

ISSN 2531-2960

Volumen I, Número 2 — Abril — Junio - 2017

# Revista del Desarrollo Tecnológico

ECORFAN®



**ECORFAN-Spain**

## **Indización**

Google Scholar

Research Gate

REBID

Mendeley

## **ECORFAN-Spain**

### **Directorio**

#### **Principal**

RAMOS-ESCAMILLA, María. PhD.

#### **Director Regional**

MIRANDA-GARCIA, Marta. PhD.

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

SERRUDO-GONZALES, Javier. BsC.

#### **Edición de Logística**

PERALTA-CASTRO, Enrique. PhD.

#### **Diseñador de Edición**

IGLESIAS-SUAREZ, Fernando. BsC

Revista del Desarrollo Tecnológico, Volumen 1, Número 2, de Abril a Marzo - 2017, es una revista editada trimestralmente por ECORFAN-Spain. Calle Matacerquillas 38, CP: 28411. Moralzarzal -Madrid. WEB: [www.ecorfan.org/spain](http://www.ecorfan.org/spain), [revista@ecorfan.org](mailto:revista@ecorfan.org). Editora en Jefe: RAMOS-ESCAMILLA, María. Co-Editor: MIRANDA-GARCÍA, Marta. PhD. ISSN-2531-2960. Responsables de la última actualización de este número de la Unidad de Informática ECORFAN. ESCAMILLA-BOUCHÁN, Imelda, LUNA-SOTO, Vladimir, actualizado al 30 de Junio 2017.

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

Queda terminantemente prohibida la reproducción total o parcial de los contenidos e imágenes de la publicación sin permiso del Centro Español de Ciencia y Tecnología.

## **Consejo Editorial**

BELTRÁN-MIRANDA, Claudia. PhD  
Universidad Industrial de Santander, Colombia

BELTRÁN-MORALES, Luis Felipe. PhD  
Universidad de Concepción, Chile

RUIZ-AGUILAR, Graciela. PhD  
University of Iowa, U.S.

SOLIS-SOTO, María. PhD  
Universidad San Francisco Xavier de Chuquisaca, Bolivia

GOMEZ-MONGE, Rodrigo. PhD  
Universidad de Santiago de Compostela, España

ORDÓÑEZ-GUTIÉRREZ, Sergio. PhD  
Université Paris Diderot-Paris, Francia

ARAUJO-BURGOS, Tania. PhD  
Universita Degli Studi Di Napoli Federico II, Italia

SORIA-FREIRE, Vladimir. PhD  
Universidad de Guayaquil, Ecuador

## **Consejo Arbitral**

VGPA. MsC  
Universidad Nacional de Colombia, Colombia

EAO. MsC  
Universidad Nacional de Colombia, Colombia

MMD. PhD  
Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, México

BRIIG. PhD  
Bannerstone Capital Management, U.S.

EAO. MsC  
Bannerstone Capital Management, U.S.

OAF. PhD  
Universidad Panamericana, México

CAF. PhD  
Universidad Panamericana, México

RBJC. MsC  
Universidad Panamericana, México

## Presentación

ECORFAN, es una revista de investigación que publica artículos en el área de: Desarrollo Tecnológico

En Pro de la Investigación, Docencia, y Formación de los recursos humanos comprometidos con la Ciencia. El contenido de los artículos y opiniones que aparecen en cada número son de los autores y no necesariamente la opinión del Editor en Jefe.

El artículo *Caracterización no lineal y estimación de coeficientes paramétricos en la representación de la saturación magnética del transformador eléctrico* por CONTRERAS-AGUILAR, Luis, VENEGAS-TRUJILLO, Tiberio, ARROYO-LEDESMA, Jaime y CONTRERAS-SUÁREZ, Juan con adscripción en la Universidad de Colima, como siguiente artículo está *Los residuos de agave como factor de corrosión del suelo donde se vierte* por HOZ-ZAVALA, Ma. Elia Esther y NAVA-DIGUERO, Pedro con adscripción en la Universidad Tecnológica de Altamira, como siguiente artículo *Síntesis y caracterización de películas delgadas de  $Cu_2ZnSnS_4$  (CZTS) por el método de sputtering para aplicación en celdas solares* por SARRACINO-MARTÍNEZ, Omar, MORALES-ALMEIDA, Ricardo, RICARDEZ-JIMÉNEZ, Cristino y PÉREZ-HERNÁNDEZ, Germán con adscripción en la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, y la Universidad Popular de la Chontalpa, como siguiente artículo está *Estudio sobre la simetría de extremidades* por ÁLVAREZ-SÁNCHEZ, Ervin Jesús, ALDANA-FRANCO, Rosario, LÓPEZ-VELÁZQUEZ, Andrés y GALÁN-MÉNDEZ, Frixia con adscripción en la Universidad Veracruzana, como siguiente artículo está *Diseño de un intercambiador de calor tierra-aire en clima cálido-humedo* por DÍAZ-HERNÁNDEZ, Heidi Paola, AGUILAR-CASTRO, Karla María, MACÍAS-MELO, Edgar Vicente y SERRANO-ARRELLANO con adscripción en la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco y el Instituto Tecnológico Superior de Huichapan, como siguiente artículo está *Optimización de la iluminación de la planta alta de un edificio académico para eficiencia energética* por RODRÍGUEZ-URIBE, Juan Carlos, SERRANO-ARELLANO, Juan, MACÍAS-MELO, Edgar Vicente, SANTOS-LAZARO Elías David con adscripción en el Instituto Tecnológico Superior de Huichapan y la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, como siguiente artículo está *Medición de radiación solar global y comparación con datos de satélites para un sitio de México* por DIBENE-ARRIOLA, Luis, PAREDES-VÁZQUEZ, César y MESSINA-LÓPEZ, Víctor con adscripción en la Universidad Politécnica de Zacatecas y el Instituto Tecnológico Superior de Fresnillo.

## Contenido

| Artículo   | Página |
|--|--------|
| <b>Caracterización no lineal y estimación de coeficientes paramétricos en la representación de la saturación magnética del transformador eléctrico</b><br>CONTRERAS-AGUILAR, Luis, VENEGAS-TRUJILLO, Tiberio, ARROYO-LEDESMA, Jaime y CONTRERAS-SUÁREZ, Juan                       | 1-10   |
| <b>Los residuos de agave como factor de corrosión del suelo donde se vierte</b><br>HOZ-ZAVALA, Ma. Elia Esther y NAVA-DIGUERO, Pedro   | 11-24  |
| <b>Síntesis y caracterización de películas delgadas de <math>\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4</math> (CZTS) por el método de sputtering para aplicación en celdas solares</b><br>MORALES-ALMEIDA, Ricardo, SARRACINO-MARTÍNEZ, Omar, RICÁRDEZ-JIMÉNEZ, Cristino y PÉREZ-HERNÁNDEZ, Germán | 25-33  |
| <b>Estudio sobre la simetría de extremidades</b><br>ÁLVAREZ-SÁNCHEZ, Ervin Jesús, ALDANA-FRANCO, Rosario, LÓPEZ-VELÁZQUEZ, Andrés y GALÁN-MÉNDEZ, Frixia   | 34-43  |
| <b>Diseño de un intercambiador de calor tierra-aire en clima cálido-humedo</b><br>DÍAZ-HERNÁNDEZ, Heidi Paola, AGUILAR-CASTRO, Karla María, MACÍAS-MELO, Edgar Vicente y SERRANO-ARRELLANO   | 44-51  |
| <b>Optimización de la iluminación de la planta alta de un edificio académico para eficiencia energética</b><br>RODRÍGUEZ-URIBE, Juan Carlos, SERRANO-ARELLANO, Juan, MACÍAS-MELO, Edgar Vicente, SANTOS-LAZARO Elías David   | 52-59  |
| <b>Medición de radiación solar global y comparación con datos de satélites para un sitio de México</b><br>DIBENE-ARRIOLA, Luis, PAREDES-VÁZQUEZ, César y MESSINA-LÓPEZ, Víctor   | 60-73  |

*Instrucciones para Autores*

*Formato de Originalidad*

*Formato de Autorización*

## Caracterización no lineal y estimación de coeficientes paramétricos en la representación de la saturación magnética del transformador eléctrico

CONTRERAS-AGUILAR, Luis\*†, VENEGAS-TRUJILLO, Tiberio, ARROYO-LEDESMA, Jaime y CONTRERAS-SUÁREZ, Juan

*Universidad de Colima, campus Coquimatlán, Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, Km 9 carretera Colima-Coquimatlán, Coquimatlán, Colima, México, C.P*

Recibido Abril 5, 2017; Aceptado Junio 20, 2017

### Resumen

Los fenómenos que surgen durante la operación transitoria de los transformadores eléctricos, se pueden caracterizar mediante modelos matemáticos que describan su comportamiento no lineal. Algunos softwares computacionales especializados para el análisis de transitorios en sistemas eléctricos incluyen modelos sofisticados de transformadores que describen apropiadamente estos fenómenos. Sin embargo, algunos de estos modelos requieren del conocimiento de la saturación del núcleo que en algunos casos no son proporcionados por el fabricante. En este artículo se presenta un modelo alternativo de la ecuación diferencial del núcleo ferromagnético no lineal, el cual es adecuado para estudios transitorios de baja frecuencia en transformadores eléctricos. Además, se presenta una forma simple para determinar los coeficientes paramétricos de la representación de saturación del núcleo. Finalmente, se realizan simulaciones del modelo monofásico del transformador eléctrico para comparar y cuantificar el modelo presentado con mediciones reales.

**Saturación, transformador eléctrico, corriente de *inrush*, mediciones, simulación**

### Abstract

The phenomena that occur during the transient operation of electric transformers are characterized by mathematical models that describe its non-linear behavior. Specialized software for the transient analysis of electrical systems has included sophisticated models of transformers that properly describe the non-linear phenomena. However, some of these models require special knowing of the non-linear characteristic in the core, which in many cases is not provided by the manufacturer. This paper presents an alternative differential equation model of the non-linear ferromagnetic core, which it is suitable for studies of low-frequency transients of electric transformers. In addition, a simple way to determine the parametric coefficients of the non-linear representation in the core saturation is carried-out. Finally, simulations of the single-phase transformer model are compared with measurements in order to validate and quantify the presented model.

**Saturation, electric transformer, *inrush* current, measurements, simulations**

**Citación:** CONTRERAS-AGUILAR, Luis, VENEGAS-TRUJILLO, Tiberio, ARROYO-LEDESMA, Jaime y CONTRERAS-SUÁREZ, Juan. Caracterización no lineal y estimación de coeficientes paramétricos en la representación de la saturación magnética del transformador eléctrico. Revista del Desarrollo Tecnológico 2017, 1-2: 1-10

\* Correspondencia al Autor (Correo Electrónico: luisc@uol.mx)

† Investigador contribuyendo como primer autor.



## Introducción

Durante la energización y/o switcheo del transformador eléctrico se puede originar una gran corriente denominada corriente de “*inrush*”. Este fenómeno se caracteriza por una gran magnitud de corriente respecto al nominal, así como una gran componente de corriente directa y un importante contenido armónico. En términos generales, son diversos los factores que influyen para que se presente este fenómeno transitorio. En este contexto, las condiciones iniciales y la característica no lineal del núcleo ferromagnético del transformador son dos factores importantes que influyen directamente sobre la respuesta transitoria al momento del switcheo. También, la corriente de *inrush* puede llegar a ser hasta diez o más veces la corriente nominal durante el transitorio (Cheng et al, 2004), mientras la corriente de magnetización en estado estacionario, suele ser inferior al 1% de la corriente nominal.

Algunos de los efectos no deseados que se presentan cuando aparecen corrientes de *inrush* son (Kovan et al., 2011):

- Surgen problemas relacionados a la calidad de la energía y ferresonancia.
- Se incrementan los esfuerzos eléctricos y mecánicos que pueden dañar el equipo.
- Los sistemas de protección pueden operar falsamente.

Por otro lado, el modelado de transformadores puede llegar a ser muy complejo, debido principalmente a la gran cantidad de diseños en núcleos y al hecho de que algunos de sus parámetros son no lineales y dependientes de la frecuencia (Martinez-Velasco & Mork, 2003).

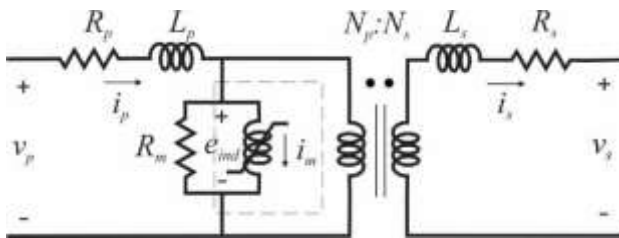
Además, dependiendo de las necesidades de estudio se han clasificado diferentes rangos de frecuencia para el análisis de transitorios (Members et al., 2013). También, los modelos desarrollados deben ser válidos para el rango específico de frecuencia o estudio requerido. Considerando este trabajo se destaca los transitorios de baja frecuencia, con rango de frecuencia desde los 5 Hz hasta 1 kHz.

Del mismo modo, se pueden utilizar diversos criterios para clasificar los modelos de transformadores en simulaciones de transitorios de baja frecuencia (Martinez-Velasco & Mork, 2003). Se destacan tres grupos principales de modelos los cuales están basados en: representación matricial (impedancia o admitancia), otro grupo son los modelos basados en la topología y el tercer grupo se basa en componentes saturables del transformador. En este sentido, el desarrollo del modelo del transformador para simulaciones de transitorios de baja frecuencia debe considerar la saturación y pérdidas del núcleo ferromagnético.

Este trabajo tiene como objetivo mostrar una representación alternativa del transformador para simulaciones transitorias de baja frecuencia. El modelo está basado en el circuito eléctrico clásico (ver Figura 1). La propuesta se centra en el modelado transitorio del inductor no lineal que representa la saturación magnética del transformador. La descripción de la saturación es mediante funciones continuas y diferenciables que permite acoplarse directamente a la ecuación diferencial que describe el comportamiento de la corriente de magnetización en el transformador. Así mismo, se describe un proceso simple de optimización para obtener los coeficientes de las funciones que representan la saturación del núcleo y con ello tener parámetros para desarrollar simulaciones transitorias del transformador.

### Modelado del transformador monofásico

La Figura 1 muestra el circuito clásico equivalente-T del transformador monofásico con parámetros concentrados. El circuito representa un transformador de dos devanados, donde la rama central en paralelo representa el núcleo ferromagnético. En esta representación se consideran las pérdidas en el núcleo ( $R_m$ ) y su característica de saturación ( $i_m$ ). Así mismo  $R_{p,s}$  y  $L_{p,s}$  son las pérdidas en el cobre y la inductancia propia de cada devanado, respectivamente.



**Figura 1** Circuito equivalente-T del transformador monofásico

Fuente: Elaboración propia con información de dominio público

Aplicando las leyes de Kirchhoff y refiriendo al lado primario del transformador se tiene,

$$v_p = R_p i_p + L_p \frac{di_p}{dt} + e_{ind} \quad (1)$$

$$e_{ind} = a(R_s i_s + L_s \frac{di_s}{dt} + v_s) \quad (2)$$

$$e_{ind} = R_m (i_p - \frac{i_s}{a} - i_m) \quad (3)$$

donde  $a$  es la relación de transformación y está dada por  $a = N_p/N_s$ ,  $p$  y  $s$  denotan primario y secundario respectivamente,  $v$  y  $i$  son los voltajes y corrientes.

### Representación alternativa en la saturación del núcleo

Ahora, observando la parte de saturación en el núcleo (recuadro discontinuo) y de acuerdo a la ley de Faraday para los enlaces de flujo se tiene (Staff, 1965),

$$e_{ind} = \frac{d\lambda}{dt} \quad (4)$$

Con

$$\lambda = L_m i_m \quad (5)$$

Desde que la inductancia ( $L_m$ ) no es constante y es función de la reluctancia ( $\mathfrak{R}$ ) (Staff, 1965),

$$L_m = \frac{N^2}{\mathfrak{R}} \quad (6)$$

y la reluctancia, a su vez es función de la permeabilidad ( $\mu$ ) del material magnético en el núcleo,

$$\mathfrak{R} = \frac{l}{\mu A} \quad (7)$$

donde  $A$  es el área de la sección transversal del núcleo,  $l$  es la longitud media del trayecto del flujo en el núcleo y  $N$  es el número de vueltas en la bobina. Sustituyendo (7) y (6) en (5) se obtiene,

$$\lambda = K \mu i_m \quad (8)$$

donde  $K = AN^2/l$  y depende de los parámetros físicos del núcleo. Sustituyendo (8) en (4),

$$e_{ind} = K \frac{d\mu i_m}{dt} \quad (9)$$

La permeabilidad ( $\mu$ ) no es constante en materiales ferromagnéticos tal que,

$$e_{ind} = K \left[ \mu \frac{di_m}{dt} + i_m \frac{d\mu}{dt} \right] \quad (10)$$

Resolviendo para  $\mu$  en (8) y substituyendo en la ecuación anterior resulta,

$$e_{ind} = \left\{ \frac{\lambda}{i_m} \frac{di_m}{dt} + i_m \frac{d\lambda}{dt} \right\} \quad (11)$$

Usando la regla de la cadena en el último término de la expresión anterior,

$$\frac{d\lambda}{dt} = \frac{d\lambda}{di_m} \times \frac{di_m}{dt} \quad (12)$$

Combinando (11) y (12) se obtiene la expresión alternativa para expresar el voltaje inducido del circuito,

$$e_{ind} = \left[ \frac{\lambda}{i_m} + i_m \frac{d\lambda}{di_m} \right] \frac{di_m}{dt} \quad (13)$$

Finalmente y por simplicidad con  $a = 1$ , las expresiones (1), (2) y (3) pueden ser re-arregladas para formar un sistema de ecuaciones diferenciales no lineales de la forma,

$$\frac{di_p}{dt} = \frac{1}{L_p} [v_p - (R_p + R_m)i_p + R_m(i_s + i_m)] \quad (14)$$

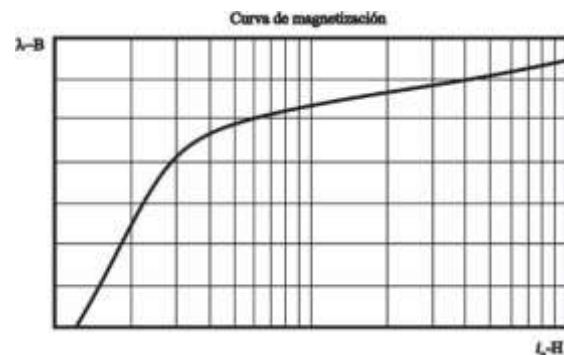
$$\frac{di_s}{dt} = \frac{1}{L_s} [-v_s - (R_s + R_m)i_s + R_m(i_p - i_m)] \quad (15)$$

$$\frac{di_m}{dt} = R_m(i_p i_m - i_s i_m - i_m^2) \left[ \lambda + i_m^2 \frac{d\lambda}{di_m} \right]^{-1} \quad (16)$$

Las ecuaciones (14), (15) y (16) describen el comportamiento transitorio de las corrientes en el primario, secundario y de magnetización respectivamente.

### Funciones para representar la saturación

La Figura 2 muestra la característica típica no lineal del núcleo ferromagnético en transformadores. Ahí se puede observar que los enlaces de flujo pueden ser función de la corriente de magnetización o de la densidad de flujo respecto a la intensidad de campo.



**Figura 2** Característica de saturación en materiales ferromagnéticos

Fuente: Elaboración propia con información de dominio público

Para nuestros propósitos aquellas funciones que logren caracterizar dicha no linealidad y sean derivables respecto a  $i_m$  o  $H$  podrán ser incluidas en el modelo. Entonces, la característica no lineal puede ser descrita como,

$$\lambda = f(i_m, a, b, c) \quad (17)$$

donde  $a$ ,  $b$  y  $c$  son coeficientes paramétricos que ajustan la función. Algunas funciones que pueden ser utilizadas son (Chiesa & Høidalen, 2007),

$$\lambda = \frac{i_m}{a + b|i_m| + c\sqrt{|i_m|}} \quad (18)$$

$$\lambda = a[\tanh(bi_m)] + ci_m \quad (19)$$

$$\lambda = a[\tan^{-1}(bi_m)] + ci_m \quad (20)$$

Las funciones (18) “Frolich modificada”, (19) “tangente hiperbólica” y (20) “tangente inversa” son continuas y diferenciable respecto a  $i_m$ , tal que sus derivadas como se indican en (16) son,

$$\left[ \lambda + i_m^2 \frac{d\lambda}{di_m} \right] = \left[ \frac{i_m(a + \frac{c}{2}\sqrt{|i_m|})}{(a+b|i_m|+c\sqrt{|i_m|})^2} \right] \quad (21)$$

$$\left[ \lambda + i_m^2 \frac{d\lambda}{di_m} \right] = [ci_m - abi_m(\tanh^2(bi_m) - 1)] \quad (22)$$

$$\left[ \lambda + i_m^2 \frac{d\lambda}{di_m} \right] = \left[ ci_m + \frac{abi_m}{(b^2i_m^2+1)} \right] \quad (23)$$

### Determinación de coeficientes paramétricos de la saturación

Usar parámetros apropiados en las ecuaciones (14)-(17) es importante para desarrollar una simulación transitoria fiable del transformador que se desea estudiar. Los parámetros relacionados con las pérdidas en los devanados ( $R_{p-s}$ ), pérdidas en el núcleo ( $R_m$ ) y las inductancia propias de los devanados ( $L_{p,s}$ ) pueden ser proporcionados por el fabricante o se pueden obtener mediante pruebas de circuito abierto y corto-circuito del transformador (Martinez-Velasco, 2009) y (Cho, 2002). En el apéndice se muestran los resultados de las pruebas y los parámetros relacionados al transformador aquí presentado. Los coeficientes ( $a, b, c$ ) de (17) pueden ser determinados mediante datos obtenidos de la característica de saturación, previamente conocida.

### Mediciones para obtener la característica de saturación

Para determinar o ajustar los coeficientes  $a, b$  y  $c$  de (17) requerimos al menos tres puntos medidos o conocidos, tal que  $x_j(i_{m,j}, \lambda_j)$  es un punto como se indica en la Figura 3. En este caso, las curvas de histéresis fueron obtenidas mediante mediciones de voltaje y corriente instantáneos en el secundario y primario del transformador en vacío, respectivamente. Entonces, los voltajes son transformados a enlaces de flujo. Para este trabajo, las curvas de histéresis fueron obtenidas en cinco puntos de operación en estado estacionario. Estas mediciones corresponden a 50, 80, 100, 120 y 150 por ciento del valor nominal del voltaje. La Figura 3 muestra solo tres curvas de histéresis correspondientes a 50, 100 y 150 por ciento del voltaje nominal.

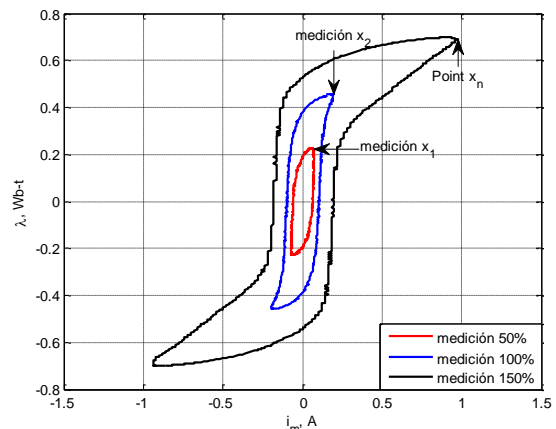


Figura 3 Mediciones de lazos de histéresis

Fuente: Elaboración propia

### Determinación de los coeficientes en la función de saturación

Una vez que se tienen los puntos  $x_j$ , se puede aplicar el método de optimización de mínimos cuadrados para determinar los valores correspondientes a los coeficientes  $a, b$  y  $c$ , como se describe a continuación.

De (17) en términos de los puntos de medición e incluyendo los errores o residuos en el ajuste de la función de saturación se obtiene,

$$\varepsilon_j = f_j(i_{m,j}, a, b, c) - \lambda_j \quad (24)$$

donde  $\varepsilon_j$  representa los residuos de los puntos  $x_j(i_{m,j}, \lambda_j)$ ,  $\forall j = 1, 2, \dots, n$ , con respecto a la función que se requiere ajustar. De tal forma, que se obtendría un sistema de residuos  $n$ -dimensional de ecuaciones algebraicas no lineales.

Entonces, el valor óptimo de los coeficientes  $a$ ,  $b$  y  $c$  se obtienen minimizando la suma de los cuadrados de los residuos como sigue,

$$\min \mathbf{F}(a, b, c) = \sum_{j=1}^n (f_j(i_{m,j}, a, b, c) - \lambda_j)^2 \quad (25)$$

donde  $f_j: \mathbf{R}^n \rightarrow \mathbf{R}$  y  $n$  es el número de mediciones que satisface  $n \geq 3$ . Ahora, asumiendo que la función objetivo  $\mathbf{F}(a, b, c)$  es diferenciable y suave, la solución del problema de optimización requiere de (24) que cumpla con la condición de optimalidad de primer orden (Wright, 1999) dada por.

$$\nabla_{a,b,c}^2 \mathbf{F}(a, b, c) = 0 \quad (26)$$

Debido a que las funciones de saturación son no lineales, el sistema  $\mathbf{F}(a, b, c)$  representa matemáticamente un sistema algebraico no lineal cuya solución proporciona los valores óptimos de los coeficientes  $a$ ,  $b$  y  $c$ . Teniendo este objetivo en mente, el método de Newton puede ser aplicado para linealizar (26),

$$\underbrace{[\nabla_{a,b,c}^2 \mathbf{F}(a, b, c)]^k}_{\mathbf{H}} [\Delta \mathbf{Y}]^k = - \underbrace{[\nabla_{a,b,c} \mathbf{F}(a, b, c)]^k}_{\nabla \mathbf{F}} \quad (27)$$

En (27) el vector de actualización es definido como  $\Delta \mathbf{Y} = \Delta[a, b, c]^T$ , el superíndice  $T$  indica la transpuesta. Los términos  $\mathbf{H}$  y  $\nabla \mathbf{F}$  es la matriz Hessiana y vector gradiente de la función objetivo, respectivamente y evaluados en la  $k$ -ésima iteración del algoritmo de solución. Por lo tanto la solución de (26) es obtenida resolviendo sucesivamente (27), donde al final de cada iteración los valores óptimos de  $a$ ,  $b$  y  $c$  son aproximados con  $\mathbf{Y}^{k+1} = \mathbf{Y}^k + \Delta \mathbf{Y}^k$  hasta cumplir una tolerancia especificada.

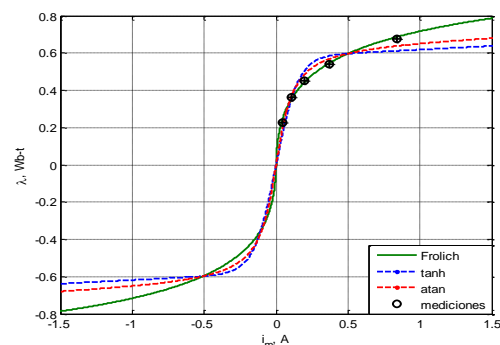
La Figura 4 muestra las curvas aproximadas a los puntos medidos con los coeficientes  $a$ ,  $b$  y  $c$  optimizados. Los valores para estos coeficientes se dan en la tabla siguiente.

|         | $a$    | $b$    | $c$    |
|---------|--------|--------|--------|
| Frolich | 0.1646 | 0.8989 | 0.4871 |
| tanh    | 0.7583 | 1.5630 | 0.1740 |
| atan    | 0.5343 | 2.9608 | 0.0112 |

**Tabla 1** Coeficientes paramétricos de las funciones

Fuente: Elaboración propia

Además, por observación se tiene que la función de Frolich modificada representa la mejor la curva deseada. Aunque, por el momento no es la finalidad, se podría incluir en el algoritmo la selección de la curva óptima, inclusive se pueden incluir más funciones que representen la característica no lineal, p.e., la ecuación logística y entre otras más.

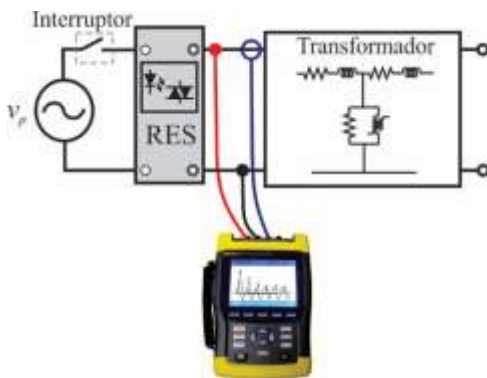


**Figura 4** Resultados de la aproximación de funciones

Fuente: Elaboración propia

### Solución transitoria del transformador monofásico

La energización del transformador es quizá la condición más crítica en cuanto a saturación del núcleo. Teniendo ello en mente y a fin de cuantificar el desempeño de la no-linealidad del modelo dentro de una simulación transitoria, se desarrolla un caso de estudio que involucra la respuesta de un transformador real, el cual se reporta en el Apéndice. Además, se desea producir las más altas corrientes de *inrush*, esto se logra cuando coincide la energización del transformador (sin carga) con el cruce por cero del voltaje de alimentación. Esta situación se puede reproducir en el laboratorio conectando el transformador por medio de un interruptor de cruce por cero. En este trabajo se utilizó un Relevador de Estado Sólido (RES) detector de cruce por cero modelo RM1A48D50 de Carlo Gavazzi (“Solid State Relays Industrial Zero Switching”, 2007). Los voltajes y corrientes instantáneos se capturaron para la cuantificación del modelo de simulación. La Figura 5 muestra el arreglo del caso de estudio, con el cual se determina las mayores corrientes de *inrush*.



**Figura 5** Caso de estudio para obtener las corrientes de *inrush* en el laboratorio

Fuente: Elaboración propia

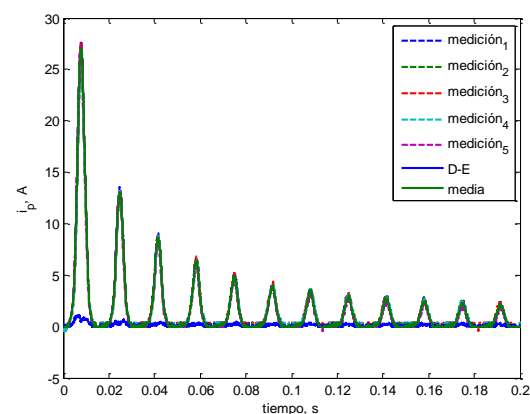
Para dar constancia al caso de estudio se desarrollaron al menos 30 energizaciones del transformador, de entre ellas se tomaron las 5 más representativas.

En la Figura 6 se muestran las 5 corrientes de *inrush* (corriente primaria) producidas por la saturación del transformador al energizar cuando el voltaje tiene pendiente positiva durante la detección del cruce por cero. Además, se muestra la media y la desviación estándar (D-E) de las 5 señales. La tabla II muestra la media y desviación estándar para los 6 picos de la señal en unidades de Amperes.

| pico  | 1 <sup>er</sup> | 2 <sup>do</sup> | 3 <sup>er</sup> | 4 <sup>to</sup> | 5 <sup>to</sup> | 6 <sup>to</sup> |
|-------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| media | 27.12           | 13.04           | 8.61            | 6.42            | 4.91            | 4.02            |
| D-E   | 1.1             | 0.65            | 0.49            | 0.39            | 0.41            | 0.34            |

**Tabla 2** Media y desviación estándar de las mediciones

Fuente: Elaboración propia



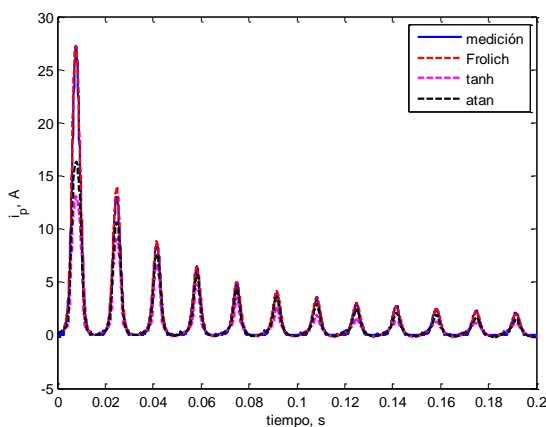
**Figura 6** Mediciones de la corriente de *inrush*

Fuente: Elaboración propia

Ahora, se desarrolla una simulación del modelo utilizando como entrada los valores de voltaje grabados en las pruebas, así como el voltaje en el secundario, el cual es el producto de una carga ( $R_L$ ) por la corriente  $i_s$ . La carga se considera lo suficientemente grande para que se suponga el transformador en vacío. Es decir, que  $i_s \approx 0$  en este caso  $R_L = 100,000 \Omega$ . Los parámetros del Apéndice se utilizan y también los coeficientes  $a$ ,  $b$  y  $c$  que se determinaron en la sección anterior.

