

ISSN 2523-6776

Volumen 1, Número 3 — Julio — Septiembre - 2017

Revista de Ingeniería Tecnológica

ECORFAN®



ECORFAN-Taiwán

Indización

- RESEARCH GATE
- GOOGLE SCHOLAR
- HISPANA
- MENDELEY

ECORFAN-Taiwán

Directorio Principal

RAMOS-ESCAMILLA, María. PhD.

Director Regional

VARGAS-DELGADO, Oscar. PhD.

Director de la Revista

PERALTA-CASTRO, Enrique. MsC.

Edición Tipográfica

TREJO-RAMOS, Iván. BsC.

Edición de Logística

SERRUDO-GONZALEZ, Javier. BsC.

Revista de Ingeniería Tecnológica, Volumen 1, Número 3, de Julio a Septiembre 2017, es una revista editada trimestralmente por ECORFAN-Taiwán. Taiwan, Taipei. YongHe district, ZhongXin, Street 69. Postcode: 23445. WEB: www.ecorfan.org/taiwan, revista@ecorfan.org. Editora en Jefe: RAMOS-ESCAMILLA, María. ISSN 2523-6776. Responsables de la última actualización de este número de la Unidad de Informática ECORFAN. ESCAMILLA-BOUCHÁN Imelda, LUNA-SOTO, Vladimir, actualizado al 30 de Septiembre 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 Instituto Nacional de defensa de la competencia y protección de la propiedad intelectual.

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

BRIIIG. 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: Ingeniería Tecnológica

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

Como primer artículo está *Mejoramiento de películas delgadas de CdTe/CdS mediante activación húmeda de CdCl₂ en una atmosfera de aire para aplicaciones en celdas solares* por VALADEZ-RENTERÍA, Ernesto, DE LA TORRE, J., ESPARZA, D. y RIVAS, J. M. con adscripción en la Unidad Académica de Ingeniería Eléctrica, la Universidad Autónoma de Zacatecas, como siguiente artículo esta *Aplicación móvil inteligente para prevención de cáncer de mama* por CUAYA-SIMBRO, Germán, RUÍZ-HERNÁNDEZ, Elías, HERNÁNDEZ-HERNÁNDEZ, Luis Ángel y LIMA-LUNA, Luis Alberto con adscripción en el Instituto Tecnológico Superior del Oriente del Estado de Hidalgo, como siguiente artículo esta *Modelo matemático completo para Robots Seriales* por CAMPOS-CALDERA, Carla, CAMPOS-CALDERA, Carlos, HAYNES, Arely y ALDERETE-ALDERETE, Javier Enrique con adscripción en el Tecnológico Nacional de México y el Instituto Tecnológico de Parral, como siguiente artículo esta *Sistema de detección de incendios basado en visión artificial* por CUAYA-SIMBRO, Germán, GUTIERREZ-FRAGOSO, Karina, JIMÉNEZ-MEDINA, Eduardo y SALDIVAR-DELGADILLO, Edgar con adscripción en el Instituto Tecnológico Superior del Oriente del Estado de Hidalgo, como siguiente artículo está *Modelado de convertidores de electrónica de potencia basado en funciones continuas: Aplicación en el STATCOM* por CONTRERAS-AGUILAR, Luis, VENEGAS-TRUJILLO, Tiberio, ARROYO-LEDESMA, Jaime y CONCHA-SÁNCHEZ, Antonio con adscripción en la Universidad de Colima, como siguiente artículo está *Determinación experimental In Situ de la difusividad aparente del suelo por desfase de onda térmica* por SILVA-AGUILAR, Oscar Fernando, ANDAVERDE-ARREDONDO, Jorge Alberto, BENÍTEZ-FUNDORA, Artemio Jesús y ESCOBEDO-TRUJILLO, Beatris Adriana, con adscripción en la Universidad Nacional Autónoma De México, y la Universidad Veracruzana, como siguiente artículo está *Factibilidad técnica económica de colectores solares para temperatura media-baja disponibles en México* por NAJERA-TREJO, Mario, MARTÍN-DOMÍNGUEZ, Ignacio, ESCOBEDO-BRETADO, Jorge y PINEDO-DÍAZ, Jesús, con adscripción en el Centro de Investigación en Materiales Avanzados, y el Instituto Tecnológico de Durango.

Contenido

Artículo	Página
Mejoramiento de películas delgadas de CdTe/CdS mediante activación húmeda de CdCl₂ en una atmosfera de aire para aplicaciones en celdas solares VALADEZ-RENTERÍA, Ernesto, DE LA TORRE, J., ESPARZA, D. y RIVAS, J. M.	1-8
Aplicación móvil inteligente para prevención de cáncer de mama CUAYA-SIMBRO, Germán, RUÍZ-HERNÁNDEZ, Elías, HERNÁNDEZ-HERNÁNDEZ, Luis Ángel y LIMA-LUNA, Luis Alberto	9-17
Modelo matemático completo para Robots Seriales CAMPOS-CALDERA, Carla, CAMPOS-CALDERA, Carlos, HAYNES, Arely y ALDERETE-ALDERETE, Javier Enrique	18-26
Sistema de detección de incendios basado en visión artificial CUAYA-SIMBRO, Germán, GUTIERREZ-FRAGOSO, Karina, JIMÉNEZ-MEDINA, Eduardo y SALDIVAR-DELGADILLO, Edgar	27-37
Modelado de convertidores de electrónica de potencia basado en funciones continuas: Aplicación en el STATCOM CONTRERAS-AGUILAR, Luis, VENEGAS-TRUJILLO, Tiberio, ARROYO-LEDESMA, Jaime y CONCHA-SÁNCHEZ, Antonio	38-45
Determinación experimental In Situ de la difusividad aparente del suelo por desfase de onda térmica SILVA-AGUILAR, Oscar Fernando, ANDAVERDE-ARREDONDO, Jorge Alberto, BENÍTEZ-FUNDORA, Artemio Jesús y ESCOBEDO-TRUJILLO, Beatris Adriana	46-57
Factibilidad técnica económica de colectores solares para temperatura media-baja disponibles en México NAJERA-TREJO, Mario, MARTÍN-DOMÍNGUEZ, Ignacio, ESCOBEDO-BRETADO, Jorge y PINEDO-DÍAZ, Jesús	58-63

Instrucciones para Autores

Formato de Originalidad

Formato de Autorización

Mejoramiento de películas delgadas de CdTe/CdS mediante activación húmeda de CdCl₂ en una atmosfera de aire para aplicaciones en celdas solares

VALADEZ-RENTERÍA, Ernesto†*, DE LA TORRE, J., ESPARZA, D. y RIVAS, J. M.

Unidad Académica de Ingeniería Eléctrica (UAIE)

Universidad Autónoma de Zacatecas. Av. Ramón López Velarde #801, Zacatecas, C.P. 98000, Mexico.

Recibido 3 de Julio, 2017; Aceptado 8 de Septiembre, 2017

Resumen

Las celdas solares basadas en CdTe/CdS están entre los dispositivos fotovoltaicos más prometedores por su alto valor teórico de conversión de energía de 29%. Problemas comunes asociados con películas delgadas policristalinas de CdTe/CdS son la porosidad y superficies no uniformes. Estos defectos facilitan el proceso de recombinación de portadores de carga y reducen la eficiencia de conversión. En este trabajo se deposita una película de CdS mediante el método de baño químico (CBD) sobre un sustrato de vidrio con óxido de estaño dopado con flúor (FTO). La película de CdS se activa usando CdCl₂ diluido en metanol dentro de un horno a cierta temperatura y en una atmosfera de aire. El objetivo es reducir las imperfecciones de la película y lograr una superficie homogénea. La película de CdTe se deposita mediante la técnica de sublimación en espacio cercano (CSS) y es sometida a activación con CdCl₂. Para encontrar los valores óptimos de activación se varían las concentraciones de CdCl₂, el tiempo de inmersión, la temperatura de recocido y el tiempo de recocido. Se evalúan las películas y la eficiencia alcanzada en función del proceso de activación. Las películas sometidas a este proceso muestran un aumento en la eficiencia de conversión.

CdTe, CdS, películas delgadas, CBD, CSS

Abstract

Solar cells based on CdTe/CdS thin films are some of the most promising photovoltaic devices due to their high theoretical conversion value of 29%. Typical problems associated with CdTe/CdS polycrystalline thin films are porosity, and non-uniform surfaces and interfaces. These defects facilitate the recombination of charge carriers decreasing the conversion efficiency. In this work, a CdS thin film is deposited by the chemical bath method (CBD) over a glass substrate with a thin layer of fluor-doped tin oxide (FTO). The CdS thin film is activated using CdCl₂ diluted in methanol inside a furnace at a certain temperature and in an air atmosphere. The objective of the activation process is to reduce the structural defects of the film and achieve a homogeneous surface. The CdTe film is deposited using the close space sublimation technique (CSS) and is activated using CdCl₂. To find the optimum values of the activation process, the concentrations of CdCl₂, the immersion time, the annealing temperature and annealing time are varied. The thin films and the conversion efficiency are evaluated as a function of the activation process. After activation, the thin films indicate an increase in conversion efficiency.

CdTe, CdS, thin films, CBD, CSS

Citación: VALADEZ-RENTERÍA, Ernesto, DE LA TORRE, J., ESPARZA, D. y RIVAS, J. M.. Mejoramiento de películas delgadas de CdTe/CdS mediante activación húmeda de CdCl₂ en una atmosfera de aire para aplicaciones en celdas solares. Revista de Ingeniería Tecnológica 2017. 1-3:1-8

*Correspondencia al Autor (Correo Electrónico: 35162148@uaz.edu.mx)

† Investigador contribuyendo como primer autor.

Introducción

El telurio de cadmio (CdTe) es uno de los materiales fotovoltaicos más prometedores por tener una brecha energética directa de 1.45 eV a temperatura ambiente, esta característica es muy cercana al valor ideal de fotoconversión de energía, por este motivo alcanza un valor teórico de conversión de energía de casi un 29% en estos dispositivos, ("CdTe Technology First Solar", 2017), (Peter, 2011). Comunmente se utiliza el CdS como material tipo n, mientras que el CdTe se utiliza como material tipo p, fabricando dispositivos P-N, este tipo de celdas son llamadas celdas solares de CdS/CdTe. Las celdas solares CdS/CdTe se crean sobre un vidrio convencional que sirve de sustrato o soporte, luego lleva una capa de un óxido transparente conductor (TCO), una película delgada de CdS seguidas de la película delgada de CdTe y finalmente se deposita el contacto metálico. La película delgada debe someterse a un proceso de activación con CdCl₂. Estudios demuestran que reduce los defectos superficiales presentes tanto en película de CdS como en la de CdTe y de esta forma se reducen los procesos de recombinación aumentando la eficiencia energética de los dispositivos (Abbas, et al., 2013) (Drost, et al., 2015) (Flores-Marquez, et al., 2015) (Li, et al., 2014) (Takamoto et al., 1997).

La película de CdS puede ser creada por diferentes técnicas como lo son spray pyrolysis, el método SILAR (Esparza, et al., 2015), sputtering, deposición por baño químico (CBD) (Pushpalatha, Bellappa & Genesha, 2015) entre otros más. El método de CBD es sencillo de realizar y puede reproducirse de manera industrial dándole una ventaja sobre otras técnicas.

Por otra parte, para las películas delgadas de CdTe existen diferentes técnicas como deposición física de vapor (PVD), Pulverización catódica o magnetron sputtering (Compaan, Gupta, Lee, Wang & Drayton, 2004)(Melo, Hernández, Alcantára & Oseguera, 2016), spray pyrolysis (Boone, Van Doren & Berry, 1982)(Reynoso, Alonso, Trujillo & Cazarez, 2016), electrodeposición (Abdul-Manaf, Salim, Madugu, Olusola & Dharmadasa, 2015), procesos autocatalíticos (Sosa & Pérez, 2016) y sublimación en espacio cercano (CSS) (Schaffner, et al., 2011), está última con la ventaja de ser sencilla de realizar.

