este sentido, la transformada Wavelet, la cual es un método de procesamiento de señales, proporciona una representación tiempo-frecuencia de las señales, considerando efectos no estacionarios y estacionarios. Lo anterior indica que la transformada Wavelet puede ser una técnica adecuada para el análisis de la parte transitoria (no estacionaria) y la parte estable (estacionaria) de las señales de energización; además presenta diversas ventajas como son poca carga computacional, compresión de datos y eliminación de ruido (Amezquita y Adeli, 2014). También, es importante mencionar que ha sido utilizada en diversas aplicaciones en electricidad. Por ejemplo, Torres et al. (2014) utilizaron la transformada Wavelet para la identificación de disturbios eléctricos como armónicos, interrupciones en el voltaje, entre otros. Urbina et al. (2017) usaron la transformada Wavelet para un mejor seguimiento en los cambios transitorios en las señales de corriente y voltaje debidos a las diversas condiciones que afectan la calidad de la energía en los sistemas eléctricos. Además, la detección de vueltas cortocircuitadas en transformadores por medio de la técnica de transformada Wavelet a partir de la corriente de energización se ha llevado a cabo obteniendo resultados prometedores sin embargo no se presentan algún índice de diagnóstico directo aunque si se presentan los coeficientes de correlación obtenidos de la transformada Wavelet para cada nivel de severidad de falla (Oliveras et al., 2016). Por otro lado, la entropía de Shannon es un índice empleado en diversas aplicaciones para detección de fallas en sistemas eléctricos que ha presentado buenos resultados como parámetro de detección y cuantificación de fallas. Por ejemplo, Gonzá-

lez et al. (2015) utilizan entropía de Shannon a partir de un método basado en descomposición de modo empírica para la detección de disturbios eléctricos que afectan la calidad de la energía. Incluso, por medio del índice de entropía de Shannon se han realizado diagnósticos automáticos de barra rota en motores de inducción (Camarena et al., 2016). En base a la información anterior, la propuesta de este trabajo es explorar el potencial de la transformada wavelet y la entropía de Shannon para el diagnóstico de fallas de cortocircuito en transformadores.

En este trabajo se propone una nueva metodología para el diagnóstico de fallas entre espiras en los devanados de un transformador monofásico utilizando la transformada Wavelet packet para discriminar la condición del transformador. La metodología propuesta se prueba y valida experimentalmente con un transformador monofásico en el que se analizan señales de corriente de 10, 20, 30 y 40 espiras cortocircuitadas. En la parte de la experimentación, señales de corriente de energización del transformador son obtenidas donde se propone un análisis separando la parte transitoria y el estado estable de la señal con la finalidad de observar el desempeño de la técnica en ambos casos. El análisis se realiza mediante la aplicación de la transformada Wavelet a cada una de las señales donde se propone la entropía de Shannon como índice de diagnóstico y así cuantificar la severidad de la misma. Finalmente, los resultados obtenidos muestran la utilidad de la propuesta para detección y cuantificación de la falla de cortocircuito entre vueltas, discutiendo la efectividad ya sea en el estado transitorio o en el estado estable.

## 2. MARCO TEÓRICO

En esta sección se describe brevemente la parte teórica que se ocupó en este trabajo. La cual se compone de dos secciones, en la primera se describe lo referente a la transfor-



mada Wavelet packet y en la segunda parte se tiene la definición de la Entropía de Shannon y la ecuación para obtener sus valores.

## 2.1. Transformada Wavelet packet

En procesamiento de las señales, la transformada Wavelet es un método de procesamiento utilizado para el análisis de señales no estacionarias (Cabal et al., 2010). Para estas señales, la transformada Wavelet puede proporcionar su representación tiempo-frecuencia (Torres et al., 2014; Camarena et al., 2015). Esta cuenta con dos algoritmos principales, algoritmo de Mallat y el método de la Wavelet packet. En ambos algoritmos,

una señal es descompuesta sucesivamente en múltiples componentes de baja y alta frecuencia (Ramchandran y Vetterli, 1993; Yen y Lin, 2000). Para cada descomposición, el conjunto de frecuencias bajas puede ser referido como aproximación (a), mientras que el conjunto de altas frecuencias puede ser referido como detalle (d). A diferencia del algoritmo de Mallat, el método de la Wavelet packet descompone tanto los componentes de aproximación como los de detalle para hacer una descomposición de bandas simétricas, el cual generalmente es llamado árbol de descomposición binaria como se muestra en la Fig. 1 (Amezquita y Adeli, 2014).

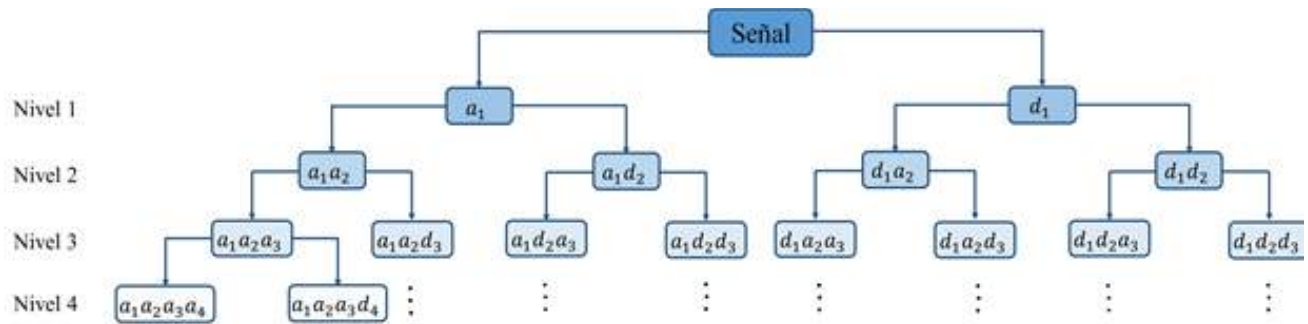


Figura 1. Ejemplo de un árbol de descomposición de la transformada Wavelet packet.

Es importante aclarar que las señales obtenidas en cada nodo deben ser ordenadas con el propósito de tener un incremento de frecuencia ascendente (Urbina et al. 2017).

En general, una función Wavelet packet  $W_{j,k}^n$ , tiene tres índices:  $j$ ,  $k$  y  $n$ . El índice  $n$  se conoce como el parámetro de modulación u oscilación y,  $j$  y  $k$  son números, los cuales representan los parámetros de escalado (localización de la frecuencia) y traslación (localización del tiempo), respectivamente. La ecuación está dada por (Yen y Lin, 2000):

$$W_{j,k}^n = 2^{\frac{j}{2}} W^n(2^j t - k) \quad (1)$$

Las dos primeras funciones de la Wavelet packet ( $n = 0$  y  $1$ ,  $j = 0$  y  $k = 0$ ) se denominan función escalar y la función Wavelet madre, respectivamente. Están dadas por:

$$W_{0,0}^0(t) = \varphi(t) \quad (2)$$

$$W_{0,0}^1(t) = \Psi(t) \quad (3)$$

Se pueden obtener otras funciones para  $n > 1$  con las siguientes funciones recursivas (Yen y Lin, 2000):

$$W_{0,0}^{2n}(t) = \sqrt{2} \sum_k h(k) W_{1,k}^n(2t - k) \quad (4)$$

$$W_{0,0}^{2n+1}(t) = \sqrt{2} \sum_k g(k) W_{1,k}^n(2t - k) \quad (5)$$

Donde  $\psi$  es el filtro pasa bajas (escalado) y  $\psi^*$  es el filtro pasa altas (Wavelet). Estos filtros están asociados con las funciones de escalado y las funciones Wavelet. Los coeficientes de aproximación (a) y detalle (d) se pueden obtener usando (4) y (5), respectivamente. Los coeficientes de la Wavelet packet de una función  $x$  se pueden calcular de la siguiente manera:

$$P_j^m(k) = \langle x, W_{j,k}^n \rangle = \int x(t) W_{j,k}^n(t) dt \quad (6)$$

Donde  $P_j^m(k)$  representa el m-ésimo conjunto de coeficientes de descomposición de la Wavelet packet. Los componentes de frecuencia y sus tiempos se reflejan en  $P_j^m(k)$  mediante el cambio de  $m$ ,  $j$  y  $k$ . Cada conjunto indica un contenido de frecuencia de sub-bandas específico, que está regulado por el parámetro de escala  $j$  y el parámetro de oscilación  $k$  (Yen y Lin, 2000).