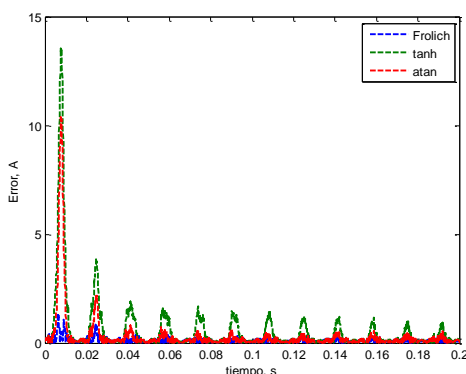
Se utiliza el ode15s de MATLAB® para solucionar el sistema de tres ecuaciones diferenciales. Las condiciones iniciales de son  $i_p(t_0) = 0$ ,  $i_s(t_0) = 0$  y  $i_m(t_0) = 0.192$ .

La Figura 7 muestra las corrientes transitorias en las simulaciones con la ecuación de saturación Frolich modificada, tangente hiperbólica y tangente inversa y la media de las mediciones. En esta figura se observa una muy buena aproximación cuando se utiliza la ecuación de Frolich modificada. Mientras que las funciones no lineales tangente hiperbólica y tangente inversa muestran mayor discrepancia durante los primeros ciclos de simulación con respecto a la media de las mediciones.



**Figura 7** Simulaciones de la corriente de inrush

Fuente: Elaboración propia



**Figura 8** Errores absolutos de las funciones

Fuente: Elaboración propia

La Figura 8 muestra los errores absolutos de cada función con respecto a la media de las mediciones y referenciados en la desviación estándar. Es importante notar que la función de Frolich modificada tienen un error máximo en el primer pico de 1.2 Amperes que es aproximadamente igual a la desviación estándar en ese pico. El error aproximado máximo en el resto de los picos en los siguientes 11 ciclos es de 0.2 Amperes, más abajo que la desviación estándar en las mediciones. Para la función tangente inversa se tienen un error absoluto máximo de aproximadamente 10, 2 y 1 Amperes en los primeros tres picos, respectivamente. El resto de los picos mantienen aproximadamente 0.5 Amperes de error absoluto, lo cual estaría dentro de la desviación estándar. La función tangente hiperbólica tienen un error de aproximadamente 13 y 3.8 Amperes en los dos primeros picos respectivamente. Mientras que un promedio de aproximadamente 1.2 Amperes en el resto de los picos.

## Conclusiones

En este trabajo se presentó una forma alternativa para representar la saturación no lineal de los transformadores. En esta forma de representación queda explícitamente la corriente de magnetización del núcleo como estado del sistema. Además, se presentaron tres funciones para representar la saturación, las cuales dependen de los coeficientes  $a$ ,  $b$  y  $c$ . También, se describió una forma simple para determinar los coeficientes la cual es basada en la minimización de los residuos por mínimos cuadrados. Se debe notar que se requieren al menos tres puntos conocidos para determinar los coeficientes y entre más puntos se le proporcione al algoritmo, tanto en la parte lineal como en la no lineal, mejor ajuste de los coeficientes se obtendrá. Para el caso presentado la función Frolich modificada tiene mejor ajuste con las mediciones realizadas en el laboratorio.

El menor error absoluto que se encontró es utilizando la función de Frolich modificada, mientras que el mayor error absoluto es con la tangente hiperbólica. Principalmente los mayores errores (función tangente hiperbólica y tangente inversa) se presentan durante los primeros picos, de lo cual se asume que el ajuste no es tan bueno en la región de saturación, mientras que en la parte lineal es más consistente.

### Agradecimiento

Los autores agradecen a la Universidad de Colima, PRODEP y CONACYT por el apoyo recibido para llevar a cabo esta investigación.

### Referencias

Cheng, C. K., Liang, T. J., Chen, J. F., Chen, S. D., & Yang, W. H. (2004). Novel approach to reducing the inrush current of a power transformer. *IEE Proceedings-Electric Power Applications*, 151(3). pp. 289-295.

Chiesa, N., & Høidalen, H. K. (2007, September). Modeling of nonlinear and hysteretic iron-core inductors in ATP. *In EEUG Meeting 2007, European EMTP-ATP Conference*, Leon, Spain.

Cho, S. D. (2002, December). *Parameter estimation for transformer modeling* (Ph.D. dissertation). Department of Electrical and Computer Engineering, Michigan Technological University, Houghton, MI, EE. UU.

Kovan, B., De Leon, F., Czarkowski, D., Zabar, Z., & Birenbaum, L. (2011, July). Mitigation of inrush currents in network transformers by reducing the residual flux with an ultra-low-frequency power source. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 26(3). 1563-1570.

Martinez-Velasco, J. A. (Ed.). (2009). *Power system transients: parameter determination*. Boca Raton, FL, EE. UU.: CRC press.

Martinez-Velasco, J. A., & Mork, B. A. (2003, June). Transformer Modeling for Low Frequency Transients-The State of the Art. *In Proceedings of the IPST International Conference on Power Systems Transients*, New Orleans, USA.

Members, C., Imece, A. F., Durbak, D.W., Elahi, H., Kol-, S., Lux, A., . . . Tarasiewicz. (2013). Modeling and Analysis of System Transients Using Digital Programs Part 2 Modeling Guidelines for Fast Front Transients. *IEEE Power & Energy Society*, pp. 5-4-5-19. *Solid State Relays Industrial Zero Switching*. (2007). Carlo Gavazzi.

Staff, E. E. (2003). *Circuitos magnéticos y transformadores*. Barcelona, Spain: Reverté. Wright, S. J., & Nocedal, J. (1999). *Numerical Optimization*. New York, EE. UU.: Springer.

### Apéndice

Se utilizó para las pruebas un transformador monofásico de laboratorio (*Lab-Volt*<sup>®</sup>) de 480 VA, 120/120 V, 4 A y 60 Hz. Para determinar los parámetros, se siguieron los procedimientos de (Martinez-Velasco, 2009) para las pruebas de circuito-abierto (PC-A) y corto-circuito (PC-C). Las mediciones de voltaje y corriente RMS, pérdidas de potencia activa y reactiva y factor de potencia (FP) fueron obtenidas usando un analizador de calidad de la energía "Fluke 435 Series II". La Tabla A.I presenta los resultados de la prueba estandarizada realizada en el transformador monofásico y la Tabla A.II muestra los valores obtenidos.



| variable          | PC-A  | PC-C  |
|-------------------|-------|-------|
| $V_2(V_{RMS})$    | 122.5 | 19.11 |
| $I_1(I_{RMS})$    | 0.15  | 4.07  |
| FP                | 0.49  | 0.26  |
| $P_{loss}(watts)$ | 9     | 20    |
| $Q_{loss}(VAR)$   | 16    | 75    |
| $S_{loss}(VA)$    | 18    | 78    |
| $a$               | 1     | 1     |

**Tabla 3** Mediciones de pruebas en el transformador

Fuente: *Elaboración propia.*

| parámetros | $R_{p,s}$        | $L_{p,s}$    | $R_m$            |
|------------|------------------|--------------|------------------|
| valor      | 0.61035 $\Omega$ | 6.0132<br>mH | 1666.66 $\Omega$ |

**Tabla 4** Parámetros del transformador

Fuente: *Elaboración propia.*

## Los residuos de agave como factor de corrosión del suelo donde se vierte

HOZ-ZAVALA, Ma. Elia Esther\*† y NAVA-DIGUERO, Pedro

*Universidad Tecnológica de Altamira*

Recibido Abril 3, 2017; Aceptado Junio 6, 2017

### Resumen

Los residuos derivados de los procesos con agave en Tamaulipas se vierten directamente en campo para que se biodegraden con el tiempo, observándose alteraciones en el suelo y por ende, daños severos. Por ello, es importante identificar los tipos de suelo en las zonas donde se siembra y maneja el agave y determinar la cantidad generada de residuo, para conocer de forma preliminar el impacto corrosivo que se promueve en los suelos de la entidad y las consecuencias de dichos efectos. La obtención de información fue a través de visitas y entrevistas a empresas. Se usaron los datos de SAGARPA para conocer siembra, cosecha y siniestralidad. Para el suelo, se usaron los datos del prontuario de información geográfica municipal del INEGI y el sistema de clasificación FAO/UNESCO. Se identificaron 24 municipios con suelos geológicos dominantes como el Vertisol y el Leptosol. Otros suelos presentes, pero en menor proporción, son el Calcisol, Phaeozem, Luvisol, Kastañozem y Chernozem. El tipo de suelo geológico predominante fue Aluvial. La gran cantidad de residuos, que aún contienen alcohol y azúcar, provocan daño severo al suelo, promoviendo su alteración y destrucción.

**Agave, residuo, tipos de suelo, Tamaulipas**

### Abstract

The residues derived from the agave processes in Tamaulipas are discharged directly into the field, being observed alterations to the soil and therefore, severe damages. So it is important to identify the types of soil in the areas where planting, using and managing the agave and determining the amount of waste generated, in order to know in a preliminary way the corrosive impact that is promoted in the soils of the entity and the consequences of those effects. The obtaining of information was through visits and interviews to the companies. SAGARPA data were used to know sowing, harvesting and loss. The type of soil was determined from the data of the municipal geographical information book of INEGI and the FAO / UNESCO classification system. We identified 24 municipalities where the types of dominant geological soils are Vertisol, and Leptosol. Other soils present, but in smaller proportion, are Calcisol, Phaeozem, Luvisol, Kastañozem and Chernozem. The predominant soil type was Alluvial. The large amount of residue that still contains alcohol and sugar, causes severe damage to the soil, promoting its alteration and destruction.

**Agave, waste, type of soil, Tamaulipas**

**Citación:** HOZ-ZAVALA, Ma. Elia Esther y NAVA-DIGUERO, Pedro. Los residuos de agave como factor de corrosión del suelo donde se vierte. Revista del Desarrollo Tecnológico 2017, 1-2: 11-24

\* Correspondencia al Autor (Correo Electrónico: mhoz@utaltamira.edu.mx)

† Investigador contribuyendo como primer autor.

## Introducción

El agave es una de las plantas considerada como materia prima para diversos procesos de los que se obtiene: ixtle en greña, jarabe dulce, tequila, mezcal, pulque, bacanora, sotol, miel de agave, inulina, composta, forraje y fibra para elaborar artesanías. Sin embargo, en cada uno de estos procesos se generan gran cantidad de residuos principalmente los derivados de la producción de destilados, que, en la mayoría de los casos, es transportado y vertido en campos a cielo abierto, en donde se deja que se biodegrade de forma natural. No se busca darle un uso alternativo o reutilización, lo que plantea un severo problema, pues genera un promedio de 71% de residuos orgánicos, según el proceso, derivados de las actividades agroindustriales, mismos que, al abandonarse directamente en campo para que se degraden con el tiempo, en realidad, lo que se provoca es un deterioro en el ecosistema, principalmente: corrosión en los suelos en donde se vierten. Uno de los suelos más afectados es el tipo Vertisol, en la parte sur del estado, que es uno de los suelos en donde se cultiva el Agave. Es de tipo arcilloso y ampliamente utilizado para agricultura en Tamaulipas la cual es una importante actividad económica en el estado, por lo que se considera necesario determinar los tipos y características de suelos existentes en las zonas donde se siembra, cosecha, usa, maneja y dispone el agave e identificar la cantidad de residuos que se genera. Principalmente, del bagazo y partes de la planta que se quedan sin uso y dispersas en el campo, sin aprovechamiento alguno. Asimismo, hay que caracterizar dichos residuos, para ver como promueven la corrosión de los suelos en donde se depositan y los efectos ambientales que esto provoca en el sitio.

## Metodología

Para este trabajo, se realizaron visitas y entrevistas a productores que utilizan al agave como materia prima en sus procesos.

De ellos se obtuvieron los datos sobre la cantidad de agave que se ocupa en el proceso, ya sea para destilados o en la producción de miel e inulina. En aquellos casos en que no se pudo contar con datos directos del productor se recurrió a la información estadística que proporciona la Secretaría de Economía y SAGARPA (2009), para establecer las cantidades producidas y los residuos generados. También se obtuvo de la base estadística de SAGARPA las hectáreas (ha) sembradas y siniestradas, así como lo cosechado (SIAP/SAGARPA). En cuanto al tipo de suelo, se tomó en consideración el Sistema de Clasificación FAO/UNESCO (1988); la clasificación del INEGI (2009) en el Prontuario de Información Geográfica Municipal de los Estados Unidos Mexicanos del Estado de Tamaulipas; y el Atlas de Suelos de América Latina y el Caribe, de Gardi et al (2014).

En esta primera fase, se hizo una revisión de trabajos que han caracterizado el bagazo de agave. Dichos datos, en esta etapa, son los considerados para conocer algunos componentes químicos del agave y ver cómo inciden en la corrosión del suelo por la cantidad de residuo dispuesto directamente a cielo abierto en el ecosistema. Se tomaron parámetros como pH, materia orgánica, concentración de azúcares y tipo de alcoholes, así como el de las sales y los nutrientes presentes en la planta y el bagazo. En lo referente al suelo, se describen las características de las unidades de los suelos existentes en las zonas de siembra y su uso, según los lineamientos de la FAO/UNESCO (1988) y el INEGI (2009). Se consideran las características propias del suelo y los parámetros físico-químicos para ver cómo impactan los residuos de bagazo en el ambiente edáfico de la entidad.

## Resultados

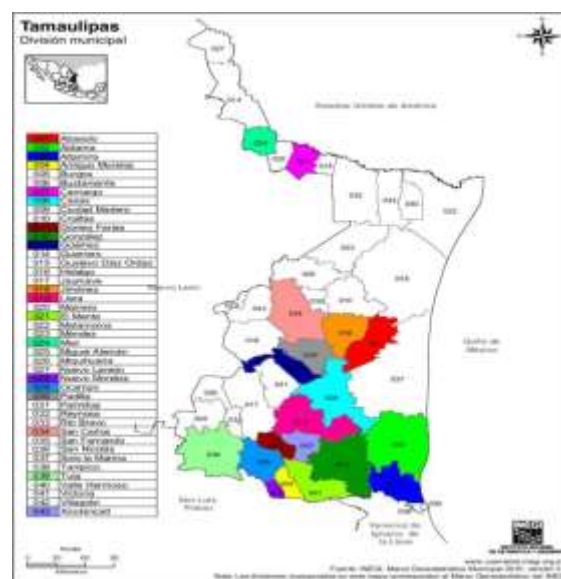
De los 11 Municipios del estado de Tamaulipas, considerados en la Denominación de Origen para producción de tequila, SAGARPA registró que, del año 2004 al 2017, el agave sembrado fluctuó de 800 a 2,000 ha cubiertas en sólo cuatro municipios: González, El Mante, Llera y Xicoténcatl. En Aldama registró siembras que no alcanzaron las 300 ha y en Altamira, Antiguo Morelos, Gómez Farías, Nuevo Morelos, Ocampo y Tula, el agave sembrado varió desde 10 hasta no más de 200 ha. Los municipios considerados para la Denominación de Origen de Mezcal son San Carlos, Tula y Jiménez, donde han sido sembradas cantidades muy pequeñas que oscilan entre 10 hasta no más de 200 ha,

| Tipo de Agave                       | Proceso                                    | Agave usado,% |
|-------------------------------------|--|---------------|
| Agave tequilana Weber variedad azul | Tequila, Destilado de Agave, Inulina, Miel | 100           |
| Agave americana                     | Mezcal, miel                               | 100           |
| Agave americana ssp protoamericana  | Mezcal, miel                               | 100           |
| Agave salmiana                      | Mezcal                                     | 100           |
| Agave montium sancticaroli,         | Mezcal                                     | 100           |
| Agave funkiana                      | Mezcal                                     | 80            |
| Agave univittata lophantha          | Mezcal                                     | 50            |
| Agave asperrima                     | Mezcal                                     | 20            |
| Agave potatorum                     | Mezcal                                     | 20            |
| Agave lechuguilla Torr.             | Ixtle                                      | 100           |
| Agave fourcroydes                   | Henequén                                   | 100           |

**Tabla 1** Tipos de Agaves usados en los diversos procesos, en el estado de Tamaulipas

*Fuente: Propia, elaborada a partir de la información de los productores en Tamaulipas*

Los mezcaleros utilizan otras variedades de agave, que no es el tequilana, y lo colectan de las áreas donde crece en forma silvestre y que, como lo refiere Barrios et al (2015), lo han colectado por siglos para realizar la bebida tradicional alcohólica denominada mezcal, sin recurrir a la siembra del mismo. (tabla 1 y figura 1).



**Figura 1** Municipios que siembran Agave Mezcalero y Tequilero

*Fuente: Propia, elaborada a partir del Marco Geoestadístico del INEGI, 2010*

SAGARPA, por otra parte, también ha registrado siembra de Agave tequilana Weber en los Municipios de Abasolo, Mier, Casas, Güémez y Camargo. Y es en este último municipio en donde se siembran ambos, agave tequilana y mezcalero, aunque no se especifica que variedad de éste último, pero no es mayor a 34 ha, divididas entre los dos variedades de agave sembrados (tabla 2).

Además, los ixtleros de la zona de Bustamante, Jaumave, Miquihuana, Tula, Palmillas y Victoria requieren el agave para generar el ixtle en greña. Este agave crece ahí de forma silvestre. La empresa “Inulina y Miel de agave”, asentada en el municipio de Llera, cultiva el agave tequilana en terrenos aledaños a la misma empresa (entrevista “Lleramex”).

Todas las actividades que involucran siembra, cosecha y procesos rústicos o artesanales, para la obtención de productos derivados del agave, generan gran cantidad de remanentes y residuos en relación con lo cosechado, empezando por las partes de la planta que son abandonadas en el campo sin utilizar. Si se considera que cada hectárea sembrada contiene 2500 plantas con un peso promedio de 60 kg por planta (de lo cual aproximadamente un tercio de este peso corresponde a la piña o cabeza) lo que representa una cosecha prevista de 50 toneladas por hectárea (T/ha) de piñas (entrevista “La Gonzaleña”). Por otra parte, si se considera que 333 plantas cosechadas equivalen a 20 T las que son aprovechadas en el proceso de producción de tequila, entonces se deduce que 130 T/ha son abandonadas en terreno, es decir, si solo es utilizada la piña o cabeza, entonces el resto de la planta que son el cogollo, las hojas y rizoma son abandonados en sitio de siembra como residuo del proceso, por no serles de utilidad.

| Municipio       | Siembra, ha. | Cosecha, ha. | Reporte siniestralidad, ha. | Remanente, ha. |
|-----------------|--------------|--------------|-----------------------------|----------------|
| Abasolo         | 200          | 20           | 180                         | 0              |
| Aldama          | 2624         | 226          | 2123                        | 275            |
| Altamira        | 790          | 10           | 487                         | 293            |
| Antiguo Morelos | 1330         | 0            | 1147                        | 183            |
| Camargo         | 540          | 0            | 504                         | 36             |
| Casas           | 580          | 0            | 556                         | 24             |
| Gomez Farias    | 100          | 0            | 90                          | 10             |
| Gonzalez        | 32738        | 937          | 28746                       | 3056           |
| Totales:        | 38,902       | 1,193 (3%)   | 33,833 (87%)                | 3,876 (10%)    |

**Tabla 2** Municipios con siembra, cosecha y siniestralidad del agave. Periodo (2004-2017)

*Fuente Propia, Elaborada a partir de información de SAGARPA*

La tabla 2 clarifica la dimensión de la situación. De la cantidad sembrada y que se reporta en la columna segunda, se realiza la cosecha con propósitos productivos según el proceso (tequila, mezcal, ixtle, etc.). Lo anterior significa, como ya se comentó, que en campo quedan los residuos de recuperar solo la piña, mismos que quedan expuestos a la degradación ambiental.

La columna cuarta reporta lo siniestrado, es decir, la planta que no es cosechada, pero que si es abandonada completa sin ningún tipo de recuperación o tratamiento posterior. La quinta y última columna reporta un remanente que se dejó en el terreno en espera de ser cosechado posteriormente en cuanto alcance el nivel de madurez necesario para los diferentes procesos de producción mencionados. De la línea de totales se observa que la cantidad siniestrada es altamente significativa (87%), lo que representa la cantidad de área cubierta con plantas que se dejan al proceso de descomposición natural, como abono según la creencia local, y que los suelos son el receptáculo de los productos de descomposición. La siniestralidad en el cultivo de agave puede deberse a diversos factores como son la pérdida de la planta por el picudo mencionado por Terán y Azuara (2013), o por eventos climáticos o por la falta de cuidado de los agaves sembrados. Como sea, se termina con una elevada cantidad de residuos en el campo sin tratamiento alguno lo que provoca impacto severo a los suelos de la entidad. Incluso las comunidades que de manera artesanal colectan las hojas de agave, y en propio campo llevan a cabo el proceso de obtención del Ixtle en greña, también generan residuos, aunque en pequeñas cantidades. No obstante, también quedan en el campo sin uso alternativo alguno

De hecho la tabla 3 muestra los residuos generados por la ruta de producción (no la de abandono explicado desde la tabla 2 en el párrafo previo). Tomando como ejemplo la fila del mezcal, para producir 500 litros de este producto es requerido de 15 T de piña, mismas que son procesadas dejando el bagazo como residuo de producción aproximadamente el 70% de lo procesado, es decir, 10.5 T, mismos que son retirados de la planta mediante camiones de volteo y vertidos en terreno aledaño en forma de conos en áreas de aproximadamente 9 m<sup>2</sup>/pila. Lo mismo ocurre para los procesos de Tequila. Miel de agave e Inulina ya que ocurren en plantas de procesamiento. El proceso de fibra de Ixtle ocurre en sitio de siembra.

| Producto      | Cantidad requerida de agave por unidad producto | Producción total de producto      | Total de Bagazo por producción |
|---------------|---|-----------------------------------|--------------------------------|
| Mezcal        | 20 a 30 kg de piña por litro                    | 500 litros por cada 15 T          | 10.5 T<br>70% es residuo       |
| Tequila       | 8 kg de piña por litro                          | 2600 litros con 20 a 25 T         | 15 T<br>75% es residuo         |
| Miel de Agave | 4 kg de piña por litro                          | 100 litros con 400 kg             | 160 kg<br>40% es residuo       |
| Ixtle         | 6664 kg de cogollos para 1 T                    | 289 T por cada 1926 T de cogollos | 1637 T<br>85% es residuo       |
| Inulina       | 6 kg de piña por kg                             | 100 kg por cada 600 kg            | 500 kg<br>83% es residuo       |

**Tabla 3** Agave utilizado por procesos y cantidad de residuo generado

Fuente: Propia, elaborada a partir de información proporcionada por los productores

Fueron identificados 24 municipios que han sido vinculados al cultivo de agave o al uso de agave silvestre existente en sus comunidades. 19 de estos municipios siembran agave mezcalero y agave tequilana Weber variedad azul (figura 1). Los otros 5 municipios que son Bustamente, Jaumave, Miquihuana, Palmillas y Victoria, ocupan el agave silvestre para las actividades de producción del Ixtle en greña, también lo cosechan y lo venden a otras comunidades para la producción de mezcal o para la elaboración de productos artesanales.

Los suelos predominantes en estas 24 entidades son: Leptosol, Chernozem, Vertisol, Regosol, Phaeozem, Kastañozem y Calcisol (tabla 4).

| Municipios      | Tipos de suelos |           |          |         |          |            |          |
|-----------------|-----------------|-----------|----------|---------|----------|------------|----------|
|                 | Leptosol        | Chernozem | Vertisol | Regosol | Phaeozem | Kastañozem | Calcisol |
| Abasolo         | *               | *         | *        |         |          | *          | *        |
| Aldama          | *               | *         | *        | *       | *        | *          | *        |
| Altamira        | *               | *         | *        | *       | *        | *          | *        |
| Antiguo Morelos | *               | *         | *        | *       | *        |            |          |
| Camargo         | *               | *         | *        |         |          | *          | *        |
| Casas           | *               | *         | *        | *       | *        | *          | *        |
| El Mante        | *               | *         | *        |         | *        | *          | *        |
| Gómez Farias    | *               | *         | *        | *       | *        |            |          |
| González        | *               | *         | *        | *       | *        | *          | *        |
| Guémez          | *               | *         | *        | *       | *        | *          | *        |
| Jiménez         | *               | *         | *        | *       | *        | *          | *        |
| Llera           | *               | *         | *        | *       | *        | *          | *        |
| Mier            | *               | *         | *        |         |          | *          | *        |
| Nuevo Morelos   | *               | *         | *        | *       | *        |            |          |
| Ocampo          | *               | *         | *        | *       | *        |            |          |
| Padilla         | *               | *         | *        | *       | *        | *          | *        |
| San Carlos      | *               | *         | *        | *       | *        | *          | *        |
| Tula            | *               | *         | *        | *       | *        | *          | *        |
| Xicotencatl     | *               | *         | *        | *       | *        | *          | *        |
| Bustamante      | *               | *         |          | *       | *        | *          | *        |
| Jaumave         | *               | *         |          | *       | *        | *          | *        |
| Miquihuana      | *               | *         |          |         | *        | *          | *        |
| Palmillas       | *               | *         |          | *       |          | *          | *        |
| Victoria        | *               | *         | *        | *       | *        | *          | *        |

**Tabla 4** Municipios y Tipos de Suelos dominantes

Fuente: Propia, elaborada con datos del Prontuario de información geográfica municipal de Tamaulipas. INEGI 2009

También en dichos municipios se encuentran otros tipos de suelos aunque no son predominantes como los señalados anteriormente. En algunos de ellos crecen muchos de los agaves que se utilizan en los procesos de destilación de mezcal o para la obtención de ixtle en greña, la fabricación de productos artesanales o de miel de agave. Dichos suelos son: Cambisol, Luvisol, Fluvisol, Solonchak, Gleysol, Arenosol, Solonetz y Gypsisol (tabla 5).

| Municipios      | Tipos de suelos |         |          |           |         |          |          |          |
|-----------------|-----------------|---------|----------|-----------|---------|----------|----------|----------|
|                 | Cambisol        | Luvisol | Fluvisol | Solonchak | Gleysol | Arenosol | Solonetz | Gypsisol |
| Abasolo         | *               | *       |          |           |         |          |          |          |
| Aldama          | *               | *       | *        | *         |         | *        |          |          |
| Altamira        |                 |         |          | *         | *       | *        | *        |          |
| Antiguo Morelos |                 | *       |          |           |         |          |          |          |
| Camargo         |                 |         |          | *         |         |          |          |          |
| Casas           | *               |         | *        |           |         |          |          |          |
| El Mante        |                 |         |          |           |         |          |          |          |
| Gómez Farias    | *               | *       |          |           |         |          |          |          |
| González        | *               |         |          |           | *       |          |          |          |
| Guímez          |                 | *       | *        |           |         |          |          |          |
| Jiménez         | *               |         |          |           |         |          |          |          |
| Llera           |                 | *       | *        |           |         |          |          |          |
| Mier            |                 |         | *        |           |         |          |          |          |
| Nvo. Morelos    |                 |         |          |           |         |          |          |          |
| Ocampo          | *               | *       |          |           | *       |          |          |          |
| Padilla         |                 |         | *        |           |         |          |          |          |
| San Carlos      |                 |         | *        |           |         |          |          |          |
| Tula            |                 | *       |          | *         |         |          |          | *        |
| Xicoténcatl     |                 |         | *        |           |         |          |          |          |
| Bustamante      | *               |         |          |           |         |          |          |          |
| Jaumave         | *               | *       | *        |           |         |          |          |          |
| Miquihuana      | *               |         |          |           |         |          |          |          |
| Palmillas       | *               | *       |          |           |         |          |          |          |
| Victoria        |                 | *       |          |           |         |          |          |          |

**Tabla 5** Municipios y Tipos de Suelos menos dominantes

Fuente: Propia, elaborada con datos del Prontuario de información geográfica municipal de Tamaulipas. INEGI 2009.

Tomando en cuenta los 7 suelos más dominantes de los 24 municipios referidos en este trabajo más 2 de los que no son dominantes pero son lo suficientemente importantes para ser considerados, dado que en ellos crecen diversas variedades de agaves silvestres, es observado entonces que los componentes físicos y químicos de estos tipos de suelos nos dan una visión en cuanto a características y nutrientes presentes en ellos. Esto deberá servir para mostrar cómo la gran cantidad de bagazo que se vierte en esos suelos puede, en vez de ayudar (como es la creencia popular), afectarlos negativamente y provocar impacto de degradación, corrosión, erosión y contaminación general, a causa de los componentes químicos y biológicos que aún contiene.

El bagazo, sin tratamiento alguno, es depositado en terrenos aledaños a las empresas destiladoras, las que consideran que solamente se requiere dejarlos secar, y con ello, es suficiente para que sirva de abono al suelo donde ha sido vertido (entrevista Sr. Guzmán, productor de Tula, Tamaulipas). Sin embargo no es considerado que dichos residuos contienen cierta concentración de azúcares, alcoholes y humedad. En general se sabe que los suelos tienen la capacidad de procesar los residuos e inhibir el impacto de dichos compuestos. Sin embargo, dada la elevada cantidad de biomasa vertida, existe la posibilidad de ocurrencia de fenómenos como la percolación (lixiviados) al subsuelo y saturación de la superficie del suelo. Es de considerarse también que por ende, con el paso del tiempo, eso conduce a cambios de composición y estructura del suelo, lo que resulta en impactos negativos severos sobre el terreno en afectación y como menciona Enríquez, et al (2016), los cambios provocados al suelo afectan las condiciones físicas y químicas del ecosistema, provocando mortalidad de organismos habituales a dicho ecosistema, además de favorecer el desarrollo de otros tipos de especies, no propias del terreno. Es de considerarse que esto se acrecienta en zonas áridas, donde la riqueza de especies es menor que en zonas húmedas.

La tabla 6 muestra las características de los suelos considerados como representativos de los municipios productores con base en el agave. Se examinan los parámetros de drenaje, profundidad de capa, porosidad, capacidad de percolación y cantidad de humedad y de retención de la misma para cada tipo de suelo. Cada característica está relacionada entre sí al considerar el suelo edáfico (capa de suelo de interés) como una membrana con espesor y capacidades características, tal como el contenido de Ca y Mg que promueven la retención de humedad, aunque antes de eso, el agua desde el exterior que se infiltra pasando por la membrana de suelo se drena y percola al cruzarla hacia los estratos inferiores.

| Suelos     | Drenaje  | Profundo                           | Poroso | Percorrido | Humedad y Retención   |
|------------|----------|------------------------------------|--------|------------|---|
| Leptosol   | Excesivo | Poco profundo <25 cm a somero 10cm | Alta   | Bajo       | Baja capacidad de retención de agua   |
| Chernozem  | Alto     | >80 cm                             | Alta   | Alto       | Retención del 33%. 95% con Ca y Mg<br>Baja retención y humedad  |
| Vertisol   | Pobre    | >170cm                             | Alta   | Bajo       | Baja en superficie<br>Retención alta profundo..<br>Alta saturación de bases > 70% de 100% con Ca y Mg |
| Regosol    | Alto     | Poco profundo                      | Baja   | Bajo       | Baja retención  |
| Phaeozem   | Medio    | < 50 cm                            | Alta   | Alto       | Alta saturación y humedad superficial   |
| Kastañozem | Medio    | Profundo                           | Alta   | Alto       | Falta periódicamente<br>Baja saturación de bases  |
| Calcisol   | Bajo     | Poco profundo                      | Baja   | Bajo       | Alto índice de evaporación<br>Retención baja Poca humedad   |
| Cambisol   | Buena    | Poco profundo                      | Alta   | Alto       | Alta capacidad de retención y humedad<br>Baja saturación de bases                                     |
| Solonchak  | Bajo     | Profundo                           | Baja   | Bajo       | Retención > 50%   |

**Tabla 6** Características físicas de los suelos dominantes en los municipios de producción de bagazo de mezcal y tequila, siembra o uso de agaves para ixtle en greña, productos artesanales o miel de agave

Fuente: Propia, elaborada a partir de información de Gardi et al (2014), FAO-WRB Soil (2006)

Lo anterior significa que al dejar las plantas en proceso de descomposición o al verter el bagazo resultado de los procesos productivos en grandes cantidades, sin considerar tratamiento alguno para ambos casos, se desbalancean las características propias ocasionando daños no solo al suelo, sino a la vida activa presente en dicho ecosistema.

La calidad física es determinante para que se realicen las funciones básicas de un suelo y conserve su capacidad de sostener la productividad biológica y, además, mantener la vitalidad de los micro y macro ecosistemas existentes.

Estos factores al regular en el suelo su capacidad de captación, retención y transporte de agua, a lo largo de su perfil, determina qué constituyentes químicos como materia orgánica, minerales, presencia de sales y pH, cuando están presentes en el suelo, pueden permanecer y ayudar, como nutrimentos, a la vida existente en el mismo suelo (tabla 7). Empero, la cantidad de bagazo altera las condiciones propias del suelo y modifica su estructura, alterando su capacidad para realizar sus funciones vitales. Barrios et al (2015) señalaron que los tipos de suelos en donde normalmente se desarrollan los agaves son de tipo calcáreo conteniendo niveles muy bajos de nitrógeno, fósforo, potasio y materia orgánica, y los suelos de Tamaulipas cumplen con esas características de poca disponibilidad de nutrientes, y además, por ser zona costera de alta salinidad, que ya en sí misma es una condición negativa, ésta es acrecentada al verter tanta cantidad de bagazo.