En este trabajo se analizó el efecto de activación de las diferentes películas depositadas, mostrando una mejora en el tamaño de grano, para ello se estudiaron diferentes configuraciones, utilizando el CdCl₂ como material que produce el proceso de activación.

Sección Experimental

Para realizar el análisis se crearon las siguientes configuraciones:

M1.-Sustrato/TCO/CdS/CdTe/Cu.

M2.-Sustrato/TCO/CdS/CdTe/CdCl₂/Cu.

M3.Sustrato/TCO/CdS/CdCl₂/CdTe/CdCl₂/Cu.

Para cada una de las celdas de CdTe/CdS se utilizaron vidrios con FTO de 25 mm x 25 mm x 2.2 mm de la marca Sigma - Aldrich con una resistividad aproximada de 7 Ω/sq como sustrato.

Antes de depositar sobre las muestras, éstas fueron lavadas con jabón comercial, luego se enjuagaron con agua desionizada dentro de un baño ultrasónico durante 10 minutos, posteriormente las muestras fueron sometidas nuevamente a un baño ultrasónico dentro de una solución compuesta por alcohol isopropílico y acetona durante un lapso de 10 minutos, al cabo de este tiempo se dejaron secar a temperatura ambiente.

La película delgada de CdS es creada mediante la técnica de deposición por baño químico (CBD). Los reactivos usados en el baño químico son sulfato de cadmio (CdSO_4) 1M disuelto en 2.5 mL de agua desionizada como fuente de cadmio, hidróxido de amonio (NH_4OH) 10M y tiourea ($\text{CS}(\text{NH}_2)_2$) 1M disuelto en 10 mL de agua desionizada como fuente de azufre. El baño químico se llevó a cabo vertiendo sulfato de cadmio dentro de un vaso de precipitados y lentamente se agregó hidróxido de amonio, la mezcla se homogenizó para después añadir tiourea y nuevamente homogenizar la solución. Después las muestras fueron colocadas de manera vertical dentro del vaso de precipitados, hecho esto la solución se calentó a 80°C durante una hora, tiempo en el que se formó la película de CdS. Luego de este lapso de tiempo las muestras se extrajeron del vaso de precipitados y fueron lavadas con agua desionizada con la finalidad de quitar residuos procedentes del baño químico.

La película de CdTe es depositada mediante la técnica de sublimación en espacio cercano (CSS), utilizando un reactor basado en la patente de los EUA No. 5, 304, 499 (Bonnet, et al, 1994) (ver la Figura 1). Las muestras fueron colocadas dentro de dos placas de grafito, una de ellas contiene una fuente sólida de CdTe y la otra sirve como tapa. Entre la fuente de CdTe y el sustrato se colocan unos separadores de cuarzo de 1 mm de espesor.

Las placas de grafito se introducen dentro de un reactor de cuarzo que es sellado a una presión de vacío cuyo rango va de 10 mTorr a 80 mTorr y sometidas a temperaturas que van de los 520°C a los 600°C aproximadamente. Las muestras se dejaron bajo estas condiciones durante un periodo de tiempo de 10 minutos en el cual se forma la película de CdTe.

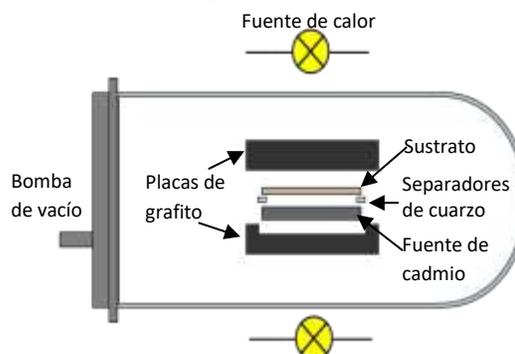


Figura 1 Esquema general del reactor de CSS

Fuente: Elaboración propia

La activación con CdCl_2 consiste en sumergir la muestra en una solución saturada de CdCl_2 disuelto en metanol durante un determinado periodo de tiempo a temperatura ambiente (Maniscalco, et al., 2015) luego de este lapso se saca la muestra de la solución y es introducida en un horno que contiene aire caliente a 300°C donde permanecen un lapso de tiempo y después las muestras son retiradas. Para la activación la concentración del CdCl_2 , el tiempo de inmersión dentro de la solución y el tiempo dentro del horno se fueron variando hasta encontrar los valores óptimos de la activación.

En la Figura 2 se muestran las posibles configuraciones utilizando la activación de las diferentes películas de la celda solar.

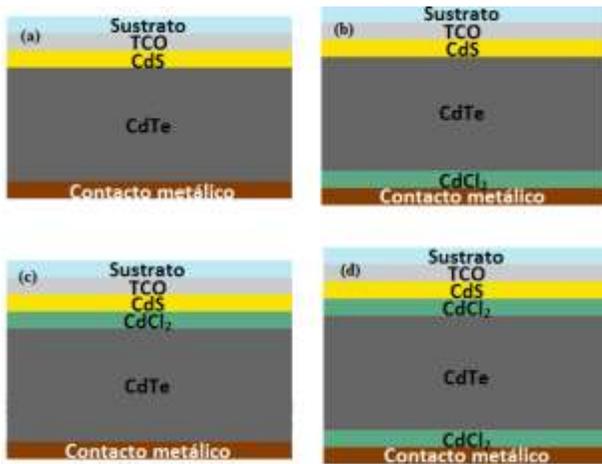


Figura 2 (a) Configuración de celda sin activación,(b) Configuración de celda con activación normal, (c) Configuración de celda con activación solo en capa de CdS,(d) configuración de celda con activación en las películas de CdS y CdTe.

Fuente: Elaboración propia

Estructura Cristalina de CdS y CdTe

El diseño y fabricación de una celda solar se debe basar directamente en las propiedades optoelectrónicas de cada material utilizado. Es necesario hacer un estudio directo de la estructura cristalina de cada material, para esto se utilizó el software Material Studio 4.4. Se crearon las estructuras cristalinas de CdTe y de CdS, en ambos casos se utilizó la estructura cúbica del tipo zinc blende correspondiente al grupo espacial F-43m, Figuras 3 y 4. Se tomaron en cuenta las constantes de red de 6.483 Å y 5.832 Å, para el CdTe y el CdS respectivamente.

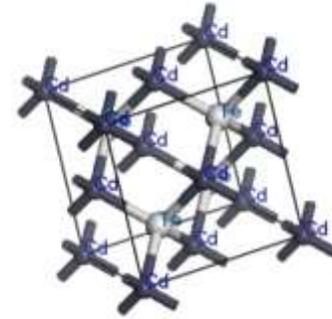


Figura 3 Estructura cristalina de CdTe con Te en el interior de la red

Fuente: Elaboración propia

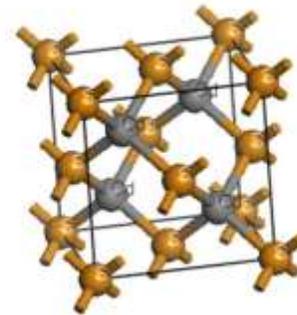


Figura 4 Estructura cristalina de CdS con el Cd en interior de la red

Fuente: Elaboración propia

Se simuló la estructura de bandas de ambos compuestos utilizando el método LDA (Song, Zhang, Hu & Fu, 2009) incluido en el modulo CASTEP, se obtuvieron gráficas donde se aprecia que ambos compuestos tienen bandas directas y se obtuvieron brechas energéticas de 1.457 eV en el caso de CdTe y de 2.417 eV para CdS valores muy cercanos a los 1.44 eV y 2.5 eV reportados en la literatura, (Nelson, 2003), (Ohring, 2002).

Difracción de Rayos X

Experimentalmente la forma de obtener la estructura cristalina de los materiales utilizados es por medio de la difracción de rayos X (XRD). En la Figura 5 se muestran los espectros de XRD de las configuraciones *M1*, *M2* y *M3*. Los resultados muestran los picos característicos de CdTe con estructura cristalina tipo cúbica de diamante con una orientación preferencial en los planos (111), (220) y (311). Los picos característicos de CdS observados corresponden a la estructura cristalina cúbica con orientaciones preferenciales hacia los planos (100), (002), (101) y (112). Asimismo, en las muestras *M1* y *M2* se encontró un pico característico correspondiente al FTO, además de encontrar picos que pueden ser relacionados a impurezas dentro de las muestras.

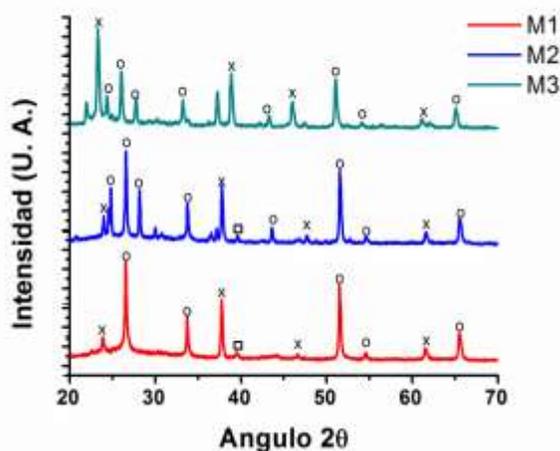


Figura 5 Difracción de rayos X de las muestras *M1*, *M2* y *M3*, donde la **X** indica los picos característicos del CdTe, el **O** indica los picos característicos del CdS y el **□** corresponde al FTO

Fuente: *Elaboración propia*

Utilizando la ecuación de Scherrer se determinó el tamaño de grano de las películas de CdS de cada una de las muestras.

$$D = \frac{0.94\lambda}{\beta \cos\theta} \quad (1)$$

Donde **D** es el tamaño de grano, λ es la longitud de onda con la que se hicieron las mediciones, β que es el valor del ancho de pico a altura media en radianes y θ es el ángulo en el que se encuentra el pico.

Para las muestras *M1* y *M2* los granos de CdS tienen un tamaño promedio que va de 20 nm hasta los 70 nm, además se observó un incremento en el tamaño de grano en la muestra *M2*. El tamaño de grano de la muestra *M3* tiene un tamaño de grano promedio de 50 nm según los cálculos realizados.

Esto nos indica el depósito de CdS y de CdTe, además que el proceso de activación promueve el crecimiento de grano, este proceso ayuda a evitar procesos de recombinación en las películas delgadas.

Caracterización electroquímica

Por medio de un potenciostato (Gamry potentiostat (reference 600)) se realizó el estudio de las curvas características de una celda solar. Las muestras fueron iluminadas con un simulador solar Oriel Sol 3A. La intensidad de iluminación fue ajustada empleando un calibrador de la marca NREL a una intensidad de 100 mW cm^{-2} .

La Figura 6, muestra el comportamiento del dispositivo cuando se encuentra sin luz y cuando se ilumina a 100 mW cm^{-2} , como se puede observar existe una sensibilidad a la luz, obteniendo 0.3 mA/cm^2 al estar irradiado, esta curva nos muestra que el dispositivo genera fotocorriente al estar expuesto a iluminación.

En el inset se muestra el dispositivo fabricado con cada una de las películas delgadas depositadas: CdS, CdTe y el contacto metálico de cobre; todo el depósito se realizó sobre FTO, figura de la izquierda. A la derecha se muestra la parte posterior del dispositivo.

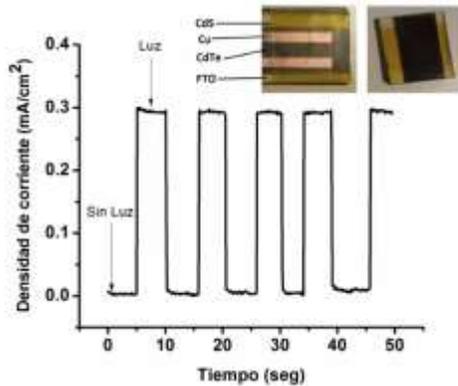


Figura 6 Curva de densidad de corriente con respecto al tiempo, con el dispositivo bajo iluminación y sin iluminación

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 7 se muestra la respuesta del voltaje producido por la celda en función del tiempo cuando el dispositivo se encuentra bajo iluminación y en obscuridad total, el dispositivo mostro un voltaje de 80 mV cuando se encuentra bajo iluminación, este voltaje es producido principalmente por la corriente fotogenerada en la celda solar.