## 2.2. Entropía de Shannon

Claude Shannon empleó el concepto de entropía como una medida para el contenido de la información (Kollment et al., 2017). La entropía de Shannon es una medida en un sistema de probabilidad y refleja la cantidad de información que hay en el sistema. La fórmula para obtener la entropía de Shannon es simple y basada en los eventos de probabilidad (El-Amraoui et al. 2016).

$$H = - \sum_{i=1}^N P_i \log_2(P_i) \quad (7)$$

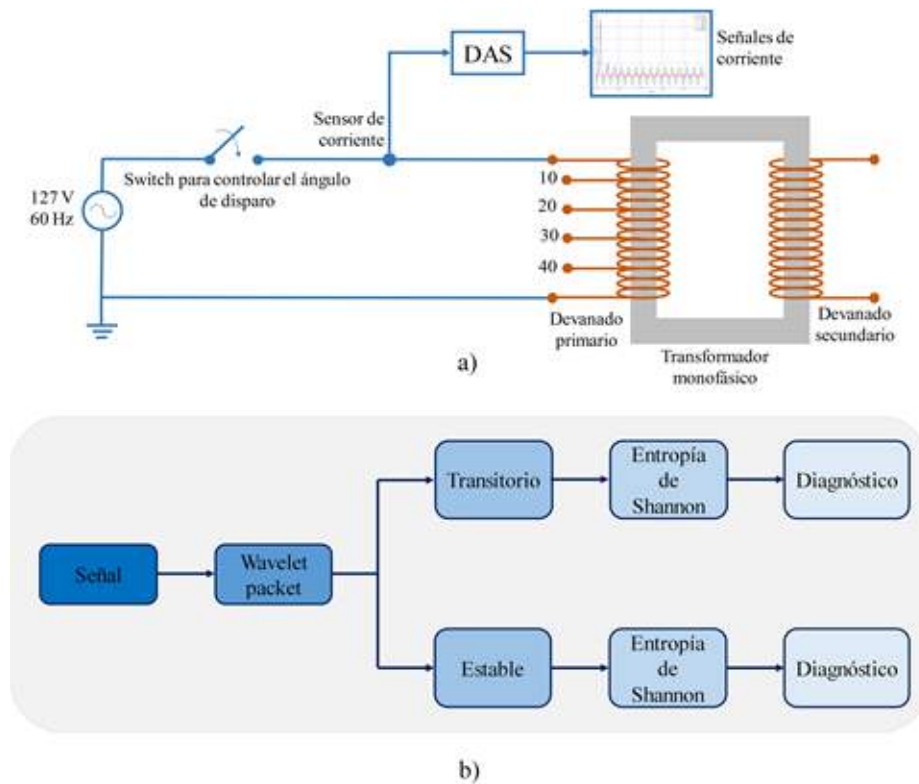
En un sistema, si  $P_i$  representa la probabilidad de que ocurra un evento, entonces  $-\log_2(P_i)$  es la cantidad de información transitiva para el evento. Por tanto, el promedio estadístico de la información transitiva para todos los eventos individuales será definido como la información transitiva del sistema. La base  $B=2$  es el número mínimo de bits que con los que se pueden comprimir una secuencia simbólica (Gu, 2017).

## 3. METODOLOGÍA

La metodología propuesta se muestra en la Fig. 2. Primeramente, las señales de corriente de energización son adquiridas, dichas señales son cinco, la primera obtenida del estado sano del transformador, las otras cuatro son obtenidas con diferentes condiciones de falla. Con el fin de obtener las señales con diversas condiciones fallas se utilizó y se modificó un transformador monofásico, al cual se le realizaron derivaciones de 10, 20, 30 y 40 espiras, de tal forma que al cortocircuitar cada una de las derivaciones mencionadas se emula la falla de corto circuito con diferentes niveles de severidad obteniendo de cada uno de ellos las señales de corriente de energización, como se muestra en la Fig. 2a. La corriente de energización se obtiene en la condición de energización máxima que se obtiene cuando el transformador se enciende en condición de cruce por cero de la señal de voltaje. También la cancelación del flujo remanente del transformador se consideró con la finalidad de obtener repetitividad en las condiciones de energización. Cabe señalar que, para la realización de las pruebas, no fue conectada ninguna carga al transformador y que se realizó una prueba con cada una de las condiciones mencionadas. Una vez obtenidas las cinco señales, a cada una de ellas se les aplicó transformada Wavelet packet, utilizando la Daubechies como Wavelet madre, se eligió esta wavelet madre ya que es la que mejor se adecua debido a sus características de remover el ruido, lo que es ideal para señales de corriente (Mohamed et al., 2007). Obtuvieron cuatro niveles de descomposición, del cual se analizaron los coeficientes del nodo (4,0). Con las señales obtenidas se realizó el análisis, el cual fue dividido en dos partes: el estado transitorio, el cual se tomó desde el momento que se energizó el transformador hasta que transcurrió 0.1164 s., de ese tiempo y hasta que finalizó la prueba, a los 0.25 s., se tomó la segunda parte, es decir, el estado estable. En ambas partes se propone la entropía de Shannon como in-



dice con el objetivo de proporcionar información para el diagnóstico de la severidad de las fallas. La Fig. 2b muestra cada uno de los pasos mencionados anteriormente.



**Figura 2.** Metodología: a) diagrama para la adquisición de las señales, b) diagrama de la metodología propuesta.

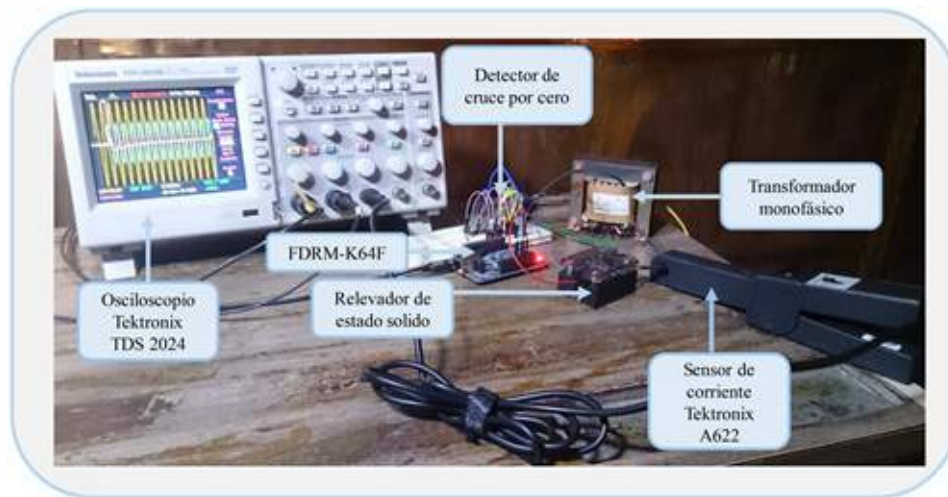
## 4. EXPERIMENTACIÓN Y RESULTADOS

### 4.1. Experimentación

En la Fig. 3 se muestra la puesta experimental empleada para validar la metodología propuesta. Para obtener las señales de corriente de energización se utilizó un transformador monofásico de 120 VA, con un voltaje de entrada de 127 V y de salida de 24 V. El transformador cuenta con 474 vueltas en el lado primario y 91 vueltas en el lado secundario. Posteriormente, se modificó el lado primario del transformador de tal forma que se le realizaron derivaciones para emular las condiciones de corto circuito entre espiras, en donde se obtuvieron las siguientes condiciones de falla: 10, 20, 30 y 40 espiras cortocircuitadas. Para controlar la energización del transformador se utilizó el microcontrolador FDRM-K64, el cual controla la activación del

transformador por medio de un relevador de estado sólido, el cual cuenta con detección de cruce por cero lo que garantiza que el ángulo de disparo para todas las pruebas sea de  $0^\circ$ . Para el sistema de adquisición de datos se utiliza un osciloscopio Tektronix TDS 2024 con una frecuencia de muestreo de 5 kHz. El sensor de corriente empleado es el Tektronix A622 con un rango de 50 mA hasta 100 A. Para la obtención de las señales de corriente de energización del estado sano y de cada una de las diferentes condiciones de falla se emplea un intervalo de tiempo de 0.25 s.