El análisis combinado de las tablas 6 y 7 permite observar que dada la alta concentración de sales de Ca y Mg los suelos en estudio de manera natural se encuentran en el límite de idoneidad para el cultivo o crecimiento silvestre del agave.



| Suelos     | M.O.                        | Mineral   | CaCO <sub>3</sub><br>Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>           | pH  |
|------------|-----------------------------|---|--|---|
| Leptosol   | Alto                        | Ca  | CaCO <sub>3</sub><br>Alto > 40%                                | > CaCO <sub>3</sub><br>alcalino<br>< CaCO <sub>3</sub><br>Ácido |
| Chernozem  | Alto                        | P, Ca   | Alto CaCO <sub>3</sub>   | 6.6-8.5   |
| Vertisol   | Bajo                        | P y K<br>deficiente<br>Yeso   | CaCO <sub>3</sub><br>Alto > 15%                                | Alcalino<br>6-8<br>Extremo 9.5                                  |
| Regosol    | Bajo                        | Poco P<br>asimilable<br>K alto y<br>además<br>Ca, Mg,<br>Na, Ca, I,<br>Yeso | CaCO <sub>3</sub> < al<br>15%                                  | Muy ácido   |
| Fluvisol   | Alto                        | Ca  | Acúmulo<br>ligero de<br>carbonatos                             | Ácido   |
| Kastanozem | Rico en<br>la<br>superficie | Ca<br>Yeso  | CaCO <sub>3</sub>  | Alcalino  |
| Calcisol   | Bajo                        | Ca alto<br>P escaso<br>Yeso   | Alto CaCO <sub>3</sub><br>rico en<br>carbonatos<br>secundarios | Poco ácido a<br>neutro  |
| Cambisol   | Bajo                        | Presencia<br>de Ca, Mg,<br>K,<br>Na,<br>Bajo<br>contenido<br>de Fe, Al      | Pequeña<br>presencia de<br>CaCO <sub>3</sub>                   | De neutro a<br>ligeramente<br>ácido                             |
| Solonchak  | Bajo                        | K alto<br>Mg bajo<br>Ca alto<br>Yeso<br>Suelo<br>salino                     | Sales<br>solubles<br>CaCO <sub>3</sub>                         | 4.5   |

**Tabla 7** Características químicas de los suelos de Tamaulipas

Fuente: Propia, elaborada a partir de la información de Espinosa Ramírez et al (2011), Manzano et al (2014). Periódico Oficial del Estado de Tamaulipas (2013). Gardi et al (2014). FAO-WRB Soil (2006)

En la tabla 8 se expone el análisis realizado a diferentes tipos de bagazo de agaves que muestra los componentes nutricionales que poseen. Se observa que los residuos de bagazo aportan cantidades apreciables de materia orgánica y nutrimentos, como K, Ca, P, N y Fe. También reduce la susceptibilidad a la erosión hídrica y eólica, por su capacidad de retención de humedad, porque favorece la actividad microbiana y permite el mejoramiento de fertilización mineral. Además, porque promueve la corrección de la acidez del suelo, por los efectos quelantes de materia orgánica. Sin embargo, altas concentraciones de bagazo generan relaciones C/N muy altas, con la consecuente inmovilización del nitrógeno.

A pesar de que el bagazo contiene todos los nutrientes requeridos por el suelo para su fertilidad, el verter grandes cantidades de bagazo sin tratamiento alguno, significa reducir la capacidad de retención de nutrientes, asimismo, se sobresatura la superficie del suelo y se percolan o lavan (con las lluvias) los minerales tan necesarios para la salud y la vitalidad del suelo. Por lo que resulta en cierto modo nocivo para la fertilidad del suelo, su recuperación y la conservación de sus propiedades, ya que provee de mayor acidez, su relación de C/N es demasiado alta y provee cantidades adicionales de Ca y Mg a lo que naturalmente ya posee el suelo, tendiendo con ello a la retención de humedad, así como la disminución de la percolación y el drenaje.

| Parámetros         | Bagazo fresco Tequilerero | Bagazo Agave tequilerero | Bagazo Agave Tequilerero | Bagazo Agave salmiana | Bagazo maguay mezcalero A. saguifolia |
|--------------------|---------------------------|--------------------------|--------------------------|-----------------------|---------------------------------------|
| pH                 | 4.7                       | 4.72                     | 5.40                     | 4.5                   | 5.32                                  |
| Materia orgánica % | 93                        | 93                       | 91.20                    | NM                    | 89.76                                 |
| Carbono %          | NM                        | NM                       | 50.60                    | NM                    | 49.87                                 |
| Nitrógeno total %  | 0.60                      | 0.60                     | 0.53                     | 0.54                  | 0.38                                  |
| C/N                | 116                       | 116                      | 95.50                    | NM                    | 131.24                                |
| P %                | 0.004                     | 0.37                     | NM                       | 0.03                  | NM                                    |
| K %                | 0.045                     | 0.45                     | NM                       | 0.43                  | NM                                    |
| Ca %               | 0.02                      | 2.11                     | NM                       | 3.46                  | NM                                    |
| Mg %               | 0.02                      | 2.30                     | NM                       | 0.12                  | NM                                    |
| Sulfuro (Azufre)   | NM                        | NM                       | NM                       | 0.21                  | NM                                    |

**Tabla 8** Caracterización de bagazo de agave

Fuente: Propia, elaborada a partir de información de Rodríguez y R. Crespo (2010), Delgadillo et al (2015), Rodríguez et al (2010), Íñiguez et al (2006) y Martínez et al (2013). NM: No medido por los autores

En este momento se hace necesario hacer un recordatorio y reflexión respecto al comentario de “vertido de grandes cantidades de bagazo” hecho en el párrafo previo.

En el caso del remanente que se abandona en sitio de siembra, se hizo mención que una hectárea tiene capacidad para la siembra de 2500 plantas de 60 kg, de agaves, es decir, 150 T, de las cuáles 40 kg son dejadas como residuos en sitio de siembra del 3% cosechado, o sea, 3 T, y lo reportado como siniestrado son 130.5 T (87%) entonces la dimensión de la afectación es de 133.5 T/ha de residuo abandonado en campo en promedio, o en otras palabras, 13.35 kg/m<sup>2</sup>, y basados en la tabla 8 representa en un metro cuadrado: 12 kg de MO, 7.2 kg de C, 0.068 kg de N y 0.27 kg de Ca y Mg correspondientemente. Por otro lado respecto al bagazo que se produce como residual de los procesos de tequila y mezcal, partiendo de lo que se estableció como cosechado en el ejemplo de este párrafo y de la tabla 3, las 3 T se convierten en 100 litros de producto y 2.1 T/ha de bagazo, o sea, que 3 ha llenan un camión de volteo, el cual desparrama en forma de pila en un área de 27 m<sup>2</sup> aproximadamente, es decir, 233 kg/m<sup>2</sup> de bagazo vertido, lo que representa en un metro cuadrado: 217 kg de MO, 130 kg de C, 1.2 kg de N y 4.3 kg de Ca y Mg correspondientemente. Ya sea en un caso o en otro, estas cantidades se sumarían a las que por naturaleza tiene el suelo y sustentarían los comentarios negativos que se han hecho respecto a la afectación que los respectivos suelos tendrían. Esto sería la dimensión de la contaminación del agave residual en el suelo, según sea dejado en sitio de siembra (disperso en campo) o depositado en pilas en terreno aledaño a las plantas de procesamiento.

Aunado a lo anteriormente descrito, como menciona Chavez (2010), el bagazo contiene la impregnación de metanol, etilacetato, etanol, n-propanol, 2-butanol, 2-metilpropanol, ácido acético, 2-metil-1-butanol y alcoholes superiores que impactan negativamente al suelo pues tienden a la conversión de aldehídos, cetonas y ácidos carboxílicos, principalmente, si son grandes cantidades de bagazo húmedo, vertidos directamente al suelo como ya se demostró.

Esto afecta la permeabilidad, así como la capacidad del suelo para realizar adecuadamente sus funciones. Igualmente se afecta la aireación del suelo, hay mayor resistencia a la penetración de sales y repercute en el drenaje del suelo, que se vuelve deficiente. Y así se disminuye el agua disponible en el suelo como lo menciona Espinosa et al (2011). Hay que considerar que los suelos de Tamaulipas, principalmente los cercanos a zonas costeras, son de alta salinidad. En este estado se han hecho estudios sobre sodicidad del suelo, en Jiménez referido por Manzano et al (2014), que muestran la afectación en el drenaje. La alta salinidad del bagazo, que ya de manera natural afecta la disponibilidad de nutrimentos, por el impacto de las altas concentraciones del mismo, conduce a una mayor concentración de sales en la superficie y al consiguiente desbalance en la disponibilidad de nutrientes. Se ocasiona, de este modo, la degradación más rápida del suelo. Por otro lado, dentro de la composición del bagazo vemos, como reporta Li et al (2012), que la piña del agave es rica en polisacáridos/oligosacáridos solubles en agua. Mucho de ello es inulina y oligómeros, además de sucrosa, glucosa, galactosa y fructuosa, las cuales, al estar en el bagazo que se vierte en campo, promueven la proliferación de hongos y bacterias, y nuevamente, se afecta la porosidad del suelo con consecuencias en la resistividad natural del suelo, al aumentar el porcentaje de humedad. Lo anterior hace que el suelo pudiese tener menos de 100 ohm-m, lo que promovería que ese suelo se vuelva agresivo y aumente la velocidad de corrosión de toda instalación enterrada en el mismo. También es conocido que suelos muy ácidos, con pH menor a 5.5, motivan una agresividad marcada sobre todo elemento metálico enterrado. El suelo se vuelve corrosivo, cambiando con ello sus características naturales. Hay que considerar que el bagazo presenta un pH ácido, que es equilibrado por el suelo, al unirse a él. No obstante, en grandes cantidades el pH se mantiene ácido y promueve esa corrosión. Por añadidura, la presencia aunada de alcoholes y azúcares favorecen el proceso.

Los iones sulfatos, presentes de forma natural en los suelos, que son transportados a través del agua, suelen tener un alto grado de agresividad. La intensidad de la reacción depende de la presencia de minerales como Na, Mg, Ca, mismos que también están presentes en el tipo de suelos mencionados en este trabajo. También, esa intensidad depende de la permeabilidad y la temperatura, tanto ambiental como del suelo, que se ven inevitablemente alterados por ese exceso de bagazo. Al estar expuestos a grandes cantidades del multicitado bagazo se promueve la disminución de porosidad, con lo que se disminuye la permeabilidad. Hay que considerar que el suelo de mayor presencia en el sur de la entidad, donde se congregan las fábricas productoras de destilados, es de tipo Vertisol. Este tipo de suelo, con alta concentración de arcilla, promueve que se estanque el agua, con el consabido aumento de sulfatos, generando aguas sulfatadas ACI-201.2R. (1992).

Como es apreciado el bagazo en sí mismo no es un agente agresivo, pero experimenta un conjunto de reacciones químicas que promueven las alteraciones al suelo. Reacciones que se producen, principalmente, por la gran cantidad de residuo vertido. Esto conduce lógicamente, a prestar más atención a la problemática ignorada y buscar alternativas de uso del residuo de bagazo de agave. En principio, hay que eludir el vertido del mismo, en gran escala en los suelos, para evitar la sobresaturación de agua; pues ésta inhibe un buen drenaje, impide la percolación natural y promueve la disminución de porosidad. Actualmente, todo lo anterior está incidiendo en la estructura natural del suelo y, con ello, se está afectando al entorno. Y no de un modo positivo. Por el contrario, se están provocando impactos negativos en el ambiente.

## Conclusiones

Se identificaron 24 municipios, de los 43 existentes en el estado de Tamaulipas, de los que 19 tienen siembra de agave tequilero y mezcalero. En los 5 municipios restantes se desarrollan diversas variedades de agave que son colectados por las comunidades para otras actividades: generación de ixtle en greña, preparación de jarabe de agave y creación de diversos productos artesanales.

Los suelos predominantes en estas 24 entidades son Leptosol, Chernozem, Vertisol, Regosol, Phaeozem, Kastañozem y Calcisol. Hay otros tipos menos dominantes, en los cuales también crecen y se desarrollan muchos de los agaves de la entidad. Estos suelos son el Cambisol, Luvisol, Fluvisol, Solonchak, Gleysol, Arenosol, Solonetz y Gypsisol.

La cantidad de residuos generados por las diversas actividades productivas que utilizan el agave como materia prima es muy elevado. El estimado demostró que la densidad promedio de residuo es de 13.35 kg/m<sup>2</sup> dispersos en campo y 217 kg/m<sup>2</sup> de bagazo apilados en terrenos aledaños a las plantas de procesamiento. Lo que demuestra que si es alta la cantidad de residuos vertidos en el campo sin tratamiento alguno. En cuanto a la calidad física de los suelos, se ven afectados en su drenaje, porosidad, percolado (lixiviado) y capacidad de retención, en lo referente a la humedad propia del suelo.

En lo que respecta a los constituyentes químicos de los suelos, en cuanto a materia orgánica, tipos de sales y minerales y su pH, se encuentra que todos se ven afectados. Al entrar en contacto con los elementos constitutivos del bagazo, en los suelos se reduce la capacidad de retención de nutrientes, se sobresatura la superficie del suelo, se generan lixiviados que pueden impactar al manto freático y se vuelve ineficiente el drenaje propio del suelo.

Además, se altera la aireación del suelo, promoviendo anaerobiosis y, por ende, proliferación de bacterias anaerobias, muchas de ellas causantes de efectos de corrosión en suelo. También hay mayor resistencia a la penetración de sales. Disminuye la porosidad y eso puede incidir en menor resistividad, al aumentar el estancamiento de agua en la superficie; lo que acrecienta, obviamente, el porcentaje de humedad. Con ello, el suelo aumenta su velocidad de corrosión. El pH, además, se mantiene ácido, aumentando así la agresividad corrosiva del suelo. Y los iones sulfatos, presentes de forma normal en el suelo, al estar en suelos saturados, estancados, llevan a la generación de aguas sulfatadas, ya que aumenta la concentración de sulfatos por falta de movilidad.

El bagazo, en cantidades que el suelo sea capaz de procesar de forma equilibrada, permitirá la fertilidad del mismo. Por ahora, eso no está sucediendo. Se están produciendo grandes cantidades de residuos que continuarán impactando negativamente los suelos de la entidad, si no se toman medidas correctivas; que muy bien pudieran ser, también, productivas.

## Referencias

- ACI-201.2R (1992). American Concrete Institute. Guide to Durable Concrete. Reporte del Comité 201. Farmington Hills.
- Barrios, A., Otero, M., Michel A. & Ariza, R. (2015). Quantitative analysis variables Maguey Mezcalero (*A. cupreata*) in four environments. *ECORFAN Journal Ecuador* 2015, 2-3: 160-164. ISSN:1390-9959. ECORFAN.
- Barrios, A., Otero, M., Michel A. & Ariza, R. (2015). Morfológica de *Agave cupreata* y variabilidad de sus Descriptores. *Revista de Ciencias Ambientales y Recursos Naturales* 2015. Vol. 1. No. 2. 90-94. ISSN-2444-4936. ECORFAN
- Castillo, D., Martínez, O., Ríos, L., Rodríguez, J., Morales, T., Castillo, F. & Avila, D. (2014). Determinación de Áreas Potenciales para Plantaciones de *Agave lechuguilla* Torr. Para la Producción de Etanol. *Acta Química Mexicana. Revista Científica de la Universidad Autónoma de Coahuila*. Volumen 6, No. 12. Pág 5-11.
- Chávez, L., (2010). Uso de bagazo de la industria mezcalera como materia prima para generar energía. *Ingenierías* Abril-Junio 2010, Vol XIII, No. 47. pág. 8-16
- Delgadillo, L., Bañuelos, R., Esparza, E., Gutiérrez, H., Cabral, F. & Muro, A. (2015). Evaluación del perfil de nutrientes de bagazo de agave como alternativa de alimento para rumiantes. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas Pub. Esp. Núm. 11* 16 de mayo-29 de Junio, 2015 p. 2099-2103.
- Enríquez, D., Dame, M., Mercado, M. & Blancas, M. (2016). Diversidad y valor de importancia como herramientas para fundamentar un cambio de uso del suelo en Zacatecas, México. *Revista de Ciencias Ambientales y Recursos Naturales* 2016, 2-3: 18-27. ISSN-2444-4936. ECORFAN.
- Espinosa, M., Andrade, E., Rivera, P. & Romero, A. (2011). Degradación de suelos por actividades antrópicas en el norte de Tamaulipas, México. *Papeles de Geografía* (en línea), núm 53-54, 2011, pp 77-88. Universidad de Murcia. España. Recuperado el 8 de octubre de 2013 de: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=40721572006>. ISSN 0213-1781.
- FAO (2006). World reference base for soil resources 2006. A framework for International classification, correlation and communication. *World Soil Resources Reports* 103. IUSS Working Group WRB. 2006. World reference base for soil resources 2006. *World Soil Resources Reports* No. 103. FAO, Rome. ISBN 92-5-105511-4

FAO-UNESCO (1988). Soil Map of World, Revised Legend. World Soil Resources Report 60. Food and Agriculture Organization of the United Nations. United Nations Educational Scientific and Cultural Organization. Roma. 119 pp.

Gardi, C., Angelini, M., Barceló, S., Comerma, J., Cruz Gaistardo, C., Encina Rojas, A., Jones, A., Krasilnikov, P., Mendonça, M., Montanarella, L., Muniz Ugarte, O., Schad, P., Vara Rodríguez & M., Vargas, R. (2014). Atlas de suelos de América Latina y el Caribe, Comisión Europea - Oficina de Publicaciones de la Unión Europea, L-2995 Luxembourg, 176 pp ISBN: 978-92-79-25599-1 e ISSN: 1018-5593.

INEGI. (2009). Prontuario de Información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos. Abasolo, Tamaulipas. Clave geoestadística 28001.

INEGI. (2009). Prontuario de Información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos. Aldama, Tamaulipas. Clave geoestadística 28002.

INEGI. (2009). Prontuario de Información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos. Altamira, Tamaulipas. Clave geoestadística 28003.

INEGI. (2009). Prontuario de Información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos. Antiguo Morelos, Tamaulipas. Clave geoestadística 28004

INEGI. (2009). Prontuario de Información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos. Camargo, Tamaulipas. Clave geoestadística 28007

INEGI. (2009). Prontuario de Información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos. Casas, Tamaulipas. Clave geoestadística 28008

INEGI. (2009). Prontuario de Información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos. El Mante, Tamaulipas. Clave geoestadística 28021.

INEGI. (2009). Prontuario de Información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos. Gómez Farías, Tamaulipas. Clave geoestadística 28011.

INEGI. (2009). Prontuario de Información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos. González, Tamaulipas. Clave geoestadística 28012.

INEGI. (2009). Prontuario de Información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos. Güémez, Tamaulipas. Clave geoestadística 28013.

INEGI. (2009). Prontuario de Información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos. Jiménez, Tamaulipas. Clave geoestadística 28018

INEGI. (2009). Prontuario de Información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos. Llera, Tamaulipas. Clave geoestadística 28019

INEGI. (2009). Prontuario de Información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos. Mier, Tamaulipas. Clave geoestadística 28024

INEGI. (2009). Prontuario de Información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos. Nuevo Morelos, Tamaulipas. Clave geoestadística 28028.

INEGI. (2009). Prontuario de Información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos. Ocampo, Tamaulipas. Clave geoestadística 28029

INEGI. (2009). Prontuario de Información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos. Padilla, Tamaulipas. Clave geoestadística 28030.

INEGI. (2009). Prontuario de Información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos. San Carlos, Tamaulipas. Clave geoestadística 28034

INEGI. (2009). Prontuario de Información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos. Tula, Tamaulipas. Clave geoestadística 28039.

INEGI. (2009). Prontuario de Información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos. Xicoténcatl, Tamaulipas. Clave geoestadística 28043.

INEGI. (2009). Prontuario de Información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos. Bustamante, Tamaulipas. Clave geoestadística 28006.

INEGI. (2009). Prontuario de Información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos. Jaumave, Tamaulipas. Clave geoestadística 28017.

INEGI. (2009). Prontuario de Información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos. Miquihuana, Tamaulipas. Clave geoestadística 28026

INEGI. (2009). Prontuario de Información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos. Palmillas, Tamaulipas. Clave geoestadística 28031.

INEGI. (2009). Prontuario de Información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos. Victoria, Tamaulipas. Clave geoestadística 28041.

Iñiguez, G., Parra, J. & Velasco, P. (2006). Utilización de subproductos de la industria tequilera. Parte 8. Evolución de algunos constituyentes de la mezcla de biosólidos-bagazo de agave durante el compostaje. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*. 22 (2) 83-93, 2006

Li, H., Foston, M., Kumar, R., Samuel, R., Gao, X., Hu, F., Ragauskas, A. & Wyman, C. (2012). Chemical composition and characterization of cellulose for Agave as a fast-growing, drought-tolerant biofuels feedstock. *Journal Royal Society of Chemistry Adv.*, 2012, 2, 4951-4958.

Manzano, J., Rivera, P., Briones, F. & Zamora, C. (2014). Rehabilitación de suelos salino sódicos: Estudio de caso en el distrito de Riego 086, Jiménez, Tamaulipas, México. *Revista Terra Latinoamericana*, vol 32. Núm 3, julio-septiembre, 2014, pp. 211-219. Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo A.C. Chapingo, México.

Martínez, G., Iñiguez, G., Ortiz, Y., López, J. & Bautista, M. (2013). Tiempos de apilado del bagazo del maguey mezcalero y su efecto en las propiedades del Compost para sustrato de tomate. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*. 29 (3) 209-216, 2013.

Periódico Oficial. Órgano del Gobierno Constitucional del Estado Libre y Soberano de Tamaulipas (2013). Plan Municipal de Desarrollo 2013-2016, del municipio de Altamira, Tamaulipas. Gobierno del Estado. Poder Ejecutivo. Secretaría General. R. Ayuntamiento Altamira, Tam. Tomo CXXXVIII. Victoria, Tam., martes 31 de diciembre de 2013. Anexo al Número 157. Pág. 1-216.

Rodríguez, R., Alcantar González, E., Iñiguez, G., Zamora, F., García, P., Ruiz, M. & Salcedo, E. (2010). Caracterización Física y Química de Sustratos Agrícolas a Partir de Bagazo de Agave Tequilero.. *INTERCIENCIA*. Julio 2010. Vol. 35 No. 7. P. 515-520.

Rodríguez, R. & Crespo, M. (2010), Desarrollo de un nuevo sustrato: composta de bagazo de agave tequilero. Primer curso nacional de sustratos. Colegio de Postgraduados. Texcoco, Estado de México. 23-30 Julio, 2010. Recuperado de: <http://www.cm.colpos.mx/montecillo/images/SUSTRATOS/013.pdf>

SAGARPA (2009). Estudio orientado a identificar los mercados y canales de comercialización internacionales para la oferta de productos de Ixtle con valor agregado. Presentado por Integradora de Ixtleros de Zacatecas S.A. de C.V. con la Consultoría Responsable: Kalan Kaash S.C. 388 pp.

SIAP/SAGARPA. (2016). Anuario estadístico de la Producción Agrícola. En línea. [infosiap.siap.gob.mx/aagricola\\_siap/entidad/index.jsp](http://infosiap.siap.gob.mx/aagricola_siap/entidad/index.jsp). Consultado en diciembre de 2016.

Terán, A. & Azuara, A. (2013). El Picudo. *Scyphophorus acupunctatus* Gyllenhal y su manejo en el Agave Tequilero (*Agave tequilana* F.A.C. Weber) Variedad Azul. Centro de Investigación Regional del Noreste Campo Experimental Las Huastecas Villa Cuauhtémoc, Tam. Diciembre de 2013 Folleto Técnico No. MX-0-310304-52-03-14-09-35 ISBN: 978-607-37-0181-5.

## Síntesis y caracterización de películas delgadas de $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ (CZTS) por el método de sputtering para aplicación en celdas solares

MORALES-ALMEIDA, Ricardo\*†, SARRACINO-MARTÍNEZ, Omar, RICÁRDEZ-JIMÉNEZ, Cristino y PÉREZ-HERNÁNDEZ, Germán

*Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, Carretera Cunduacán-Jalpa KM 1. Col. La Esmeralda C.P. 86690. Cunduacán, Tabasco, México*

*Universidad Popular de la Chontalpa, Carretera Cárdenas-Huimanguillo KM 2. Col. R/A Paso y Playa C.P. 86500. Cárdenas, Tabasco, México*

Recibido Abril 12, 2017; Aceptado Junio 6, 2017

### Resumen

En este trabajo dirigimos nuestros esfuerzos en el desarrollo de películas delgadas de  $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$  en su fase kesterita debido a que posee propiedades adecuadas para su aplicación fotovoltaica y está formado por materiales abundantes en la naturaleza y con poca toxicidad. La síntesis de las películas de  $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$  se desarrolla mediante la técnica de sputtering a partir de un blanco conformado de CuS, ZnS, SnS y S. Para lograr obtener el material en su fase kesterita se estudiaron diferentes temperaturas (400°C-600°C) y tiempos de depósito (60 min - 150min) para obtener las mejores condiciones de cristalización. A las películas obtenidas se les somete a estudios de DRX y UV-VIS permitiéndonos observar los cambios que están ocurriendo en el proceso de formación. Los estudios de DRX muestran una orientación preferencial en el plano (1 1 2), (2 1 1), (2 0 0), (3 1 2) y (2 0 6), correspondientes a una estructura tipo kesterita. A partir de los resultados logramos optimizar los procesos involucrados en los depósitos, obteniendo películas en su fase kesterita con un valor de banda prohibida de energía de 1.54eV, sugiriendo que este material presenta un valor óptimo para su aplicación como material absorbedor en una celda solar

### Kesterite, película delgada, celda solar, sputtering, CZTS

**Citación:** MORALES-ALMEIDA, Ricardo, SARRACINO-MARTÍNEZ, Omar, RICÁRDEZ-JIMÉNEZ, Cristino y PÉREZ-HERNÁNDEZ, Germán. Síntesis y caracterización de películas delgadas de  $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$  (CZTS) por el método de sputtering para aplicación en celdas solares. Revista del Desarrollo Tecnológico 2017, 1-2: 25-33

### Abstract

In this work, we direct our efforts in the development of thin films of  $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$  in its kesterite phase since it has properties suitable for its photovoltaic application and it is formed by materials abundant in nature and with little toxicity. The synthesis of the  $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$  films is developed by the sputtering technique from a CuS, ZnS, SnS and S, shaped target. To obtain the material in its kesterite phase, different temperatures (400 °C-600 °C) and storage times (60 min -150min) were studied to obtain the best crystallization conditions. The films obtained are subjected to XRD and UV-VIS studies, allowing us to observe the changes that are occurring in the training process. The XRD studies show a preferential orientation in the (1 1 2), (2 1 1), (2 0 0), (3 1 2) and (2 0 6) planes, corresponding to a kesterite type structure. From the results we optimized the processes involved in the deposits, obtaining films in their kesterite phase with a value of band of energy of 1.54eV, suggesting that this material presents an optimum value for its application as absorber material in a solar cell.

### Kesterite, thin film, solar cell, sputtering, CZTS

\* Correspondencia al Autor (Correo Electrónico: omar\_sarra@hotmail.com)

† Investigador contribuyendo como primer autor.



## Introducción

El uso excesivo de combustibles fósiles para la generación de energía eléctrica ha causado grandes problemas de contaminación a nuestro planeta, para disminuir este problema se está implementando el uso de las energías renovables en especial la energía solar (FLORES, GONZÁLEZ, JUÁREZ, & HUITZIL, 2016). La conversión de la energía solar a energía eléctrica se realiza a través de las celdas solares (MOLINA-GARCÍA & MELCHOR-HERNÁNDEZ, 2016; SALAZAR-PERALTA, Alfredo, & PICHARDO-S, 2016) y los materiales semiconductores más usados en la producción de celdas solares a nivel industrial son: Cu (In, Ga) Se<sub>2</sub> (CIGS) y CdTe. Estos materiales, con banda prohibida de energía (Eg) directa, dan lugar a altos coeficientes de absorción del orden de 10<sup>6</sup> cm<sup>-1</sup>, siendo capaces de absorber la mayor parte del espectro visible con capas mucho más delgadas (1-5 μm), permitiendo además tener un especial estatus en la industria fotovoltaica debido a la variedad de técnicas que presentan para su depósito, así como al prometedor crecimiento observado en la industria, obteniendo las mayores eficiencias del 20.3% para el CIGS (Jackson et al., 2011) y del 16.7% para películas de CdTe (Green, Emery, Hishikawa, & Warta, 2010).

A pesar de las propiedades prometedoras, así como la variedad de técnicas que existen para su fabricación, ambos materiales tienen algunas limitaciones, destacando su alto precio, uso de materiales tóxicos como el Cadmio (Cd) y Selenio (Se) así como una reducida disponibilidad de los elementos, tal como el Teluro (Te), Indio (In) y Galio (Ga) (Cao & Shen, 2011).

Estos inconvenientes han dado lugar a la búsqueda e investigación de celdas solares con materiales absorbentes que sean más amigables con el ser humano y el medio ambiente.

Actualmente se están explorando alternativas para el desarrollo de celdas solares, como es el caso del compuesto cuaternario Cu<sub>2</sub>ZnSnS<sub>4</sub> (CZTS) en su fase tipo kesterita que ha causado mucho interés como material absorbente debido a sus propiedades electro-ópticas que presenta, tal como un alto coeficiente de absorción de 10<sup>4</sup> cm<sup>-1</sup> (Touati, Ben Rabeh, & Kanzari, 2015), conductividad tipo p y una banda prohibida de energía directa entre 1.4-1.5 eV, el cual es el valor óptimo de Eg para celdas solares de alta eficiencia (Chalapathy, Jung, & Ahn, 2011). Además, que sus elementos constituyentes son menos costosos, abundantes en la corteza terrestre y no tóxicos (Abusnina, Moutinho, Al-Jassim, DeHart, & Matin, 2014; Bodnar, Telesh, Gurieva, & Schorr, 2015) (Zhou et al., 2013) (Ikhlusal Amal & Kim, 2013), tales como Zn y Sn, son más abundantes (75 y 2.2 ppm, respectivamente) y menos costosos que In (0.049 ppm) (Katagiri, 2005) y Ga.

Recientemente el depósito de películas de CZTS se ha hecho por una serie de métodos tal como: baño químico (DBC), spray pirolisis, co-evaporación térmica (Li, Chen, & Ma, 2015), spin-coated (Majula et al., 2015) y sputtering (Dhakal, Peng, Reid Tobias, Dasharathy, & Westgate, 2014; Lin, Chi, Hsieh, Chen, & Huang, 2016). Siendo el método de sputtering preferido por varios autores porque ha probado ser un método que permite obtener películas delgadas de alta calidad y reproducibles. Por ejemplo, (Katagiri et al, 2009) reporta el desarrollo de películas delgadas de CZTS por sputtering a temperatura ambiente mediante el depósito de capas de Cu, ZnS y SnS, señalando la importancia de realizar tratamientos térmicos para mejorar las características de las películas. (Seol, Lee, Lee, Nam, & Kim, 2003), reporta el desarrollo de películas de CZTS por sputtering a temperatura ambiente, obteniendo películas amorfas y problemas en la relación estequiométrica del CZTS, mejorando su cristalinidad al practicarle un tratamiento térmico en un ambiente de azufre.

Sin embargo, el método ideal y las rutas para obtener el CZTS, así como algunos problemas presentes en estas estructuras que incluyen la descomposición durante el recocido y el control de la formación de fases secundarias son algunos de los temas de gran investigación. Por lo tanto, el objetivo de este trabajo es depositar películas delgadas de CZTS mediante el método de sputtering, centrandó nuestro estudio en el establecimiento de las condiciones y optimización del proceso con el fin de conseguir la estequiometría deseada del material CZTS para su aplicación como material absorbedor en el desarrollo de celdas solares.

### Experimentación

Las películas delgadas de CZTS se depositaron por la técnica de sputtering ocupando un blanco de aleación cuaternaria de CZTS con 36.22% de CuS, 22.18% de ZnS, 34.31% de SnS y 7.29% de S. Las películas se depositaron sobre sustratos de vidrio conductor Tec 7 con área de 3cm x 3cm a temperaturas superiores de 350 °C y tiempos de depósito de 60, 90, 120 y 150 minutos. Antes de empezar el calentamiento de los sustratos, la cámara de vacío fue bombeada hasta alcanzar una presión superior a  $10^{-5}$  Torr, vacío necesario para accionar el calentamiento hasta llegar a la temperatura seleccionada. En el proceso del depósito se introdujo Argón (con una pureza de 99.99%) hasta alcanzar una presión de depósito de  $5 \times 10^{-2}$  Torr, con una potencia de 50 W de rf. El espesor de las muestras utilizadas en este estudio varía desde 466 nm hasta 685 nm.

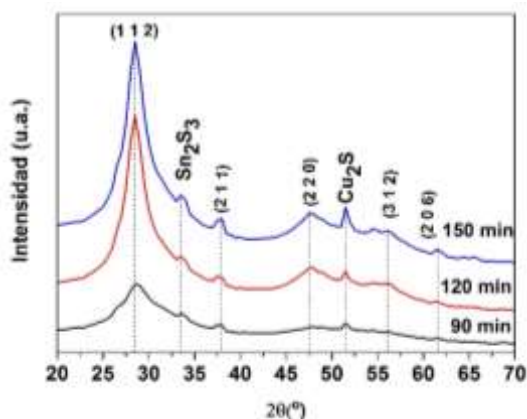
Para comprender el efecto de los tiempos y temperaturas de depósito realizados en este trabajo, se emplearon diferentes técnicas experimentales tales como: Difracción de Rayos X (DRX), empleando un difractor de la marca Smar Lab Rigaku con radiación  $\text{CuK}\alpha$  ( $\lambda=1.5406\text{\AA}$ ) para el estudio estructural. Para el estudio morfológico se utilizó un microscopio electrónico de barrido (SEM), marca Joel.