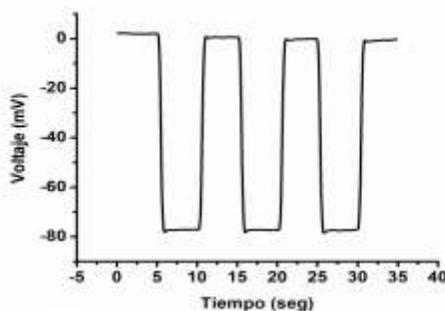


Figura 7 Curva de voltaje con respecto al tiempo, con el dispositivo bajo iluminación y sin iluminación.

Fuente: Elaboración propia

Agradecimientos

Este trabajo fue apoyado por una beca en el Programa Nacional de Posgrados de Calidad, CONACyT (E. V. R.) y por el programa para el desarrollo profesional docente del nivel superior (Prodep) número de proyecto F-PROMEP-38/Rev-04 SEP-23-005 (D. E. S.)

Conclusiones

Se logro mostrar el depósito efectivo de CdS y de CdTe, los cuales presentan estructura cúbica. Por medio de activación húmeda con CdCl₂ se logró aumentar el tamaño de grano de las películas delgadas de CdS y CdTe. Este proceso ayuda a homogenizar el depósito de cada película y disminuye la cantidad de defectos superficiales presentes en el crecimiento de cada película. Sin embargo, este proceso no es suficiente para corregir todas las imperfecciones de las películas delgadas, uno de los principales problemas en este tipo de dispositivos es la ingeniería de la celda. Al analizar las muestras mediante las curvas de I-V no se obtuvieron resultados satisfactorios, principalmente por problemas relacionados a corto circuitos, obteniendo densidades de corriente y voltaje muy bajos. Los cortos circuitos se dan principalmente por no contar con depósitos de películas uniformes, es decir que presenta porosidades. Estas porosidades están presentes en cada película depositada, de tal forma que al depositar el contacto metálico, éste está en contacto con el FTO, impidiendo el flujo de electrones. Las porosidades permiten la difusión del metal hasta hacer contacto con la película de FTO que sirve también como contacto creando micro cortos que atrapan a los portadores generados por la luz absorbida.

Referencias

- Abbas, A., West, G. D., Bowers, J. W., Isherwood, P., Kaminski, P. M., Maniscalco, B., ... & Barth, K. L. (2013). The effect of cadmium chloride treatment on close-spaced sublimated cadmium telluride thin-film solar cells. *IEEE Journal of Photovoltaics*, 3 (4), 1361-1366.
- Abdul-Manaf, N. A., Salim, H. I., Madugu, M. L., Olusola, O. I., & Dharmadasa, I. M. (2015). Electro-Plating and Characterisation of CdTe Thin Films Using CdCl₂ as the Cadmium Source. *Energies*, 8 (10), 10883-10903.
- Boone, J. L., Van Doren, T. P., & Berry, A. K. (1982). Deposition of CdTe by spray pyrolysis. *Thin Solid Films*, 87 (3), 259-264.
- CdTe Technology | First Solar. (2017). Aguacalientesolarproject.com. Retrieved 26 July 2017, from <http://www.aguacalientesolarproject.com/en/Technologies-and-Capabilities/PV-Modules/First-Solar-Series-4-Modules/CdTe-Technology>
- Compaan, A. D., Gupta, A., Lee, S., Wang, S., & Drayton, J. (2004). High efficiency, magnetron sputtered CdS/CdTe solar cells. *Solar Energy*, 77 (6), 815-822.
- D. Bonnet, B. Henriches, K. Jager, H. Richter, (1994). Petente de los EUA No. 5,304,499; Abril 1994.
- Drost, C., Siepchen, B., Krishnakumar, V., Späth, B., Kraft, C., Modes, T., & Zywitzki, O. (2015). Activation of CdTe-based thin films with zinc chloride and tetrachlorozincates. *Thin Solid Films*, 582, 100-104.
- Esparza, D., Zarazúa, I., López-Luke, T., Cerdán-Pasarán, A., Sánchez-Solís, A., Torres-Castro, A.,... & De la Rosa, E. (2015). Effect of different sensitization technique on the photoconversion efficiency of CdS quantum dot and CdSe quantum rod sensitized TiO₂ solar cells. *The Journal of Physical Chemistry C*, 119 (24), 13394- 13403.
- Flores-Marquez, J. M., Albor-Aguilera, M. L., Matsumoto-Kuwabara, Y., Gonzalez-Trujillo, M. A., Hernandez-Vasquez, C., Mendoza-Perez, R.,... & Tufiño-Velazquez, M. (2015). Improving CdS/CdTe thin film solar cell efficiency by optimizing the physical properties of CdS with the application of thermal and chemical treatments. *Thin Solid Films*, 582, 124-127.
- Krishnakumar, V., Han, J., Klein, A., & Jaegermann, W. (2011). CdTe thin film solar cells with reduced CdS film thickness. *Thin Solid Films*, 519 (21), 7138-7141.
- Li, C., Wu, Y., Poplawsky, J., Pennycook, T. J., Paudel, N., Yin, W. ... & Pennycook, S. J. (2014). Grain-boundary-enhanced carrier collection in CdTe solar cells. *Physical review letters*, 112 (15), 156103.
- Maniscalco, B., Abbas, A., Bowers, J. W., Kaminski, P. M., Bass, K., West, G., & Walls, J. M. (2015). The activation of thin film CdTe solar cells using alternative chlorine containing compounds. *Thin Solid Films*, 582, 115-119.
- MELO-MÁXIMO, Dulce Viridiana, HERNÁNDEZ-GONZÁLEZ, María de Jesús, ALCÁNTARA, Juan Alberto y OSEGUERA, Joaquin. Recubrimientos protectores en atmosferas corrosivas. *Revista de Aplicación Científica y Técnica* 2016, 2-4: 41-44.
- Nelson, J. (2003). *The physics of solar cells*. World Scientific Publishing Co. Inc.

Ohring, M. (2002). *Materials science of thin films*. Academic press.

Peter, L. (2011). Towards sustainable photovoltaics: the search for new materials. *Philosophical Transactions of The Royal Society A: Mathematical, Physical And Engineering Sciences*, 369(1942), 1840-1856. <http://dx.doi.org/10.1098/rsta.2010.0348>

Pushpalatha, H. L., Bellappa, S., & Ganesha, R. (2015). Structural and optical properties of CdS thin film obtained by chemical bath deposition and effect of annealing. *Indian Journal of Pure & Applied Physics (IJPAP)*, 52 (8), 545-549.

REYNOSO-SOTO, Edgar, ALONSO-PÉREZ, Jorge, TRUJILLO-NAVARRETE, Balter y CAZAREZ-CASTRO, Nohé. Automatización en la deposición de películas delgadas de nanomateriales para la posible utilización en celdas solares. *Revista de Tecnología e Innovación* 2016, 3-7: 51-59.

Schaffner, J., Motzko, M., Tueschen, A., Swirschuk, A., Schimper, H. J., Klein, A. ... & Jaegermann, W. (2011). 12% efficient CdTe/CdS thin film solar cells deposited by low-temperature close space sublimation. *Journal of Applied Physics*, 110 (6), 064508.

Song, J., Zhang, H., Hu, H., & Fu, Q. (2009). Calculation of band structure in (101)-biaxially strained Si. *Science in China Series G: Physics, Mechanics and Astronomy*, 52 (4), 546-550.

SOSA-DOMÍNGUEZ, Adrián y PÉREZ-BUENO, José de Jesús. Recubrimientos Ni-P negros de doble capa con capacidad absorbente solar. *Revista de Tecnología e Innovación* 2016, 3-8: 50-55

Takamoto, T.; Agui, T.; Kurita, H.; Ohmori, M. (1997). Improved junction formation procedure for low temperature deposited CdS/CdTe solar cells. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, 49, 219-225.

Aplicación móvil inteligente para prevención de cáncer de mama

CUAYA-SIMBRO, Germán†*, RUÍZ-HERNÁNDEZ, Elías, HERNÁNDEZ-HERNÁNDEZ, Luis Ángel y LIMA-LUNA, Luis Alberto

Instituto Tecnológico Superior del Oriente del Estado de Hidalgo. Carretera Apan-Tepeapulco Km 3.5, Col Las Peñitas, Apan, Hidalgo, México

Recibido 3 de Julio, 2017; Aceptado 19 de Septiembre, 2017

Resumen

De acuerdo al Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) el total de casos de cáncer diagnosticados en la población mexicana de 20 años es el cáncer de mama. Una de las principales razones por la cual no se detecta a tiempo el cáncer de mama es por no tener herramientas de prevención al alcance de la población afectada. Esta clínicamente comprobado que la detección temprana de cáncer de mama ayuda a tener una mayor probabilidad de supervivencia. Una medida alternativa de detección temprana de cáncer de mama es la autoexploración, por lo que es importante fomentar este hábito para evitar las consecuencias de una detección tardía de la enfermedad. El objetivo de este trabajo es presentar los avances en el desarrollo de una aplicación móvil inteligente la cual apoye en la detección temprana de riesgo de padecer cáncer de mama, la aplicación estará basada en la captura de datos temporales y en el análisis de dicha información mediante técnicas de minería de datos, los datos capturados serán los resultados de una autoexploración de una persona

Prevención, aplicación móvil, minería de datos

Abstract

According to the National Institute of Statistics and Geography (INEGI), the total number of cancer cases diagnosed in the Mexican population of 20 years or more is the breast cancer. One of the main reasons to breast cancer is not detected early is because it doesn't have prevention tools available to the affected population. Clinically has been proved that the early detection of breast cancer helps to have a greater chance of survival. An alternative action to early detection of breast cancer is self-examination, so it is important to encourage this habit to be able to take preventive measures and avoid consequences of a late detection of the disease. Thus, the objective of this work is to present the progress of the development of an intelligent mobile application which supports the early detection of risk of breast cancer, the application will be based on the capture of temporal data and the analysis of such information by data mining techniques, the data will be captured from the results of a self-exploration of a person.

Prevention, mobile application, data mining

Citación: CUAYA-SIMBRO, Germán, RUÍZ-HERNÁNDEZ, Elías, HERNÁNDEZ-HERNÁNDEZ, Luis Ángel y LIMA-LUNA, Luis Alberto. Aplicación móvil inteligente para prevención de cáncer de mama. Revista de Ingeniería Tecnológica 2017. 1-3:9-17

*Correspondencia al Autor (Correo Electrónico: gcuaya@itesa.edu.mx)

† Investigador contribuyendo como primer autor.

Introducción

De acuerdo al Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), en 2014, del total de casos de cáncer diagnosticados en la población mexicana de 20 años, el de mama es el de mayor presencia con un 19.4%. A nivel mundial se detectan 1.38 millones de casos nuevos de cáncer de mama y hay 458,000 muertes siendo este el tipo de cáncer con mayor incidencia entre las mujeres. (INEGI, 2017)

Actualmente se conocen distintos exámenes para la determinación de cáncer de mama cómo lo son, estudios de mastografía, exámenes clínicos de la mama (ECM), imágenes por resonancia magnética (IRM). Estos estudios se realizan de manera esporádica y generalmente bajo las instrucciones de algún médico y tienen la finalidad de confirmar el diagnóstico del especialista, esto es, los estudios no son realizados con fines de prevención. La prevención en este tipo de enfermedades es importante debido a que, si el cáncer es detectado tarde se convertirá en un problema muy grave, además de que puede conllevar problemas mayores y la posibilidad de sobrevivir se reduce, cuando el tejido anormal o el cáncer se detectan a tiempo, puede ser más fácil tratarlo.