**Figura 3.** Puesta del experimento.

## 4.2. Resultados

Como se menciona en la sección de metodología, señales de corriente de energización de un transformador monofásico bajo diferentes condiciones de falla de cortocircuito son empleadas para el análisis de la parte transitoria y estacionaria. En la Fig. 4 se pueden observar diferentes gráficas las cuales representan los nodos 0, 1 y 2 del nivel de descomposición 4 de la transformada Wavelet, los cuales representan los anchos de banda frecuenciales de 0-156.25 Hz, 156.25-312.5 Hz y 312.5-468.75 Hz, respectivamente. En el apartado de la Fig. 4a se aprecian las gráficas del estado sano de la señal, en las Figs. 4b, 4c, 4d y 4e se observan las gráficas de los nodos antes mencionados y de las condiciones de falla de 10, 20, 30 y 40 espiras cortocircuitadas, respectivamente. Visualmente las gráficas del nodo 0 tienen una mejor definición y además se aprecia tanto el estado transitorio como el estado estable, la cual es la razón de que se seleccionara este nodo para realizar el análisis.

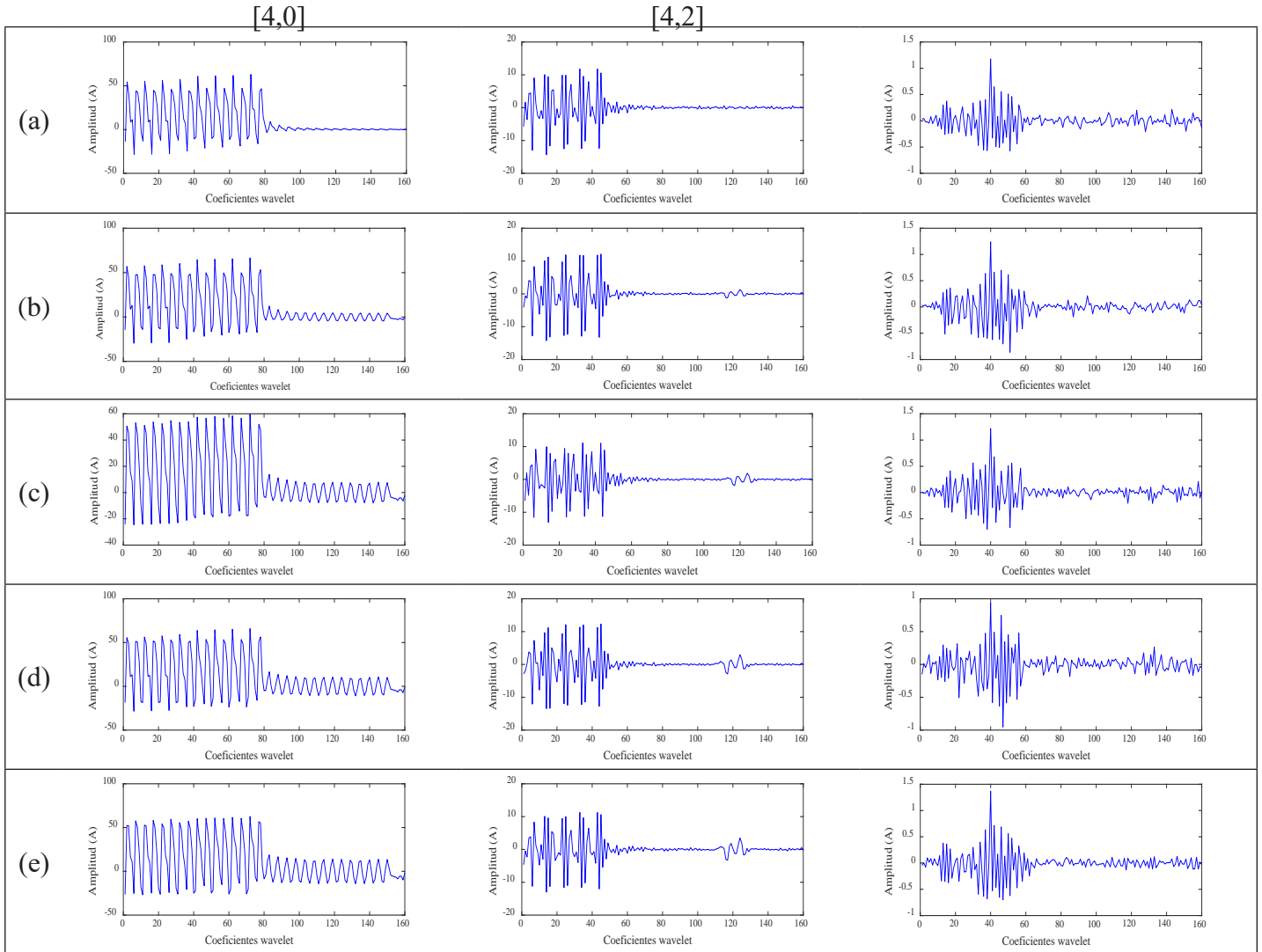
En la Fig. 5 se pueden observar los resultados que se obtuvieron al aplicar la metodología. En la Fig. 5a se aprecian las cinco señales de corriente de energización que fueron adquiridas, las cuales corresponden al estado sano y las fallas de 10, 20, 30 y 40 espiras cortocircuitadas del transformador, respectivamente.

A las señales antes mencionadas se les aplicó la transformada Wavelet. Posteriormente, se obtuvieron los coeficientes de cada una de las señales como se muestra en la Fig. 5b. Una vez obtenidos los coeficientes de cada señal, se obtuvo la parte transitoria y la parte estacionaria de cada señal como se muestra en las Figs. 5c y 5d, respectivamente. Además, con la finalidad de obtener un índice para la cuantificación de la falla se obtuvo la entropía de Shannon para identificar y cuantificar la falla.

En la Tabla 1 se muestra los valores obtenidos de la entropía de Shannon para las señales de los coeficientes del estado transitorio y estacionario. Los valores mencionados anteriormente fueron graficados y se observan en la Fig. 6, en donde se pueden apreciar dos gráficas. La gráfica roja muestra los valores del estado transitorio, en ella se observa que algunos valores son repetitivos y además no muestran un patrón a seguir que ayude a la identificación de la falla. En el caso de la gráfica verde, los datos tienden a seguir un comportamiento lineal por lo que a partir de estos datos se puede realizar la identificación e incluso la cuantificación de la falla. Lo anterior debido a que los valores de la entropía aumentan conforme las espiras cortocircuitadas también aumentan.