Los estudios ópticos fueron realizados usando un espectrofotómetro Agilent technologies 8453, con un intervalo de longitud de onda de 400-1100 nm, para estimar la banda prohibida de energía (Eg) de cada una de las muestras desarrolladas.

### Discusión de resultados.

#### Propiedades estructurales.

En el orden para comparar las propiedades estructurales de las películas con diferentes tiempos de depósito, preparamos películas con una temperatura de 400 °C bajo condiciones idénticas. Los patrones de DRX con diferentes tiempos de depósito a 90 min, 120 min y 150 min son mostrados en el gráfico 1 y analizados usando la tarjeta PDF No.: 01-075-4122. En el gráfico 1 se muestran los patrones de las películas desarrolladas observándose la presencia de picos localizados en  $2\theta=28.44^\circ$ ,  $37.91^\circ$ ,  $47.3^\circ$ , distintivos de una estructura CZTS, acompañado de la formación de fases secundarias como  $\text{Sn}_2\text{S}_3$ , en  $2\theta=33.48^\circ$  (PDF No.: 00-014-0619) y la fase  $\text{Cu}_2\text{S}$  en  $2\theta=51.48^\circ$  (PDF No.: 00-002-1272). Para tiempos por debajo de 60 min, no hay formación de la estructura de CZTS y a medida que incrementa el tiempo de depósito los patrones de DRX revelan un aumento en la intensidad de los picos característicos de CZTS así como un aumento en las fases secundarias. Para lograr obtener películas de CZTS en su fase kesterita con la menor formación de fases secundarias se realizaron depósitos a 90 min con temperatura de sustrato de 400, 500 y 600 °C.



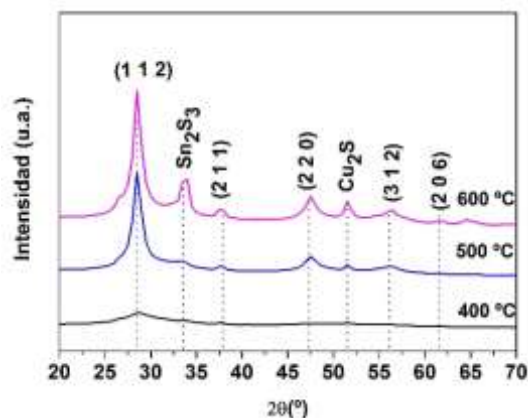
**Gráfico 1** DRX de películas delgadas de CZTS depositadas a 400 °C con diferente tiempo de depósito: 90 min, 120 min y 150 min

Los análisis de DRX mostrados en el gráfico 2 sugieren que las películas de CZTS depositadas a diferentes temperaturas, muestran una estructura tetragonal tipo kesterita con orientación en  $2\theta=28.44^\circ, 37.91^\circ, 47.3^\circ, 56.09^\circ$  y  $62.12^\circ$ , correspondiente a los planos (1 1 2), (2 1 1), (2 0 0), (3 1 2) y (2 0 6). Estas películas muestran una ligera dependencia en el parámetro de red con el incremento de la temperatura (ver tabla 1) y como en algunos reportes esta dependencia podría ser explicada debido a la sustitución de algún átomo en la red cristalina (Montoya De Los Santos, Courel, Mathews, & Mathew, 2017).

| Parámetro de red  | Temperatura °C | a=b  | c     |
|-------------------|----------------|------|-------|
| PDF # 01-075-4122 |                |      |       |
| a=b=5.43          | 400            | 5.42 | 11.06 |
| c=10.85           | 500            | 5.45 | 10.08 |
|                   | 600            | 5.39 | 10.63 |

**Tabla 1** Parámetro de red de películas de CZTS depositadas a diferentes temperaturas de depósito bajo un tiempo de 90min

El gráfico 2 muestra que bajo un incremento en la temperatura de depósito, la intensidad del pico con orientación preferencial en el plano (1 1 2) se vuelve más fuerte, observando que las películas cristalizan en la estructura CZTS cuando la temperatura de depósito está por encima de los 400 °C (Chalapathy et al., 2011). En la gráfica se observa que, bajo la temperatura de 500 °C, se presentan los planos característicos de la estructura de CZTS con picos bien definidos y mostrando una intensidad baja en la formación de las fases secundarias. Sin embargo, con el incremento de la temperatura a 600 °C es más evidente la presencia de la fase secundaria de Sn<sub>2</sub>S<sub>3</sub> considerada a la pérdida de azufre (Lin et al., 2016) y la presencia de la fase de Cu<sub>2</sub>S considerada a la descomposición de la película de CZTS (Ikhlusal Amal & Kim, 2013).



**Gráfico 2** DRX de películas delgadas de CZTS depositadas con un tiempo de 90 min a diferentes temperaturas

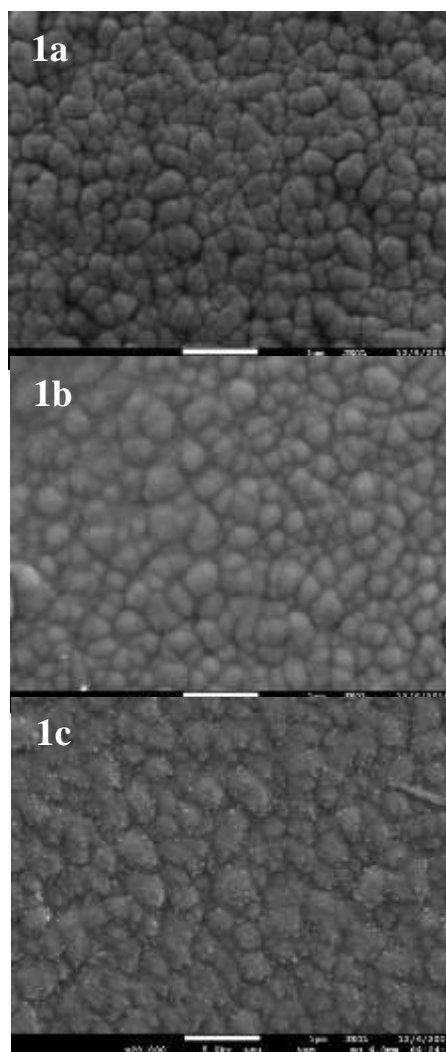
El tamaño de cristal de las películas depositadas a 90 min. bajo diferentes temperaturas se calculó usando la ecuación de Debye-Scherrer (1) (Ghribi, Alyamani, Ayadi, Djessas, & Mir, 2015; He et al., 2013) (Adelifard, 2015):

$$D = \frac{0.9\lambda}{\beta \cos \theta} \tag{1}$$

donde,  $D$  es el tamaño de cristal de la muestra,  $\lambda = 1.54056 \text{ \AA}$  es la longitud de onda de la fuente de rayos X ( $\text{CuK}\alpha$ ),  $\beta$  es la anchura total a media altura (FWHM) del pico principal y  $\theta$  es el ángulo de difracción de la Ley de Bragg. Los resultados muestran una variación en el tamaño de cristal como una función de la temperatura de depósito. Cuando la temperatura de depósito incrementa de  $400 \text{ }^\circ\text{C}$  a  $600 \text{ }^\circ\text{C}$ , el tamaño de cristal incrementa en promedio de  $0.47 \text{ nm}$  a  $2.10 \text{ nm}$ , revelando con lo anterior que la temperatura de depósito tiene un notable efecto de mejoramiento en los procesos de cristalización de las películas de CZTS.

### Propiedades morfológicas

La Fig. 1 muestra imágenes de SEM de películas de CZTS con diferentes temperaturas de depósito, mostrando el impacto de la temperatura sobre la morfología de las películas. Los cambios relacionados al tamaño de grano y morfología del grano son evidentes. La Fig. 1a correspondiente a una película de CZTS con una temperatura de depósito de  $400 \text{ }^\circ\text{C}$ , la cual muestra una superficie compacta libre de huecos y con pequeños granos bien definidos. La Fig. 1b y 1c muestra una fusión del grano y el crecimiento del mismo, indicando una cristalización de las películas con el incremento de la temperatura. El tamaño promedio de los granos son  $290 \text{ nm}$ ,  $320 \text{ nm}$  y  $390 \text{ nm}$  para las películas de CZTS con temperaturas de depósito de  $400 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $500 \text{ }^\circ\text{C}$  y  $600 \text{ }^\circ\text{C}$ .

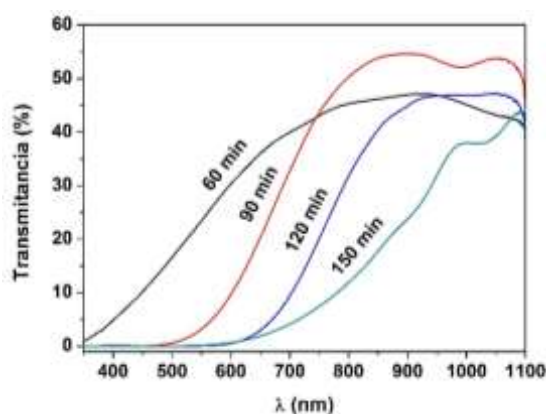


**Figura 1** Imágenes de SEM de películas de CZTS depositadas con un tiempo de 90 min y temperatura de depósito de (a)  $400 \text{ }^\circ\text{C}$ , (b)  $500 \text{ }^\circ\text{C}$  y (c)  $600 \text{ }^\circ\text{C}$

### Propiedades ópticas

Los espectros de transmitancia del gráfico 3 fueron usados para estimar el valor del coeficiente de absorción de las películas, se observan cambios sistemáticos en los bordes de absorción a medida que aumenta el tiempo de depósito, desplazándose a longitudes de onda más largas, caso similar para películas depositadas a diferentes temperaturas.

Los cambios pueden ser atribuidos a una variedad de defectos formados en las películas al realizar los procesos de depósito (Bodnar et al., 2015), causando a su vez una disminución del 50% en cada uno de los espectros de transmitancia (Chalapathy et al., 2011) y la presencia de fases secundarias en la estructura kesterita (Chalapathy et al., 2011) (Ikhlusal Amal & Kim, 2013) como se observa en los DRX del gráfico 1 y 2, debido a la pérdida de alguno de sus elementos constituyes al incrementar el tiempo y las temperaturas de depósito.



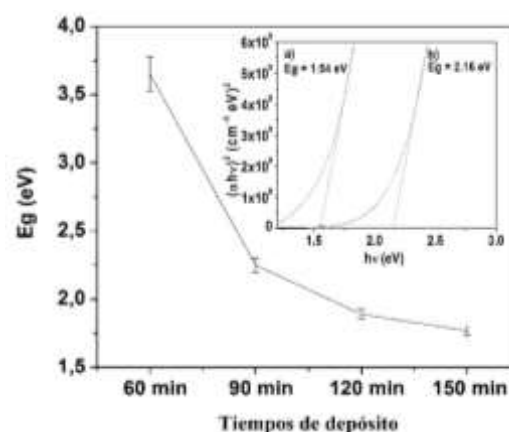
**Gráfico 3** Espectro de transmitancia de películas de CZTS depositadas a 400 °C con tiempos de depósito de 60 min., 90 min., 120 min., y 150 min

El valor de la banda prohibida de energía en las películas desarrolladas fue determinado usando el coeficiente de absorción estimado y usando la relación de Tauc observada en la ecuación (2) (Prabeesh, Selvam, & Potty, 2016) (Kaushik, Rao, & Subrahmanyam, 2017):

$$(\alpha hv)^2 = E_g - hv \quad (2)$$

donde  $\alpha$  es el coeficiente de absorción,  $hv$  es la energía del fotón,  $E_g$  es la energía de banda prohibida. Los valores de la banda prohibida se estimaron a partir de  $(\alpha hv)^2$  vs  $(hv)$  por la extrapolación de la parte lineal de la función, como se muestra en el recuadro interno del gráfico 4. Los cambios en la banda prohibida de energía de las películas son proporcionales al incremento del tiempo y temperatura de depósito.

De los resultados se obtuvo que una película formada bajo una temperatura de 500 °C y un tiempo de depósito de 90 min., presenta un valor de brecha de energía de 1.54 eV, siendo este valor apropiado con los reportados para una banda prohibida de energía directa de una película de CZTS (Bodnar et al., 2015) (Touati et al., 2015) (Ikhlusal Amal & Kim, 2013) (Abusnina et al., 2014) (Zhou et al., 2013) (Seol et al., 2003).



**Gráfico 4** Banda prohibida de energía ( $E_g$ ) vs tiempo de depósito; el recuadro interno representa una gráfica de Tauc de una película típica de CZTS depositada a 90 min. y temperaturas de a) 500 °C, b) 400 °C

## Conclusión

En este estudio logramos desarrollar películas delgadas de CZTS por el método de sputtering, usando un blanco compuesto por precursores metálicos de CuS, ZnS, SnS y S. Las películas presentan valores en su banda prohibida de energía en un rango de 3.52 eV a 2.16 eV, bajo temperaturas de 400 °C, y tiempos de depósito de 60 min a 150 min. Los análisis de DRX revelan que el incremento de temperatura y tiempos de depósito mejora sustancialmente la cristalinidad de las películas de CZTS, así como un incremento en la intensidad de las fases secundarias, localizadas en  $2\Theta = 33.48^\circ$  corresponde a la fase  $\text{Sn}_2\text{S}_3$  y la presencia de  $\text{Cu}_2\text{S}$  en  $2\Theta = 51.48^\circ$  atribuidas a una variedad de defectos formados en las películas al realizar los procesos de depósito, así como a la pérdida de alguno de sus elementos constituyes al incrementar el tiempo y las temperaturas de depósito.

Sin embargo, logramos establecer que bajo condiciones de 500 °C y tiempos de depósito de 90 min, la formación de fases secundarias puede ser disminuida, obteniendo una estructura cristalina con todas las características de una película de CZTS y un valor adecuado de banda prohibida de energía directa de 1.54 eV indicando propiedades ópticas adecuadas para su aplicación como un material absorbedor para el desarrollo de una celda solar. Actualmente estamos trabajando en el desarrollo de tratamientos térmicos a diferentes temperaturas y tiempos bajo una atmosfera de azufre para obtener películas de CZTS más cristalinas y sin la formación de fases secundarias.

### Agradecimientos.

Este trabajo fue parcialmente apoyado por los proyectos CONACyT 239590, PRODEP 103.5/16/10255 y UPCH-CA-12 25634. Los autores agradecen a la UJAT por las facilidades brindadas en el desarrollo de este trabajo, así como a la M.C. Edit Ponce Recinos (UPChiapas) por las mediciones de DRX y SEM.

### Referencias

Abusnina, M., Moutinho, H., Al-Jassim, M., DeHart, C., & Matin, M. (2014). Fabrication and Characterization of CZTS Thin Films Prepared by the Sulfurization of RF-Sputtered Stacked Metal Precursors. *Journal of Electronic Materials*, 43(9), 3145-3154. doi: 10.1007/s11664-014-3259-2

Adelifard, M. (2015). Nanostructured Cu<sub>2</sub>ZnSnS<sub>4</sub> thin films: influence of substrate temperature on structural, morphological, optical and electrical properties. *Applied Physics A*, 121(1), 95-101. doi: 10.1007/s00339-015-9389-4

Bodnar, I. V., Telesh, E. V., Gurieva, G., & Schorr, S. (2015). Transmittance Spectra of Cu<sub>2</sub>ZnSnS<sub>4</sub> Thin Films. *Journal of Electronic Materials*, 44(10), 3283-3287. doi: 10.1007/s11664-015-3909-z

Cao, M., & Shen, Y. (2011). A mild solvothermal route to kesterite quaternary Cu<sub>2</sub>ZnSnS<sub>4</sub> nanoparticles. *Journal of Crystal Growth*, 318(1), 1117-1120. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2010.10.071>

Chalapathy, R. B. V., Jung, G. S., & Ahn, B. T. (2011). Fabrication of Cu<sub>2</sub>ZnSnS<sub>4</sub> films by sulfurization of Cu/ZnSn/Cu precursor layers in sulfur atmosphere for solar cells. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 95(12), 3216-3221. doi: <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2011.07.017>

Dhokal, T. P., Peng, C. Y., Reid Tobias, R., Dasharathy, R., & Westgate, C. R. (2014). Characterization of a CZTS thin film solar cell grown by sputtering method. *Solar Energy*, 100, 23-30. doi: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2013.11.035>

Flores, O., González, R., Juárez, V., & Huitzil, I. (2016). Análisis comparativo de rendimiento, costo y producción energética entre el sistema aislado e interconectado de la empresa cartón corrugado Puebla S.A. de C.V. *Aplicaciones de la Ingeniería*, 3 No. 9, 48-58.

Ghribi, F., Alyamani, A., Ayadi, Z. B., Djessas, K., & Mir, L. E. (2015). Study of CuS Thin Films for Solar Cell Applications Sputtered from Nanoparticles Synthesised by Hydrothermal Route. *Energy Procedia*, 84, 197-203. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2015.12.314>

Green, M. A., Emery, K., Hishikawa, Y., & Warta, W. (2010). Solar cell efficiency tables (version 36). *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 18(5), 346-352. doi: 10.1002/pip.1021

- He, J., Sun, L., Zhang, K., Wang, W., Jiang, J., Chen, Y., . . . Chu, J. (2013). Effect of post-sulfurization on the composition, structure and optical properties of Cu<sub>2</sub>ZnSnS<sub>4</sub> thin films deposited by sputtering from a single quaternary target. *Applied Surface Science*, 264, 133-138. doi: <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2012.09.140>
- Ikhlasul Amal, M., & Kim, K. H. (2013). Structural and optical properties of sulfurized Cu<sub>2</sub>ZnSnS<sub>4</sub> thin films from Cu–Zn–Sn alloy precursors. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 24(2), 559-566. doi: 10.1007/s10854-012-0858-7
- Jackson, P., Hariskos, D., Lotter, E., Paetel, S., Wuerz, R., Menner, R., . . . Powalla, M. (2011). New world record efficiency for Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub> thin-film solar cells beyond 20%. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 19(7), 894-897. doi: 10.1002/pip.1078
- Katagiri, H. (2005). Cu<sub>2</sub>ZnSnS<sub>4</sub> thin film solar cells. *Thin Solid Films*, 480–481, 426-432. doi: <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2004.11.024>
- Kaushik, D. K., Rao, T. N., & Subrahmanyam, A. (2017). Studies on the disorder in DC magnetron sputtered Cu<sub>2</sub>ZnSnS<sub>4</sub> (CZTS) thin films grown in sulfide plasma. *Surface and Coatings Technology*, 314, 85-91. doi: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2016.09.034>
- Li, Y., Chen, J., & Ma, J. (2015). Properties of Cu<sub>2</sub>ZnSnS<sub>4</sub> (CZTS) thin films prepared by plasma assisted co-evaporation. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 26(9), 6546-6551. doi: 10.1007/s10854-015-3251-5
- Lin, Y.-P., Chi, Y.-F., Hsieh, T.-E., Chen, Y.-C., & Huang, K.-P. (2016). Preparation of Cu<sub>2</sub>ZnSnS<sub>4</sub> (CZTS) sputtering target and its application to the fabrication of CZTS thin-film solar cells. *Journal of Alloys and Compounds*, 654, 498-508. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2015.09.111>
- Majula, L., Mlyuka, N. R., Samiji, M. E., Bryce, R. S., Kim, D. Y., Kim, S. H., . . . Choi, H. J. (2015). Spin-coated kesterite CZTS thin films for photovoltaic applications. *Journal of the Korean Physical Society*, 67(6), 1078-1081. doi: 10.3938/jkps.67.1078
- Molina-García, M., & Melchor-Hernández, C. (2016). Prototipo de un Sistema Fotovoltaico Autónomo. *Aplicaciones de la Ingeniería*, 3 No. 8, 8-18.
- Montoya De Los Santos, I., Courel, M., Mathews, N. R., & Mathew, X. (2017). Study on the effect of annealing under pressure on the material properties of Cu<sub>2</sub>ZnSn(S,Se)<sub>4</sub> thin films. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 68, 68-75. doi: <https://doi.org/10.1016/j.mssp.2017.06.013>
- Prabeesh, P., Selvam, I. P., & Potty, S. (2016). Effect of annealing temperature on a single step processed Cu<sub>2</sub>ZnSnS<sub>4</sub> thin film via solution method. *Thin Solid Films*, 606, 94-98.
- Salazar-Peralta, A., Alfredo, P.-S. J., & Picahrd-S, U. (2016). La energía solar, una alternativa para la generación de energía renovable. *Investigación y Desarrollo*, 2 No. 5, 11-20.
- Seol, J.-S., Lee, S.-Y., Lee, J.-C., Nam, H.-D., & Kim, K.-H. (2003). Electrical and optical properties of Cu<sub>2</sub>ZnSnS<sub>4</sub> thin films prepared by rf magnetron sputtering process. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 75(1–2), 155-162. doi: [https://doi.org/10.1016/S0927-0248\(02\)00127-7](https://doi.org/10.1016/S0927-0248(02)00127-7)
- Touati, R., Ben Rabeh, M., & Kanzari, M. (2015). Effect of post-sulfurization on the structural and optical properties of Cu<sub>2</sub>ZnSnS<sub>4</sub> thin films deposited by vacuum evaporation method. *Thin Solid Films*, 582, 198-202. doi: <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2014.12.032>

Zhou, S., Tan, R., Jiang, X., Shen, X., Xu, W., & Song, W. (2013). Growth of CZTS thin films by sulfurization of sputtered single-layered Cu–Zn–Sn metallic precursors from an alloy target. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 24(12), 4958-4963. doi: 10.1007/s10854-013-1507-5



## Estudio sobre la simetría de extremidades

ÁLVAREZ-SÁNCHEZ, Ervin Jesús†, ALDANA-FRANCO, Rosario, LÓPEZ-VELÁZQUEZ, Andrés y GALÁN-MÉNDEZ, Frixia

*Facultad de Ingeniería Mecánica y Electrica Región Xalapa, Universidad Veracruzana*

Recibido Abril 13, 2017; Aceptado Junio 15, 2017

### Resumen

Desde hace mucho tiempo se ha comentado que el exterior del cuerpo humano es simétrico en sus extremidades superiores e inferiores, considerando la longitud y grosor, por lo que cuando se llegan a realizar los diseños de prótesis para alguna extremidad, esta aseveración de simetría se toma como una verdad absoluta, sin embargo dependiendo de la constitución y de la actividad física de una persona, esto no siempre resulta ser así. En este trabajo se llevan a cabo las mediciones de las masas de las extremidades de un grupo de voluntarios con la finalidad de llevar a cabo un estudio de validación de la simetría existente. Del análisis realizado se obtienen los rangos dentro de los cuales se puede considerar que una de las extremidades es simétrica respecto a la otra, permitiendo de esta manera una mejor aproximación del total del peso con que debe contar el prototipo de una prótesis

### Extremidades, simetría, estudio

### Abstract

During many years, has been considered that the outside of the human body is symmetrical in the upper and lower extremities, talking about length and thickness, so that when prosthetics are designed for one of the extremities this affirmation becomes an absolute truth. However, depending on the physical constitution and activity of a person, this does not always been demonstrated. In this paper measurements of extremities masses of a group of volunteers are carried out in order to validate the existing studies of symmetry. From the analysis performed the range where one extremity can be considered symmetrical with the other is obtained. This allows having a better approximation of the total weight that a prosthesis prototype must have

### Extremities, symmetry, study

**Citación:** ÁLVAREZ-SÁNCHEZ, Ervin Jesús, ALDANA-FRANCO, Rosario, LÓPEZ-VELÁZQUEZ, Andrés y GALÁN-MÉNDEZ, Frixia. Estudio sobre la simetría de extremidades. Revista del Desarrollo Tecnológico 2017, 1-2: 34-43

† Investigador contribuyendo como primer autor.

## Introducción

En múltiples ocasiones se nos ha dicho que el cuerpo humano cuenta con una simetría bilateral (Weyl, H., 2016), sin embargo surgen preguntas tales como: ¿qué tan simétrico es? ¿existen proporciones en nuestro cuerpo? (Schilder, P., 2007). Esto no es algo nuevo, la idea surgió siglos atrás, cuando el florentino Leonado Da Vinci inicio con el estudio de las proporciones del cuerpo humano, plasmando en el Hombre de Vitruvio (Zöllner, F., 2014) (Fuster Ruiz, R. y Jordi Aguadé, J., 2015): las proporciones ideales humanas están basadas en el número áureo (Blanco Dávila, F., 2005).

Al paso de los siglos se genera la Antropometría, una nueva ciencia que permite obtener las mediciones del cuerpo humano con nuevas tecnologías (Nariño Lescay, R, Alonso Becerra, A. y Hernández González A., 2016), así como las técnicas para llevar a cabo dichas mediciones (GSE, 1993)(Carmenate Milián, L, Moncada Chévez, F. A. y Borjas Leiva, E. W. 2014) para posteriormente darles un tratamiento estadístico.

Aunque ya se tiene la forma de establecer las proporciones entre las dimensiones del cuerpo humano (Brabandere, S., 2017) y existen investigaciones sobre el seguimiento de la postura humana (Ramakrishna, V, Kanade, T. y Sheikh, Y. 2013), obesidad (Kamadjeu, R. M et al, 2006), volumen de agua (Watson, P. E, Watson, I. D. and Batt, R. D., 1980), surge una duda ¿qué pasa con las proporciones individuales de masas en un grupo de personas? La investigación más cercana es para predecir la masa muscular utilizando datos antropométricos y demográficos (Al-Gidan, Y. Y. et al, 2014) , sin embargo los resultados no abordan el estudio de la simetría de las masas de las extremidades del cuerpo humano.

El estudio que se presenta en este trabajo sirve como base para poder determinar la relación de simetría de masa que existe en las extremidades del cuerpo humano, con la finalidad de ser utilizado posteriormente en el diseño de prótesis que sean funcionales y que no causen un desbalanceo en los pacientes o un gasto excesivo de energía para su manipulación.

## Descripción del Método

Para este trabajo se realizó un ensayo inicial con una muestra de 20 personas voluntarias, 8 mujeres y 12 hombres, con edades que oscilan entre los 15 años y los 55 años, cuyas identidades se mantienen en el anonimato por razones de confidencialidad. En la tabla 1 se muestra para cada uno de los individuos (I) su edad (E) en años, sexo (S) masculino (M) o femenino (F), estatura (Es) en centímetros y la masa total (MT) en kilogramos.

| I  | E  | S | Es    | MT    |
|----|----|---|-------|-------|
| 1  | 52 | F | 153.0 | 66.8  |
| 2  | 20 | F | 163.0 | 49.4  |
| 3  | 16 | M | 169.2 | 76.8  |
| 4  | 30 | M | 172.0 | 86.1  |
| 5  | 22 | M | 165.0 | 72.9  |
| 6  | 21 | M | 174.5 | 105.6 |
| 7  | 21 | M | 173   | 62.9  |
| 8  | 20 | M | 178.5 | 77.2  |
| 9  | 20 | M | 169.5 | 61.9  |
| 10 | 37 | M | 184   | 95.9  |
| 11 | 23 | M | 169.2 | 45.3  |
| 12 | 20 | M | 173.2 | 73.1  |
| 13 | 22 | F | 165.1 | 71.7  |
| 14 | 24 | F | 168.3 | 83.6  |
| 15 | 26 | F | 168.9 | 77.4  |
| 16 | 20 | M | 169.8 | 94.7  |
| 17 | 23 | F | 160.8 | 66.9  |
| 18 | 23 | F | 157.3 | 60.2  |
| 19 | 22 | M | 178.0 | 79.4  |
| 20 | 25 | F | 158.2 | 67.3  |

**Tabla 1** Datos básicos del grupo de estudio

Fuente: Propia

Para realizar el estudio, se utilizaron básculas pequeñas con una precisión de 1 gramo, con la finalidad de contar con una medición lo más exacta posible. Sin embargo es necesario aclarar que la postura del individuo al momento de tomar la muestra puede alterar la medición de las masas. Para evitar en lo mayor posible variaciones significativas, se llevó a cabo el siguiente procedimiento:

- El tronco se coloca sobre una superficie lisa ubicada una distancia vertical de 4 cm del suelo, que es la altura de las básculas.
- La superficie de apoyo solo debe cubrir el tronco y la cabeza, permitiendo libertad de movimiento para las extremidades.
- Las extremidades deben subdividirse en su forma anatómica para tomar sus masas.
- Para los miembros superiores se utiliza la división anatómica de brazo, antebrazo y mano, por lo que se requieren 3 básculas por cada extremidad.
- Para los miembros inferiores se utiliza la división anatómica de muslo, pierna y pie, por lo que se requieren 3 básculas por cada extremidad.

A continuación se realiza la toma de masas y el análisis de los resultados obtenidos.

### Análisis de datos

Lo primero que se busca es verificar si existe la simetría bilateral de masas entre los miembros superiores y los miembros inferiores de forma completa, sin realizar una división anatómica.

### *Simetría bilateral entre miembros: anatomía completa*

El primer análisis se hace con los miembros inferiores, considerando una comparación entre los mismo como miembro inferior derecho (ID) y miembro inferior izquierdo (II) a través del porcentaje de masa que tienen respecto de la masa total.

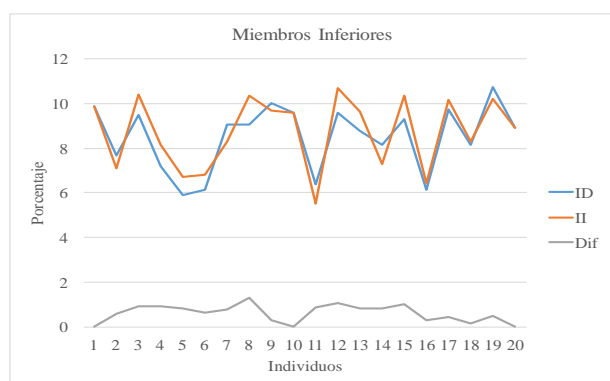
En la tabla 2 se muestran las mediciones de masa en kilogramos y los porcentajes, donde se puede observar que aunque se tenía el concepto de que el cuerpo cuenta con una simetría bilateral, esto solo se cumple en la mayoría de los casos para longitud, sin embargo para la masa depende directamente de la actividad física del individuo, ya que los músculos tienden a desarrollarse.

| I  | MT    | ID  | %     | II  | %     |
|----|-------|-----|-------|-----|-------|
| 1  | 66.8  | 6.6 | 9.88  | 6.6 | 9.88  |
| 2  | 49.4  | 3.8 | 7.69  | 3.5 | 7.09  |
| 3  | 76.8  | 7.3 | 9.51  | 8.0 | 10.42 |
| 4  | 86.1  | 6.2 | 7.20  | 7.0 | 8.13  |
| 5  | 72.9  | 4.3 | 5.90  | 4.9 | 6.72  |
| 6  | 105.6 | 6.5 | 6.16  | 7.2 | 6.82  |
| 7  | 62.9  | 5.7 | 9.06  | 5.2 | 8.27  |
| 8  | 77.2  | 7.0 | 9.07  | 8.0 | 10.36 |
| 9  | 61.9  | 6.2 | 10.02 | 6.0 | 9.69  |
| 10 | 95.9  | 9.2 | 9.59  | 9.2 | 9.59  |
| 11 | 45.3  | 2.9 | 6.40  | 2.5 | 5.52  |
| 12 | 73.1  | 7.0 | 9.58  | 7.8 | 10.67 |
| 13 | 71.7  | 6.3 | 8.79  | 6.9 | 9.62  |
| 14 | 83.6  | 6.8 | 8.13  | 6.1 | 7.30  |
| 15 | 77.4  | 7.2 | 9.30  | 8.0 | 10.34 |
| 16 | 94.7  | 5.8 | 6.12  | 6.1 | 6.44  |
| 17 | 66.9  | 6.5 | 9.72  | 6.8 | 10.16 |
| 18 | 60.2  | 4.9 | 8.14  | 5.0 | 8.31  |
| 19 | 79.4  | 8.5 | 10.71 | 8.1 | 10.20 |
| 20 | 67.3  | 6.0 | 8.92  | 6.0 | 8.92  |

**Tabla 2** Masas de miembros inferiores

*Fuente: Propia*

En el gráfico 1 se muestra la comparación de los resultados obtenidos en la tabla 1. Se puede observar que existen pequeñas variaciones entre las masas de los miembros inferiores izquierdo y derecho.



**Gráfico 1** Relación entre miembros inferiores

Fuente: Propia

En el gráfico 1, se encuentra que existe una relación de simetría entre 0% y 1.29% para los miembros inferiores.