Una alternativa para tener un diagnóstico preventivo y así evitar las consecuencias de una detección tardía de cáncer de mama, es la autoexploración periódica, debido a que se ha confirmado que este tipo de estudios personalizados ayudan a detectar de manera temprana la posibilidad de padecer este tipo de cáncer. Desafortunadamente no se cuenta con la cultura suficiente para llevar periódicamente este tipo de exámenes y aún más guardar la información adquirida en cada uno de ellos, para que a partir del análisis de estos datos se pueda determinar el riesgo de padecer esta enfermedad. (American Cancer Society, 2015)

Por lo que el objetivo de este trabajo de investigación es presentar los resultados obtenidos hasta el momento los cuales consisten en el desarrollo de una aplicación móvil en android y el análisis de bases de datos de cáncer de mama mediante algoritmos de minería de datos, lo cual permitiera el desarrollo de una aplicación móvil inteligente que permitirá fomentar la cultura de autoexploración, además, de permitir detectar cambios que impliquen el riesgo de padecer cáncer de mama y mandar una alerta al usuario para que tome acciones de corroboración de dicha enfermedad. Esta aplicación será de fácil adquisición y manejo aprovechando la tendencia en el uso de aplicaciones móviles.

Este artículo consta de las siguientes secciones; Trabajos Relacionados, donde se contrastan los trabajos similares al nuestro; Métodos, donde se describen las técnicas y métodos utilizados para realizar esta investigación; Experimentos, donde se redacta información relacionada al diseño de las pruebas para nuestra investigación; Resultados, en esta sección se presentan y analizan los resultados de los experimentos realizados; Conclusiones y Trabajo Futuro, donde se presentan las conclusiones derivadas de esta investigación, así como las perspectivas a desarrollar.

Trabajos relacionados

Existen trabajos reportados de investigaciones en cuanto a cáncer de mama y su detección temprana, entre los primeros podemos citar a los trabajos con un enfoque médico, los cuales están basados en el análisis de como la nutrición, el estilo de vida y la interacción con el ambiente ayuda en la prevención de este tipo de cáncer, como se muestra en (Howell, y otros, 2014), (Key, y otros, 2004).

Por otro lado, desde el área de sistemas computacionales se han realizado diversos estudios en los cuales se aplican técnicas de minería de datos, las cuales permiten realizar la evaluación de diferentes modelos de prevención y diagnóstico de cáncer de mama; estos trabajos reportan el uso de bases de datos con información de pacientes con cáncer de mama y muestran la efectividad de los modelos para detectar o determinar si un paciente tiene riesgo de padecer este tipo de cáncer, como los trabajos (Liou, 2016), (Asri, 2016).

Desafortunadamente, estos estudios solo reportan los resultados crudos de la investigación, pero no se desarrolla algún tipo de sistema el cuál permita hacer uso de dichos resultados, como pudiera ser la construcción de una aplicación móvil.

Por otro lado, en la actualidad los teléfonos móviles o teléfonos inteligentes (Smartphones) son una alternativa viable para poner al alcance nuevas tecnologías o herramientas de apoyo en la detección temprana de cáncer. Se han reportado trabajos en donde se han desarrollado aplicaciones móviles relacionadas al cáncer de mama, por ejemplo: “My cancer coach” (BreastCancer.org, 2017), ayuda a administrar la rutina diaria de gente con cáncer basada en el diagnóstico determinado por el médico, así como el tratamiento a seguir, esta aplicación está basada en grabaciones de audio, calendario, toma de notas y preguntas y respuestas al médico.

Pero esta aplicación, está orientada a la población estadounidense y es completamente desarrollada en inglés, además no permite hacer prevención de cáncer como la que proponemos en nuestro trabajo; “B4BC” (Black Sun Production, 2016), una aplicación orientada principalmente a la comunidad deportiva, la cual permite configurar recordatorios para autoexámenes e incluso puede programar dichos autoexámenes de acuerdo al ciclo menstrual del usuario, esta aplicación ofrece instrucciones sobre cómo realizar un autoexamen, tips médicos para prevención del cáncer, recetas y consejos para llevar una vida saludable para mujeres activas, pero de igual forma esta aplicación está orientada a la población estadounidense y está completamente en inglés, además no realiza un análisis para prevención de acuerdo a cambios registrados en los autoexámenes realizados; “Breast Cancer: Beyond the Shock” (National Breast Cancer Foundation, 2017), esta aplicación proporciona diversa información relacionada al cáncer de mama, puede aprender, preguntar y escuchar, esto es, permite ver video los cuales te enseñan los diferentes tipos de tumores y tratamientos, además de presentar historias de mujeres en la vida real quienes padecen o padecieron este tipo de cáncer, pero básicamente es una aplicación informativa, y de igual forma que las otras dos aplicaciones mencionadas, está desarrollada en inglés para la población estadounidense. Cabe señalar que existen otras aplicaciones similares pero la mayoría están desarrolladas en inglés.

Adicionalmente, en el Centro de Investigación y de Estudios Avanzados (CINVESTAV) creó un software para detectar cáncer de mama. – que principalmente consiste en ayudar en el entrenamiento de radiólogos, así como dar certeza al emitir diagnósticos y evitar las biopsias innecesarias.

El sistema se basa en un software al que previamente “se le entrenó” con un banco de imágenes representativas de cientos de casos de cáncer (Ramírez-Reyes, 2013).

Por otro lado, los estudiantes del Instituto Tecnológico de Colima (ITEC) diseñaron un sostén para detectar este tipo de cáncer de mama de fácil funcionamiento para poder ser utilizado en casa. Sirve para medir la temperatura de los senos y con ello, detectar las condiciones iniciales del cáncer, cuando se va a implantar un tumor, ya que los senos sufren cambio en su patrón termográfico (Ramírez, 2016).

También, existe una aplicación móvil para avisar que se debe hacer la auto exploración una semana después del periodo menstrual de la mujer, en caso de ser mujeres mayores podrán programar el día del recordatorio. Otra de sus características es que enseña paso a paso como realizarse la autoexploración ya sea en imágenes o en un vídeo.

En contraste con la aplicación móvil que se esta desarrollando, ésta tendrá la función de dar recordatorio al usuario sobre el día que debe realizar una autoexploración, al final de esta, el usuario tendrá que llenar un formulario predefinido con datos obtenidos durante la autoexploración, esta acción será realizada mensualmente, la aplicación analizará automáticamente los datos obtenidos para así, determinar si existió algún cambio y con base en ello, dar una alerta al usuario para realizarse algún estudio más detallado propiciando la prevención de la ocurrencia de cáncer.

Métodos

Minería de datos

La definición para ésta puede variar dependiendo su uso y al autor, pero en resumen minería de datos es la extracción de conocimiento a partir de la información almacenada en una base de datos. (Valiente, 2015).

Para realizar minería de datos se han desarrollado diferentes técnicas que permiten a los científicos la clasificación de la información y con los resultados formular alguna hipótesis. Estas técnicas se dividen en dos tipos:

El método descriptivo: Tiene como objetivo la búsqueda de patrones interpretables para describir datos.

El método predictivo: Este utiliza algunas variables para la predicción de valores futuros o desconocidos de otras variables. Estas variables pueden ser de clasificación, regresión y detección de la desviación. Esta técnica a funcionado de manera exitosa en el ámbito de la medicina.

En nuestro caso específico, para el análisis de datos se utilizaron técnicas de clasificación para fines predictivos. Estas técnicas de clasificación consisten en determinación de clases (etiquetas o valores), asociadas a valores continuos, entre las técnicas podemos mencionar, conjunto de reglas, árbol de decisión, redes neuronales, etc. La clasificación consiste en predecir una determinada clase para un objeto.

Los clasificadores utilizados sobre los datos analizados fueron los siguientes:

Bayes Net: Basado en redes bayesianas las cuales modelan un fenómeno mediante un conjunto de variables y las relaciones de dependencia entre ellas. Dado este modelo, se puede hacer inferencia bayesiana; es decir, estimar la probabilidad posterior de las variables no conocidas, en base a las variables conocidas.

J48: Utiliza el algoritmo C4.5 utilizado para generar un árbol de decisión. En cada nodo del árbol, C4.5 elige un atributo de los datos que más eficazmente dividen el conjunto de muestras en subconjuntos enriquecidos en una clase u otra. El atributo con la mayor ganancia de información normalizada se elige como parámetro de decisión.

Bagging: Ofrece un incremento sobre la precisión de cualquiera de los clasificadores individuales utilizados, especialmente si el modelo está sobre ajustado. La idea básica es re-muestrear los datos y calcular las predicciones sobre el conjunto de datos re-muestreados.

SMO: Este algoritmo está basado en redes neuronales (funcionamiento inspirado en el cerebro humano, de ahí su nombre) cuya característica más importante es su capacidad de aprender a partir de ejemplos, lo cual les permite generalizar sin tener que formalizar el conocimiento adquirido. Se caracterizará por tener un aprendizaje no supervisado competitivo y por no tener ningún resultado objetivo al que la red deba tender.

Weka

Para el procesamiento de los datos utilizamos la herramienta Weka. Weka es una herramienta de software para el aprendizaje automático y minería de datos diseñado a base de Java y desarrollado en la universidad de Waikato en Nueva Zelanda en el año 1993.

Permite realizar minería de datos con una interfaz gráfica para facilitar su utilización. Además, permite una comparación con los distintos métodos que se utilizan para el pre procesamiento, clasificación de información, clustering y meta-aprendizaje, contiene una colección de algoritmos para realizar análisis de datos y modelado predictivo, también tiene herramientas para la visualización de estos datos (Valiente, 2015).

Aplicaciones móviles

Una aplicación móvil es un programa que se puede descargar y al que se puede acceder directamente desde el teléfono o desde algún otro aparato móvil como una Tablet. Para poder descargar una aplicación móvil, es necesario tener acceso a internet. Actualmente ya existen aplicaciones móviles que resuelven diferentes problemas cotidianos en casi todos los sectores.

Es por lo anterior que se considera un área de oportunidad el realizar aplicaciones que puedan ser utilizadas por diferentes sectores sociales y que dichas aplicaciones permitan apoyar en el monitoreo, detección y prevención de diferentes enfermedades, en nuestro caso, prevención de cáncer de mama.

Plataformas

Los dispositivos móviles, al igual que los ordenadores, necesitan sistemas operativos que manejen el hardware y ofrezcan funcionalidades básicas para el software de aplicación. A continuación, se mencionan los sistemas operativos más populares en la actualidad.

iOS: Sistema operativo móvil de la empresa Apple Inc. Originalmente desarrollado para el iPhone (iPhone OS), siendo después usado en dispositivos como el iPod Touch, iPad y el Apple TV. Apple, Inc.

Android: Esta basado en el kernel de Linux diseñado principalmente para dispositivos móviles con pantalla táctil, como teléfonos inteligentes o tabletas, inicialmente desarrollado por Android, Inc. Google respaldó económicamente y más tarde compró esta empresa en 2005.

En nuestro caso, seleccionamos la plataforma Android Studio para el desarrollo de nuestra aplicación debido principalmente a que la mayoría de los dispositivos móviles cuentan con este sistema operativo.

Experimentos

Datos

Los experimentos realizados están basados en el análisis de dos bases de datos con información de cancer de mama, extraídas del repositorio de la Universidad de California en Irvine (UCI). La primera base de datos (DB 1) consta de 569 registros con 31 atributos cada uno, de los cuales, se puede observar si el paciente registrado pose un tumor maligno o benigno. La segunda base de datos (DB 2) contiene 198 registros con 34 atributos, en esta base de datos se puede visualizar la recurrencia o no recurrencia del cáncer de mama en los pacientes de la base de datos 1. Adicionalmente, se construyeron dos bases de datos más a partir de las bases de datos DB 1 y DB 2; la primera base construida (DB 3) contiene todos los registros de ambas bases, DB 1 y DB 2, es decir, contiene 767 registros, cada uno con 32 atributos, donde, para unificar la clase se consideró el atributo de recurrencia equivalente a cáncer maligno y el de no recurrencia equivalente a cáncer benigno. La segunda base construida (DB 4) considera aquellos registros que existen en ambas bases de datos, DB 1 y DB 2, por lo que esta base cuenta con 139 registros con 65 atributos, en donde el atributo que determina la clase es el de recurrencia o no recurrencia.