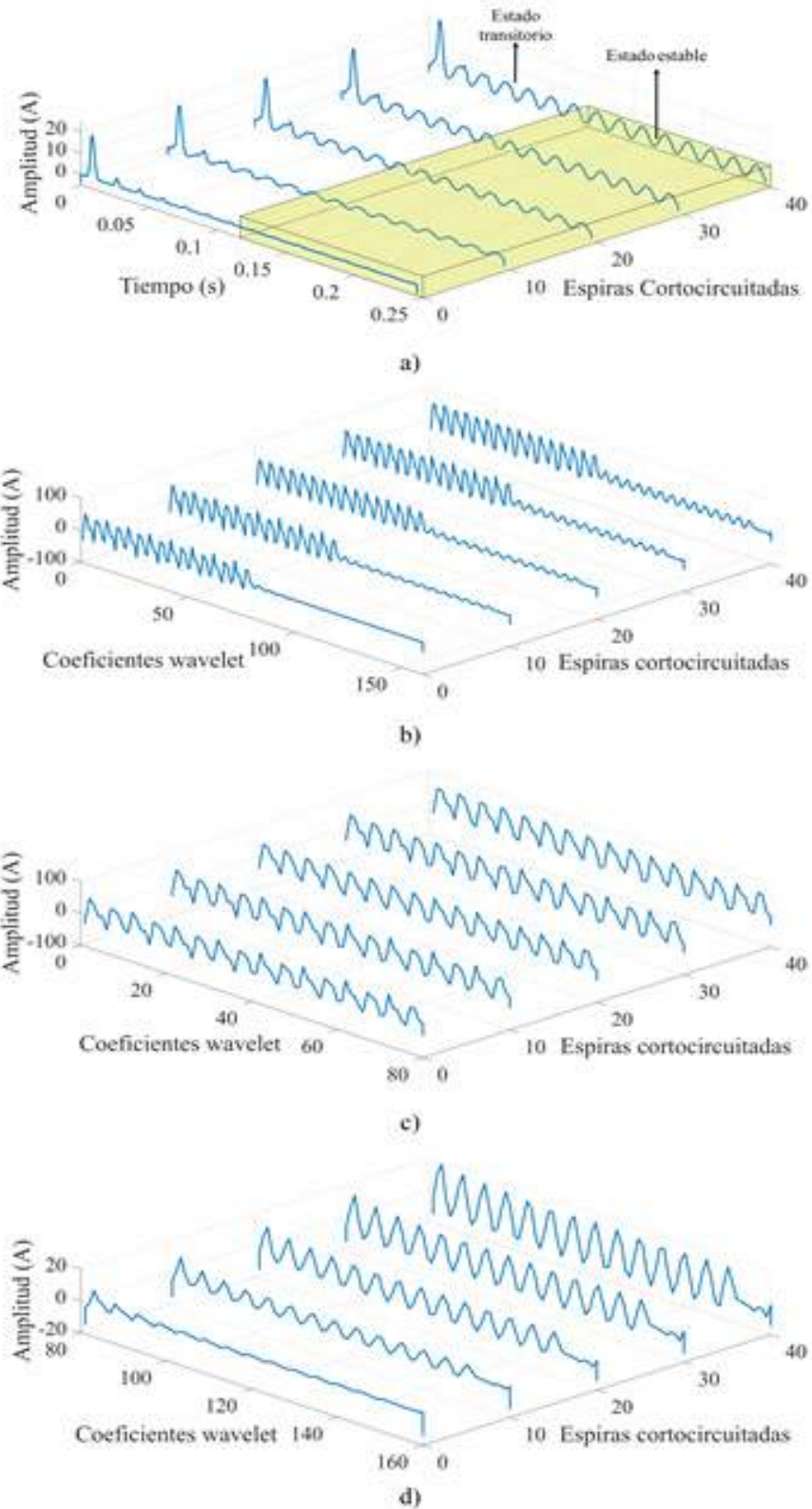
## Nodo del árbol Wavelet



**Figura 4.** Señales en nodos del árbol wavelet, a) estado sano, b) 10 espiras cortocircuitadas, c) 20 espiras cortocircuitadas, d) 30 espiras cortocircuitadas, e) 40 espiras cortocircuitadas.

	<b>Estado Sano</b>	<b>10 Vueltas cortocircuitadas</b>	<b>20 Vueltas cortocircuitadas</b>	<b>30 Vueltas cortocircuitadas</b>	<b>40 Vueltas cortocircuitadas</b>
<b>Transitorio</b>	5.9307	5.9307	5.8980	5.9307	5.8652
<b>Estado estable</b>	5.7402	5.8069	5.8402	5.8736	5.9069

**Tabla 1.** Valores de la entropía de Shannon.



**Figura 5.** Señales, a) corriente de energización, b) aplicación de la transformada wavelet, c) coeficientes wavelet del estado transitorio, d) coeficientes wavelet del estado estable.

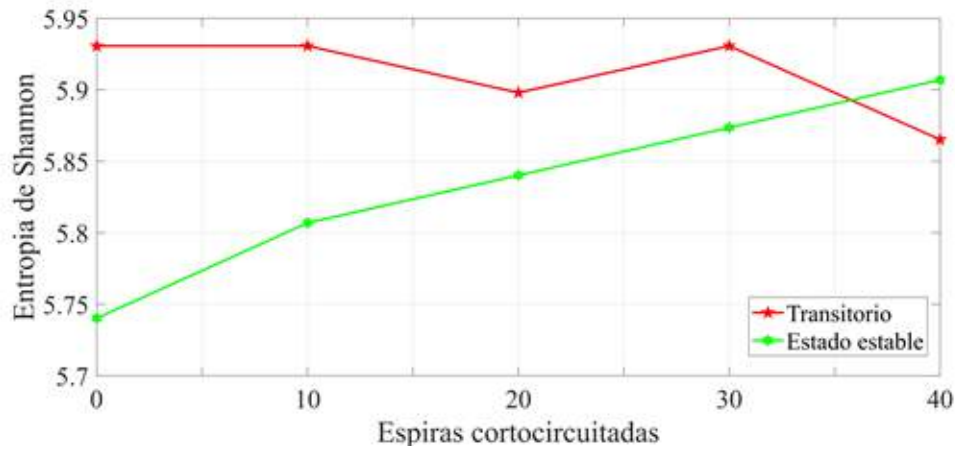


Figura 6. Valores de la entropía de Shannon.

## 5. CONCLUSIONES

En este trabajo se propone una metodología para analizar fallas de cortocircuito entre espiras, mediante la información obtenida a partir de señales de corriente de energización en transformadores. La metodología propuesta se validó a través de señales experimentales donde se consideran diferentes condiciones de falla tales como: 10, 20, 30 y 40 espiras cortocircuitadas y además de analizar el estado sano del transformador. Las señales mencionadas anteriormente contienen información del estado transitorio y del estado estable de la corriente de energización del transformador.

Por lo tanto, en este trabajo, se propone un análisis de cada una de las etapas de la corriente de energización del transformador. Lo anterior con el fin de obtener índices que ayuden a identificar fallas de cortocircuito, así como también la cuantificación de la misma. Para lograr el objetivo, se aplicó transformada Wavelet a las señales de corriente de energización, de donde se obtuvieron los coeficientes Wavelet. A cada una de las señales formadas por los coeficientes se les aplicó entropía de Shannon. Al utilizar este índice se obtuvieron datos para cada uno de los estados de la señal antes mencionados. El análisis desarrollado muestra que el estado estable, a diferencia del estado tran-

sitorio, provee mayor información para la detección y cuantificación de la falla. El índice de entropía de Shannon demostró ser adecuado para la cuantificación de la severidad de la falla ya que se observó que los valores de entropía se incrementaban conforme aumentaban las espiras cortocircuitadas. Aunque la propuesta demostró ser sensible en la detección de diez espiras cortocircuitadas, se debe realizar un mayor análisis para determinar el número mínimo de detección de espiras. La principal ventaja de la metodología propuesta es la versatilidad para diferentes aplicaciones, la cual es evaluada por medio del análisis por separado de las condiciones transitorias y de estado estable y aunque se obtienen resultados prometedores para el análisis en estado estable, nuevos índices pueden ser propuestos con el objetivo de mejorar el diagnóstico de la severidad de la falla en la parte transitoria.

En los trabajos futuros se propone utilizar otros métodos e índices que ayuden a la identificación de la falla en estado transitorio, además de validar las pruebas con un transformador de mayor potencia.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por otorgar las becas 296868 y 610469 que ayudaron a la realización de este trabajo, y a las distintas instituciones de su adscripción por su apoyo durante toda esta investigación.

## FUENTES DE FINANCIAMIENTO

Este proyecto fue solventado mediante el proyecto UAQ-PRODEP con registro FIN-2017-2.

## REFERENCIAS

Ahmadi, M., H. Samet, and T. Ghanbari. 2014. Discrimination of internal fault from magnetising inrush current in power transformers based on sine-wave least-squares curve fitting method. *IET Science, Measurement & Technology*. 9:73-84. doi: 10.1049/iet-smt.2014.0012.

Amezquita-Sanchez J. P., and H. Adeli. 2014. Signal processing techniques for vibration-based health monitoring of smart structures. *Arch Comput Meth Eng*. 23:1-15. doi. 10.1007/s11831-014-9135-7.

Ashrafian, A., B. Vahidi, and M. Mirsalim. 2014. Time-time-transform application to fault diagnosis of power transformers. *IET Generation, Transmission & Distribution*. 8:1156-1167. doi: 10.1049/iet-gtd.2013.0622.

Bhide, R. S., M. S. S. Srinivas, A. Banerjee and R. Somakumar. 2010. Analysis of winding inter-turn fault in transformer: A review and transformer models. 2010 IEEE International Conference on Sustainable Energy Technologies (ICSET). 1-7. doi: 10.1109/ICSET.2010.5684425.