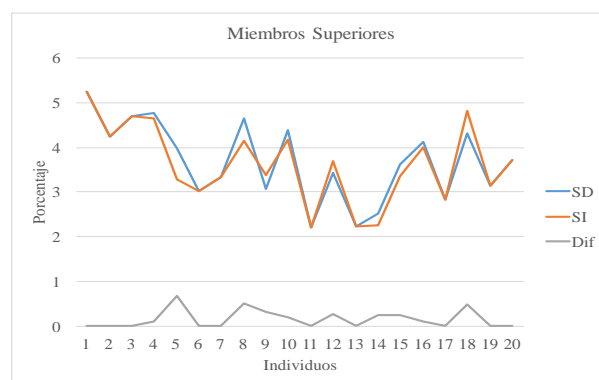
En la tabla 3 se muestran las mediciones obtenidas de las masas de los miembros superiores para los individuos del grupo de estudio.

| I  | MT    | SD  | %    | SI  | %    |
|----|-------|-----|------|-----|------|
| 1  | 66.8  | 3.5 | 5.24 | 3.5 | 5.24 |
| 2  | 49.4  | 2.1 | 4.25 | 2.1 | 4.25 |
| 3  | 76.8  | 3.6 | 4.69 | 3.6 | 4.69 |
| 4  | 86.1  | 4.1 | 4.76 | 4.0 | 4.65 |
| 5  | 72.9  | 2.9 | 3.98 | 2.4 | 3.29 |
| 6  | 105.6 | 3.2 | 3.03 | 3.2 | 3.03 |
| 7  | 62.9  | 2.1 | 3.34 | 2.1 | 3.34 |
| 8  | 77.2  | 3.6 | 4.66 | 3.2 | 4.15 |
| 9  | 61.9  | 1.9 | 3.07 | 2.1 | 3.39 |
| 10 | 95.9  | 4.2 | 4.38 | 4.0 | 4.17 |
| 11 | 45.3  | 1.0 | 2.21 | 1.0 | 2.21 |
| 12 | 73.1  | 2.5 | 3.42 | 2.7 | 3.69 |
| 13 | 71.7  | 1.6 | 2.23 | 1.6 | 2.23 |
| 14 | 83.6  | 2.1 | 2.51 | 1.9 | 2.27 |
| 15 | 77.4  | 2.8 | 3.62 | 2.6 | 3.36 |
| 16 | 94.7  | 3.9 | 4.12 | 3.8 | 4.01 |
| 17 | 66.9  | 1.9 | 2.84 | 1.9 | 2.84 |
| 18 | 60.2  | 2.6 | 4.32 | 2.9 | 4.82 |
| 19 | 79.4  | 2.5 | 3.15 | 2.5 | 3.15 |
| 20 | 67.3  | 2.5 | 3.71 | 2.5 | 3.71 |

**Tabla 3** Masas de miembros superiores

Fuente: Propia

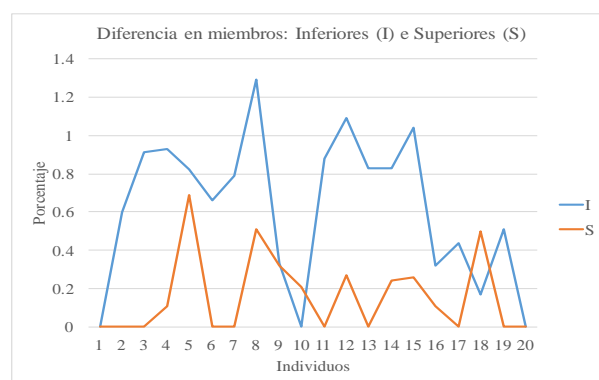
En el gráfico 2 se muestran las comparaciones entre los porcentajes de masa de los miembros superior derecho (SD) y superior izquierdo (SI), así como la diferencia entre los mismos. Se observa que la simetría entre los miembros superiores tiene un error de entre 0% y 0.69%.



**Gráfico 2** Relación entre miembros superiores

Fuente: Propia

En el gráfico 3 se comparan las simetrías que se tienen en los miembros superiores y en los miembros inferiores, los cuales son alentadores para corroborar la simetría bilateral en masas.



**Gráfico 3** Comparación de simetrías

Fuente: Propia

Aun y cuando se tiene un porcentaje de simetría relativamente bueno para los miembros completos, en un paciente esto representaría una amputación total de uno de los miembros, lo que no es usual, por lo que el siguiente análisis que se realiza es para la división anatómica de las extremidades.

#### *Simetría bilateral entre miembros inferiores: división anatómica*

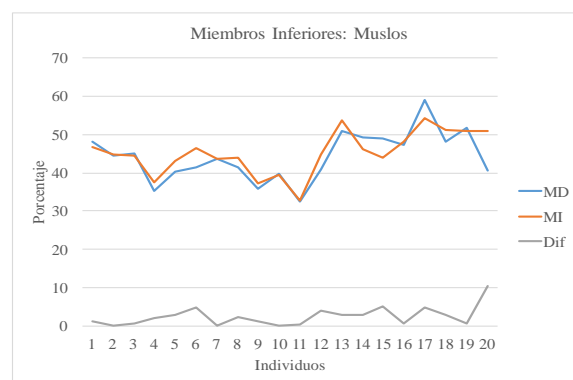
El análisis se iniciará con los miembros inferiores, divididos en muslo derecho (MD), muslo izquierdo (MI), pierna derecha (PND), pierna izquierda (PNI), pie derecho (PD) y pie izquierdo (PI). Para este caso, solo se obtendrá el porcentaje de masa que tiene cada sección, respecto de la masa total de cada miembro inferior. En la tabla 4 se muestran los porcentajes obtenidos, en donde se tienen variaciones en todas las partes que componen los miembros inferiores.

En el gráfico 4 se muestra la relación existente entre los muslos y la diferencia en porcentaje que existe entre ellos. Se observa que no se tiene un porcentaje promedio, ya que se tienen variaciones muy pequeñas hasta unas que resultan significativas, como en el caso del individuo número 20, que presenta una diferencia del 10%.

| I  | MD    | MI    | PND   | PNI   | PD    | PI    |
|----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 1  | 48.04 | 46.71 | 36.05 | 36.78 | 15.91 | 16.51 |
| 2  | 44.47 | 44.67 | 37.85 | 37.08 | 17.68 | 18.24 |
| 3  | 45.11 | 44.45 | 34.91 | 35.08 | 19.98 | 20.47 |
| 4  | 35.36 | 37.51 | 43.76 | 42.52 | 20.88 | 19.97 |
| 5  | 40.24 | 43.17 | 32.98 | 31.52 | 26.78 | 25.30 |
| 6  | 41.51 | 46.52 | 40.58 | 35.60 | 17.91 | 17.88 |
| 7  | 43.72 | 43.54 | 37.95 | 38.17 | 18.34 | 18.30 |
| 8  | 41.48 | 43.90 | 41.65 | 38.68 | 16.86 | 17.41 |
| 9  | 35.93 | 37.30 | 41.44 | 37.67 | 22.63 | 25.03 |
| 10 | 39.66 | 39.42 | 46.05 | 42.72 | 14.29 | 17.86 |
| 11 | 32.46 | 32.77 | 41.19 | 40.61 | 26.34 | 26.62 |
| 12 | 40.74 | 44.81 | 38.12 | 36.66 | 21.14 | 18.53 |
| 13 | 50.81 | 53.70 | 30.38 | 31.76 | 18.82 | 14.54 |
| 14 | 49.20 | 46.17 | 34.58 | 36.65 | 16.22 | 17.18 |
| 15 | 49.02 | 43.84 | 36.70 | 40.82 | 14.28 | 15.35 |
| 16 | 47.33 | 48.14 | 39.09 | 37.92 | 13.58 | 13.93 |
| 17 | 58.95 | 54.18 | 30.06 | 35.77 | 10.99 | 10.05 |
| 18 | 48.20 | 51.24 | 36.07 | 32.65 | 15.74 | 16.11 |
| 19 | 51.59 | 51.01 | 33.87 | 34.94 | 14.54 | 14.05 |
| 20 | 40.43 | 51.01 | 40.74 | 34.94 | 18.82 | 14.05 |

**Tabla 4** Porcentajes de masas de muslos, piernas y pies

Fuente: Propia



**Gráfico 4** Porcentajes de masas de muslos

Fuente: Propia

La comparación de los porcentajes de masa entre las piernas se muestra en el gráfico 5, en donde se aprecia que se tiene una variación menor, ya que el máximo alcanzado es de 5.8%.

Finalmente, la comparación entre los pies se muestra en el gráfico 6, obteniéndose que en la mayoría de los casos se tiene un porcentaje bajo.

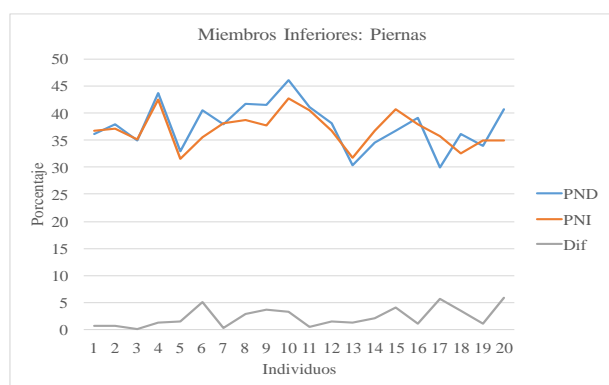


Gráfico 5 Porcentajes de masas de piernas

Fuente: Propia

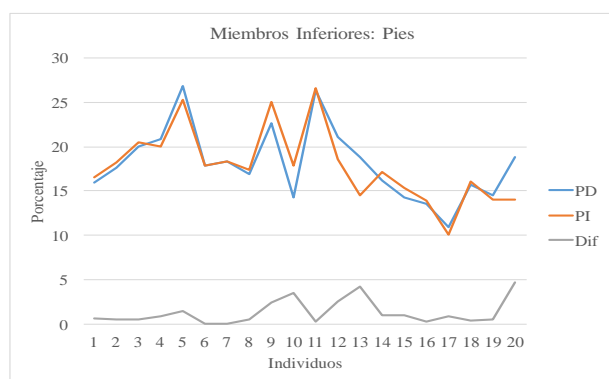


Gráfico 6 Porcentajes de masas de pies

Fuente: Propia

Debido a las diferencias existentes entre cada uno de los elementos de los miembros inferiores no se llega a una conclusión de existencia de simetría. Aunque de forma completa la diferencia de porcentaje es de 1.29% como máximo, en el caso individual esta diferencia se incrementa por encima del 10%.

En el gráfico 7 se realiza una comparación entre las diferencias para cada uno de los elementos que conforman el miembro inferior. Con esta información, se puede determinar en una prótesis que porcentaje de masa es el aceptable para no generar un desbalance en el paciente.

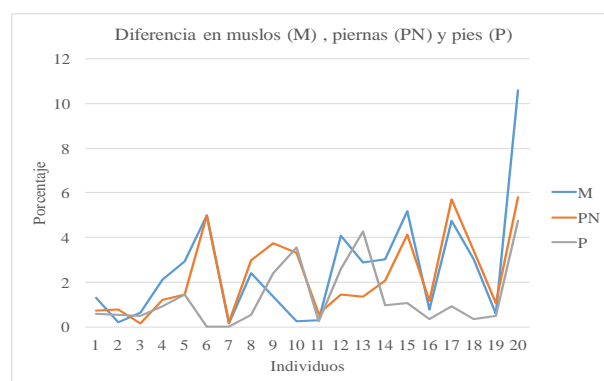


Gráfico 7 Diferencias de porcentajes en los elementos del miembro inferior

Fuente: Propia

*Simetría bilateral entre miembros superiores: división anatómica*

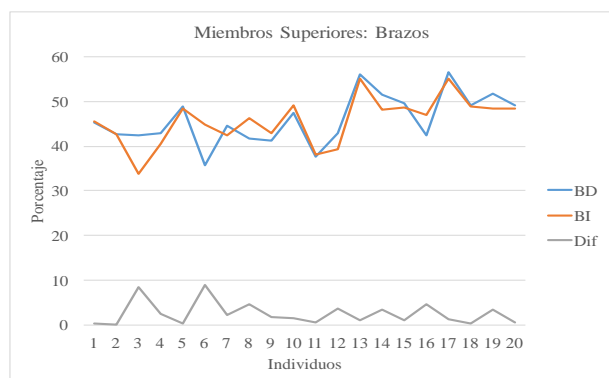
Para este análisis se utilizará la división anatómica: brazo derecho (BD), brazo izquierdo (BI), antebrazo derecho (AD), antebrazo izquierdo (AI), mano derecha (MND) y mano izquierda (MNI). En la tabla 5 se muestran las mediciones de masa realizadas a los individuos del grupo de análisis.

| I  | BD    | BI    | AD    | AI    | MND   | MNI   |
|----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 1  | 45.22 | 45.59 | 36.56 | 37.28 | 18.22 | 17.13 |
| 2  | 42.69 | 42.65 | 37.47 | 37.11 | 19.84 | 20.24 |
| 3  | 42.42 | 33.90 | 40.61 | 44.36 | 16.97 | 21.73 |
| 4  | 42.98 | 40.57 | 46.37 | 48.11 | 10.64 | 11.32 |
| 5  | 48.78 | 48.51 | 38.81 | 38.74 | 12.41 | 12.75 |
| 6  | 35.68 | 44.72 | 50.06 | 41.91 | 14.26 | 13.37 |
| 7  | 44.68 | 42.32 | 43.09 | 42.62 | 12.22 | 15.06 |
| 8  | 41.71 | 46.31 | 49.50 | 45.61 | 8.79  | 8.08  |
| 9  | 41.15 | 42.93 | 41.72 | 41.12 | 17.13 | 15.95 |
| 10 | 47.45 | 49.08 | 40.59 | 43.10 | 11.97 | 7.82  |
| 11 | 37.56 | 38.19 | 45.87 | 45.28 | 16.57 | 16.53 |
| 12 | 42.93 | 39.21 | 41.44 | 43.81 | 15.63 | 16.98 |
| 13 | 56.09 | 55.11 | 33.55 | 34.88 | 10.37 | 10.01 |
| 14 | 51.50 | 48.07 | 36.93 | 40.02 | 11.57 | 11.90 |
| 15 | 49.60 | 48.57 | 38.13 | 38.86 | 12.27 | 12.58 |
| 16 | 42.43 | 47.02 | 44.18 | 39.92 | 13.39 | 13.06 |
| 17 | 56.54 | 55.16 | 35.18 | 35.68 | 8.28  | 9.06  |
| 18 | 49.16 | 48.92 | 39.17 | 39.33 | 11.67 | 11.75 |
| 19 | 51.83 | 48.41 | 39.33 | 38.71 | 8.84  | 12.88 |
| 20 | 49.04 | 48.41 | 39.56 | 38.71 | 11.40 | 12.88 |

Tabla 5 Porcentajes de masas de brazos, antebrazos y manos

Fuente: Propia

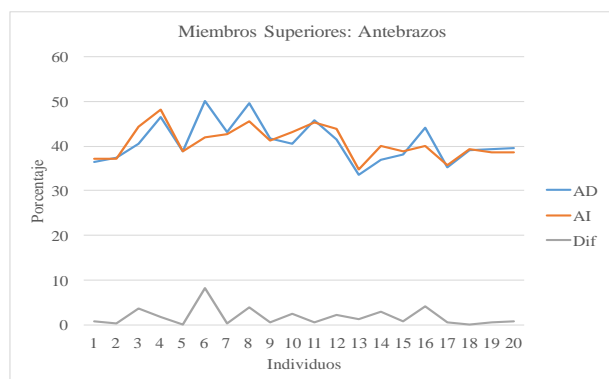
En el gráfico 8 se muestra la relación entre los brazos y la diferencia entre ellos, obteniéndose una diferencia menor al 10%.



**Gráfico 8** Porcentajes de masas de brazos

*Fuente: Propia*

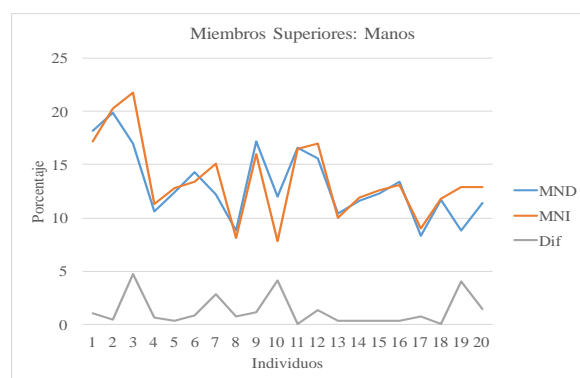
En el gráfico 9 se muestra la relación entre los antebrazos y la diferencia entre ellos, observándose que la diferencia existente es menor al 10%.



**Gráfico 9** Porcentajes de masas de antebrazos

*Fuente: Propia*

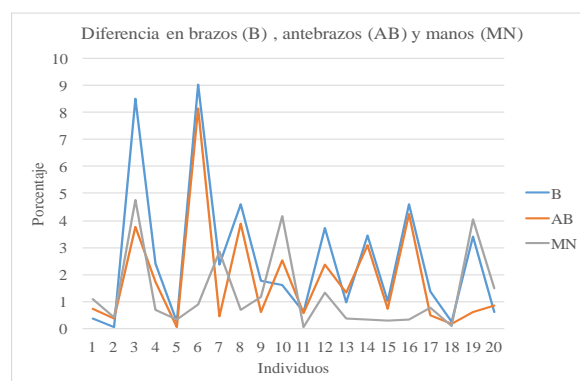
En el gráfico 10 se encuentran los porcentajes de las manos y la diferencia entre ellos, donde se tiene una diferencia menor al 5%.



**Gráfico 10** Porcentajes de masas de manos

*Fuente: Propia*

Aunque de forma completa, los miembros superiores presentan una diferencia del 0.69%, entre los elementos que los componen se tienen diferencias cercanas al 10%. En el gráfico 11 se muestran las diferencias existentes entre cada elemento de los miembros superiores.



**Gráfico 11** Diferencias de porcentajes en los elementos del miembro superior

*Fuente: Propia*

De los resultados que se obtienen, existen diferencias significativas en las simetrías, sin embargo estas se encuentran por debajo del 10% de las diferencias entre porcentajes.

El tener un grupo de estudio tan variado en edades y estaturas puede ser un punto que afecte los resultados simétricos, por lo que el análisis se limitará a individuos cuyo rango de edad sea 20-23 años y su estatura se encuentre entre 160-175 cm. Los individuos que cumplen con los rangos son 10 de 20, por lo que el grupo se redujo un 50% del total. Los datos de los individuos se muestran en la tabla 6.

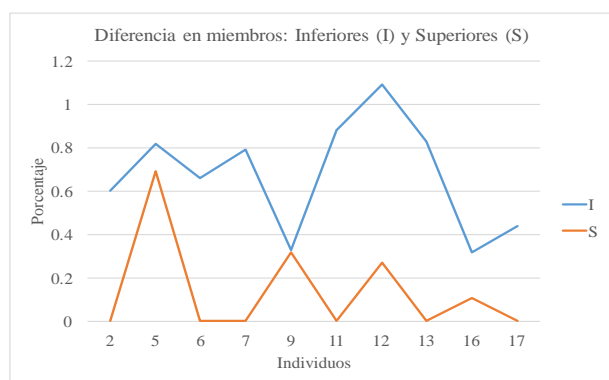
| I  | E  | S | Es    | MT    |
|----|----|---|-------|-------|
| 2  | 20 | F | 163.0 | 49.4  |
| 5  | 22 | M | 165.0 | 72.9  |
| 6  | 21 | M | 174.5 | 105.6 |
| 7  | 21 | M | 173   | 62.9  |
| 9  | 20 | M | 169.5 | 61.9  |
| 11 | 23 | M | 169.2 | 45.3  |
| 12 | 20 | M | 173.2 | 73.1  |
| 13 | 22 | F | 165.1 | 71.7  |
| 16 | 20 | M | 169.8 | 94.7  |
| 17 | 23 | F | 160.8 | 66.9  |

**Tabla 6** Datos básicos del grupo de estudio reducido

Fuente: Propia

Lo siguiente es repetir los análisis de porcentajes de simetría, por lo que solo se mostrarán los resultados de forma gráfica.

En el gráfico 12 se muestra la relación resultante de la simetría entre los miembros inferiores y superiores.

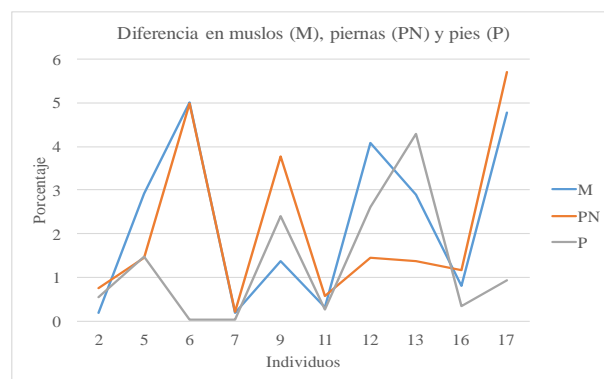


**Gráfico 12** Comparación de simetrías en el grupo de estudio reducido

Fuente: Propia

Los resultados muestran una disminución en la diferencia de simetría para los miembros inferiores, obteniéndose un 1.09%, mientras que se mantiene el 0.69% de diferencia para los miembros superiores, por lo que se puede concluir que los individuos del estudio reducido tienen miembros simétricos en masa. Para verificar si esta reducción sucede en los elementos que conforman las extremidades, se procede a repetir el procedimiento.

El gráfico 13 muestra los resultados de los elementos del miembro inferior para el grupo de estudio reducido.



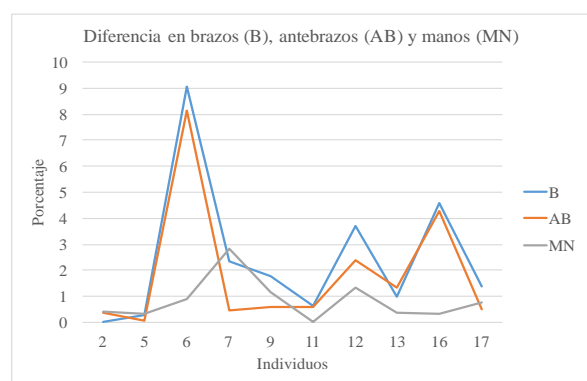
**Gráfico 13** Diferencias de porcentajes en los elementos de los miembros inferiores del grupo reducido

Fuente: Propia

Se tiene una reducción en la diferencia de simetría en los muslos de un 10.58% a un 5.01%, en las piernas del 5.8% a un 5.71% y en los pies de 4.77% a 4.28%, lo que en conjunto representa una disminución significativa.

En el gráfico 14 se muestran las diferencias de simetría en los elementos que conforman los miembros superiores.





**Gráfico 14** Diferencias de porcentajes en los elementos de los miembros superiores del grupo reducido

Fuente: Propia

Los resultados muestran que la diferencia de simetría se mantiene para los brazos en 9.04% y para los antebrazos en 8.15%, mientras que para las manos se tiene un cambio de 4.76% a 2.84%. Lo anterior implica que no se tiene un cambio significativo para el grupo de estudio reducido.

Comparando los porcentajes de diferencia máximos obtenidos para considerar que los miembros y sus elementos son simétricos, en la tabla 7 se resumen, comparándolos con las masas medidas máximas para el grupo de estudio completo.

|                            | Masa máxima (Kg) | Porcentaje de diferencia mayor | Masa para simetría (gramos) |
|----------------------------|------------------|--------------------------------|-----------------------------|
| Miembro Inferior Derecho   |                  |                                |                             |
| Muslo                      | 3.6488           | 10.58                          | 385.9                       |
| Pierna                     | 4.2366           | 5.8                            | 245.7                       |
| Pie                        | 1.3147           | 4.77                           | 62.7                        |
| Miembro Inferior Izquierdo |                  |                                |                             |
| Muslo                      | 3.6266           | 10.58                          | 383.7                       |
| Pierna                     | 3.9302           | 5.8                            | 227.9                       |
| Pie                        | 1.6431           | 4.77                           | 78.4                        |
| Miembro Superior Derecho   |                  |                                |                             |
| Brazo                      | 1.9929           | 9.04                           | 180.2                       |
| Antebrazo                  | 1.7048           | 8.15                           | 138.9                       |
| Mano                       | 0.5027           | 4.76                           | 23.9                        |
| Miembro Superior Izquierdo |                  |                                |                             |
| Brazo                      | 1.9632           | 9.04                           | 177.5                       |
| Antebrazo                  | 1.7240           | 8.15                           | 140.5                       |
| Mano                       | 0.3128           | 4.76                           | 14.9                        |

**Gráfico 14** Diferencias de porcentajes en los elementos de los miembros superiores del grupo reducido

Fuente: Propia

Los resultados mostrados en la tabla 7, representan las variaciones que se tienen en la simetría, lo que visto desde la perspectiva de la masa del cuerpo humano, se ve disminuida a unos cuantos gramos.

## Conclusiones

Mediante los resultados obtenidos, se concluye que el cuerpo humano es simétrico bilateral en masa, con una diferencia mínima en cada una de sus extremidades y una diferencia un poco mayor si se analiza desde la perspectiva de división anatómica, que es lo usual al momento del diseño de prótesis.

Este tipo de estudios sirve como apoyo a los protesistas, para que tengan un marco de referencia cuando se diseñan y construyen las prótesis, ya que con esto estarían apoyando a una rehabilitación adecuada de cada paciente, incrementando el bajo porcentaje de las personas que aprenden a utilizarlas.

Aunque se presenta un caso de estudio, es necesario el incrementar el número de personas, con la finalidad de validar los resultados obtenidos, además de buscar otra forma de medir con mayor precisión las masas de las extremidades y sus elementos.

## Referencias

- Al-Gindan, Y. Y, Hankey, C, Govan, L, Gallagher, D, Heymsfield S. B. and Lean, M. EJ. (2014). Derivation and validation of simple equations to predict total muscle mass from simple anthropometric and demographic data. *The American Journal of Clinical Nutrition*, Vol. 100, Num. 4, 1041-1051.
- Blanco Dávila, F. (2005). Las proporciones divinas. *Cirugía Plástica*, Vol. 15, Num. 2, 118-124.
- Brabandere, S. (2017). Human Body Ratios. A project that measures up. Disponible en: <https://www.scientificamerican.com/article/human-body-ratios/>
- Carmenate Milián, L, Moncada Chévez, F. A. y Borjas Leiva, E. W. (2014). Manual de medidas antropométricas. Costa Rica: SALTRA / IRET-UNA.
- Fuster Ruiz, R. y Jordi Agudé, J. (2015). Nuevas aportaciones a los estudios geométricos del Hombre de Vitruvio de Leonardo da Vinci. Disponible en: <http://www.canonvitruviano.com/articulos/el-hombre-de-vitruvio>
- GSE (1993). Mediciones antropométricas. Estandarización de las técnicas de medición, actualizada según parámetros internacionales. *Revista de Actualización en Ciencias del Deporte*, Vol. 1, Num. 2.
- Kamadjeu, R. M, Edwards, R, Atanga, J. S, Kiawi, E. C, Unwin, N. and Mbanya J. C. (2006). Anthropometry measures and prevalence of obesity in the urban adult population of Cameroon: an update from the Cameroon Burden of Diabetes Baseline Survey. *BMC Public Health* 2006, Vol. 6, Num. 228, 1-8.
- Nariño Lescay, R, Alonso Becerra, A. y Hernández González A. (2016). Antropometría. Análisis comparativo de las tecnologías para la captación de las dimensiones antropométricas. *Revista EIA*, Vol. 13, Num. 26, 47-59.
- Ramakrishna, V, Kanade, T. y Sheikh, Y. (2013). Tracking Human Pose by Tracking Symmetric Parts. *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. 23-28 June 2013, Portland, OR, USA.
- Schilder, P. (2007). *The image and appearance of the human body*. Taylor and Francis Group.
- Watson, P. E, Watson, I. D. and Batt, R. D. (1980). Total body water volumes for adult males and females estimated from simple anthropometric measurements. *The American Journal of Clinical Nutrition*. Vol. 33, Num. 1, 27-39.
- Weyl, H. (2016). *Symmetry*. Princeton University Press, Princeton, New Jersey.
- Zöllner, F. (2014). Anthropomorphism: From Vitruvius to Neufert, from Human Measurement to the Module of Fascism. In Kirsten, Wagner and Jasper, Cepl (editors). *Images of the body in architecture: Anthropology and built space*. Tübingen, Berlin, 47-75

## Diseño de un intercambiador de calor tierra-aire en clima cálido-húmedo

DÍAZ-HERNÁNDEZ, Heidi Paola\*†, AGUILAR-CASTRO, Karla María, MACÍAS-MELO, Edgar Vicente y SERRANO-ARRELLANO

*Universidad Juárez Autónoma de Tabasco  
Instituto Tecnológico Superior de Huichapan*

Recibido Abril 27, 2017; Aceptado Junio 21, 2017

### Resumen

En este trabajo se analiza la factibilidad de la construcción de un prototipo de un Intercambiador de Calor Tierra-Aire (ICTA), como un sistema pasivo en la obtención del confort térmico. Para ello, se realizó un análisis y diseño de un ICTA en un clima cálido-húmedo. Este análisis, se realizó mediante Dinámica de Fluidos Computacional, se determinó la diferencia de temperatura entre la entrada y salida ( $\Delta T$ ), así como, el efecto de la velocidad de entrada en la obtención de la  $\Delta T$ . Para este caso, se modeló un ICTA de 6 m de largo, 2.5 m de profundidad y 0.1 m de diámetro. En el estudio se considera 27°C como la temperatura promedio del suelo a 2.5 m y 36°C como el promedio de la temperatura ambiente. Para la simulación se utilizó el procesador FLUENT y se analizó el ICTA para 3 velocidades de entrada del fluido: 1, 3, y 5 m/s. Como resultado, se obtuvo un efecto de enfriamiento de 5, 3 y 2°C, para 1, 3, y 5 m/s, respectivamente. Estos resultados indican que una velocidad de entrada baja mejora el desempeño del ICTA.

**Intercambiador de Calor Tierra-Aire, FLUENT, sistema pasivo, perfil de temperatura**

### Abstract

This work analyzes the feasibility of the construction of a prototype of an Earth-Air Heat Exchanger (EAHE), as a passive system for obtain thermal comfort. For this, an analysis and design of an EAHE was carried out in a warm-humid climate. Computational Fluid Dynamics was used to analyze the thermal performance of an EAHE with 6 m long, 2.5m depth and 0.1 m diameter. The temperature difference between the inlet and the outlet air ( $\Delta T$ ), and the effect of the air inlet velocity on  $\Delta T$  were determined in this analysis. The average soil temperature and the average ambient temperature were considered as 27°C and 36°C, respectively. For the simulations, the FLUENT software was used. Air inlet velocities of 1, 3, and 5 m/s provided a cooling effect of 5, 3, and 2°C, respectively. This result indicates that a low air inlet velocity improves the performance of the EAHE.

**Earth-to-Air Heat Exchanger, FLUENT, passive system, temperature profile**

**Citación:** DÍAZ-HERNÁNDEZ, Heidi Paola, AGUILAR-CASTRO, Karla María, MACÍAS-MELO, Edgar Vicente y SERRANO-ARRELLANO. Diseño de un intercambiador de calor tierra-aire en clima cálido-húmedo. Revista del Desarrollo Tecnológico 2017, 1-2: 34-51

\* Correspondencia al Autor (Correo Electrónico: veladavila@gmail.com)

† Investigador contribuyendo como primer autor.

## Introducción

En la actualidad, el incremento de tecnologías ha provocado un aumento exponencial del consumo energético. Uno de los objetivos principales de estas tecnologías es proveer condiciones de confort térmico deseados por sus usuarios. Sin embargo, paradójicamente esto ha causado graves problemas al medio ambiente, tales como el agotamiento de los recursos naturales, la degradación de los principales ecosistemas, la contaminación y el calentamiento global (Zheng-Xia, 2016).

Como evidencia del calentamiento global se observó que en febrero del 2016, se registró un aumento de 1.35°C de la temperatura mundial (Fresneda, 2016). Esto ha alarmado a muchas instituciones organizaciones y diferentes gobiernos. El cambio climático ha generado una tendencia a la concientización de la sociedad para el uso de energías sustentables y sistemas pasivos que minimicen el consumo eléctrico, y que permitan aprovechar energías y recursos renovables para minimizar el impacto ambiental.

México participa en acuerdos internacionales contra el cambio climático, ha ratificado el Protocolo de Kyoto y participa en actividades de la Agenda 21, ONU. También, ha decretado la Ley General de Cambio Climático (2012), en la cual, se crea el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático; así mismo, la Ley de Transición Energética (2015), la cual establece las bases para un cambio hacia las energías renovables. México se ha comprometido a reducir las emisiones de carbono negro en un 51% y reducir las emisiones de gases de efecto invernadero en un 22% al 2030; según lo acordado en la ONU, COP 21 y el Acuerdo de Paris. Sin embargo, esto aun no es suficiente ya que en comparación con otros países, México, tiene la necesidad de aperturar aun más políticas en cuestiones energéticas, con el fin de implementar el desarrollo sustentable en el país (Bautista Vargas *et al.*, 2016).

En nuestro país es necesaria la innovación tecnológica, ya que es un tema fundamental relacionado con el desarrollo del país y sociedad. Lo anterior, debido a que las necesidades actuales del mundo, son complejas, y debido a esto se necesitan sistemas eficaces que permitan enfrentarlos (Reyes *et al.*, 2017). Es por eso que en este estudio se propone a los Intercambiadores Tierra-Aire (ICTA) como una alternativa de un sistema pasivo de confort térmico. Estos consisten básicamente en un tubo enterrado a cierta profundidad de la tierra, por el cual circula aire. Este tubo conecta el interior de una edificación con el ambiente exterior y viceversa.