Weka

Como se ha mencionado se utilizó la herramienta de Weka, en específico, los algoritmos de clasificación, los algoritmos utilizados en nuestra investigación fueron: Bayes Net, J48, Bagging y SMO. Para evaluar la efectividad de clasificación de cada uno de ellos, se utilizó validación cruzada de 10 pliegues y para determinar la efectividad de cada uno de ellos se reportó los valores de precisión y recuerdo. Donde precisión es la probabilidad de padecer la enfermedad si el resultado de la prueba diagnóstica es positivo y el recuerdo es la proporción de enfermos correctamente identificados.

Resultados

Aplicación móvil

Como se ha mencionado, se ha desarrollado hasta el momento una primera versión de la aplicación móvil que permitirá enviar recordatorios para realizar una autoexploración periódicamente, ingresar y almacenar los datos obtenidos de dicha exploración y finalmente, enviar alertas de acuerdo al análisis de los datos para tomar medidas de corroboración como puede ser visitar a un médico o realizarse algún tipo de estudio.

A continuación, se muestran imágenes de la aplicación desarrollada hasta el momento.


Figura 1 Pantalla de inicio de sesión

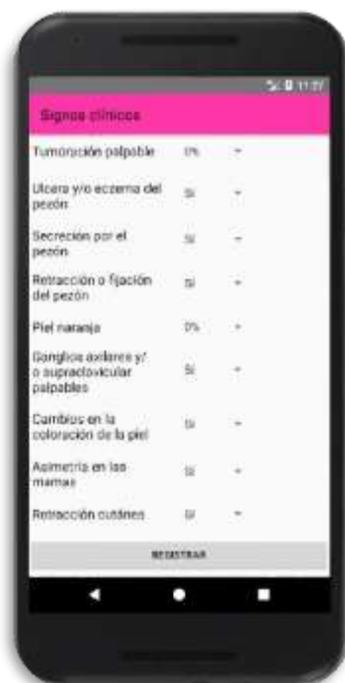
Fuente: Elaboración Propia


Figura 3 Pantalla de configuración de alarma

Fuente: Elaboración Propia


Figura 2 Pantalla de los factores de riesgo

Fuente: Elaboración Propia


Figura 4 Pantalla de signos clínicos del paciente

Fuente: Elaboración Propia

Minería de datos

Como se ha comentado se han probado diversos clasificadores con el propósito de verificar la efectividad de cada uno de ellos y así, determinar la viabilidad de incorporar como motor de inferencia a alguno de ellos a nuestra aplicación móvil. Además de verificar con cuál de las bases de datos utilizadas hasta el momento se obtienen mejores resultados.

Los resultados obtenidos de precisión y recuerdo se muestran en los gráficos 1 y 2 respectivamente.

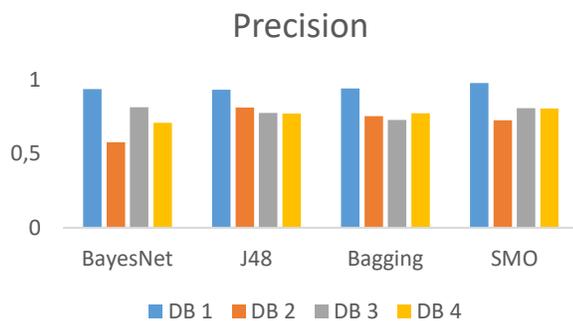


Gráfico 1 Comparación del valor de precisión obtenido por los clasificadores en las diferentes bases de datos

Fuente: *Elaboración Propia*



Gráfico 2 Comparación del valor de recuerdo obtenido por los clasificadores en las diferentes bases de datos

Fuente: *Elaboración Propia*

Conclusiones y trabajo futuro

De acuerdo a los resultados obtenidos, se observa que el uso de la segunda base de datos y de las que fueron construidas en combinación de ambas, no producen mejores resultados, debido, probablemente, a que la segunda base de datos contiene información pertinente a la recurrencia de la enfermedad y no tanto al padecerla por primera vez.

Los resultados indican que cualquiera de los clasificadores probados da una efectividad similar por lo que cualquiera de ellos es viable de ser el motor de inferencia en nuestra aplicación.

Como trabajo futuro se tienen las siguientes actividades; la terminación de la aplicación móvil, en específico el módulo de inferencia, el de almacenamiento de datos y el módulo de recordatorio, por otro lado, se realizará la adquisición de datos reales de exámenes de autoexploración, así como su análisis y procesamiento, también se realizarán pruebas de la aplicación ya terminada con diferentes usuarios para evaluar su eficiencia, y finalmente, con base en los resultados obtenidos y la valoración de la aplicación, se realizará un proceso de mejora de la misma.

Referencias

American Cancer Society. (2015). Breast Cancer Facts & Figures 2015-2016. Atlanta: American Cancer Society.

Asri, H. (2016). Using Machine Learning Algorithms for Breast Cancer Risk Prediction and Diagnosis. *Procedia Computer Science*.

Black Sun Production. (2016). B4BC Boarding 4 Breast Cancer.

BreastCancer.org. (2017). My Cancer Coach. Genomic Health.

Howell, A., Anderson, A., Clarke, R., Duffy, S., Evans, D., Garcia-Closas, M., . . . Harvie, M. (2014). Risk determination and prevention of breast cancer. *Breast Cancer Res.*

INEGI. (2017). Estadística a propósito del día mundial del cáncer de mama.

Key, T., Schatzkin, A., Willet, W., Allen, N., Spencer, E., & Travis, R. (2004). Diet, nutrition and the prevention of cancer. Oxford: The Authors.

Liou, D. (2016). Applying data mining for the analysis of breast cancer data. Taiwan : Yang Ming University.

National Breast Cancer Foundation. (2017). Breast Cancer: Beyond The Shock.

Ramírez, J. A. (2016). Sistema de monitoreo de temperatura de los senos humanos en la detección temprana del cáncer de seno. Colima: ITEC.

Ramírez-Reyes, A. (2013). Investigación y Desarrollo Tecnológico en Mamografía Digital. CINVESTAV.

Valiente, A. B. (2015). Inteligencia en redes de comunicaciones. Diagnóstico cardiología.

Modelo matemático completo para Robots Seriales

CAMPOS-CALDERA, Carla†*, CAMPOS-CALDERA, Carlos, HAYNES, Arely y ALDERETE-ALDERETE, Javier Enrique

*Departamento de Metal Mecánica, Tecnológico Nacional de México
Instituto Tecnológico de Parral*

Recibido 12 de Julio, 2017; Septiembre 8 de Junio, 2017

Resumen

El presente artículo detalla el análisis de un robot serial o manipulador considerando en el mismo dos cadenas cinemáticas de estudio, la primera, en la fase predominante como abierta; mientras que la segunda, en su etapa de manipulación cerrada. Las metodologías empleadas para tal fin se basan en el modelo dinámico del robot calculado mediante las ecuaciones de movimiento de Lagrange y las formulaciones de Ghorbel, con sus respectivos antecedentes en las ecuaciones de Chace. Este estudio pretende ampliar el punto de vista de los análisis tradicionales de robots seriales o manipuladores, partiendo de la premisa de que un manipulador en su modelo dinámico no sólo debe incluir la cadena cinemática abierta que permite su movilidad y el cálculo de fuerzas o pares en tareas programadas; sino que se pretende ampliar los efectos que la cadena cerrada brindaría al momento de tomar objetos (esencialmente para los controladores de fuerza). La formulación matemática del robot va acompañada de simulaciones hechas en Matlab, las cuales permiten visualizar las velocidades, aceleraciones, fuerzas y pares durante las 2 etapas de análisis de un robot serial de 2 g.d.l. La parte final de este trabajo presenta animaciones sencillas mediante modelos 3D elaborados en toolbox integrados en Simulink, que permiten verificar a la par de las simulaciones un comportamiento más real del robot en la ejecución de una trayectoria sencilla pero con dos fases cinemáticas de evaluación como un modelo matemático completo para el robot.

Cadena, Lagrange, robot serial, animación

Abstract

The present article details an analysis of a serial robot taking into consideration the two types of kinematic chains: the predominant open stage; and the closed manipulation stage. To reach such an end, Lagrange's methodologies and Ghorbel's mathematical equations, which correspond with the previous equations by Chace, is used to create the dynamic robot model. This study attempts to broaden the traditional analysis on serial robots or manipulators. Parting from the premise that the dynamic model of a serial robot mainly includes the open kinematic chain, which allows for it to move and calculate the forces and torques in programmed tasks; including an analysis of the dynamic model at a closed manipulation stage, would provide results during the moment a manipulator is taking an object (particularly on the force controllers). The mathematical formulation of the robot is accompanied by simulations made in Matlab, which allow visualizing the velocities, accelerations, forces and torques during the 2 kinematics stages of analysis of a serial robot of 2 d.o.f. The final part of this work presents simple animations using 3D models elaborated in toolbox integrated in Simulink, which allow verifying, along with the simulations, a more realistic behavior of the manipulator during the realization of a simple trajectory, but with the kinematic stages of evaluation as a complete mathematical model for the serial robot.

Kinematics, Lagrange, serial robot, animation

Citación: CAMPOS-CALDERA, Carla, CAMPOS-CALDERA, Carlos, HAYNES, Arely y ALDERETE-ALDERETE, Javier Enrique. Modelo matemático completo para Robots Seriales. Revista de Ingeniería Tecnológica 2017. 1-3:18-26

*Correspondencia al Autor (Correo Electrónico: ccampos@itparral.edu.mx)

† Investigador contribuyendo como primer autor.

Introducción

El artículo se centra en la ampliación de la dinámica de robots seriales antes y después de la etapa de manipulación de objetos, es decir, antes de tomar un objeto el robot serial se modela como una cadena cinemática abierta, una vez que se toma el objeto contra una superficie, la cadena abierta que lo caracteriza se convierte en una cadena cerrada; si la tarea es instantánea la literatura establece que las fuerzas actuantes en el efector final se pueden despreciar; sin embargo, si se supera esa instantaneidad es posible una segunda etapa de análisis (cadena cinemática cerrada) que vale la pena considerar al momento de construir controladores (Lewis, Dawson, Abdallah, 2004), de ahí el valor agregado de las metodologías que se proponen. Las secciones que conforman el artículo son 6, en la sección I se muestra el análisis cinemático del robot, el modelado dinámico (cadena abierta-cerrada) se aborda en las secciones II y III.

En la sección IV se definen las simulaciones y animación de los modelos matemáticos descritos de I a III, el financiamiento para la publicación del artículo se agradece en la sección V. Finalmente la sección VI presenta conclusiones y trabajos a futuro.

Cinemática

Lung – Wen Tsai (Tsai, 1999), define la cinemática como la ciencia que trata con los aspectos de movimiento de un robot de n grados de libertad (g.d.l.) sin considerar las fuerzas o pares que lo causan; se centra únicamente en el cambio geométrico del robot respecto del tiempo (posiciones, velocidades aceleraciones).

La cinemática presenta 2 problemas: cinemática directa e inversa, la primera se enfoca en encontrar la posición y orientación del efector final conocidas las variables articulares del robot, la segunda encuentra las variables articulares del robot conocidas la posición y orientación del efector final.