Bhowmick, S., and S. Nandi. 2015. Online detection of an interturn winding fault in single-phase distribution transformers using a terminal measurement-based modeling technique. *IEEE Trans Power Deliv*. 30:1007-1015. doi: 10.1109/TPWRD.2014.2347320

Cabal-Yepez, E., R. Saucedo-Gallaga, A. G. Garcia-Ramirez, A. A. Fernandez-Jaramillo, M. Pena-Anaya, and M. Valtierra-Rodriguez. 2010. FPGA-Based online detection of multiple-combined faults through information entropy and neuronal networks. *Int. Conf. Reconfigurable Comput. FPGAs (ReConFig)*. 244–249. doi: 10.1109/ReConFig.2010.31.

Camarena-Martinez, D., M. Valtierra-Rodriguez, J. P. Amezcua-Sanchez, D. Granados-Lieberman, R. J. Romero-Troncoso, and A. Garcia-Perez. 2016. Shannon Entropy and-Means Method for Automatic Diagnosis of Broken Rotor Bars in Induction Motors Using Vibration Signals. *Shock and Vibration*. 1-11. doi: 10.1155/2016/4860309

Camarena-Martinez, D., M. Valtierra-Rodriguez, L. A. Morales-Hernandez, J. P. Benitez-Rangel, and A. Dominguez-Gonzalez. Time-frequency analysis of power quality signals using compact kernel distribution technique. *IEEE International Autumn Meeting on power, electronics and computing, ROPEC 2015*. 1-6. doi: 10.1109/ROPEC.2015.7395078.

Dashti, H., M. Davarpanah, M. Sanae-Pasand, and H. Lesani. Discriminating transformer large inrush currents from fault currents. *Int J Electr Power Energ Syst*. 75: 74-82. doi: 10.1016/j.ijepes.2015.08.025



El-Amraoui, A., L. Masmoudi, H. Ez-Zahraoui, and Y. El-Amraoui. 2016. Quantum edge detection based on shannon entropy for medical images. 2016 IEEE/ACS 13th International Conference of Computer Systems and Application (AICCSA). 1-6. doi: 10.1109/AICCSA.2016.7945739.

Faiz, J., J. Gharaeei, and S. Lotfi-fard. 2016. Detection, location, and estimation of severity of interturn faults in power transformers. IEEE 10th International Conference on Compatibility, Power Electronics and Power Engineering (CPE-POWERENG), 2016. 39-44. doi: 10.1109/CPE.2016.7544155.

Golshan, M. H., M. Saghaian-Nejad, A. Saha, and H. Samet. 2014. A new method for recognizing internal faults from inrush current conditions in digital differential protection of power transformers. Elec Power Syst Res. 71:61-71. doi: 10.1016/j.epsr.2003.11.015.

Gonzalez-Cordoba, J. L., A. Mejia-Barron, and M. Valtierra-Rodriguez. 2015. Automatic detection and classification of electrical disturbances by means of empirical mode decomposition method. IEEE International Autumn Meeting on power, electronics and computing, ROPEC 2015. 1-6. doi: 10.1109/ROPEC.2015.7395079.

Gu, R. 2017. Multiscale Shannon entropy and its application in the stock market. Phys Stat Mech Appl. 484:215-224. doi: 10.1016/j.physa.2017.04.164.

Kollment, W., P. O'Leary, and R. Ritt. 2017. Force based tool wear detection using Shannon entropy and phase plane. Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC), 2017 IEEE International. 1-6. doi: 10.1109/I2MTC.2017.7969765.

Lei, X., J. Li, Y. Wang, S. Mi, C. Xiang. 2014. Simulative and experimental investigation of transfer function of inter-turn faults in transformer windings. Elec Power Syst Res. 107:1-8. doi: 10.1016/j.epsr.2013.08.021.

Mao, P. L., and R. K. Aggarwal. 2000. A wavelet transform based decision making logic method for discrimination between internal faults and inrush currents in power transformers. Int J Electr Power Energ Syst. 22:389-395. doi: 10.1016/S0142-0615(00)00013-2.

Mejia-Barron, A., M. Valtierra-Rodriguez, D. Granados-Lieberman, J. C. Olivares-Galvan, R. Escarela-Perez. 2017. Experimental data-based transient-stationary current model for inter-turn fault diagnostics in a transformer. Elec Power Syst Res. 152:306-315. doi: 10.1016/j.epsr.2017.07.020.

Mohamed I. M., M. I. Dessouky, S. Deyab, and F. H. Elfouly. 2007. Comparison between haar and daubechies wavelet transformions on FPGA technology. Proc World Acad Sci Eng Tech. 26:68-72. doi: 10.1999/1307-6892/7063.

Olivares-Galvan, J. C., R. Escarela-Perez, J. A. A. González, J. C. Jacobo, D. Guillén, and F. P. Espino-Cortés. 2016. Detection of interturn faults during transformer energization using wavelet transform. IEEE International Autumn Meeting on power, electronics and computing, ROPEC 2016. 1-5. doi: 10.1109/ROPEC.2016.7830612.

Oliveira L. M. R., and A. J. Cardoso. 2017. Comparing power transformer turn-to-turn faults protection methods: Negative sequence component versus

space vector algorithms. *IEEE Trans Ind Appl.* 53:2817-2825. doi: 10.1109/TIA.2016.2613506.

Ramchandran, K., and M. Vetterli. 1993. Best wavelet packet bases in a rate-distortion sense. *IEEE Trans Image Process.* 2:160-175. doi: 10.1109/83.217221.

Torres J. E., M. Valtierra-Rodriguez, M. A. Juarez, and G. Vazquez. 2014. Efficient discrete wavelet representation of electrical power disturbances by measuring energy concentration in the tiled timefrequency plane. *IEEE 23rd International Symposium on Industrial Electronics (ISIE).* 998-1003. doi: 10.1109/ISIE.2014.6864748.

Urbina-Salas, I., J. R. Razo-Hernandez, D. Granados-Lieberman, M. Valtierra-Rodriguez, and J. E. Torres-Fernandez. 2017. Instantaneous power quality indices based on single-sideband modulation and wavelet packet-Hilbert transform. *IEEE Trans Instrum Meas.* 66:1021-1031. doi: 10.1109/TIM.2017.2663560.

Wu, W., T. Ji, M. Li and Q. Wu. 2016. Using mathematical morphology to discriminate between internal fault and inrush current of transformers. *IET Generation, Transmission & Distribution.* 10:73-80. doi: 10.1049/iet-gtd.2015.0216.

Yazdani-Asrami, M., M. Taghipour-Gorjikolaie, S. M. Razavi, and S. A. Gholamian. 2015. A novel intelligent protection system for power transformers considering possible electrical faults, inrush current, CT saturation and over-excitation. *Int J Electr Power Energy Syst.* 64:1129-1140. doi: 10.1016/j.ijepes.2014.08.008

Yen, G. G., and K. C. Lin. 2000. Wavelet packet feature extraction for vibration monitoring. *IEEE Trans Ind Electron.* 47:650-667. doi: 10.1109/41.847906.

Zhou, H., K. Hong, H. Huang, and J. Zhou. 2016. Transformer winding fault detection by vibration analysis methods. *Appl Acoust.* 114:136-146. doi: 10.1016/j.apacoust.2016.07.024.



# **SOL-GEL SYNTHESIS OF THE DOUBLE PEROVSKITE $\text{Sr}_2\text{FeMO}_6$ ASSISTED BY MICROWAVE TECHNIQUE**

---

J. Valdés<sup>1\*</sup>, A. Cuan<sup>1</sup>, O. Navarro<sup>2</sup>, R. Nava<sup>1</sup>, B. Aguilar<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Dirección de investigación y posgrado, Facultad de ingeniería,  
Universidad Autónoma de Querétaro,  
Cerro de las campanas S/N, Santiago de Querétaro, Querétaro, 76010, México.

<sup>2</sup>Unidad Morelia, Instituto de Investigaciones en Materiales,  
Universidad Nacional Autónoma de México,  
Antigua carretera a Pátzcuaro No. 8701, Col. Ex Hacienda de San José de la  
Huerta, 58190, Morelia, Michoacán, México.