Los ICTA permiten el ahorro de energía mediante el calentamiento del aire debido a la temperatura del suelo para la calefacción y viceversa, el enfriamiento del aire para la refrigeración de edificios. Este fenómeno es posible debido a que la temperatura de la tierra permanece relativamente constante durante todo el año, debido a que las fluctuaciones de temperatura en la superficie de la tierra se ven disminuidas debido a la alta inercia térmica del suelo. Por lo tanto, a una profundidad suficiente, la temperatura del suelo es siempre mayor que la del aire exterior en invierno o lugares fríos y es menor en verano o lugares cálidos (Florides y Kalogirou, 2007). Los ICTA han demostrado tener un muy bajo consumo de energía (Jhala y Bansal, 2016) y debido a la inercia de la tierra es aplicable con enfriador y como calefacción de acuerdo a la temperatura, suelo y clima de la región.

En este estudio se realizó un análisis de un diseño de un ICTA mediante Dinámica de Fluidos Computacional con el fin de determinar el  $\Delta T$ , así como, determinar el efecto de la velocidad de entrada en la obtención de esta.

Este estudio permitirá establecer la viabilidad de la construcción de un prototipo experimental de un ICTA en regiones con características cálido-húmeda.

El estudio se realizó en la ciudad de Cunduacán, Tabasco. Una región con clima cálido-húmedo, donde el promedio de máxima temperatura es de 36°C (INEGI, 2016) y el uso de sistemas de aire acondicionado se ha vuelto un servicio básico en la zona, por lo que, un ICTA podría ser una alternativa para ahorro en el consumo de energía eléctrica.

### Modelo del ICTA

El diseño del intercambiador se muestra en la figura 1. El cual consiste en un ICTA horizontal de 6 m de largo, enterrado a 2.5 m de profundidad. El material que se usó para el tubo fue PVC (policloruro de vinilo) de 4" (10.2 cm), el cual tiene: una densidad de 370 kg/m<sup>3</sup>, calor específico de 80 J/ kg-K y conductividad térmica de 0.25 W/m-K. El modelo horizontal y el tipo de material se seleccionó tomando en cuenta los trabajos reportados en la literatura, donde Rakesh *et al.*, (2016) indican que se ha obtenido una mayor eficiencia con el modelo horizontal en comparación con el vertical, así como, también concluyen que el material del tubo ha tenido una diferencia poco significativa en la eficiencia del ICTA, por lo cual, se obtuvo por un material comercial y de bajo costo.

Para las definir las dimensiones del ICTA se tomó en cuenta recomendaciones de un estudio experimental previo realizado en Bangladesh, con condiciones climáticas similares a la de nuestra región de estudio (Mohammad Jia *et al.*, 2015).

En la figura 1 se observa el modelo físico de nuestro ICTA, en donde la sección gris oscuro representa una sección aislada del tubo en la sección de salida. La velocidad de entrada se varió en 1, 3 y 5 m/s que corresponden a los Caso I, Caso II y Caso III, respectivamente.

Esto con el fin de observar que tan significativa es esta variación en la eficiencia del ICTA.

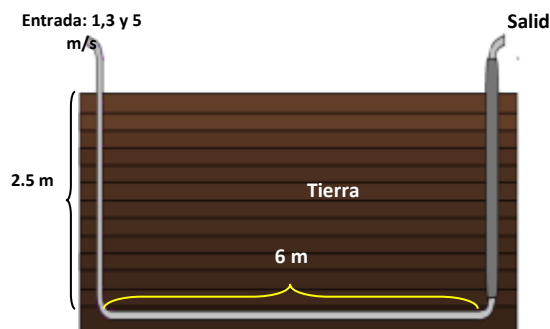


Figura 1 Diseño del ICTA

El Estado de Tabasco tiene suelo muy húmedo y de diferentes composiciones según la región en a que se encuentre (INAFED, 2016), es por eso que para obtener la temperatura de la tierra se realizaron mediciones previas en el área de Cunduacán, en el intervalo de tiempo de las 10:30 a las 17:30 h. Durante estas 7 horas, se realizaron mediciones de temperatura a diferentes profundidades como se muestra en la figura 2. Con estos resultados, se obtuvo que la temperatura del suelo fue en promedio de 27°C a una profundidad de 2.5 m. También se observó que a partir de los 0.5 m de profundidad la temperatura de la tierra permanece con variaciones poco significativas.

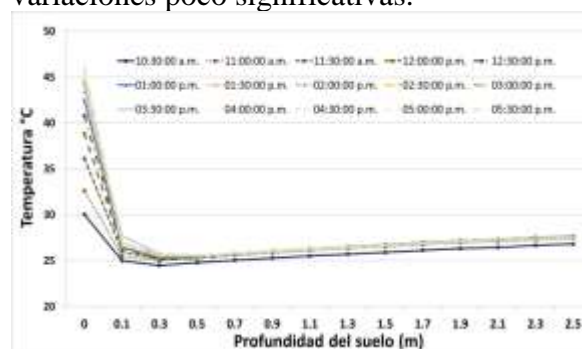


Gráfico 2 Comportamiento de la temperatura del suelo de estudio

Para realizar el análisis computacional del ICTA se utilizaron las herramientas computacionales GAMBIT y FLUENT, con este último, se obtuvo el comportamiento de los perfiles de velocidad y temperatura.

En FLUENT se resuelven las siguientes ecuaciones (NASA, 2016):

*Ecuación de continuidad:*

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

Donde:  $\rho$  es la densidad ( $\text{kg/m}^3$ );  $u, v, w$  son las componentes de la velocidad (m/s);  $t$  es el tiempo (s);  $x, y, z$  son las componentes de la posición (m).

*X-Momentum:*

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u^2)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho uv)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho uw)}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{1}{Re_r} \left[ \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} \right] \quad (2)$$

Donde:  $\tau$  son componentes del tensor de tensiones ( $\text{N/m}^2$ );  $Re_r$  es el número de Reynolds que es la relación entre el escalamiento de la inercia del flujo y las fuerzas viscosas en el flujo (adimensional).

*Y-Momentum:*

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho uv)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v^2)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho vw)}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{1}{Re_r} \left[ \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} \right] \quad (3)$$

*Z-Momentum:*

$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho uw)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho vw)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w^2)}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{1}{Re_r} \left[ \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} \right] \quad (4)$$

*Energía:*

$$\frac{\partial(E_T)}{\partial t} + \frac{\partial(uE_T)}{\partial x} + \frac{\partial(vE_T)}{\partial y} + \frac{\partial(wE_T)}{\partial z} = -\frac{\partial(u\rho)}{\partial x} - \frac{\partial(v\rho)}{\partial y} - \frac{\partial(w\rho)}{\partial z} - \frac{1}{Re_r Pr_r} \left[ \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} \right] + \frac{1}{Re_r} \left[ \frac{\partial}{\partial x} (u\tau_{xx} + v\tau_{xy} + w\tau_{xz}) + \frac{\partial}{\partial y} (u\tau_{xy} + v\tau_{yy} + w\tau_{yz}) + \frac{\partial}{\partial z} (u\tau_{xz} + v\tau_{yz} + w\tau_{zz}) \right] \quad (5)$$

Donde:  $E_T$  es la energía total (J);  $q$  es el flux de calor ( $\text{W/m}^2$ );  $Pr_r$  es el número de Prandtl que es la relación entre las tensiones viscosas y las tensiones térmicas (adimensional).

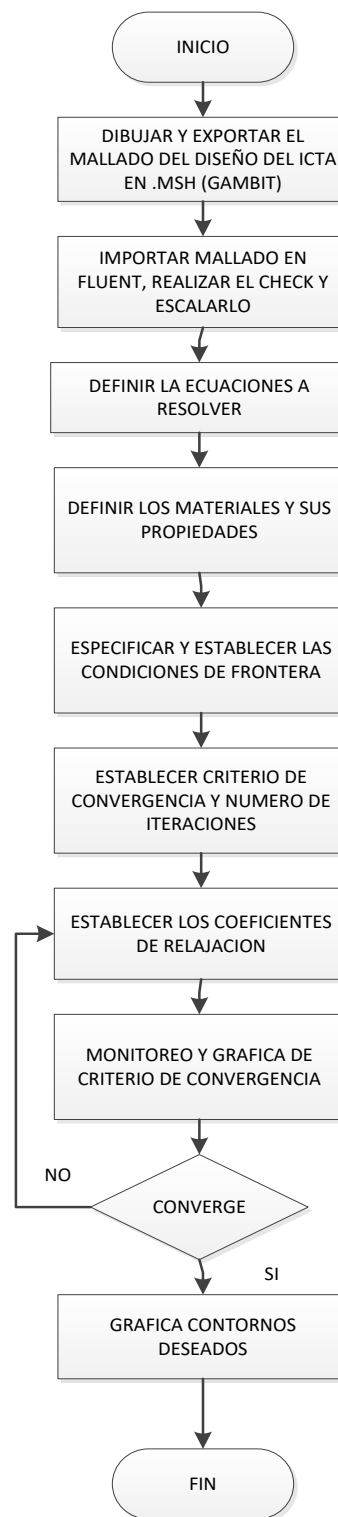


Figura 2 Metodología de simulación

## Metodología

Para la modelación, se propuso un diseño de un ICTA y se analizó mediante Dinámica de Fluidos Computacional. Para el estudio, se usó GAMBIT (pre-procesador) para el dibujo y mallado, y FLUENT (procesador) para la simulación. En la figura 2 se muestra un diagrama de flujo del procedimiento que se llevó a cabo para realizar la simulación.

En la parte del dibujado se consideró el modelo del ICTA de la figura 1. Para la discretización del modelo se utilizó un mallado con elementos “hex” del tipo “map” con una razón de aspecto entre 0 y 1. Durante el mallado se obtuvo un total de nodos de 104,643 nodos.

En la figura 3 se muestra el dibujo mallado, donde se establecieron las condiciones de frontera para cada cara. Cada cara fue considerada como una pared, con propiedades específicas, ver Tabla 1.



Figura 3 Dibujo y mallado en GAMBIT

El archivo del mallado, \*.msh, fue importado a FLUENT y se escaló en cm. Se definieron las ecuaciones a resolver, así como, los materiales y propiedades del fluido.

Como fluido se consideró aire y como material sólido de las paredes se seleccionó PVC. Se definieron las características y establecieron condiciones de frontera para cada cara, en la entrada vertical se definieron temperaturas por cada sección de las señaladas en la Figura 2.

El tubo vertical de salida se estableció como aislado. Las propiedades de los materiales considerados se muestran en la Tabla 1.

Para realizar las simulaciones se establecieron velocidades de entrada 1, 3, 5 m/s y se consideró el modelo de la figura 3 y los datos de la Tabla 1. El criterio de convergencia de las ecuaciones gobernantes del sistema se estableció en  $1 \times 10^{-8}$  como residual para todos los casos.

| Propiedades                         | Fluido (Aire) | Pared del ducto (PVC) | Aislante                                     |
|-------------------------------------|---------------|-----------------------|--|
| Conductividad térmica (W/m K)       | 0.0242        | 0.25                  | Se específico ó como pared aislada ( $q=0$ ) |
| $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )         | 1.225         | 370                   |  |
| Calor específico (J/ kg K)          | 1006.43       | 80                    |  |
| Temperatura promedio ambiente(°C)   | 36            |                       |  |
| Temperatura promedio del suelo (°C) | 27            |                       |  |

Tabla 1 Características y propiedades del fluido y paredes

## Resultados

Para el Caso I, con velocidad 1 m/s, la solución del modelo convergió aproximadamente a las 600 iteraciones como se muestra en la figura 5.

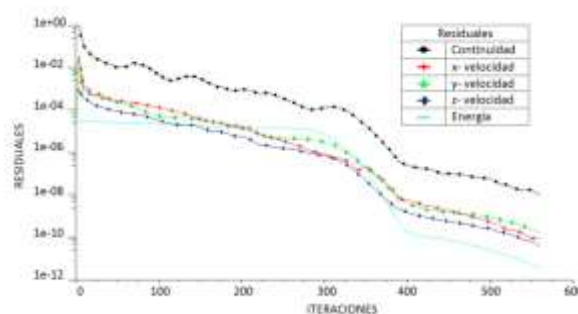


Figura 4 Residuales Caso I

En la figura 4 se presenta el comportamiento del contorno de temperatura obtenido para el Caso I, en el cual se observa que es posible alcanzar una temperatura máxima de salida de 31°C (304 K).



Figura 5 Contorno de temperatura Caso I

Para el Caso II, con velocidad 3 m/s, la solución se obtuvo antes de las 450 iteraciones como se muestra en la figura 7.

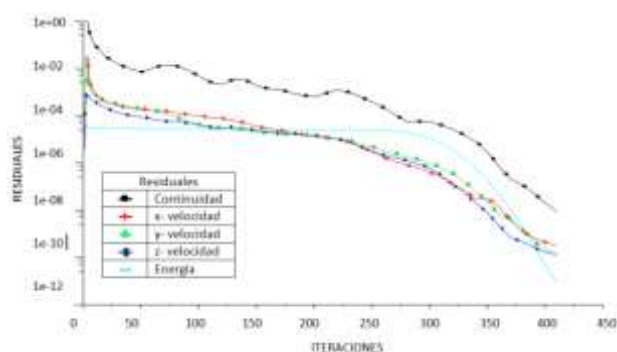


Figura 6 Residuales Caso II

El contorno de temperatura del Caso II, se muestra en la figura 7, se puede observar que para esta velocidad de 3 m/s fue posible alcanzar una temperatura de salida de aproximadamente 33 °C (306 K).

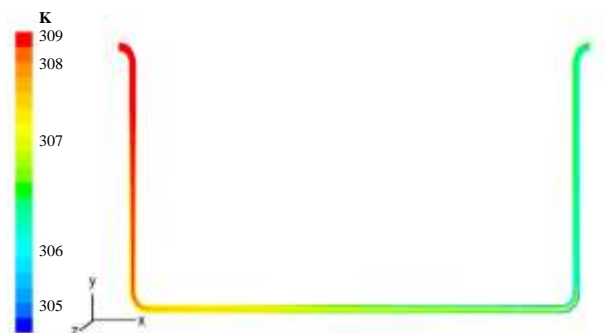


Figura 7 Contorno de temperatura Caso II

Finalmente, el Caso III, con velocidad de 5 m/s, convergió cerca de las 400 iteraciones y los resultados del residual se pueden ver en la figura 9.

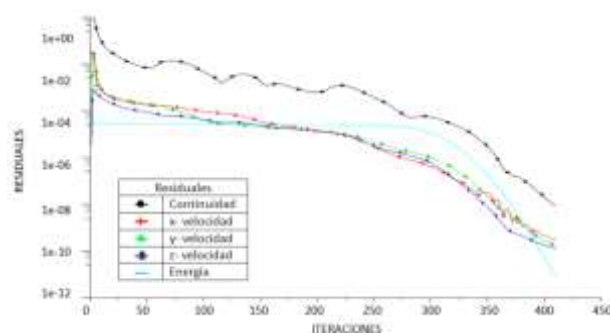


Figura 8 Residuales Caso III

El contorno de temperatura del Caso III se puede ver en la figura 10, en el cual se observa que fue posible alcanzar una temperatura de salida de aproximadamente 34 °C (307 K).

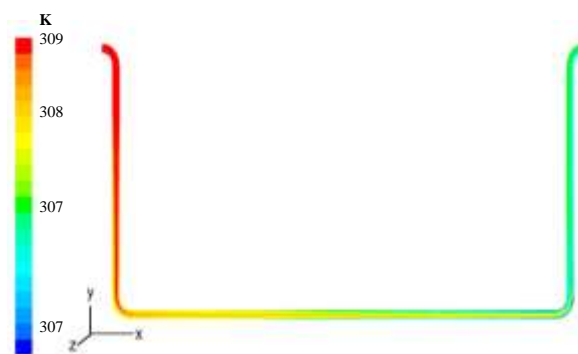


Figura 9 Contorno de temperatura Caso III

En la Tabla 2 se presenta un concentrado de los resultados obtenidos para los tres casos de estudio.

| Casos | V (m/s) | Temperatura de entrada (°C) | Temperatura de salida (°C) | ΔT (°C) |
|-------|---------|-----------------------------|----------------------------|---------|
| I     | 1       | 36                          | 31                         | 5       |
| II    | 3       | 36                          | 33                         | 3       |
| III   | 5       | 36                          | 34                         | 2       |

Tabla 2 Resumen de los resultados obtenidos

Como se observa en los resultados obtenidos, la diferencia entre la temperatura de salida del Caso II y III fue de tan solo 1.0°C. Mientras que, el Caso I obtuvo la máxima diferencia, 5°C. Puede observarse que a medida que se incrementa la velocidad la ΔT disminuye.



## Agradecimientos

Se agradece al Programa para el Desarrollo Profesional Docente (PRODEP) por el apoyo financiero para el desarrollo del proyecto PRODEP UJAT-PTC-246, del cual se deriva este trabajo.

## Conclusiones

Los resultados obtenidos sugieren que para incrementar la  $\Delta T$ , la velocidad del fluido más adecuada de acuerdo a este estudio es de 1 m/s (Caso I), es decir, cuando la velocidad de entrada es más baja. Esto es, debido a que el tiempo de residencia del fluido en el ducto es mayor que para el Caso II y III. Estos resultados indican que a medida que se incrementa la velocidad, la  $\Delta T$  disminuye.

Es importante señalar que si se considera el estándar de confort térmico entre 20 y 25°C, se puede concluir que este modelo del ICTA no logrará proporcionar el confort térmico deseado. Lo anterior, es evidente debido a que la temperatura del suelo es de 27°C.

Con estos resultados obtenidos, se puede analizar que para mejorar el diseño sería necesario:

1) incrementar la profundidad para el ICTA en esta región;

2) implementar técnicas que ayuden a alcanzar temperaturas en el suelo por debajo de 27°C, tales como un sistema de riego o bien vegetación, ya que se ha demostrado que la vegetación puede mejorar la calidad del aire, así como también reducir los niveles de CO<sub>2</sub>. Lo anterior, debido a que estos sistemas funcionan como reguladores de temperatura natural, lo cual ocasiona que las estructuras o capas que se encuentran debajo del suelo alcancen temperaturas frescas en verano y cálidas en invierno (Mata González y Galicia Serrano, 2016); y

3) proponer otras configuraciones para el ICTA donde se incremente el tiempo de residencia del fluido en el ducto.

## Referencias

Bautista Vargas, M., Barron Torres, J., García Martínez A., Hernández Flores, J. (2016). Desarrollo sustentable y los diferentes métodos de transporte de energía eléctrica. *Revista de tecnología e innovación*, 3(7), 60-72.

Florides, G., Kalogirou, S. (2007). Ground heat exchangers - A review of systems, models and applications. *Renewable energy*, 32 (15), 2461-2478.

Fresneda, C. (2016). Febrero fulmina el récord de aumento de la temperatura global con 1,35 grados. *El mundo*. Recuperado de: <http://www.elmundo.es/ciencia/2016/03/14/56e694f9ca47411a128b4631.html>

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), (2016). Recuperado de:

<http://www.cuentame.inegi.org.mx/monografias/informacion/tab/territorio/clima.aspx?tema=me&e=27>

Instituto Nacional para el Federalismo y el Desarrollo Municipal (INAFED). (2016). Enciclopedia de los municipios y delegaciones de México: Tabasco.

Jhala R. S., Bansal, V. (2016). A comprehensive review on EATHE. VII International Conference on Recent Innovations in Science, Engineering and Management, RISEM-16, 530-543.

Mata González M., Galicia Serrano, C. (2016). Ahorro energético indirecto mediante techos verdes. *Revista de Investigación y Desarrollo*, 2(5), 77-81.

Mohammad Jia Uddin Chowdhury, Bodius Salam, Md. Akefur Rahman. (2015). An experimental analysis of a horizontal earth to air heat Exchanger (ETAHE) system for hot climatic condition of Bangladesh. *International Conference on Mechanical Engineering and Renewable Energy (ICMERE2015)*.

National Aeronautics and Space Administration (NASA). (2015). Navier-Stokes Equations.

ONU, Organización de las Naciones Unidas, Agenda 21, Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente.

ONU, Organización de las Naciones Unidas, Acuerdo de Paris COP21 de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático.

Rakesh D. Patel, Ramana, P.V. (2016). Experimental Analysis of Horizontal and Vertical Buried Tube Heat Exchanger Air Conditioning System. *Indian Journal of Science and Technology*, 9(35), 1-8.

Reyes R., Soto, L. E., Elizarrarás, R. (2017). La innovación tecnológica a través de proyectos de ingeniería con enfoque sistémico. *Revista de Aplicación Científica y Técnica*, 3(7), 41-50.

Zheng-Xia, H., Shi-Chun X., Wen-Xing S., Ry-Yin L., Hong C. (2016). Factors that influence corporate environmental behavior: empirical analysis based on panel data in China. *Journal of Cleaner Production*, 133,531-543.

## Optimización de la iluminación de la planta alta de un edificio académico para eficiencia energética

RODRÍGUEZ-URIBE, Juan Carlos†, SERRANO-ARELLANO, Juan\*, MACÍAS-MELO, Edgar Vicente', SANTOS-LAZARO Elías David'

*División de Arquitectura, Instituto Tecnológico Superior de Huichapan-ITESHU-TecNM. Dom. Conocido S/N, El Saucillo, Huichapan, Hgo, México. C.P. 42411*

*'División de Ingeniería y Arquitectura, Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, Av. Universidad s/n, Zona de la Cultura, Col. Magisterial, Vhsa, Centro, Tabasco, C.P. 86040, México*

Recibido Abril 4, 2017; Aceptado Junio 7, 2017

### Resumen

Se realizó un estudio de la iluminación del tercer nivel (planta alta) de un edificio académico de una institución de educación superior. El edificio de estudio fue construido de forma tradicional satisfaciendo la necesidad inicial de establecer un internado sin embargo con el tiempo se adaptó el edificio convirtiéndolo en un edificio académico, la modificación de las funciones del edificio se llevaron a cabo sin realizar un estudio detallado de iluminación de las intensidades o de la correcta ubicación de las mismas, por lo que se realizó un levantamiento arquitectónico del mismo para poder analizarlo a través de una simulación. Las intensidades de iluminación se encontraron en todas las áreas que integran el tercer nivel del edificio académico a través del programa de simulación de luminarias. En los resultados se encontró que se podía reducir el consumo de energía en un 15%. Esto representó una gran reducción en el consumo de energía eléctrica. Posteriormente, se realizaron mediciones en las zonas de uso para comprobar los resultados de las intensidades encontradas y se verificaron los resultados con las simulaciones. Se mostró que estas herramientas de análisis benefician enormemente el uso eficiente de la energía y ayudan a la sustentabilidad energética.

### Iluminación, luminarias y sustentabilidad

**Citación:** RODRÍGUEZ-URIBE, Juan Carlos, SERRANO-ARELLANO, Juan, MACÍAS-MELO, Edgar Vicente, SANTOS-LAZARO Elías David. Optimización de la iluminación de la planta alta de un edificio académico para eficiencia energética. *Revista del Desarrollo Tecnológico* 2017, 1-2: 52-59

### Abstract

A study of lighting of the third level (upper floor) of an academic building of an institution of conducted. The study building was built in a traditional way satisfying the initial need to establish an internship however over time the building was adapted to be converted into an academic building, modification of the functions of the building were making without a detailed study of lighting Of the intensities or of the correct location of the same, reason why an architectural survey of the same one was made to be able to analyze it through a simulation. Lighting intensities were found in all areas through the luminaire simulation program. The results showed that energy consumption could be reduced by 15%. This represented a great reduction in the consumption of electrical energy. Subsequently, measurements were made in the zones of use to check the results of the intensities found and the results were verified with the simulations. These analytical tools were shown to greatly benefit from the efficient use of energy and help with energy sustainability.

### Lighting, luminaire, sustainability

\* Correspondencia al Autor (Correo Electrónico: lmhernan@uacam.mx)

† Investigador contribuyendo como primer autor.

## Introducción

Actualmente cerca del 80% de los puestos laborales de una empresa son realizados dentro de oficinas por ello es importante contar con espacios que brinden comodidad y confort, para lograr este cometido uno de los factores más importantes se encuentra dentro de la etapa de iluminación [1]. Las luminarias son un recurso del cual se puede tener fácil disponibilidad y control, pero necesitan inversiones significativas en equipo y mantenimiento [2]. En la actualidad el consumo de energía eléctrica en las edificaciones mediante luminarias se encuentra entre el 18% y 20% del consumo total, es por eso que la importancia de una correcta ubicación y selección de luminarias impactará de forma directa en el consumo de energía en la vivienda o edificio. Por eso es importante tener un control sobre la cantidad de luminarias que necesitamos para alumbrar correctamente el entorno de trabajo, la falta de luminarias reduciría la visibilidad afectando así el desempeño del trabajador, mientras que un exceso de éstas incrementa el costo y tiempo en mantenimiento, de la misma forma puede provocar destellos molestos.

En busca de tener una mejor eficiencia y un ahorro en el consumo energético que se emplea en cuanto a luminarias en las instalaciones del Instituto Tecnológico Superior de Huichapan (ITESHU) se propone analizar el tercer nivel del edificio académico “tres niveles”, esta planta cuenta con los siguientes espacios arquitectónicos: seis cubículos para docentes, pasillo y un aula de dibujo. El área de dibujo es la que debe contar con mayor número de luxes que al de las demás áreas de la planta ya que así lo establece la norma oficial mexicana para las condiciones de iluminación en los centros de trabajo [3].

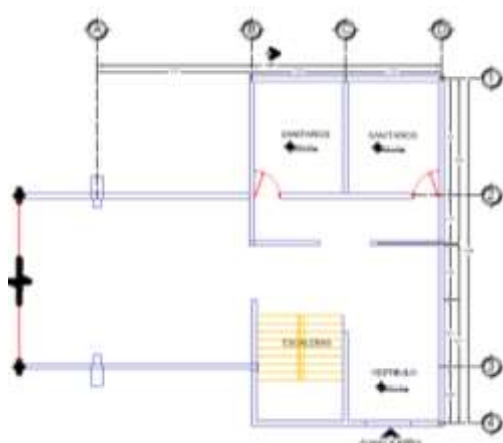
Se usará el programa DiaLux para hacer el análisis de las luminarias que se encuentran instaladas y verificar si cumplen con los requerimientos mínimos de la norma oficial mexicana para las condiciones de iluminación en los centros de trabajo [3] y si la planta arquitectónica en general cumple con la norma en densidad de potencia eléctrica para sistemas de alumbrado en edificaciones no residenciales [4]. En caso de no contar con los requerimientos se debe hacer un rediseño de iluminación, buscando: exista una buena proporción de visibilidad para poder tener un grado solicitado en cuanto a precisión y velocidad en el desarrollo de las tareas, niveles de iluminación que reduzcan los esfuerzos al trabajar, por último, condiciones lumínicas que proporcionen seguridad con el mobiliario y un deslumbramiento e incapacidad visual mínimas [5]. En este artículo se abarcará el levantamiento arquitectónico del tercer nivel del edificio académico “tres niveles”, y su exportación al programa de simulación de luminarias con el objetivo de realizar la simulación energética del espacio arquitectónico.

## Metodología

### Levantamiento arquitectónico de la edificación

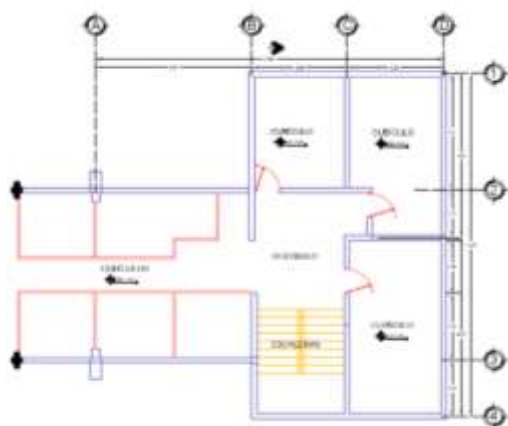
La edificación se encuentra en el estado de Hidalgo en el municipio de Huichapan, el área de estudio es un edificio de tres niveles y para su análisis se realizó un levantamiento arquitectónico de la construcción. Para la exportación del levantamiento al software fue necesario dibujarlo en un software de tipo CAD, en el cual, se dibujaron los planos de las tres plantas arquitectónicas por separado. Con las medidas obtenidas en el levantamiento se realizaron los planos eléctricos de dichas plantas, así como, un plano con la distribución de los objetos que se encuentran en cada planta.

En las Figuras 1, 2 y 3 se muestran los planos arquitectónicos de las tres plantas arquitectónicas correspondientes al edificio académico “tres niveles” que será objeto de análisis de iluminación.



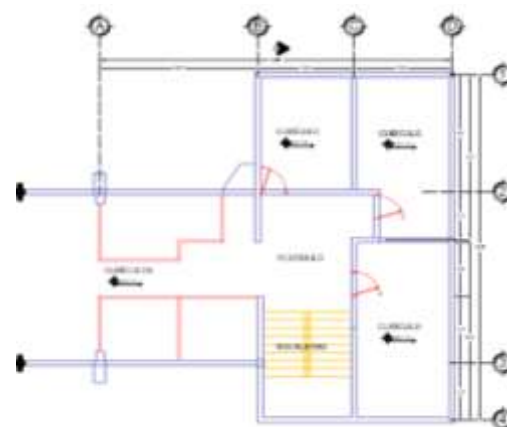
**Figura 1** Plano de la planta arquitectónica correspondiente al primer nivel del edificio académico de “tres niveles”

*Fuente (Elaboración: propia)*



**Figura 2** Plano de la planta arquitectónica correspondiente al segundo nivel del edificio académico de “tres niveles”

*Fuente (Elaboración: propia)*



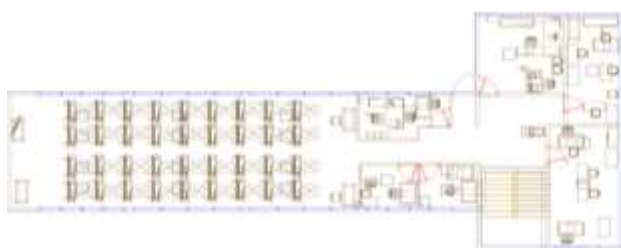
**Figura 3** Plano de la planta arquitectónica correspondiente al tercer nivel del edificio académico de “tres niveles”

*Fuente (Elaboración: propia)*

Solamente realizaremos el análisis de la simulación energética al espacio correspondiente al tercer nivel (planta alta) del edificio académico “tres niveles”.

### Envío de datos (plantas arquitectónicas) a programa de simulación DiaLux

El plano de la planta arquitectónicas correspondiente al tercer nivel (planta alta) del edificio académico “tres niveles” fue exportada al programa de simulación (DiaLux) donde se trabajó para su renderización en 3D, una vez finalizado esto se colocaron los muebles correspondientes a cada espacio arquitectónico de acuerdo a las actividades que se realizan en él, así como también se ubicaron los distintos vanos (puertas y ventanas) correspondientes a cada espacio respetando sus dimensiones. Con el objetivo de que los resultados sean los más parecidos a los reales. En la Figura 4 observamos una representación gráfica de la tercera planta arquitectónica del edificio en estudio, en la representación identificamos el distinto mobiliario correspondiente a cada espacio arquitectónico.



**Figura 4** Plano de la planta arquitectónica del tercer nivel del edificio académico de “tres niveles” con su correspondiente mobiliario

Fuente (Elaboración: propia)



**Figura 5** Vista en isométrico 3D de la planta arquitectónica del tercer nivel del edificio académico de “tres niveles” con sus correspondientes mobiliarios y vanos arquitectónicos (puertas y ventanas)

Fuente (Elaboración: propia)

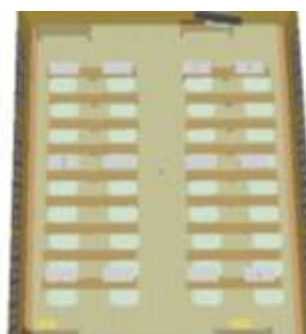
Es necesario tener en cuenta que las luminarias en los cubículos normalmente son instaladas en el techo, con un modelo regular en líneas rectas, la distribución de las luminarias debe coincidir con el módulo de las ventanas, con la finalidad de proporcionar un nivel de luminosidad conveniente para las salas de mayores dimensiones. Debe tenerse cuidado en que las luminarias cumplan los requisitos de nivel de iluminación, uniformidad, deslumbramiento y los de uso racional de energía [6].

### Áreas de análisis

En el análisis de la planta arquitectónica del tercer nivel del edificio académico identificamos las áreas principales de actividades éstas son: el salón de dibujo (donde se imparte clases a los alumnos de la carrera de arquitectura) y los cubículos para docentes.

En la Figura 6 observamos una representación en planta del salón de dibujo, aquí observamos las condiciones de frontera en cuanto a la delimitación del espacio físico así como el mobiliario presente en este espacio arquitectónico.

El espacio cuenta con 36 restiradores de dibujo con sus respectivos bancos, así como 4 mesas de trabajo y 1 televisión; el espacio está delimitado físicamente por 3 secciones de ventanas y un muro de concreto.