Fase Simple

En esta subsección se detalla la cinemática directa del robot en su fase simple o cadena abierta. Las ecuaciones (1) y (2) describen la cinemática directa del robot (figura 1) y han sido ampliamente estudiadas dentro de la literatura (Craig, 1989), (Ollero, 2001) y (Fu, Gonzalez, Lee, 1988).

$$x = l_1 \cos \theta_1 + l_2 \cos \theta_2 \quad (1)$$

$$y = l_1 \sin \theta_1 + l_2 \sin \theta_2 \quad (2)$$

En (1) y (2), l_i ($i=1,2$), indica las longitudes de los eslabones, $\mathbf{q}=[\theta_1 \ \theta_2]^T \in \mathcal{R}^{n \times 1}$ es el vector de coordenadas articulares, $\mathbf{x}=[x \ y]^T \in \mathcal{R}^{n \times 1}$ es el vector de coordenadas operacionales, que representan la posición del efector final.

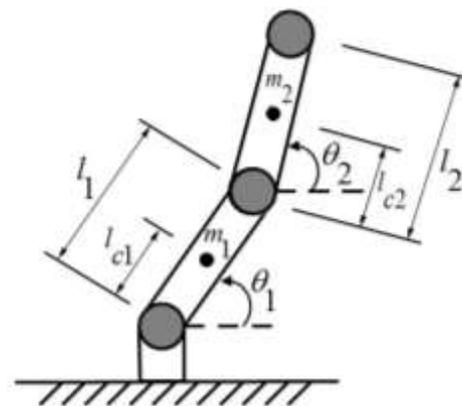


Figura 1 Parámetros robot 2 g.d.l.

Fuente: Elaboración propia

El modelo cinemático inverso del robot es parte de la resolución de los problemas cinemáticos por lo que se inicia considerando los esquemas de las figuras 2 y 3, con la finalidad de encontrar relaciones vectoriales que conduzcan al cálculo de las variables articulares del robot.

Al aplicar el tercer caso de la metodología de Chace (Shigley, 1988), claramente se pueden deducir las ecuaciones (3)-(5) que son base para el modelo cinemático inverso, en las mismas por conveniencia se establece $x_0=y_0=0$.

$$\hat{l}_1 = v\hat{\mu} - u\hat{\lambda} \tag{3}$$

$$\hat{l}_2 = (C - v)\hat{\mu} - u\hat{\lambda} \tag{4}$$

$$C = \sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2} \tag{5}$$

Restando (4) de (3) se encuentra v , u se obtiene sustituyendo v en (3), conocidas u y v , se encuentran las ecuaciones (6) y (7).

$$\hat{l}_1 = \frac{l_1^2 - l_2^2 + C^2}{2C} \hat{\mu} \mp \sqrt{l_1^2 - \sigma} \hat{\lambda} \tag{6}$$

$$\hat{l}_2 = \left(C - \frac{l_1^2 - l_2^2 + C^2}{2C} \right) \hat{\mu} \pm \sqrt{l_1^2 - \sigma} \hat{\lambda} \tag{7}$$

con:

$$\sigma = \frac{l_1^2 - l_2^2 + C^2}{2C} \tag{8}$$

Se debe recordar de (Shigley, 1988) que $\hat{\mu}$ es un vector de magnitud unitaria, que gracias al ángulo ψ se puede descomponer según la ecuación (9)

$$\hat{\mu} = [\|\hat{\mu}\| \cos \psi \quad \|\hat{\mu}\| \sin \psi \quad 0]^T = [\cos \psi \quad \sin \psi \quad 0]^T \tag{9}$$

por otra parte como $\hat{\lambda} = \hat{\mu} \times \hat{k}$ y $\hat{k} = [0 \quad 0 \quad 1]^T$, el producto cruz resultante se aprecia en (10).

$$\hat{\lambda} = [\sin \psi \quad -\cos \psi \quad 0]^T \tag{10}$$

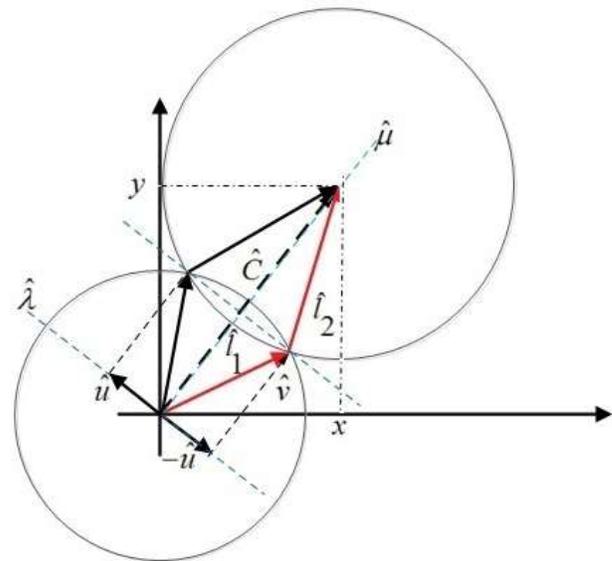


Figura 2 Descomposición vectorial para robot de 2 g.d.l. en base a metodología de Chace

Fuente: Elaboración propia

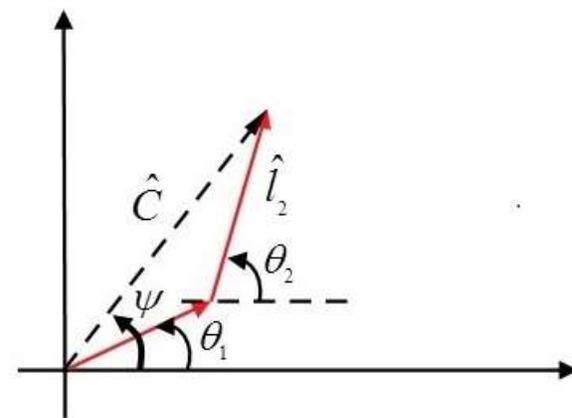


Figura 3 Relación del vector C con el vector de variables articulares

Fuente: Elaboración propia

Al sustituir (9) y (10), en (6) y (7); en forma particular se establece el vector \hat{l}_1 , cuyos elementos se muestran en la ecuación (11).

$$\begin{bmatrix} l_{1x} \\ l_{1y} \end{bmatrix} = \frac{l_1^2 - l_2^2 + C^2}{2C} \begin{bmatrix} \cos\psi \\ \sin\psi \end{bmatrix} \mp \sqrt{l_1^2 - \sigma} \begin{bmatrix} \sin\psi \\ -\cos\psi \end{bmatrix} \quad (11)$$

A partir de (11) se puede ver que la relación $\text{atan}(l_{1y}/l_{1x})$ es el ángulo de inclinación de \hat{l}_1 , o bien θ_1 .

$$\theta_1 = \frac{\frac{l_1^2 - l_2^2 + C^2}{2C} \sin\psi \mp \sqrt{l_1^2 - \sigma} (-\cos\psi)}{\frac{l_1^2 - l_2^2 + C^2}{2C} \cos\psi \mp \sqrt{l_1^2 - \sigma} \sin\psi} \quad (12)$$

La expresión para el ángulo θ_2 o inclinación de \hat{l}_2 , sigue un proceso similar al de θ_1 , en (13) se encuentra la descomposición de \hat{l}_2 .

$$\begin{bmatrix} l_{2x} \\ l_{2y} \end{bmatrix} = \left(C - \frac{l_1^2 - l_2^2 + C^2}{2C} \right) \begin{bmatrix} \cos\psi \\ \sin\psi \end{bmatrix} \mp \sqrt{l_1^2 - \sigma} \begin{bmatrix} \sin\psi \\ -\cos\psi \end{bmatrix} \quad (13)$$

por tanto

$$\theta_2 = \frac{\left(C - \frac{l_1^2 - l_2^2 + C^2}{2C} \right) \sin\psi \mp \sqrt{l_1^2 - \sigma} (-\cos\psi)}{\left(C - \frac{l_1^2 - l_2^2 + C^2}{2C} \right) \cos\psi \mp \sqrt{l_1^2 - \sigma} \sin\psi} \quad (14)$$

Esta sección termina al presentar las ecuaciones del modelo de velocidad del robot, aplicando $\partial \mathbf{x} / \partial \theta_i$ las velocidades operacionales del robot $\dot{\mathbf{x}} = [\dot{x} \ \dot{y}]^T$ (15)-(16) son determinadas, a partir de ellas y con la expresión $\dot{\mathbf{q}} = J^{-1} \dot{\mathbf{x}}$ se estiman las velocidades articulares, las aceleraciones articulares se desarrollan por $\ddot{\mathbf{q}} = J^{-1}(\ddot{\mathbf{x}} - \dot{J}\dot{\mathbf{q}})$.

$$\dot{x} = -l_1 \sin(\theta_1) \dot{\theta}_1 - l_2 \sin(\theta_2) \dot{\theta}_2 \quad (15)$$

$$\dot{y} = l_1 \cos(\theta_1) \dot{\theta}_1 + l_2 \cos(\theta_2) \dot{\theta}_2 \quad (16)$$

Fase Cerrada

La fase cerrada del robot (figura 4) se analiza como un mecanismo corredera – manivela.

Los métodos algebraicos y ecuaciones de Chace (Shigley, 1988), permiten calcular el modelo cinemático directo (17), mostrando una única componente en el eje x.

$$C = l_1 \cos\theta_1 + \sqrt{l_2^2 - l_1^2 \sin^2\theta_1} \quad (17)$$

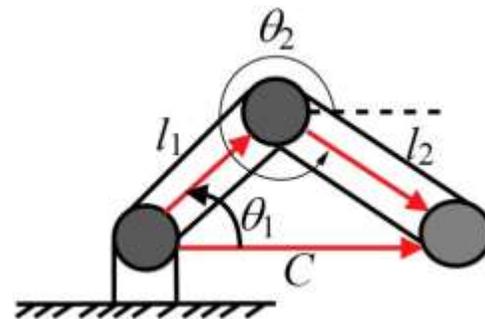


Figura 4 Cadena cerrada robot 2 g.d.l

Fuente: Elaboración propia

La cinemática inversa de esta fase se establece en (18) y (19), retomando para su solución las ecuaciones para una corredera–manivela profundamente analizada en (Shigley, 1988).

$$\theta_1 = \cos^{-1} \left(\frac{C^2 + l_1^2 - l_2^2}{2Cl_1} \right) \quad (18)$$

$$\theta_2 = \cos^{-1} \left(\frac{C^2 + l_2^2 - l_1^2}{2Cl_2} \right) \quad (19)$$

La cinemática de velocidad de la fase cerrada no se presenta en el presente artículo, puesto que la dinámica no depende de su cálculo.

Dinámica fase simple

En una fase simple o cadena abierta, el modelo dinámico del robot se desarrolla por la conocida metodología de Lagrange (Kelly, Santibáñez, Loria, 2005).