\*Autor de correspondencia  
jesvalher@hotmail.com



## ABSTRACT

A sol-gel synthesis of the double perovskite  $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_6$  assisted by microwave technique was performed. A citric acid was used as chelating agent to modify the hydrolysis of the metal ions. The sol-gel synthesis was carried out in order to generate the precursor phases of the  $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_6$  system. Also, the conventional sol-gel synthesis was carried out for comparison purposes. The high pressures achieved with microwave heating generate phases with high crystallinity according to the X-ray pattern obtained. Besides, small rates of the metallic clusters of iron are present in the XRD pattern. Scanning electron microscope technique also was carried out for characterization of the precursor phases and the final system.

### Keywords:

sol-gel synthesis; microwave heating; double perovskite; X-ray, SEM.

## RESUMEN

El Sistema  $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_6$  fue sintetizado por la técnica de sol-gel asistido por microondas. Se utilizó ácido cítrico como agente quelante para modificar la hidrólisis de los iones metálicos. La síntesis por sol-gel fue realizada con el fin de generar las fases precursoras del sistema  $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_6$ . Igualmente, para fines de comparación se sintetizó el sistema por el método de sol-gel y calentamiento tradicional. Las altas presiones logradas con el calentamiento por microondas generan fases con alta cristalinidad de acuerdo con los patrones de difracción de rayos X obtenidos. Pequeñas cantidades de Fe metálico se encuentran presentes en el patrón de rayos X. La morfología de las fases precursoras al igual que el compuesto final se analizó por la técnica de microscopía electrónica de barrido.

### Palabras clave:

síntesis por sol-gel, calentamiento por microondas, doble perovskita, rayos X, SEM.

## 1. INTRODUCTION

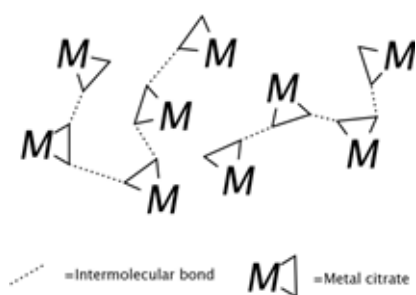
An ideal double perovskite has the formula unit:  $\text{A}2\text{B}'\text{B}''\text{O}_6$ , where A denotes an alkali-earth or rare-earth ion, B' and B'' are transition-metal sites occupied alternately, there are oxygen bridges every B' and B'' atom pair give alternating B'O<sub>6</sub> and B''O<sub>6</sub> octahedral form (Kobayashi et al., 1998). The double perovskite  $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_6$ , namely (SFMO), has a particular interest for its ferromagnetic and half-metallic behavior. The ordered lattice structure of SFMO consist of body centered cubic lattice with alternating FeO<sub>6</sub> and MoO<sub>6</sub> octahedral forms at the corners and the strontium atom in its center (Valenzuela et al., 2014). In particular, semi-metallic behavior has been investigated, in which only one-spin direction in the Fermi energy is present, due to its attractive properties for spintronics applications (Soto et al., 2014). Therefore, the SFMO is very attractive for applications in magnetic recording devices (Valenzuela et al., 2014) caused by the low field magnetoresistance of the grate in granular form (Cernea et al., 2013) and a relatively high Curie temperature (410-450K) (Kobayashi et al., 1998).

The synthesis of SFMO is traditionally prepared with the solid state method by mixing the SrMoO<sub>4</sub> and SrFeO<sub>3-x</sub> precursors to form the double perovskite ( $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_6$ ) by calcination and reduction of them. This method requires a high temperature (1270°C) for the reduction and the grain size is in the micron scale, reducing its magnetoresistance (Zhai et al., 2012).

In the sol-gel citrate synthesis, the citric acid play the role as a chelating agent in order to modify the hydrolysis for the metal ions (Danks et al., 2016). This molecule with three carboxyl acid moieties is able to dissociate, and it is an effective chelating agent. The metal ions are attached in the OH of the carboxyl group liberating a H<sup>+</sup> forming a metal citrate, the gelification process occurs with



the intermolecular bond of the metal citrates (Figure 1).



**Figure 1.** Schematic Gelification of the metallic citrates, there is a weakly interconnected network.

It has been reported that heating the porous of the gel at high temperatures causes densification (Hench and West, 1990). In addition, it is known that the microwave-assisted synthesis uses the property from some compounds, in a liquid or solid state, to transform electromagnetic energy into heat (Liu et al., 2007), the energy transfer is achieved from dielectric losses, which results in the dissipation of electromagnetic energy in heat (de la Hoz et al., 2005). In contrast with the conventional synthesis, heat transfer is slow and occurs from the surface to the bulk (generating a temperature gradient), while the microwave-assisted synthesis allows selective absorption of electromagnetic radiation, uniform heating and even promotes reactions which would not occur in classical conditions (de la Hoz et al., 2005). In addition, heating a solution with microwaves in a closed container helps to develop a hydrothermal process (Komarneni et al., 1992). The high pressure and temperature in the container modifies the behavior of the chemical species in the solution and stimulates the generation of new phases.

The intergrain magnetoresistance of polycrystalline  $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_6$  is known to depend on its grain size (Li et al., 2008) and the amount of insulating nonmagnetic  $\text{SrMoO}_4$  impurity formed during fabrication (Cerneja et al., 2013). Also, the cationic disorder

breaks down the half-metallic ferromagnetic behavior (Reyes et al., 2016). Therefore, the method and synthesis conditions must be chosen carefully, so new techniques of synthesis have to be developed to find a better crystalline phase of SFMO with a decrease of the cationic disorder. Based on this fact, the method of sol-gel microwave assisted synthesis is used in this work and it is compared with the traditional sol-gel method, where X-ray diffraction (XRD) and Scanning electron microscopy (SEM) techniques were applied for the characterization of the materials.

## 2. METHODOLOGY

The system  $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_6$  was synthesized by the sol-gel microwave assisted synthesis method from its precursor's phases, then a calcination of  $900^\circ\text{C}$  for 3 hours was performed, and finally a reduction in an atmosphere of  $\text{Ar}2\% \text{H}$  was achieved to obtain the final system  $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_6$ .

Strontium nitrate  $\text{Sr}(\text{NO}_3)_2$  (99.995%), iron (III) nitrate nonahydrate  $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$  (99.95%), molybdenum (IV) oxide  $\text{MoO}_3$  (99.99%), citric acid Monohydrate (99%) and ammonium hydroxide solution (28.0-30.0%) to form Ammonium molybdate  $(\text{NH}_4)_2\text{MoO}_4$  are used to form the precursor agents. All reagents were provided by Sigma-Aldrich. The reagents were weighted according to their stoichiometric rate. Molar ratio citric acid:  $(2\text{Sr} + \text{Fe} + \text{Mo})$  salts used were 4.3:1.

In a beaker of 200ml, 50ml deionized water were added and put into a magnetic stirring at  $80^\circ\text{C}$ . 0.5ml of ammonium hydroxide solution and 144mg of molybdenum (IV) oxide were added in order to obtain ammonium molybdate, the solution was stirred until transparency was reached, then 150ml of deionized water was added. 1g of citric acid, 423mg of Strontium nitrate and 404mg of iron (III) nitrate nonahydrate were added to the solution. The solution was maintained under stirring at  $80^\circ\text{C}$  in order to evaporate

de water and to get a 50ml of the solution. The obtained sol was placed in a microwave "Synthos 3000" from Anton Paar (Figure 3). Two experiments were performed, the first (SGMW) with 15min to reach 170°C in the solution and 30min of reaction at this conditions the containers reach a stable pressure of 41bar, and the second (SG) without microwave heating. The precipitate of SGMW was dried out and then calcined in a muffle furnace Nobertherm. The sol of SG was dried out in a furnace at 90°C for 18H and then calcined in a muffle furnace Nobertherm. Soon after, the two experiments (SGMW and SG) were put into a muffle furnace at 900°C, were the average speed was about of 10°C/min and then they were maintained for 3 hours. The  $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_6$  system was reached in a reduction environment with a flow of Ar2%H at 1200°C for 3 hours.

The structure and microstructure of the precursors phases of SFMO powders and the SFMO final system were investigated by X-ray diffraction (XRD) and scanning electron microscopy (SEM). The XRD patterns of SFMO and its precursor phases were recorded with a D8 ADVANCE diffractometer form Bruker-AXS. For the powder diffraction,

CuK $\alpha$ 1 radiation (wavelength 1.5406 Å), LiF crystal monochromator and Bragg-Brentano diffraction geometry were used. The data were acquired at 25°C, with a step-scan interval of 0.020° and step time of 5s. The SEM was carried out using a JSM-IT300 operated at 10.0KeV.