**Figura 6** Vista en planta del salón de dibujo. (con su mobiliario y envolvente física)

Fuente (Elaboración: propia)

En la Figura 7 identificamos algunos de los cubículos presentes en la planta arquitectónica del tercer nivel del edificio de “tres niveles” los cuales en su mayoría cuentan con el siguiente mobiliario: por lo menos dos mesas en cada cubículo y una silla. En total en esta planta hay 6 cubículos, la mitad cuenta con sus paredes de concreto, mientras que los otros son de aluminio con grandes ventanas que permiten tener mayor iluminación.



**Figura 7** Vista en planta de los cubículos (con su mobiliario y envoltente física)

Fuente (Elaboración: *propia*)

### Colocación de luminarias

Antes de comenzar con la colocación de las luminarias debemos tener en cuenta cual será nuestro plano útil, que en este caso como las actividades son limitadas a la lectura, escritura, dibujo en computadoras, etc., el plano horizontal de trabajo (plano útil) tendrá una altura que puede oscilar de 0.75 a 0.85 por encima del piso, y la altura en techos puede llegar hasta los 3 metros. Por último, hay que tomar en cuenta a la uniformidad ( $E_{\min}/E_{\text{prom}}$ ), esto con la finalidad de impedir las molestias causadas por los cambios abruptos de luminancia. El cociente del valor del nivel de iluminación existente en la zona donde se realiza tareas y el alumbrado del plano útil no debe ser inferior a los establecidos en la Tabla 1 [6].

| Iluminación de tarea (lx)                  | Iluminación de áreas circundantes inmediatas (lx) |
|--|---|
| Mayor o menor a 750                        | 500   |
| 500  | 300   |
| 300  | 200   |
| Menor o igual a 200                        | $E_{\text{tarea}}$                                |
| Uniformidad ( $E_{\min}/E_{\text{prom}}$ ) |   |
| Mayor o igual a 0.5                        | Mayor o igual a 0.4                               |

**Tabla 1** Relación del coeficiente de uniformidad de iluminación

Fuente (Anexo General del Reglamento Técnico de Iluminación y Alumbrado Público. (2010). Capítulo 4. Diseños y cálculos de iluminación interior. 77-115)

Tomado en cuenta lo anterior se puede proceder a la colocación de luminarias en la edificación, manteniendo los niveles mínimos de iluminación establecidos en la norma oficial mexicana NOM-025-STPS-2008 Tabla 2 [3].

| Área de trabajo                 | Tarea a realizar                                  | Niveles mínimos de iluminación |
|---------------------------------|---|--------------------------------|
| Requerimiento visual simple     | Almacenaje rudo, recepción y despacho             | 200                            |
| Distinción moderada de detalles | Aulas y oficinas.                                 | 300                            |
| Distribución clara de detalles  | Salas de cómputo, áreas de dibujo y laboratorios. | 500                            |
| Distinción final e detalles     | Talleres de alta precisión.                       | 750                            |

**Tabla 2** Requerimientos mínimos de iluminación por área de trabajo

Fuente (Basada en norma oficial mexicana NOM-025-STPS-2008)

Como se muestra en la tabla anterior, se debe contar con entre 300 y 500 luxes para áreas dedicadas a estudios, así como, centros de cómputo

Para determinar la densidad de potencia eléctrica para sistemas de alumbrado en edificaciones no residenciales que no debemos rebasar usaremos la norma oficial mexicana NOM-007-ENER-2014 Tabla 3 [4].

| Tipo de edificio                    | DPEA(W/m <sup>2</sup> ) |
|-------------------------------------|-------------------------|
| Oficinas                            | 12                      |
| Escuelas o instituciones educativas | 14                      |
| Bibliotecas                         | 15                      |

**Tabla 3** Densidad de potencia eléctrica para sistemas de alumbrado en edificaciones no residenciales

Fuente (norma oficial mexicana NOM-007-ENER-2014)

**Resultados**

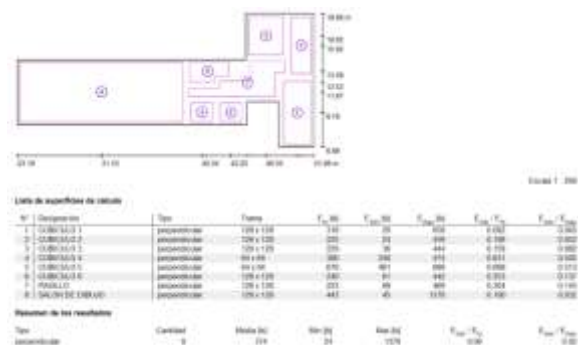
La planta arquitectónica del tercer nivel del edificio de "tres niveles" cuenta con la cantidad de 42 luminarias de tipo incandescente las cuales presentan un total de 106,470 (lm), una potencia total de 1,344 (W) y una densidad de potencia eléctrica para alumbrado de 6.94 W/m<sup>2</sup>. En la Figura 8 observamos los resultados obtenidos en el plano útil del proyecto.



**Figura 8** Resumen de resultados en el plano útil del proyecto

Fuente (Elaboración: propia)

Las superficies de cálculo nos muestran que ninguno de los cubículos cumple con la iluminancia mínima, y solo dos de cumplen con la uniformidad (cubículo 4 y 5), mientras el salón de dibujo y el cubículo 5 logran sobrepasar la iluminancia máxima, por último, el pasillo logra cumplir con la iluminancia mínima, aunque su uniformidad es de 0.3 cuando debería alcanzar los 0.4. Lo anterior lo podemos distinguir en la Figura 9.



**Figura 9** Resultados de las superficies cálculo

Fuente (Elaboración: propia)

La Figura 10 muestra una Vista Ray-Trace de la tercera planta arquitectonica del edificio academico "tres niveles" con las luminarias encendidas.



**Figura 10** Vista Ray-Trace de la planta arquitectonica del tercer nivel del edificio academico "tres niveles" con las luminarias encendidas

Fuente (Elaboración: propia)

La selección de las luminarias se realizó mediante una investigación donde se determinó que las lámparas led son óptimas por su bajo consumo de potencia eléctrica. Debido a lo anterior, se procedió a colocar las lámparas en la edificación para una mejor distribución de la intensidad lumínica por área considerando las normas oficiales mexicanas NOM-025-STPS- 2008 y NOM-007-ENER-2014. El uso de lamparas de tipo LED se propuso debido a que solo el cubiculo 5 cumplía con los requisitos de las normas, con base a lo anterior, se realizó un rediseño de luminarias, aumentando el número de luminarias pero seleccionando una que produjera una luminicencia similar usando menor potencia, después de hacer el diseño y realizar el analisis luminotécnico se optuvieron los siguientes resultados: 4 lamparas RS060B y 62 lamparas SM530C marca PHILIPS lo anterior se muestra en la Figura 11.



**Figura 11** Lamparas a utilizar en la nueva configuración de luminarias (optimización)

Fuente (Elaboración: propia)



La potencia total que utilizan las luminarias es de 1140 [W], y su densidad de potencia eléctrica para alumbrado es de 5.38 W/m<sup>2</sup>, es decir que la potencia en luminarias se redujo en un 15%, de la misma manera la densidad de potencia eléctrica para alumbrado fue 15% menos a la que se tiene actualmente, ver Figura 12.

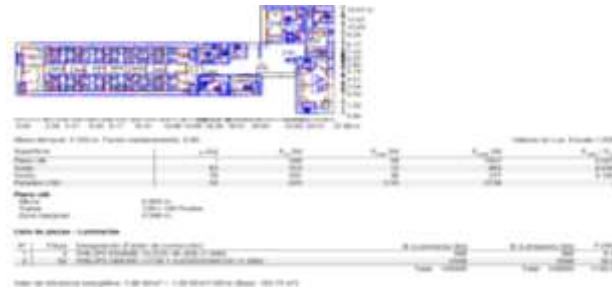


Figura 12 Resumen del plano útil del rediseño de iluminación

Fuente (Elaboración: propia)

Con el rediseño se logro que todas las áreas a excepción del cubiculo 6 cumplieran con los requisitos establecidos por las normas oficiales mexicanas, el cubiculo 6 es el único que no cuenta con una geometría regular, además sus paredes estan compuestas por ventanas, esto provoca que entre luz impactando así la iluminación dentro del cubiculo, para alumbrar el pasillo se aprovecho este mismo efecto, dejando que la luz de los cubiculos brinde iluminación al pasillo, ver Figura 13.

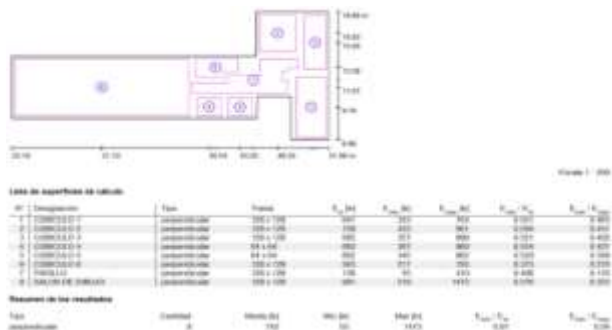


Figura 13 Resultados de las superficies de cálculo con el rediseño de iluminación

Fuente (Elaboración: propia)

En las Figuras 14 y 15 observamos las vistas 3D y Ray-Trace del rediseño de iluminación.



Figura 14 Vista 3D con luminarias encendidas del rediseño de iluminación

Fuente (Elaboración: propia)



Figura 15 Vista Ray-Trace de la planta arquitectónica del tercer nivel con las luminarias encendidas del rediseño de iluminación

Fuente (Elaboración: propia)

|           | Piezas | lm     | W    | DPEA <12 W/m <sup>2</sup> |
|-----------|--------|--------|------|---------------------------|
| Actual    | 42     | 106470 | 1344 | 6.94                      |
| Propuesta | 66     | 156720 | 1140 | 5.38                      |

Tabla 4 Comparación de las luminarias actualmente instaladas contra la propuesta

En la tabla 4 podemos observar que la propuesta necesita de 24 lámparas más, produce 50250lm más y gasta 204W menos. Su densidad de potencia eléctrica para alumbrado se reduce 1.56W/m<sup>2</sup>, sigue estando por debajo del límite que es 12 W/m<sup>2</sup>. Por último la eficiencia energética [lm/W] de cada instalación de luminarias podemos obtenerla al dividir la cantidad de lúmenes entre los Watts que consumen, en la instalación actual tenemos que  $eficiencia\ energética = \frac{106470lm}{1344W} = 79.21 \frac{lm}{W}$

Por otro lado con la propuesta obtenemos que  $eficiencia\ energética = \frac{156720lm}{1140W} = 137.47 \frac{lm}{W}$  con esto podemos observar que las luminarias escogidas para cumplir con las normativas y otorgar una iluminación óptima resulta más eficientes que las instaladas actualmente.

### Conclusiones

Actualmente el diseño de iluminación de interiores se ha modernizado, pero muchas de las edificaciones que se construyen no toman en cuenta este concepto al momento de colocar luminarias, si se realiza un buen análisis de éstas se puede reducir la potencia usada en luminarias y la densidad de potencia eléctrica. Una buena elección de luminarias puede reducir el consumo eléctrico o la reducción en el mantenimiento de lámparas.

Se debe tener claro el propósito de la iluminación para no elegir una luminaria que proporcione demasiado flujo luminoso con una potencia que perjudique la iluminación del sitio. De la misma forma es necesario conocer si las luminarias irán empotradas o suspendidas a los elementos arquitectónicos y cuál será el área de trabajo, todos esos factores se deben tener en cuenta al momento de variar el flujo de iluminación y la potencia de las luminarias que se elegirán.

Usar distintos tipos de lámparas resulta en algunos casos convenientes ya que no todas las áreas necesitan la misma cantidad de iluminación, dentro de este proyecto se propuso el uso de lámparas con menor intensidad luminosa para alumbrar el pasillo, pero al intentar combinarlas dentro de un cubículo resulta perjudicial debido a que reduce la uniformidad.

No debe existir una diferencia significativa entre el flujo luminoso si se quiere usar distintos tipos de lámparas dentro de una misma área de trabajo, de esta forma la uniformidad se mantiene, de lo contrario se deberá tener una distancia que provoque una penumbra donde una lámpara con bajo flujo pueda mantener una uniformidad más agradable para la vista.

### Referencias

- [1] Pleuslite. (2015) Iluminación en oficinas: Criterios para elegir un sistema energético eficiente. Retrieved from <http://pleuslite.com/iluminacion-en-oficinas-criterios-para-elegir-un-sistema-energetico-eficiente/#iLightbox>
- [2] Martín Monroy, M. (2006). Manual de Iluminación. Las Palmas de Gran Canaria: ICARO
- [3] Norma Oficial Mexicana NOM-025-STPS-2008, Condiciones de iluminación en los centros de trabajo.
- [4] Norma Oficial Mexicana NOM-007-ENER- 2014, Eficiencia energética para sistemas de alumbrado en edificios no residenciales.
- [5] Indriago, J., González, R., La Roche, P., Mustieles, F., Machado, M., Oteiza, I. (2002). Evaluación de la iluminación natural y soleamiento de viviendas bioclimáticas para climas cálido-húmedos. Rev. Téc. Ing. Univ. Zulia Vol.25(2), 13-34.
- [6] Anexo General del Reglamento Técnico de Iluminación y Alumbrado Público. (2010). Capítulo 4. Diseños y cálculos de iluminación interior. 77-115.

## Medición de radiación solar global y comparación con datos de satélites para un sitio de México

DIBENE-ARRIOLA, Luis\*†, PAREDES-VÁZQUEZ, César y MESSINA-LÓPEZ, Víctor

*Universidad Politécnica de Zacatecas, Programa Educativo de Ingeniería en Sistemas Computacionales, Plan del Pardillo S/N, Parque Industrial, Fresnillo, Zac. C.P. 99059*

*Instituto Tecnológico Superior de Fresnillo, Av. Tecnológico número 2000, Col Solidaridad, Fresnillo, Zac. C.P. 99040*

Recibido Abril 5, 2017; Aceptado Junio 8, 2017

### Resumen

La comparación entre la radiación solar medida contra la especificada por la NASA para un sitio en Bahía de Banderas, surge porque el disponer de estaciones meteorológicas con piranómetros calibrados y certificados es muy costosa así como su recalibración y mantenimiento. Para ello se tomaron los dos años de mediciones con que se cuenta. Se observa que el patrón de comportamiento de los valores medios mensuales de irradiación diaria global (horizontal, e inclinada 20° al sur) incidente medidos a lo largo de los dos años es muy similar al presentado por la NASA para el sitio de medición. Se encontró que en general los valores NASA son superiores a los medidos, excepto para agosto y septiembre. Que esta diferencia para el caso de la irradiación horizontal fue del 7.68% con una desviación estándar de 6.17% y un rango de 19.29% mientras que en el caso de la irradiación global inclinada para los dos años de mediciones fueron mayores en un 5.69% con una desviación estándar del 7.87% y un rango de 21.01%. Estos porcentajes con respecto a los valores de la NASA.

### Radiación solar, medición, NASA

### Abstract

The comparison between solar radiation measured against that specified by NASA for a place in Banderas Bay arises because the availability of meteorological stations with calibrated and certified pyranometers is very expensive as well as their recalibration and maintenance. For this, two years of measurements were taken. It is observed that the behavior pattern of the monthly mean values of global daily irradiation (horizontal, and sloping 20 ° south) incident measured over the two years is very similar to that presented by NASA for the measurement site. It was found that in general the values NASA are superior to those measured, except for August and September. That this difference for the horizontal irradiation case was 7.68% with a standard deviation of 6.17% and a range of 19.29% whereas in the case of the inclined global irradiation for the two years of measurements were higher in 5.69% with A standard deviation of 7.87% and a range of 21.01%. These percentages with respect to NASA values.

### Solar radiation, measurement, NASA

**Citación:** DIBENE-ARRIOLA, Luis, PAREDES-VÁZQUEZ, César y MESSINA-LÓPEZ, Víctor. Medición de radiación solar global y comparación con datos de satélites para un sitio de México. *Revista del Desarrollo Tecnológico* 2017, 1-2: 60-73

\* Correspondencia al Autor (Correo Electrónico: ldibene@utbb.edu.mx)

† Investigador contribuyendo como primer autor.

## Introducción

La radiación que llega del sol a la tierra es la fuente principal de energía para la generación de los fenómenos en la atmósfera, en los océanos y, en general, para la vida en la tierra (Kalogirou, 2009). Su espectro se compone principalmente de luz ultra violeta (UV), luz visible e Infrarrojo cercano. Esa radiación atraviesa el espacio en forma de ondas electromagnéticas colimadas hasta llegar a la capa exterior de la atmósfera y permanece prácticamente constante y se le conoce como “Constante Solar” (Vega de Kuyper & Morales, 2015). El valor de dicha constante utilizado actualmente por la Organización Meteorológica Mundial (OMM) es de  $1367 \text{ W} / \text{m}^2$  y se ha mantenido desde 1982; sin embargo, se ha medido por la NASA y su valor en el año 2008 fue de  $1360.8 \pm 0.5 \text{ W} / \text{m}^2$ . Ese valor cambia a lo largo del año de acuerdo a la distancia entre la tierra y el sol en un 6.6% siendo más intensa en enero que en julio, y también cambia hasta un 0,1%, dependiendo de la actividad solar (Rosemann, 2011).

Una vez que esa radiación entra a la atmósfera y pasa a través de ella, se reduce por la dispersión y absorción causada por las moléculas de aire, partículas de aerosol, gotas de agua y cristales de hielo en las nubes. Las moléculas gaseosas y los aerosoles causan la mayor parte de la absorción de la radiación solar. La dispersión de la radiación solar tiene lugar dentro de toda la gama espectral (Kalogirou, 2009). La radiación UV es dispersada por moléculas y aerosoles y absorbida por el  $\text{O}_3$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_2$  y otros gases. El Ozono absorbe toda la peligrosa luz ultravioleta C y más del 90% de la luz ultravioleta B. La luz visible es dispersada por moléculas y aerosoles, pero es poco absorbida; aquí las ondas más cortas son más dispersadas, lo que hace que el cielo se vea azul.

La radiación infrarroja es absorbida por el vapor de agua y los aerosoles, pero poco dispersada, de modo que aproximadamente el 30% de la toda la radiación extraterrestre que llega a la tierra es reflejada de nuevo al espacio, un 19% es absorbida por las nubes y la atmósfera y un 51% es absorbida por el agua y la tierra (Rosemann, 2011). Como resultado de la interacción entre la atmósfera y la radiación solar una porción de los rayos originalmente colimados es dispersada o no direccional y alguna de esta radiación dispersa alcanza la tierra desde el cielo y se la llama radiación difusa, mientras que los rayos que llegan colimados al suelo se les llama radiación directa. Juntos forman la radiación global (Kalogirou, 2009). A la radiación que finalmente llega al suelo se le llama recurso solar y como se puede entender, éste es muy variable por la influencia de la atmósfera que debe atravesar.

Debido a la aleatoriedad anterior, para poder estimar la radiación solar en un determinado lugar para el futuro es necesario recurrir a bases de datos del pasado obtenidas por medio de estaciones de medición terrestres y/o conjuntos de datos modelados o por satélites. Es muy importante que dicha información sea lo más precisa y exacta posible ya que los datos exactos de la radiación solar son fundamentales para la industria de la energía solar tanto en la investigación y el desarrollo, como en la elección de los lugares óptimos y tipos de sistemas, en la supervisión de la eficiencia, y en la programación de mantenimiento (Rosemann, 2011). Además, también para lograr una mayor penetración de la conversión de la energía solar en la red eléctrica y la reducción de los costos de integración del sistema.

Específicamente; la comprensión de los impactos de las nubes y otros componentes meteorológicos en el recurso solar y la cuantificación de la variabilidad intra- / inter-horaria, estacional e interanual son esenciales para diseñar con precisión proyectos de energía solar a escala de utilidad (Aron Habte, 2017). Para que estos valores sean precisos, se requieren muchos años de mediciones. Se estima que aun así, por muy precisas y completas que sean las bases de datos disponibles, puede haber un error de un 10% en la predicción de la energía solar anual incidente y hasta un 30% en valores mensuales.

El uso de la energía solar ha crecido enormemente en los últimos años y, sin embargo, representa sólo alrededor del 1% de la generación de electricidad a nivel mundial. Los observadores convencionales ahora predicen que la energía solar fotovoltaica podría proporcionar el 16% de la electricidad global a mediados de siglo (Jeffrey Ball, 2017). También existe un amplio y confiable conjunto de tecnologías para convertirla y utilizarla como energía térmica (Albizzati, 2015). Los cálculos de especialistas en evaluación de recursos energéticos prevén que para el año 2100, cerca del 50% de la energía que se use en el mundo será de origen solar (Ciencia UNAM, 2013). Además, hay un creciente interés en el campo de la investigación de la radiación solar debido a sus muchas aplicaciones en los procesos físicos, químicos y biológicos que se producen en la interacción biosfera-atmósfera. El conocimiento de las variaciones estacionales y temporales permite su uso en estudios de evapotranspiración, optimización de la demanda de agua en riego, previsión de cultivos, planificación agrícola, cambio climático, desarrollo de sistemas de tecnología energética (térmica y fotovoltaica), conservación de alimentos, edificios y ambiente (Pacheco de Souza, Carvalho da Silva, Aki Tanaka, Morgan Uliana, Terra de Almeida, & Evaldo Klar, 2017).

La radiación solar global se considera como el parámetro más esencial en aplicaciones de meteorología, energía renovable y conversión de energía solar, especialmente para el dimensionamiento de sistemas fotovoltaicos independientes (Premalatha Neelamegam, 2016), (Danny H.W. Li, 2015).

La cantidad de energía que llega del sol al suelo es enorme; un área de únicamente 50 kilómetros cuadrados podría recibir durante el año la suficiente energía solar para satisfacer las necesidades de una población de 120 millones de habitantes. Un primer paso indispensable para aprovechar el sol, sería hacer una evaluación correcta de este recurso en el país. No es suficiente saber que sobra energía; se necesita conocer a qué hora llega, en dónde llega y cómo llega. Para evaluar correctamente la cantidad de radiación solar, esta debe estudiarse como un elemento del clima, pues la cantidad que llega a la superficie se ve afectada por elementos como la latitud, altitud, las corrientes marinas que generan nubosidad y los vientos, entre otros (Ciencia UNAM, 2013). Para la evaluación del rendimiento de los sistemas de energía solar son necesarios los datos de radiación solar, que no está disponible en muchos lugares. Los datos de radiación solar por hora se requieren para un dimensionado preciso de los sistemas de energía. La radiación solar total en diferente orientación y pendiente es necesaria para calcular la eficiencia de los sistemas de energía solar instalados (Aggarwal, 2012). Por lo anterior, su importancia es enorme y justifica perfectamente los esfuerzos para su investigación.

El desarrollo de un programa de investigación en energía solar, debe empezar siempre con un estudio de los datos de radiación solar sobre el sitio o región de interés (F. O. Ogunsanwo, 2016).

El conocimiento de la cantidad de radiación solar en un lugar determinado es esencial en el campo de la física de la energía solar (Chineke, 2009) y es importante para arquitectos, ingenieros y científicos para diseño de edificios eficientes en energía; el desarrollo de aplicaciones de energía solar activa y pasiva; y estudios de climatología y contaminación (Medugu D. W., 2013). Los instrumentos más usados en las estaciones meteorológicas para medir la radiación solar directa y global son los pirheliómetros y los piranómetros, sin embargo son caros si son de grado científico, por lo que hay pocas estaciones en todo el mundo, especialmente en los países en desarrollo por lo que los investigadores buscan extrapolar los valores de un lugar para su aplicación en un lugar diferente (Agbo G. A., 2013). Por lo tanto, la predicción de la radiación solar de los modelos de estimación ha sido ampliamente utilizada a nivel mundial para generar bases de datos de radiación solar para varios lugares del mundo. Existen numerosas técnicas estadísticas para estimar la radiación solar y cada método se basa en diferentes principios (Medugu D. W., 2013). Se tiene por ejemplo la correlación empírica usando las horas de sol propuesta por Angstrom y modificada por Prescott y Page y modelos como los de Rietveld y otros (Agbo G. A., 2013).

En México, actualmente el Instituto de Geofísica de la UNAM lidera varios proyectos, entre ellos uno llamado “Calibración y validación de información de radiación solar del Servicio Meteorológico Nacional”, otro llamado “Investigación, Calibración de una red nacional de sensores de radiación solar y de su base de datos (recobro, validación y publicación de 133 estaciones), otro llamado "Inventario Nacional del Recurso Solar", en el que intervienen el Centro Mexicano de Innovación en Energía Solar, SENER-CONACYT y otros (Santillán, 2012).

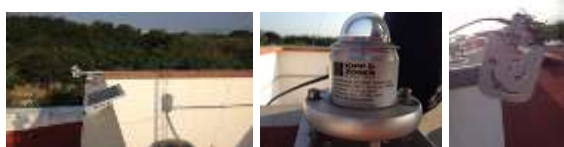
## Materiales y Métodos

En el año 2014, la Universidad Tecnológica de Bahía de Banderas (UTBB) adquirió con recursos del Programa de Apoyo a la Educación Superior (PADES) 3 piranómetros Marca Kipp&Zonnen, modelo CMP3, calibrados y certificados con números: 010321140846, 010321140856 y 010321140851 (ver imagen 1); a los que se les llamará piranómetro 1, piranómetro 2 y piranómetro 3, respectivamente. Ellos se recibieron a principios del año 2015 y se instalaron en la azotea del edificio “Laboratorio de Ingenierías” de la propia universidad. Los primeros dos de ellos se instalaron para medir radiación global horizontal. La intención fue verificar si tenían las mismas lecturas. El tercero se instaló con una inclinación de 20° hacia el sur, con el fin de medir radiación global inclinada.



**Figura 1** Imágenes de los certificados de los piranómetros CMP3, instalados en la UTBB

En la figura 2, se puede observar cómo están instalados en una parte de la azotea del edificio denominado “Laboratorio de Ingenierías”.



**Figura 2** Los 3 piranómetros instalados en el edificio “Laboratorio de Ingenierías” de la UTBB

Estos piranómetros empezaron a tomar y grabar lecturas desde el 29 de mayo del año 2015, pero para fines de éste artículo se consideran las lecturas desde el primero de junio del año 2015 al 31 de mayo del año 2017, completando de manera ininterrumpida dos años de mediciones.

Cada uno de estos 3 piranómetros mide de manera continua la radiación solar y la convierte en una diferencia de potencial (en  $\mu\text{V}$ ), que se puede medir como voltaje diferencial a través de dos cables que salen de cada piranómetro y que están conectados a un datalogger modelo CR-1000 (ver imagen 3), en el cual se creó un programa que permite que cada 5 segundos se registre el valor de los  $\mu\text{V}$  para cada piranómetro y cuando se completan 120 lecturas (10 minutos) se promedian y ese dato se registra y se manda a la base de datos de la computadora como irradiancia ( $\text{W}/\text{m}^2$ ).



**Figura 3** Caja para intemperie, batería, Datalogger CR1000 y convertidor para cable Ethernet

Cada 6 lecturas hacen una hora, se promedian y se multiplican por 1 hora para obtener la irradiación de esa hora ( $\text{W}\cdot\text{h}/\text{m}^2$ ) y así a lo largo de cada día, para obtener la insolación diaria. De esa manera se obtuvieron los datos de insolación para cada día de los dos años mencionados. También se obtuvo el valor medio mensual de irradiación diaria global incidente para cada mes de los dos años de mediciones.

Toda la información anterior se obtuvo para el sitio donde se instalaron los piranómetros (Latitud 20.708701 y Longitud -105.285616). Lo anterior, es con el fin de construir una base de datos confiables a lo largo de los años, ya que el uso de los datos recogidos en el pasado puede ser útil para capturar la variabilidad diaria y estacional, mientras que la medición del pasado reciente puede explotarse para proporcionar una predicción a corto plazo (Massimo Lazzaronia, 2015).

En este trabajo se quiso hacer una comparación entre los datos medidos con estos piranómetros y los reportados por la NASA, ya que ellos dicen que sus datos basados en satélites y modelos han demostrado ser lo suficientemente precisos como para proporcionar datos fiables de recursos solares y meteorológicos sobre regiones donde las mediciones de superficie son escasas o inexistentes (Paul W. Stackhouse, 2017) lo que aplica perfectamente para esta región del país, dado que en la zona de estudio (Bahía de Banderas) no se cuenta con otras estaciones que tengan piranómetros calibrados.

Para ello, se entró al sitio “*Surface meteorology and Solar Energy – NASA* con la dirección: <https://eosweb.larc.nasa.gov/sse/> en la sección *Meteorology and Solar Energy*, en *Data tables for a particular location*.

Para comparar los datos medidos contra los del satélite, se elaboran una serie de tablas y gráficas y se hace un análisis estadístico de los mismos.

## Resultados y Discusión

En la tabla 1, se muestra el comportamiento de los valores medios mensuales de irradiación diaria global horizontal incidente para los meses de junio a diciembre del año 2015, tomada por los piranómetros 1 y 2 con el fin de verificar si tenían las mismas lecturas:

|        | Lecturas piranómetros (kW-h / m <sup>2</sup> ) |      |
|--------|--|------|
|        | P1   | P2   |
| jun-15 | 6.38   | 6.37 |
| jul-15 | 6.10   | 6.08 |
| ago-15 | 6.18   | 6.13 |
| sep-15 | 5.60   | 5.53 |
| oct-15 | 4.61   | 4.52 |
| nov-15 | 4.19   | 4.07 |
| dic-15 | 3.55   | 3.45 |

**Tabla 1** Lecturas de la radiación global horizontal mensual diaria (kW-h / m<sup>2</sup>), medidas con los piranómetros 1 y 2

La gráfica 1 muestra los valores medios mensuales de irradiación diaria global incidente horizontal (kW-h / m<sup>2</sup>) tanto para el piranómetro 1 como para el piranómetro dos.



**Gráfico 1** Comportamiento de las lecturas de radiación global horizontal mensual promedio diaria entre los piranómetros 1 y 2, (kW-h / m<sup>2</sup>) entre junio y diciembre del año 2015

Como puede verse, inician prácticamente iguales y se van separando a lo largo del tiempo.

En la tabla 2, se puede observar la variación, en porcentaje, de las lecturas entre el piranómetro 1 y el piranómetro 2, respecto al piranómetro 2.

|        | Diferencia entre Lecturas piranómetros respecto a P2 |      |
|--------|--|------|
|        | Diferencia   | (%)  |
| jun-15 | 0.01   | 0.21 |
| jul-15 | 0.02   | 0.32 |
| ago-15 | 0.05   | 0.82 |
| sep-15 | 0.07   | 1.29 |
| oct-15 | 0.09   | 1.99 |
| nov-15 | 0.12   | 2.83 |
| dic-15 | 0.10   | 3.00 |

**Tabla 2** Porcentaje de variación de las lecturas entre los piranómetros 1 y 2, respecto al 2

Como se puede ver, se observa que poco a poco las lecturas se van separando, por lo que deberán ser recalibrados. Ya no se comparan en lo sucesivo, dado que el piranómetro 1 se utilizó para otras aplicaciones.

Este artículo se basa en las lecturas del piranómetro 2 para las mediciones de la radiación global horizontal y el piranómetro 3 para las mediciones de la radiación global inclinada 20° hacia el sur (azimut 0°).

En la tabla 3 siguiente, se muestran los valores medios mensuales de irradiación diaria global horizontal incidente y con una inclinación de 20° hacia el sur; obtenidas para los dos años completos de mediciones; esto es desde el 01 de junio del año 2015 al 31 de mayo del año 2017. Se incluyen en esta tabla los valores de insolación promedio mensual presentados por el sitio de la NASA (Atmospheric Science Data Center, 2017), tanto horizontal como inclinada 20° hacia el sur; el cual presenta sus resultados para un periodo de 22 años y ya mencionado con anterioridad en este artículo:



|        | Insolación                   | Insolación                      | Insolación    | Insolación     |
|--------|------------------------------|---------------------------------|---------------|----------------|
|        | Global                       | Global                          | Global        | Global         |
|        | Horizontal                   | Inclinada                       | Horizontal    | Inclinada      |
|        | $G_h$ (kW-h/m <sup>2</sup> ) | $G_{20}$ (kW-h/m <sup>2</sup> ) | NASA $G_{hN}$ | NASA $G_{20N}$ |
| jun-15 | 6.37                         | 5.61                            | 7.06          | 7.10           |
| jul-15 | 6.08                         | 5.50                            | 6.37          | 6.33           |
| ago-15 | 6.13                         | 5.89                            | 5.88          | 5.69           |
| sep-15 | 5.53                         | 5.84                            | 5.27          | 5.41           |
| oct-15 | 4.52                         | 5.27                            | 5.41          | 6.05           |
| nov-15 | 4.07                         | 5.30                            | 4.98          | 6.09           |
| dic-15 | 3.45                         | 4.55                            | 4.22          | 5.23           |
| ene-16 | 4.44                         | 6.06                            | 4.57          | 5.62           |
| feb-16 | 5.10                         | 6.36                            | 5.64          | 6.56           |
| mar-16 | 5.73                         | 6.32                            | 6.76          | 7.26           |
| abr-16 | 6.27                         | 6.20                            | 7.29          | 7.21           |
| may-16 | 7.06                         | 6.43                            | 7.67          | 7.05           |
| jun-16 | 6.54                         | 5.83                            | 7.06          | 7.10           |
| jul-16 | 6.03                         | 5.47                            | 6.37          | 6.33           |
| ago-16 | 5.89                         | 5.66                            | 5.88          | 5.69           |
| sep-16 | 5.61                         | 5.89                            | 5.27          | 5.41           |
| oct-16 | 5.20                         | 6.19                            | 5.41          | 6.05           |
| nov-16 | 4.18                         | 5.52                            | 4.98          | 6.09           |
| dic-16 | 3.90                         | 5.46                            | 4.22          | 5.23           |
| ene-17 | 4.26                         | 5.83                            | 4.57          | 5.62           |
| feb-17 | 5.28                         | 6.68                            | 5.64          | 6.56           |
| mar-17 | 5.99                         | 6.67                            | 6.76          | 7.26           |
| abr-17 | 6.86                         | 6.86                            | 7.29          | 7.21           |
| may-17 | 6.71                         | 6.28                            | 7.67          | 7.05           |

**Tabla 3** Valores medios mensuales de irradiación diaria global (horizontal, e inclinada 20° al sur) incidente, medidas vs los valores correspondientes NASA

Se hace en primer lugar una revisión del comportamiento de la radiación global horizontal y posteriormente, el de la radiación global inclinada.