Las energías cinemática y potencial del robot, $K(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$, $U(\mathbf{q})$, permiten iniciar el cálculo del Lagrangiano $L(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$, ecuación (20); mediante el cual es posible encontrar las ecuaciones generalizada del movimiento de Lagrange (21).

$$L(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) = K(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) - U(\mathbf{q}) \quad (20)$$

$$\frac{d}{dt} \left[\frac{\partial L(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})}{\partial \dot{q}_i} \right] - \frac{\partial L(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})}{\partial q} = \tau \quad (21)$$

El calculo de $K(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$ y $U(\mathbf{q})$ se realiza por medio de las ecuaciones (22) y (23), siendo m_i la masa de cada uno de los eslabones, I_i la matriz de inercia, h_i el vector al centro de masa referenciado a un marco fijo, g gravedad, i representa el número de g.d.l actuados del robot, por lo tanto $i=1,2$.

$$K_i(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) = \sum_{i=1}^n \frac{1}{2} m_i v_i^T v_i + \frac{1}{2} \omega_i^T I_i \omega_i \quad (22)$$

$$U_i(\mathbf{q}) = \sum_i m_i g h_i \quad (23)$$

Las ecuaciones de par del robot (figura 1) se definen en (24) y (25).

$$\tau_1 = \ddot{\theta}_1 (m_1 l_{c1}^2 + m_2 l_1^2 + I_{1zz}) + 2l_1 l_{c2} \cos(\theta_1 - \theta_2) \ddot{\theta}_2 + 2l_1 l_{c2} \sin(\theta_1 - \theta_2) \dot{\theta}_2^2 + (m_1 l_{c1} + m_2 l_1) g \cos \theta_1 \quad (24)$$

$$\tau_2 = \ddot{\theta}_2 (m_2 l_{c2}^2 + I_{2zz}) + 2l_1 l_{c2} \cos(\theta_1 - \theta_2) \ddot{\theta}_1 - 2l_1 l_{c2} \sin(\theta_1 - \theta_2) \dot{\theta}_1^2 + m_2 l_{c2} g \cos \theta_2 \quad (25)$$

La ecuación (21) se puede reescribir en la ecuación (26), en donde $M(\mathbf{q}) \in \mathfrak{R}^{n \times n}$ es la matriz de inercia definida simétrica y positiva, $C(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) \in \mathfrak{R}^{n \times n}$ es la matriz de fuerzas centrípetas y de coriolis, $\mathbf{g}(\mathbf{q})$ es el vector de fuerzas o pares gravitacionales.

$$M(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + C(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{g}(\mathbf{q}) = \boldsymbol{\tau} \quad (26)$$

En base a (24) y (25) la matriz de inercia, coriolis y el vector de gravedad se presentan en (27), (28) y (29).

$$M(\mathbf{q}) = \begin{bmatrix} m_1 l_{c1}^2 + m_2 l_1^2 + I_{1zz} & 2l_1 l_{c2} \cos(\theta_1 - \theta_2) \\ 2l_1 l_{c2} \cos(\theta_1 - \theta_2) & m_2 l_{c2}^2 + I_{2zz} \end{bmatrix} \quad (27)$$

$$C(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) = \begin{bmatrix} 0 & 2l_1 l_{c2} \sin(\theta_1 - \theta_2) \dot{\theta}_2 \\ -2l_1 l_{c2} \sin(\theta_1 - \theta_2) \dot{\theta}_1 & 0 \end{bmatrix} \quad (28)$$

$$\mathbf{g}(\mathbf{q}) = \begin{bmatrix} (m_1 l_{c1} + m_2 l_1) g \cos \theta_1 \\ m_2 l_{c2} g \cos \theta_2 \end{bmatrix} \quad (29)$$

Dinámica cadena cerrada

El análisis de la cadena cerrada se fundamenta complementamente en las ecuaciones deducidas por Ghorbel (Ghorbel, Chételat, Gunawardana, Longchamp, 2011), mismas que se explican y aplican a nuestro caso de estudio.

En la cadena cerrada del robot, el vector de coordenadas generalizadas dependientes es preestablecido como $\mathbf{q}' = [\theta_1 \ \theta_2 \ \theta_3]^T$ en donde θ_3 es el ángulo que posiciona la herramienta.

Las coordenadas independientes son seleccionadas de tal forma que el sistema restringido –vea (Ghorbel et al, 2011), (Iliá, Cammarata, y Sinatra, 2007), (Soto, Campa, 2011), (Unda, García, 1985) y (Campos, Campa, Llama, Pámanes, 2011)– proporcione una variable independiente $\alpha(q') = \theta_1$; para lograr tal fin, se necesita un vector operador $\Theta = [1 \ 0 \ 0]^T$, cuyo renglón y columnas serán parte de la matriz de restricción del sistema, ecuación (31).

$$\alpha(q') = \Theta q' \tag{31}$$

Las restricciones $\varphi(q')$ quedan en función de las distancias de cada uno de los eslabones y la herramienta de manipulación del robot, figura 5, por lo que se presentan 2 restricciones, ecuación (32). La variable d dentro de (32) indica la distancia entre las cadenas cinemáticas desarticuladas.

$$\varphi(q') = \begin{bmatrix} l_1 \cos \theta_1 - l_2 \cos \theta_2 - l_3 \cos \theta_3 - d \\ l_1 \sin \theta_1 - l_2 \sin \theta_2 - l_3 \sin \theta_3 \end{bmatrix} \tag{32}$$

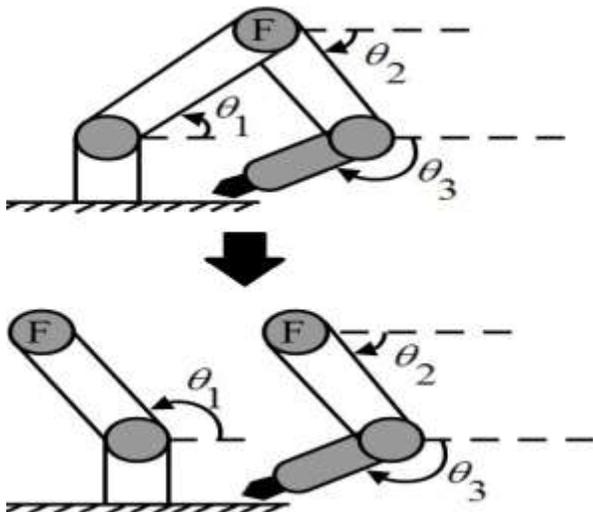


Figura 5 Apertura cadena cerrada y definición de restricciones

Fuente: Elaboración propia

El vector de restricciones holonómicas como lo cita Ghorbel es $R = [\varphi(q') \ \alpha(q')]^T$, del cual se obtiene el jacobiano de restricción $\gamma(q') = \partial R / \partial q'$ cuya proyección $R(q')$ hará posible la reducción del sistema; así como, el cálculo del modelo dinámico de la cadena cerrada mediante las ecuaciones (33) a (36).

$$R(q') = \gamma_q^{-1}(q') \begin{bmatrix} 0_{(n'-n) \times n} \\ I_{n \times n} \end{bmatrix} \tag{33}$$

$$M^*(q') = R(q')^T M(q') R(q') \tag{34}$$

$$C^*(q') = R(q')^T C(q', \dot{q}') R(q') + R(q')^T M(q') \dot{R}(q) \tag{35}$$

$$g^* = R(q')^T g(q') R(q) \tag{36}$$

En (37) se muestran los valores finales que el vector de R adoptaría.

$$R(q') = \begin{bmatrix} \frac{\text{sen}(\theta_3 - \theta_1)}{\frac{3}{1}} \\ \frac{\text{sen}(\theta_3 - \theta_2)}{\frac{3}{2}} \\ -\frac{\text{sen}(\theta_2 - \theta_1)}{\frac{2}{1}} \\ \frac{\text{sen}(\theta_3 - \theta_2)}{\frac{3}{2}} \\ 1 \end{bmatrix} \tag{37}$$

$$M^*(q') \ddot{q}' + C(q', \dot{q}') \dot{q}' + g(q') = \tau \tag{38}$$

El * presente en las ecuaciones (34) a (36), indica las nuevas matrices del sistema cerrado o restringido siendo su ecuación de par (38).

Simulación y Animación

En (Díaz, Gutierrez, Valdés y Hernández 2016) y (López, Serna y Olgúin, 2016), se advierte la importancia de realizar simulaciones y animaciones que anticipen el comportamiento físico de mecanismos o exoesqueletos, en (Mendoza, Tapia, Ortega y García, 2016) la construcción de un laboratorio virtual para el monitoreo de la posición de servomotores, reafirma la necesidad de interfaces gráficas que indiquen en todo momento el desenvolvimiento de actuadores (también presentes en la robótica) durante la ejecución de tareas, es por ello que en este artículo se llevan a cabo simulaciones y animaciones de los modelos matemáticos descritos en las secciones de nuestro trabajo.

La simulación y animación de los modelos desarrollados de I a III se logran en un lenguaje de programación dedicado a la manipulación matricial y al cálculo numérico, denominado Matlab; en éste existe una herramienta llamada Simulink, que permite de una manera sencilla animar y emular el comportamiento de cualquier robot.

Los parámetros físicos en que hemos basado las simulaciones considera masas y distancias para los eslabones: $m_1=3.03$ Kg, $m_2=6.20$ Kg, $l_1=0.40$ m y $l_2=0.40$ m. El cálculo de los valores para I_{izz} , se ha simplificado gracias a las propiedades físicas que el paquete Solid Works brinda al momento de realizar las piezas del diseño asistido (CAD) del robot; sin embargo por simplicidad al ser los valores de I_{izz} pequeños, para la simulación se han considerado nulos.

Una vez que el modelo CAD del robot se ha elaborado, se procede a realizar su ensamblaje en un paquete de realidad virtual denominado V-Realm Builder, el cual genera un escenario tridimensional que se exporta hacia Simulink, en dónde mediante una programación a bloques se anticipan los movimientos del robot.

La trayectoria diseñada se observa en la Gráfica 1, en la Gráfica 2 se presentan las variables articulares ante la ejecución de una tarea sencilla, los pares τ_1 y τ_2 de la fase simple se presentan en la Gráfica 3, mientras que el valor de los pares durante la fase cerrada se visualizan en la Gráfica 4.

Finalmente el modelo 3D del robot se aprecia en la figura 6, cabe mencionar que la figura 1 es un esquema simplificado del modelo 3D.

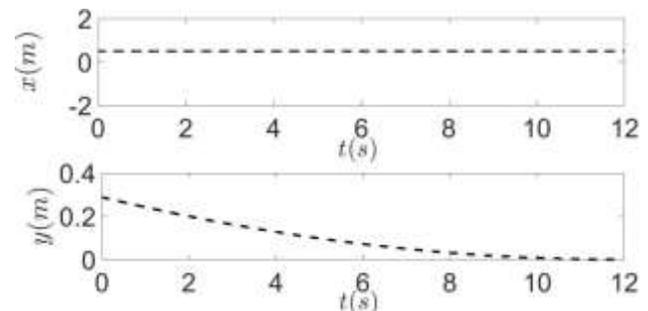


Gráfico 1 Trayectoria fase simple

Fuente: Elaboración propia

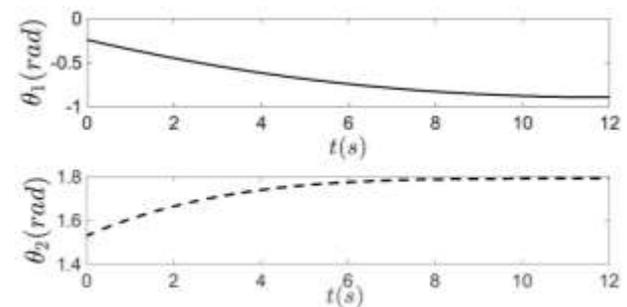
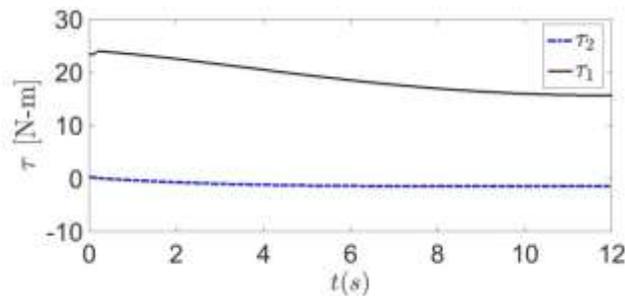


Gráfico 2 Variables articulares

Fuente: Elaboración propia



Gráfica 3 Pares fase simple

Fuente: Elaboración propia

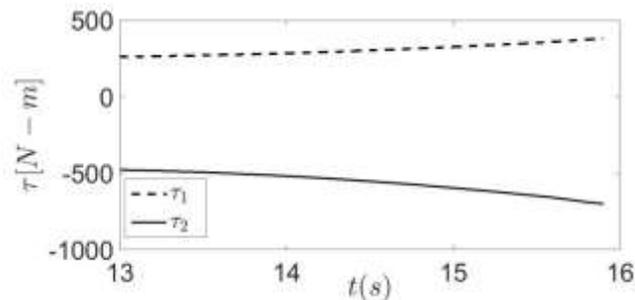


Gráfico 4 Pares fase doble

Fuente: Elaboración propia

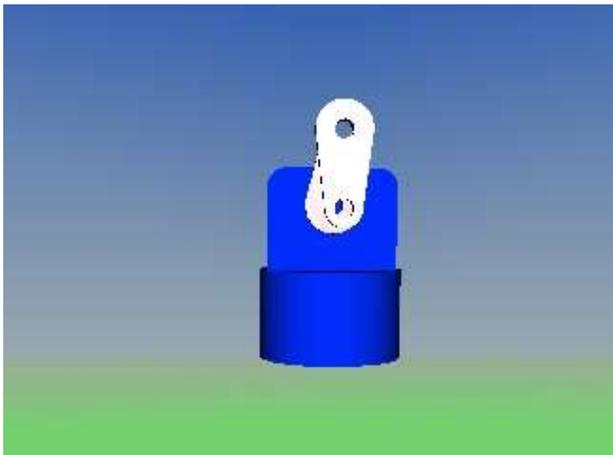


Figura 6 Mundo virtual del robot

Fuente: Elaboración propia

Agradecimiento

Se agradece al Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Parral por financiar la presente publicación.