### 3. RESULTS

#### 3.1 X-ray diffraction analysis

Figure 2 shows the XRD Pattern of the samples SGMW and SG from the precursor phases of the double perovskite  $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_6$ . It can be seen that both of the samples presents a phase of  $\text{SrMoO}_4$   $\text{SrMoO}_4$  (PDF: 01-085-0586), but they differ in one compound  $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$  (PDF:00-033-1340) for the SGMW sample and  $\text{SrFe}_2\text{O}_3$  for the SG sample. The presence of  $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$  in the SGMW sample can achieve metallic iron in the final step of the synthesis (as it can be seen in Figure 3). The intensity of the Bragg reflections in Figure 2 shows a better crystallinity for the SGMW sample compared with SG sample.

**Figure 2.** XRD Pattern of the SGMW and SG samples of the precursor phases (after the calcination process) of the double perovskite  $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_6$ .

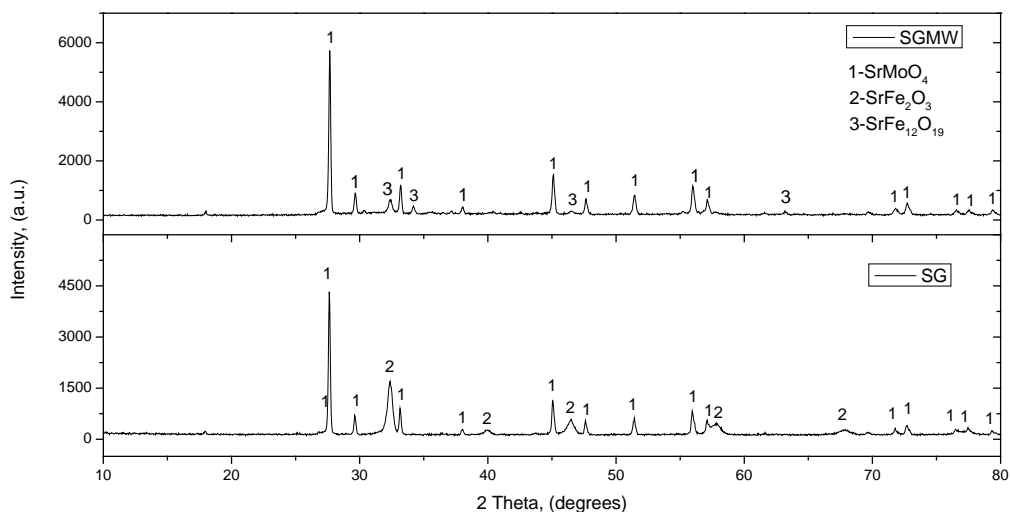
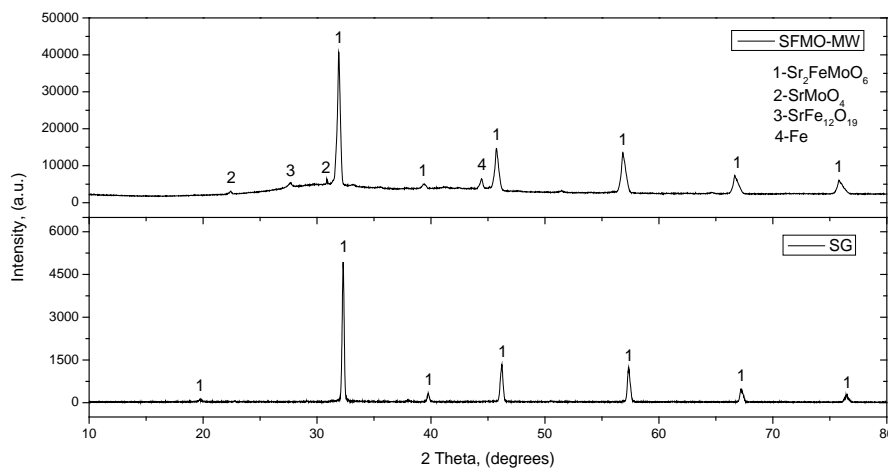




Figure 3 shows the XRD pattern of the SGMW and SG samples after the reduction process. In this final step the  $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_6$  (PDF: 01-072-6394) phase is formed. For the intensity in both samples, it can be seen that the SGMW sample shows a better crystallinity compared with the SG sample, the background in the SGMW XRD pattern changes between  $25^\circ$  and  $45^\circ$ , this change shows the presence of an amorphous phase.

Also the widths of the Bragg reflections in SGMW are bigger than those of SG, these phenomena talks about the crystallite size, where the crystallite size is smaller for the SFMO synthesized by microwaves than those obtained by the conventional Sol-gel technique, 24nm for SGMW and 415nm for SG sample (the crystallite size was obtained by Scherrer method).

**Figure 3.** XRD patterns of the SGMW and SG samples after the reduction process. In this final step the  $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_6$  phase is formed, the intensity of the Bragg reflections shows a better crystallinity for the SGMW sample.



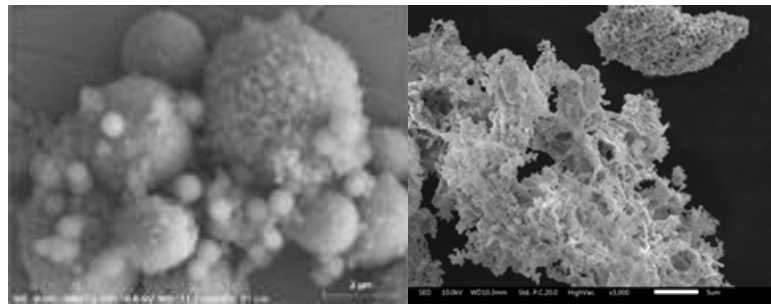
### 3.2 Scanning electron microscopy

The SEM was carried out using a JSM-IT300 operated at 10.0KeV. In order to see the morphology of the system a secondary electron image was carried out, a secondary electron (SE), Figure 4 illustrate the morphology of the SGMW sample and the SG sample after the calcination process. The notable difference in both samples is the spherical shape for the SGMW, this shape can be attributed for hydrothermal process involved in the microwave assisted synthesis. The SG sample shows a porous network of the precursor phases, this morphology is attributed to the drying process in the sol-gel process.

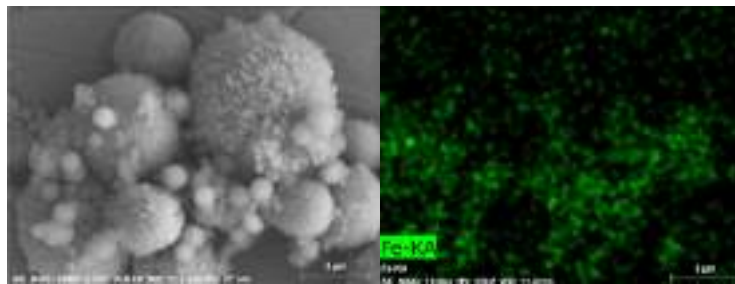
buton of the iron atom in the sample SGMW after the microwave assisted synthesis, it can be seen that there is iron all over the area except in the biggest spheres; Figure 6 shows the distribution of oxygen, strontium and molybdenum, a phase of oxide of strontium and molybdenum is in the biggest spheres. The spectrum of this analysis is shown in figure 7.