De la tabla 3 anterior, se obtuvo la media aritmética (Murray R. Spiegel, 2009):

$$\bar{X} = \frac{\sum_{j=1}^N X_j}{N} \quad (1)$$

Lo anterior, tanto para los dos años de mediciones, como para los valores reportados por la NASA, resultando en 5.47 kW-h / m<sup>2</sup> para la radiación global horizontal medida contra 5.93 kW-h / m<sup>2</sup> para la NASA.

Asimismo, se obtuvo el rango de insolación global horizontal (Murray R. Spiegel, 2009):

$$R = V_M - V_m \quad (2)$$

Dónde  $V_M$  es el valor mayor del conjunto de datos y  $V_m$  es el valor menor de dicho conjunto.

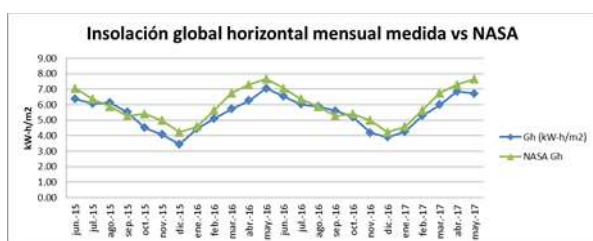
El rango de insolación global horizontal medida es de 3.61 kW-h / m<sup>2</sup> con la mínima de 3.45 kW-h / m<sup>2</sup> en diciembre del año 2015 y la máxima de 7.06 kW-h / m<sup>2</sup> en mayo del año 2016. El rango para los valores proporcionados por la NASA para el sitio de medición es de 3.45 kW-h / m<sup>2</sup> con la mínima radiación para el mes de diciembre con un valor de 4.22 kW-h / m<sup>2</sup> y la máxima de 7.67 kW-h / m<sup>2</sup> para mayo.

La desviación estándar de las insolaciones mensuales se calculó con la siguiente ecuación (Murray R. Spiegel, 2009):

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^N (X_j - \bar{X})^2}{N}} \quad (3)$$

Por tanto la desviación estándar de las insolaciones promedio diarias mensuales da 1.002 kW-h / m<sup>2</sup>, mientras que la desviación estándar para los datos de la NASA fue de 1.083 kW-h / m<sup>2</sup>.

De la tabla 3 se desprende la gráfica 2, en la cual se puede ver el comportamiento de los valores medios mensuales de irradiación diaria global horizontal incidente (kW-h / m<sup>2</sup>) medida a lo largo de los dos años (desde el 1 de junio del 2015 al 31 de mayo del 2016) vs los valores mostrados por la NASA (radiación global horizontal promedio de los últimos 22 años) para el sitio con latitud 20.709 grados y longitud -105.286 grados. Los valores de la NASA se repiten.



**Gráfico 2** Comportamiento de la radiación global horizontal medida ( $\text{kW-h/m}^2$ ) vs la radiación global horizontal mensual de la NASA para el sitio de medición

Se observa en la gráfica 2 que el comportamiento de la radiación global horizontal medida es muy similar al proporcionado por la NASA para el sitio seleccionado.

En la gráfica 3 se muestran los valores medios mensuales de irradiación diaria global horizontal incidentes medidos para el período de junio del año 2015 a mayo del año 2016; comparados contra los datos de la NASA:



**Gráfico 3** Comparación entre los valores medios mensuales de irradiación diaria global horizontal incidente medidos vs NASA. Junio 2015 a mayo 2016

En la gráfica 3 se observa que los valores medidos de este período son menores que los reportados por la NASA, excepto para los meses de agosto y septiembre del año 2015. La tabla 4 muestra esas diferencias ( $\text{kW-h/m}^2$ ) y su valor en porcentaje respecto a los valores NASA:

|        | Diferencia (NASA-Gh) | % de la diferencia respecto a NASA |
|--------|----------------------|------------------------------------|
| jun-15 | 0.69                 | 9.77                               |
| jul-15 | 0.29                 | 4.60                               |
| ago-15 | -0.25                | -4.20                              |
| sep-15 | -0.26                | -4.84                              |
| oct-15 | 0.89                 | 16.53                              |
| nov-15 | 0.91                 | 18.21                              |
| dic-15 | 0.77                 | 18.31                              |
| ene-16 | 0.13                 | 2.85                               |
| feb-16 | 0.54                 | 9.53                               |
| mar-16 | 1.03                 | 15.24                              |
| abr-16 | 1.02                 | 14.03                              |
| may-16 | 0.61                 | 7.94                               |

La tabla 5 muestra las diferencias de los valores NASA menos los medidos ( $\text{kW-h/m}^2$ ) y el porcentaje correspondiente de la diferencia, respecto a los valores NASA para el periodo junio 2016 a mayo 2017:

|        | Diferencia (NASA-Gh) | % de la diferencia respecto a NASA |
|--------|----------------------|------------------------------------|
| jun-16 | 0.52                 | 7.33                               |
| jul-16 | 0.34                 | 5.30                               |
| ago-16 | -0.01                | -0.17                              |
| sep-16 | -0.34                | -6.40                              |
| oct-16 | 0.21                 | 3.84                               |
| nov-16 | 0.80                 | 16.02                              |
| dic-16 | 0.32                 | 7.60                               |
| ene-17 | 0.31                 | 6.87                               |
| feb-17 | 0.36                 | 6.31                               |
| mar-17 | 0.77                 | 11.32                              |
| abr-17 | 0.43                 | 5.96                               |
| may-17 | 0.96                 | 12.45                              |

En la tabla 5 y gráfica 4 se observa que los valores medidos de este período también son menores que los reportados por la NASA, excepto para los meses de agosto y septiembre del año 2016.



**Gráfico 4** Comparación entre los valores medios mensuales de irradiación diaria global horizontal incidente medidos vs NASA. Junio 2016 a mayo 2017

Se observa, que en el período de junio 2016 a mayo 2017 el comportamiento de los valores medios mensuales de irradiación diaria global horizontal incidente se aproximan más a los valores NASA que el periodo anterior (tabla 6). Esta tabla compara el valor absoluto de las diferencias entre los valores NASA con los medidos y su respectivo promedio, siendo éste menor en el segundo año:

|                              | Diferencia (NASA-Gh) kW-h / m <sup>2</sup> | Valor absoluto de la diferencia kW-h / m <sup>2</sup> |
|------------------------------|--|---|
| jun-15                       | 0.69                                       | 0.69  |
| jul-15                       | 0.29                                       | 0.29  |
| ago-15                       | -0.25                                      | 0.25  |
| sep-15                       | -0.26                                      | 0.26  |
| oct-15                       | 0.89                                       | 0.89  |
| nov-15                       | 0.91                                       | 0.91  |
| dic-15                       | 0.77                                       | 0.77  |
| ene-16                       | 0.13                                       | 0.13  |
| feb-16                       | 0.54                                       | 0.54  |
| mar-16                       | 1.03                                       | 1.03  |
| abr-16                       | 1.02                                       | 1.02  |
| may-16                       | 0.61                                       | 0.61  |
| Total diferencia en promedio |  | 0.62  |
| jun-16                       | 0.52                                       | 0.52  |
| jul-16                       | 0.34                                       | 0.34  |
| ago-16                       | -0.01                                      | 0.01  |
| sep-16                       | -0.34                                      | 0.34  |
| oct-16                       | 0.21                                       | 0.21  |
| nov-16                       | 0.80                                       | 0.80  |
| dic-16                       | 0.32                                       | 0.32  |
| ene-17                       | 0.31                                       | 0.31  |
| feb-17                       | 0.36                                       | 0.36  |
| mar-17                       | 0.77                                       | 0.77  |
| abr-17                       | 0.43                                       | 0.43  |
| may-17                       | 0.96                                       | 0.96  |
| Total diferencia en promedio |  | 0.45  |

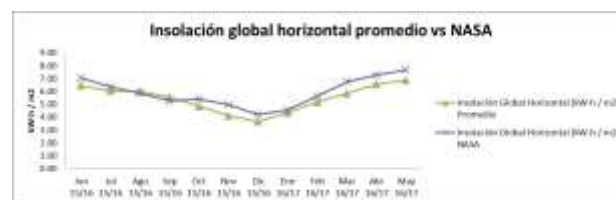
**Tabla 6** Valor absoluto de las diferencias entre los valores NASA y medidos y sus promedios

En la tabla 7 se compara el promedio de los valores medios mensuales de irradiación diaria global horizontal incidente medidos vs NASA:

| Insolación Global Horizontal (kW-h / m <sup>2</sup> ) |          |       |
|---|----------|-------|
| Mes-Año   | Promedio | NASA  |
| Jun 15/16   | 6.46     | 7.06  |
| Jul 15/16   | 6.05     | 6.37  |
| Ago 15/16   | 6.01     | 5.88  |
| Sep 15/16   | 5.57     | 5.27  |
| Oct 15/16   | 4.86     | 5.41  |
| Nov 15/16   | 4.13     | 4.98  |
| Dic 15/16   | 3.67     | 4.22  |
| Ene 16/17   | 4.35     | 4.57  |
| Feb 16/17   | 5.19     | 5.64  |
| Mar 16/17   | 5.86     | 6.76  |
| Abr 16/17   | 6.56     | 7.29  |
| May 16/17   | 6.89     | 7.67  |
| TOTAL   | 65.60    | 71.12 |
| PROMEDIO DIARIO kW/m2                                 | 5.47     | 5.93  |

**Tabla 7** Promedio de los valores medios mensuales de irradiación diaria global horizontal incidente medidos vs NASA

En la gráfica 5 se compara el promedio de los valores medios mensuales de irradiación diaria global horizontal incidente medidos vs NASA:



**Gráfico 5** Promedio de los valores medios mensuales de irradiación diaria global horizontal incidente medidos vs los correspondientes valores NASA

Como puede verse, la gráfica 5 es intermedia entre la gráfica 3 y la gráfica 4, y se considera más representativa que ambas. Se piensa que entre más sean los años de mediciones, más se aproximará a la de la NASA.

La tabla 8 presenta el promedio de los valores medios mensuales de irradiación diaria global horizontal incidente medidos vs NASA, su diferencia, el valor absoluto de la diferencia y el promedio de esas diferencias en valor absoluto:

| Mes-Año                        | Promedio | NASA  | Diferencia NASA - Gh | Valor absoluto de la diferencia NASA - Gh |
|--------------------------------|----------|-------|----------------------|---|
| Jun 15/16                      | 6.46     | 7.06  | 0.60                 | 0.60                                      |
| Jul 15/16                      | 6.05     | 6.37  | 0.32                 | 0.32                                      |
| Ago 15/16                      | 6.01     | 5.88  | -0.13                | 0.13                                      |
| Sep 15/16                      | 5.57     | 5.27  | -0.30                | 0.30                                      |
| Oct 15/16                      | 4.86     | 5.41  | 0.55                 | 0.55                                      |
| Nov 15/16                      | 4.13     | 4.98  | 0.85                 | 0.85                                      |
| Dic 15/16                      | 3.67     | 4.22  | 0.55                 | 0.55                                      |
| Ene 16/17                      | 4.35     | 4.57  | 0.22                 | 0.22                                      |
| Feb 16/17                      | 5.19     | 5.64  | 0.45                 | 0.45                                      |
| Mar 16/17                      | 5.86     | 6.76  | 0.90                 | 0.90                                      |
| Abr 16/17                      | 6.56     | 7.29  | 0.73                 | 0.73                                      |
| May 16/17                      | 6.89     | 7.67  | 0.78                 | 0.78                                      |
| TOTAL                          | 65.60    | 71.12 | 5.52                 | 6.37                                      |
| PROMEDIO kW-h / m <sup>2</sup> | 5.47     | 5.93  | 0.46                 | 0.53                                      |

**Tabla 8** Promedio de las diferencias en valor absoluto de los valores medios mensuales de irradiación diaria global horizontal incidente medidos vs NASA

Finalmente, en la tabla 9 se presenta la diferencia entre los valores medios mensuales de irradiación diaria global horizontal incidente proporcionados por la NASA menos los valores medios mensuales de irradiación diaria global horizontal incidente medidos de los dos años, en porcentaje, incluyendo el promedio de la diferencia.

Como se puede ver en la tabla 9, los valores NASA para la irradiación global horizontal incidente fueron mayores que los valores medidos en un 7.68% con una desviación estándar de 6.17%.

| Mes-Año                        | Promedio | NASA  | Diferencia NASA - Gh | % de la diferencia respecto a NASA |
|--------------------------------|----------|-------|----------------------|------------------------------------|
| Jun 15/16                      | 6.46     | 7.06  | 0.60                 | 8.55                               |
| Jul 15/16                      | 6.05     | 6.37  | 0.32                 | 4.95                               |
| Ago 15/16                      | 6.01     | 5.88  | -0.13                | -2.18                              |
| Sep 15/16                      | 5.57     | 5.27  | -0.30                | -5.62                              |
| Oct 15/16                      | 4.86     | 5.41  | 0.55                 | 10.19                              |
| Nov 15/16                      | 4.13     | 4.98  | 0.85                 | 17.11                              |
| Dic 15/16                      | 3.67     | 4.22  | 0.55                 | 12.95                              |
| Ene 16/17                      | 4.35     | 4.57  | 0.22                 | 4.86                               |
| Feb 16/17                      | 5.19     | 5.64  | 0.45                 | 7.92                               |
| Mar 16/17                      | 5.86     | 6.76  | 0.90                 | 13.28                              |
| Abr 16/17                      | 6.56     | 7.29  | 0.73                 | 9.99                               |
| May 16/17                      | 6.89     | 7.67  | 0.78                 | 10.20                              |
| TOTAL                          | 65.60    | 71.12 | 5.52                 | 92.20                              |
| PROMEDIO kW-h / m <sup>2</sup> | 5.47     | 5.93  | 0.46                 | 7.68                               |

**Tabla 9** Diferencia, en porcentaje, entre los valores NASA y valores medidos de la irradiación horizontal

Además de lo anterior, se utilizó Excel para encontrar las líneas de tendencia de las dos curvas; la de la NASA y la de los datos medidos, encontrándose que ambas curvas son descritas muy bien por ecuaciones polinómicas de grado 6 y que se presentan en este artículo como ecuación 4 y ecuación 5 para las curvas de tendencia de la NASA y de los datos medidos, respectivamente. A continuación se muestra la ecuación 4:

$$y = 4E^{-5}x^6 - 0.0025x^5 + 0.0511x^4 - 0.4561x^3 + 1.9551x^2 - 4.2334x + 9.7871 \quad (4)$$

El coeficiente de determinación o bondad de ajuste de la curva 4 anterior, la cual representa los datos de las insolaciones promedio para los 22 años de mediciones de los satélites de la NASA es de:

$$R^2 = 0.9626$$

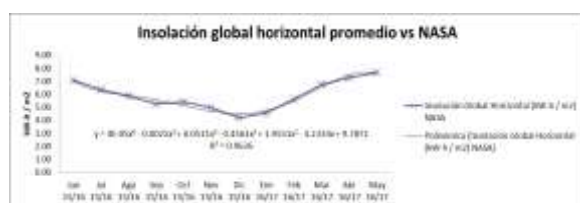
A continuación se muestra la ecuación 5:

$$y = 0.0002x^6 - 0.0101x^5 + 0.1572x^4 - 1.1506x^3 + 4.0297x^2 - 6.53x + 9.966 \quad (5)$$

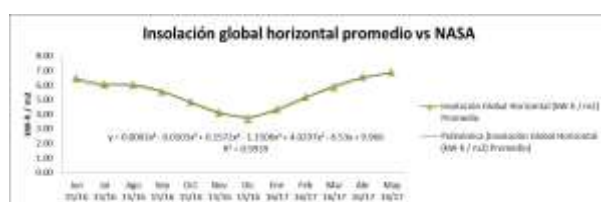
El coeficiente de determinación o bondad de ajuste de la curva 5 anterior para representar los datos de las radiaciones medidas por los piranómetros instalados en la UTBB es de:

$$R^2 = 0.9939$$

Tanto las líneas de tendencia para los datos NASA y los datos medidos se muestran en las gráficas 6 y 7, respectivamente:



**Gráfico 6** Línea de tendencia para los datos de la NASA, correspondiente a una ecuación polinómica de grado 6 (ecuación 4)



**Gráfico 7** Línea de tendencia para los datos de medidos, correspondiente a una ecuación polinómica de grado 6 (ecuación 5)

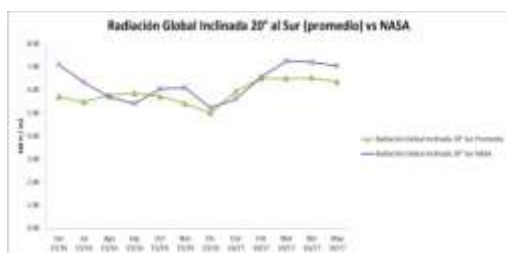
Lo que sigue, es ver los resultados correspondientes entre los valores medios mensuales de irradiación diaria global inclinada (20° al sur) incidente medidos vs los correspondientes valores proporcionados por la NASA para el sitio de medición.

Para lo anterior, se presenta la tabla 10, la cual concentra los valores medios mensuales de los dos años de mediciones vs los correspondientes valores que da la NASA. Estos valores se obtuvieron para cada mes promediando por ejemplo junio 2015 y junio 2016 y ese promedio se compara con junio NASA, y así sucesivamente.

| Mes-Año                        | Promedio | NASA  | Porcentaje de diferencia respecto a la NASA |
|--------------------------------|----------|-------|---|
| Jun 15/16                      | 5.72     | 7.10  | 19.45                                       |
| Jul 15/16                      | 5.48     | 6.33  | 13.39                                       |
| Ago 15/16                      | 5.78     | 5.69  | -1.56                                       |
| Sep 15/16                      | 5.86     | 5.41  | -8.37                                       |
| Oct 15/16                      | 5.73     | 6.05  | 5.32  |
| Nov 15/16                      | 5.41     | 6.09  | 11.16                                       |
| Dic 15/16                      | 5.00     | 5.23  | 4.30  |
| Ene 16/17                      | 5.95     | 5.62  | -5.81                                       |
| Feb 16/17                      | 6.52     | 6.56  | 0.64  |
| Mar 16/17                      | 6.50     | 7.26  | 10.48                                       |
| Abr 16/17                      | 6.53     | 7.21  | 9.37  |
| May 16/17                      | 6.35     | 7.05  | 9.89  |
| TOTAL                          | 70.84    | 75.60 | 68.25                                       |
| PROMEDIO kW-h / m <sup>2</sup> | 5.90     | 6.30  | 5.69  |

**Tabla 10** Valores medios mensuales de irradiación global inclinada para los dos años de mediciones vs los correspondientes valores que da la NASA (kW-h / m<sup>2</sup>) y porcentaje de diferencia respecto a la NASA

Se puede observar en la tabla 10 que los valores NASA son mayores a los valores medidos excepto en los meses de agosto, septiembre y enero y que hay una mayor variación (desviación estándar de 7.87%) de los valores mensuales comparándolos con los valores de irradiación global horizontal. No obstante el promedio del porcentaje de diferencia respecto a la NASA es menor que el valor obtenido para la irradiación horizontal. Esto se puede ver en la gráfica 8, que se presenta a continuación:



**Gráfica 8** Promedio de los valores medios mensuales de irradiación diaria global (inclinada 20° al sur) incidente medidos vs los correspondientes valores NASA

El rango de variación para los valores medios mensuales de irradiación diaria global horizontal incidente proporcionados por la NASA menos los valores medios mensuales de irradiación diaria global horizontal incidente medidos de los dos años, en porcentaje fue de 17.11% (noviembre) menos -2.18% (agosto) igual a 19.29%; mientras que los valores medios mensuales de irradiación diaria global inclinada incidente medidos de los dos años, en porcentaje, fue de 19.45% (junio) menos 1.56% (agosto) igual a 21.01%.

Por tanto la irradiación inclinada tiene un mayor rango de variación (21.01%) que la horizontal (19.29%) aunque su variación promedio es menor (5.69% contra 7.68%). Se obtuvo también la desviación estándar para los dos casos, y esta fue de 6.17% para la irradiación horizontal contra 7.87% en la inclinada.

## Conclusiones

Lo primero que se observó es que los piranómetros calibrados al principio de su instalación tenían casi las mismas lecturas (variación de 0.21% en junio del 2015) y en tan solo 7 meses esta fue aumentando hasta el 3% (diciembre del 2015), lo que muestra la necesidad del mantenimiento y la recalibración de los mismos para que sus lecturas sean confiables.

Ellos son muy caros, también su recalibración y mantenimiento; lo que explica la necesidad de buscar modelos a través de otros medios como correlaciones a través de otras variables meteorológicas y en este caso ver los valores que presentan los satélites de la NASA.

Lo segundo es que el comportamiento de los valores medios mensuales de irradiación diaria global horizontal incidente medidos sigue el mismo patrón que el correspondiente que proporciona la NASA, no obstante que la primera impresión fue de sorpresa al ver que la altitud que NASA marca para el sitio de medición es de 451 m sobre el nivel del mar, cuando se sabe que en realidad solo son 6 metros sobre el nivel del mar (Latitud 20.708701 y Longitud -105.285616). Sin embargo, el comportamiento de los valores obtenidos fue muy acorde con lo que ellos dicen: que sus datos basados en satélites y modelos han demostrado ser lo suficientemente precisos como para proporcionar datos fiables de recursos solares y meteorológicos sobre regiones donde las mediciones de superficie son escasas o inexistentes (Paul W. Stackhouse, 2017) lo que aplica perfectamente para esta región del país, dado que en la zona de estudio (Bahía de Banderas) no se cuenta con otras estaciones que tengan piranómetros calibrados. En este caso se observó que los valores medios mensuales de irradiación diaria global horizontal incidente que presenta la NASA para el sitio de medición fueron mayores que los valores medidos en un 7.68% con una desviación estándar de 6.17% y un rango de 19.29% mientras que en el caso de los valores medios mensuales de irradiación global inclinada para los dos años de mediciones fueron mayores en un 5.69% con una desviación estándar del 7.87% y un rango de 21.01%. Estos porcentajes con respecto a los valores de la NASA.

Se observa también que agosto y septiembre tienen valores medidos superiores a los de la NASA a diferencia del resto del año; ello posiblemente se explique por el cambio de patrones en la nubosidad de la zona, ya que los últimos años al parecer han sido más soleados que antes. Esto implica hacer un estudio al respecto para verificar dicha afirmación.

### Agradecimientos

Se agradece a la Universidad Tecnológica de Bahía de Banderas por las facilidades otorgadas para la realización de este trabajo, al PADES por proporcionar los recursos para la adquisición de los piranómetros y al comité organizador del CIERMI 2017 por sus lineamientos y guía.

### Referencias

*Ciencia UNAM*. (29 de 07 de 2013). Recuperado el 12 de 07 de 2017, de ¿Cuánto sol recibe México?: [http://ciencia.unam.mx/leer/237/Cuanto\\_Sol\\_recibe\\_Mexico](http://ciencia.unam.mx/leer/237/Cuanto_Sol_recibe_Mexico)

Agbo G. A., A. B. (2013). Application of regression and multiple correlation analysis to morning hours solar radiation in Lapai. *International Journal of Physical Sciences*, 5.

Aggarwal, R. K. (2012). Precise estimation of total solar radiation on tilted surface. *African Journal of Environmental Science and Technology*, 6.

Albizzati, E. (2015). Evaluación de la sustentabilidad de instalaciones solares con colectores de placa plana y tubos evacuados. *Rev. Int. Contam. Ambie*, 8.

Aron Habte, M. S. (2017). *Evaluation of the National Solar Radiation Database (NSRDB): 1998–2015*. (N. R. Laboratory, Ed.) USA: U.S. Department of Energy.

Atmospheric Science Data Center. (25 de Julio de 2017). *Surface meteorology and Solar Energy - NASA*. Recuperado el 25 de Julio de 2017, de Meteorology and solar energy: <https://eosweb.larc.nasa.gov/sse/>

Chineke, I. U. (2009). Evaluating the global solar energy potential at Uturu., *International Journal of Physical Sciences*, 115-119.

Danny H.W. Li, S. L. (2015). An Analysis of Global, Direct and Diffuse Solar Radiation. *Energy Procedia*, 6.

F. O. Ogunsanwo, J. O. (2016). Empirical model for estimation of global radiation. *International Journal of Physical*, 8.

Jeffrey Ball, D. R. (2017). *China's Evolving Solar Industry And Its Implications for Competitive Solar Power In the United States and the World*. Stanford Steyer Taylor center for energy policy and finance.

Kalogirou, S. (2009). *Solar energy engineering : processes and systems*. USA: Elsevier.

Massimo Lazzaronia, S. F. (2015). Models for Solar Radiation Prediction based on Diferents Measurements Sites. *Journal of the International Measurement Confederation (IMEKO)*, 33.

Medugu D. W., A. A. (2013). Solar radiation: Correlation between measured and predicted values in Mubi, Nigeria. *International Journal of Science and Technology Education Research*, 7.

Murray R. Spiegel, L. J. (2009). Estadística. En L. J. Murray R. Spiegel, *Estadística* (pág. 571). México, D.F.: Mc Graw Hill.

Pacheco de Souza, A., Carvalho da Silva, A., Aki Tanaka, A., Morgan Uliana, E., Terra de Almeida, F., & Evaldo Klar, A. a. (2017). Global radiation by simplified models for the state of Mato Grosso, Brazil. *Pesq. agropec. bras*, 13.

Paul W. Stackhouse, J. W. (02 de junio de 2017). *Surface meteorology and Solar Energy A renewable energy resource web site (release 6.0)*. Recuperado el 14 de 07 de 2017, de Atmospheric Science Data Center: <https://eosweb.larc.nasa.gov/cgi-bin/sse/sse.cgi?skip@larc.nasa.gov+s07#s07>  
Premalatha Neelamegam, V. A. (2016).

Prediction of solar radiation for solar systems by using ANN models with different back propagation algorithms. *Journal of Applied Research*, 9.

Rosemann, R. (2011). *A Guide to Solar Radiation Measurement* (segunda ed.). Netherlands: Gengenbach Messtechnik.

Santillán, M. L. (02 de 02 de 2012). *CIENCIA UNAM*. Recuperado el 10 de 07 de 2017, de El Instituto de Geofísica calibrará 133 sensores de radiación solar: [http://ciencia.unam.mx/leer/66/El\\_Instituto\\_de\\_Geofisica\\_calibrara\\_133\\_sensores\\_de\\_radiacion\\_solar](http://ciencia.unam.mx/leer/66/El_Instituto_de_Geofisica_calibrara_133_sensores_de_radiacion_solar)

Vega de Kuyper, J. C., & Morales, S. R. (2015). *Fuentes de energía, renovables y no renovables. Aplicaciones*. México, D.F.: Alfaomega.



## Instrucciones para Autores

---

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

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

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

---

#### Resumen

Titulo

Objetivos, metodología

Contribución

(150-200 palabras)

#### Abstract

Title

Objectives, methodology

Contribution

(150-200 words)

#### Keyword

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

---

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

---

---

† Investigador contribuyendo como primer autor.

## Instrucciones para Autores

### Introducción

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

Explicación del tema en general y explicar porque es importante.

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

Enfocar claramente cada una de sus características

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

Explicación de las secciones del artículo

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

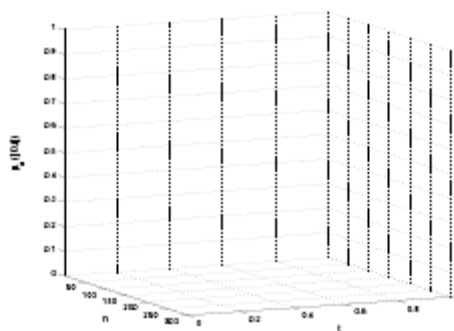
[Título en Times New Roman No.12, espacio sencillo y Negrita]

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

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

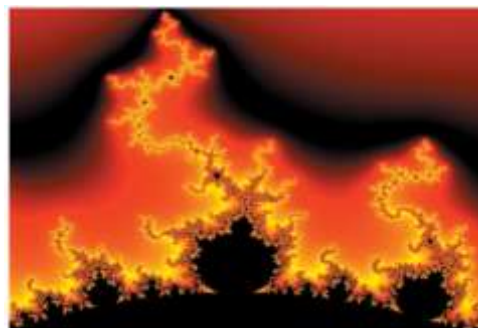
En el *contenido del artículo* todo gráfico, tabla y figura debe ser editable en formatos que permitan modificar tamaño, tipo y número de letra, a efectos de edición, estas deberán estar en alta calidad, no pixeladas y deben ser notables aun reduciendo la imagen a escala.

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



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

No deberán ser imágenes- todo debe ser editable.



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

No deberán ser imágenes- todo debe ser editable.

|  |  |  |  |  |
|--|--|--|--|--|
|  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |

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

No deberán ser imágenes- todo debe ser editable.

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

## Instrucciones para Autores

---

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

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

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

### Metodología a desarrollar

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

### Resultados

Los resultados deberán ser por sección del artículo.

### Anexos

Tablas y fuentes adecuadas.

### Agradecimiento

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

### Conclusiones

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

### Referencias

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

### Ficha Técnica

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

Nombre de la Revista

Título del Artículo

Abstract

Keywords

Secciones del Artículo, por ejemplo:

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

Nombre de Autor (es)

Correo Electrónico de Correspondencia al Autor

Referencia

**Formato de Originalidad**



Madrid, España a \_\_\_\_ de \_\_\_\_ del 20 \_\_\_\_

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

Artículo (Article):

\_\_\_\_\_

Firma (Signature):

\_\_\_\_\_

Nombre (Name)

### Formato de Autorización



Madrid, España a \_\_\_\_ de \_\_\_\_ del 20 \_\_\_\_

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

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

Artículo (Article):

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

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

# Revista del Desarrollo Tecnológico

“Caracterización no lineal y estimación de coeficientes paramétricos en la representación de la saturación magnética del transformador eléctrico”

**CONTRERAS-AGUILAR, Luis, VENEGAS-TRUJILLO, Tiberio, ARROYO-LEDESMA, Jaime y CONTRERAS-SUÁREZ, Juan**

*Universidad de Colima*

“Los residuos de agave como factor de corrosión del suelo donde se vierte”

**HOZ-ZAVALA, Ma. Elia Esther y NAVA-DIGUERO, Pedro**

*Universidad Tecnológica de Altamira*

“Síntesis y caracterización de películas delgadas de  $Cu_2ZnSnS_4$  (CZTS) por el método de sputtering para aplicación en celdas solares”

**MORALES-ALMEIDA, Ricardo, SARRACINO-MARTÍNEZ, Omar, RICÁRDEZ-JIMÉNEZ, Cristino y PÉREZ-HERNÁNDEZ, Germán**

*Universidad Juárez Autónoma de Tabasco*

*Universidad Popular de la Chontalpa*

“Estudio sobre la simetría de extremidades”

**ÁLVAREZ-SÁNCHEZ, Ervin Jesús, ALDANA-FRANCO, Rosario, LÓPEZ-VELÁZQUEZ, Andrés y GALÁN-MÉNDEZ, Frixia**

*Universidad Veracruzana*

“Diseño de un intercambiador de calor tierra-aire en clima cálido-humedo”

**DÍAZ-HERNÁNDEZ, Heidi Paola, AGUILAR-CASTRO, Karla María, MACÍAS-MELO, Edgar Vicente y SERRANO-ARRELLANO**

*Universidad Juárez Autónoma de Tabasco*

*Instituto Tecnológico Superior de Huichapan*

“Optimización de la iluminación de la planta alta de un edificio académico para eficiencia energética”

**RODRÍGUEZ-URIBE, Juan Carlos, SERRANO-ARELLANO, Juan, MACÍAS-MELO, Edgar Vicente, SANTOS-LAZARO Elías David**

*Instituto Tecnológico Superior de Huichapan*

*Universidad Juárez Autónoma de Tabasco*

“Medición de radiación solar global y comparación con datos de satélites para un sitio de México”

**DIBENE-ARRIOLA, Luis, PAREDES-VÁZQUEZ, César y MESSINA-LÓPEZ, Víctor**

*Universidad Politécnica de Zacatecas*

*Instituto Tecnológico Superior de Fresnillo*