An energy dispersed X-ray (EDS) mapping analysis for chemical characterization was carried out, in the Figure 5 it is show the distri-

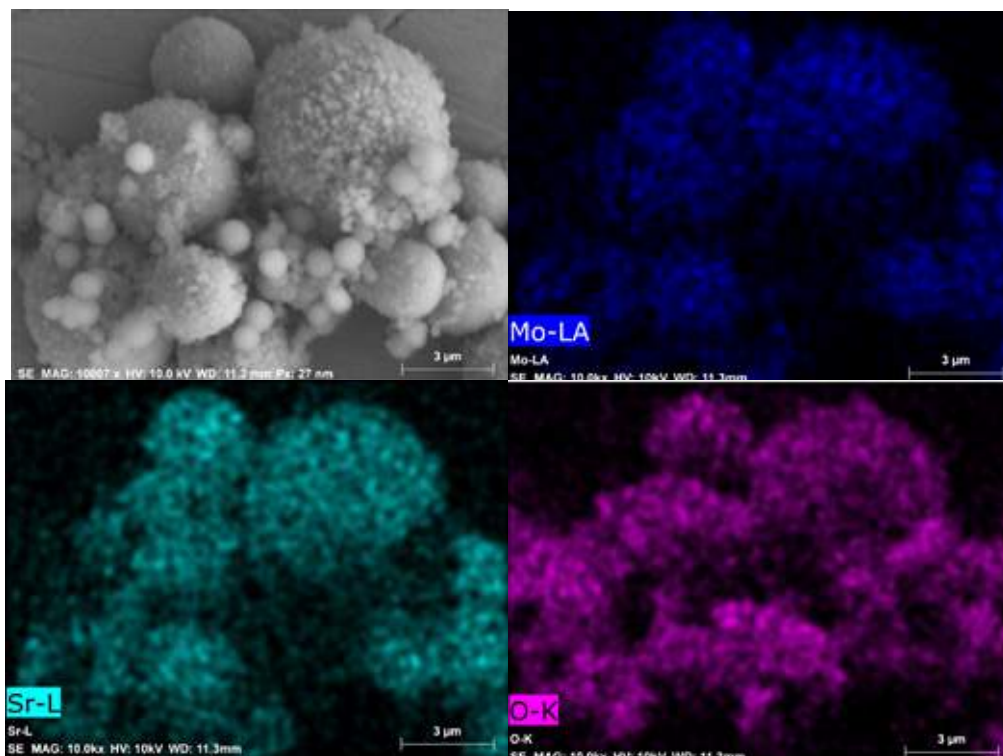
**Figure 4.** Secondary electrons image of the SGMW and SG samples; SGMW shows particles with an spherical shape; SG sample shows a complicated network of the precursor phases.

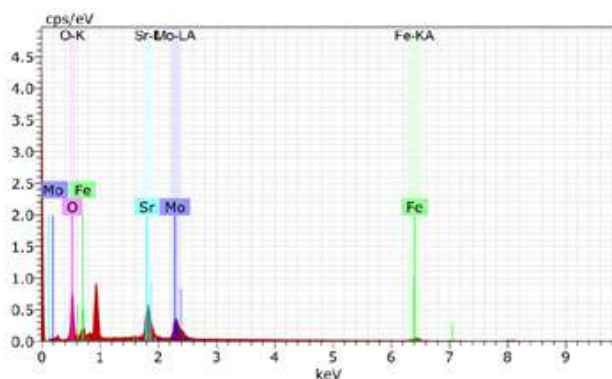


**Figure 5.** Image of the EDS analysis of the sample SGMW after the calcination process, the morphology of the sample is illustrated in the left side and the iron distribution in the same area is shown in the right side.



**Figure 6.** Image of the EDS analysis of the sample SMW1 after the calcination process, the morphology of the sample is illustrated in the upper right corner; the distribution of oxygen is in the upper left corner; the strontium distribution is shown at the bottom right corner; the molybdenum distribution is shown at the bottom left corner.





**Figure 7.** Spectrum of the EDS analysis for the sample SGMW after the calcination process.

## 4. DISCUSSION

The x-ray diffraction pattern for the SGMW sample (Figure 2) shows that the precursors  $\text{SrMoO}_4$  and  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  were produced under the microwave synthesis condition, also the sample SGMW results in a better crystallinity than the sample SG, this can be seen for the intensity of the Bragg diffraction and its defined morphology, however, when the sample was calcined, the presence of  $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$  was observed (Figure 2), instead of strontium and iron 1:1 compounds that were desirable, this change caused the creation of iron phases when the sample was reduced (figure 3). With regard to the morphology of the sample synthesized by microwaves (figure 4) we can see a change in the shape of the particles, changing to a spherical shape instead of disordered clusters shape and high porosity, this change of shape should be due to the pressure reached inside the container when the sample was synthesized by microwave. Microwave assisted synthesis has given rise to new forms in the morphology of the system and future experiments will have to be done to get a sample of  $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_6$  without contaminating phases.

## 5. CONCLUSION

The sol gel process by metal citrates is a technique that depends on many factors such as the pH, the salts used, and the amount of water in the sol creation and also in the homogeneous distribution of the metallic cations in the gel. Although the microwave-assisted synthesis process allows a uniform heating throughout the solution, increasing the pressure in the container can be a factor to generate the iron phase that are found together with the  $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_6$  final system, the XRD pattern of the synthesized samples with microwaves show an increase in the crystallinity of the system with respect to those synthesized in a conventional way. The morphology of the precursors formed by the microwave assisted synthesis is shown to be more uniform and in a defined way.

In order to find the ideal conditions in which the microwave-assisted synthesis improves the creation of the final system ( $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_6$ ) it is necessary to play with the conditions as the pH in the solution, the temperature and even change the type of acid that is used. The formation of the gel in the solution is of vital importance in a sol-gel process, improving the gelation process and homogeneity it can achieve much more promising results for the synthesis of these quaternary systems.

## ACKNOWLEDGEMENTS

This work was partially supported by grants No. 252677 from Conacyt and PA-PIIT-IN104616 from UNAM México. . AC thanks to PRODEP for the financial granted through the Research Project UAQ-PTC-339.

## REFERENCES

Cernea, M., F. Vasiliu, C. Plapcianu, C. Bartha, I. Mercioniu, I. Pasuk, R. Lowndes, R. Trusca, G. V. Aldica, and L. Pintilie. 2013. Preparation by sol-gel

and solid state reaction methods and properties investigation of double perovskite  $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_6$ . *J. Eur. Ceram. Soc.* 33:2483–2490.

Danks, A. E., S. R. Hall, and Z. Schnepp. 2016. The evolution of “sol-gel” chemistry as a technique for materials synthesis. *Mater. Horizons* 3:91–112.

Hench, L. L., and J. K. West. 1990. The sol-gel process. *Chem. Rev.* 90:33–72.

Kobayashi, K.-I., T. Kimura, H. Sawada, K. Terakura, and Y. Tokura. 1998. Room-temperature magnetoresistance in an oxide material with an ordered double-perovskite structure. *Nature* 395:677–680.

Komarneni, S., R. Roy, and Q. H. Li. 1992. Microwave-hydrothermal synthesis of ceramic powders. *Mater. Res. Bull.* 27:1393–1405.

de la Hoz, A., Á. Díaz-Ortiz, and A. Moreno. 2005. Microwaves in organic synthesis. Thermal and non-thermal microwave effects. *Chem. Soc. Rev.* 34:164–178.

Li, X. H., Y. P. Sun, W. J. Lu, R. Ang, S. B. Zhang, X. B. Zhu, W. H. Song, and J. M. Dai. 2008. Size dependence of electronic and magnetic properties of double-perovskite  $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_6$ . 145:98–102.

Liu, S., X. Qian, and J. Xiao. 2007. Nanopowders by microwave assisted sol-gel route. :187–193.

Reyes, A. M., Y. Arredondo, O. Navarro. 2016. First principles study of the effects of disorder in the  $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_6$  perovskite. *Rev. Mex. Física* 62:160–163.

Soto, T. E., J. L. Valenzuela, R. Mondragón, R. Morales, J. Lemus-Ruiz, and O. Navarro. 2014. Synthesis of the off-stoichiometric oxide system  $\text{Sr}_2\text{Fe}_{1+x}\text{Mo}_{1-x}\text{O}_6$  with  $-1 < x < 0.25$ . *Phys. B Condens. Matter* 455:6–9. Valenzuela, J. L., T. E. Soto, J. Lemus, O. Navarro, and R. Morales. 2014. Reaction kinetics of the double perovskite  $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_6$  by gas-solid reactions. *Phys. B Condens. Matter* 455:10–13.

Zhai, Y., J. Qiao, G. Huo, and S. Han. 2012. Synthesis, magnetic and electrical transport properties of magnetoresistance material  $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_6$  by microwave sintering. *J. Magn. Magn. Mater.* 324:2006–2010.



UNIVERSIDAD  
AUTÓNOMA  
DE QUERÉTARO



FACULTAD  
DE INGENIERÍA



DIPFI  
POSGRADO  
INGENIERÍA



PERSPECTIVAS DE LA  
CIENCIA Y LA INGENIERÍA