Conclusiones

En este artículo se obtiene el modelo completo de un robot serial de 2 g.d.l. en la manipulación de un objeto, enfatizado que es necesario modelar la fase cerrada de la cadena cinemática que éste posee.

Es importante destacar que los pares durante la la cadena cerrada, sufren un considerable incremento respecto de la fase simple, lo que conlleva a reconsiderar el diseñar controladores con ganancias adaptables a las dos fases.

A futuro se pretende validar físicamente los resultados de este trabajo empleando sensores de fuerza y esquemas de control de par realimentado o de fuerza; con el fin de extender nuestras metodologías en robots con un mayor número de g.d.l.

Referencias

Lewis FL., Dawson DM, Abdallah CT. (2004). *Robot Manipulator Control: Theory and Practice*. New York, USA: Marcel Dekker Inc.

Tsai L-W. (1999). *Robot Analysis: the mechanics of serial and parallel manipulators*. New York, USA: Jhon Wiley & Sons, Inc.

Craig J. (1989). *Introduction to Robotics: mechanics and control*. New York, USA: Addison – Wesley.

Ollero A. (2001). *Robótica: manipuladores y robots móviles*. Barcelona, España: MARCOMBO.

Fu K.S., Gonzalez R.C., Lee C.S.G., Robotics: Control, Sensing, Vision and Intelligence. México: McGraw-Hill.

Shigley J.E, Uicker J.J. (1988). *Teoría de máquinas y mecanismos*. Edo. México, México: Mc Graw Hill/Interamericana de México.

Kelly R., Santibáñez V., Loria A. (2005), Control of Robot Manipulators in Joint Space: Prentice Hall, México.

Ghorbel, F. H., Chélat O., Gunawardana R., Longchamp R. (2011). Modeling and Set Point of Closed-Chain Mechanisms: Theory and Experiment, *IEEE Transactions on Control systems Technology*, 8(5), 801-815.

D. Iliá, A., Cammarata, y Sinatra R. (Junio 2007). *A novel formulation of dynamic balancing of five – bar linkages*, Congreso Mundial IFToMM, Besanzón, Francia.

Soto I., y Campa R. (2011). *Sobre Modelado dinámico de robots paralelos: Mecanismo de cinco barras como caso de estudio*, XIII Congreso Mexicano de Robótica, San Luís Potosí, México.

Unda J., y García J. (1985). Análisis cinemático y dinámico de sistemas mecánicos formados por varios sólidos rígidos, *Revista internacional de métodos numéricos para cálculo y diseño de ingeniería*, 1(4), 31 – 48.

Campos C., Campa R., Llama M. y Pámanes A. (2011). Modelling, Simulation and Analysis of a 5-Dof Parallelogram-Link Biped Mechanism, *Praise Worthy Prize S.r.l: International Review on Modelling and Simulations (I.R.E.M.O.S)*, 4(6), 3337 – 3352.

Díaz S., Gutierrez C., Valdés D., y Hernández B. (2016). Diseño y control en tiempo real de un brazo de robot mediante una interfaz virtual, *Revista Tecnológica e Innovación*, 3(9), 49-60.

López F., Serna L., y Olguín J. (2016). Desarrollo de un exoesqueleto para la rehabilitación de miembros superiores, *Revista de Tecnología a Innovación*, 3(7), 1-12.

Mendoza R., Tapia G., Ortega F. y García J.M. (2016). Aplicación web par el control remoto de mecanismos mediante Arduino, *Revista de Tecnología e Innovación*, 3(6), 1 – 7.

Sistema de detección de incendios basado en visión artificial

CUAYA-SIMBRO, Germán†*, GUTIERREZ-FRAGOSO, Karina, JIMÉNEZ-MEDINA, Eduardo y SALDIVAR-DELGADILLO, Edgar

Instituto Tecnológico Superior del Oriente del Estado de Hidalgo. Carretera Apan-Tepeapulco Km 3.5, Col Las Peñitas, Apan, Hidalgo, México

Recibido 21 de Julio, 2017; Aceptado 7 de Septiembre, 2017

Resumen

México cuenta con una gran biodiversidad en flora y fauna y la superficie de zonas forestales en el país es muy extensa de la cual el 40% aproximadamente son áreas arboladas. Detectar un incendio forestal de manera temprana puede ayudar a los departamentos de bomberos a sofocarlo con mayor prontitud, manteniendo reducido el foco del fuego y más manejable en muchos casos. Así, el uso de tecnología que pueda detectar de manera oportuna el riesgo de un posible incendio es un tema de interés. Este trabajo presenta el desarrollo de un sistema que detecta la posibilidad de ocurrencia de un incendio en tiempo real mediante el uso de 2 algoritmos computacionales que procesan secuencias de video. Los algoritmos utilizados están basados en el análisis del espacio de representación de color RGB y a través del análisis de la binarización de los *frames* respectivamente. El sistema desarrollado fue probado con videos existentes y grabados en tiempo real en los cuales se resalta las áreas detectadas como incendios mostrando así la funcionalidad del sistema.

Abstract

Mexico has a great biodiversity in flora and fauna and the surface of forest areas in the country is very extensive of which approximately 40% are wooded areas. Detecting a forest fire early can help fire departments to stifle it more quickly, keeping fire out of focus and more manageable in many cases. Thus, the use of technology that can detect early the risk of a possible fire is an issue of interest. This work presents the development of a system that detects the possibility of occurrence of a fire in real time through the use of 2 computational algorithms that process video sequences. The algorithms used are based on the analysis of the space RGB and through the analysis of the binarization of the frames respectively. The developed system was tested with existing and recorded in real time videos, where is highlighting the areas detected as fires with both algorithms which shows the system's functionality.

Artificial vision, fire, detection

Visión artificial, incendio, detección

Citación: CUAYA-SIMBRO, Germán, GUTIERREZ-FRAGOSO, Karina, JIMÉNEZ-MEDINA, Eduardo y SALDIVAR-DELGADILLO, Edgar. Sistema de detección de incendios basado en visión artificial. Revista de Ingeniería Tecnológica 2017. 1-3:27-37

*Correspondencia al Autor (Correo Electrónico: gcuaya@itesa.edu.mx)

† Investigador contribuyendo como primer autor.

Introducción

El 99% de los incendios son causados por actividades humanas. Entre las causas frecuentes por las cuales se generan incendios en zonas semiáridas, así como en bosque o selva, se pueden mencionar los accidentes automovilísticos, los ferroviarios y en ocasiones, los aéreos; las negligencias, que son quemas agropecuarias no controladas, fogatas que no son apagadas, fumadores, quema de basura, y uso general del fuego en otras actividades producidas dentro de estas áreas; las intencionales, que son generalmente por conflictos entre personas o comunidades; y las naturales que son principalmente la caída de rayos en una tormenta eléctrica o la erupción de un volcán.

En ocasiones no se tiene la precaución apropiada para la prevención de los incendios en regiones semiáridas, además de que son propensas a este tipo de eventos por sus mismas condiciones. De manera que la prevención de incendios en zonas semiáridas puede evitar la destrucción de hábitat de la fauna terrestre, la eliminación de plantas generadoras de oxígeno y el incremento del efecto invernadero en la atmosfera por la emisión de carbono y otros gases.

Actualmente existen acciones preventivas para los incendios, las cuales se mencionan a continuación: obras de ingeniería, para reducir la acumulación de material combustible o modificar su continuidad, estas pueden ser brechas cortafuego o quemas prescritas; actividades educativas, como las campañas de difusión y cuidado y asistencia técnica para el uso del fuego en poblaciones rurales; supervisión legal, en esta se verifica que se cumplan las leyes y normas relativas para el uso del fuego (Forestal, 2010).

Asimismo, existen las acciones de detección las cuales consisten en actividades de vigilancia sobre una zona determinada, a través de torres de observación colocadas en puntos estratégicos de una determinada área con peligro de incendios, brigadas móviles distribuidas a través de carreteras o caminos en zonas de riesgo con recorridos de inspección y sobrevuelos. En zonas boscosas esta labor se complica para un solo equipo, por lo que en nuestro país participan de manera indirecta la Fuerza Aérea Mexicana, así como la Policía Federal Preventiva e incluso los vuelos comerciales y privados si detectan un incendio inmediatamente hacen un reporte a las autoridades correspondientes (Forestal, 2010).

Lo anterior es una tarea que demanda la atención continua de los encargados de detectar este tipo de eventos y en muchas ocasiones los vigilantes se ven superados por la necesidad de cubrir una zona geográfica amplia por lo que requieren contar con herramientas de apoyo que les permita mejorar la eficiencia de su trabajo.

Una alternativa para la detección de incendios es el uso de las TICs, las cuales han sido aplicadas con éxito en la detección de incendios en interiores detectando el humo en casas y edificios mediante sensores, pero la detección de incendios es una tarea complicada en un ambiente exterior, en específico en la naturaleza.

Este trabajo de investigación propone el uso de técnicas de visión artificial para detectar en tiempo real el inicio de un incendio mediante el análisis de los cambios que existen en un entorno semiárido. Además, el sistema podrá enviar alguna alerta, como puede ser un correo o un mensaje de texto, al personal de vigilancia para que ellos a la vez tomen las medidas necesarias para evitar los efectos de haber detectado un incendio de manera tardía.

Los resultados obtenidos de este sistema contrastan la efectividad de las dos técnicas utilizadas para la detección del inicio de un incendio en tiempo real.

El artículo está constituido por las siguientes secciones, trabajo relacionado donde se realiza una descripción de trabajos similares al nuestro, visión artificial en donde se describen las técnicas utilizadas en este trabajo de investigación, metodología utilizada donde se muestran las pruebas realizadas, resultados la cual reporta la información obtenida de los experimentos, y por último conclusiones y trabajo futuro derivadas de esta investigación.

Trabajo Relacionado

Existen métodos tradicionales de detección de fuego los cuales realizan un monitoreo llevado a cabo frecuentemente por personal del área determinada, uno de dichos métodos es la detección mediante infrarrojo y cámaras ópticas el cual debe tener una central de vigilancia y un monitor de supervisión, así como torres de vigilancia distribuidas por todo el terreno, si la cámara detecta dónde está un incendio se detiene y trasmite una alarma para el vigilante (Victor Hugo Medina García J. M., 2009). La implementación de esta estrategia en amplias zonas geográficas semiáridas tiene como principal desventaja un elevado costo.

Un método es la detección mediante imágenes por satélite, este detecta el humo y la señal de calor emitida por el incendio, con base en ello se elaboran mapas con los puntos cardinales de la ubicación del incendio, cabe mencionar que si el satélite detecta una temperatura entre 180 y 355°K se considera fuego (Medina y otros, 2009). Este tipo de métodos pueden resultar poco eficientes y enviar una alerta en forma tardía debido a que no se monitorea de manera permanente una zona específica.

Otro método tradicional empleado es la detección mediante la imagen térmica, este sistema detecta el fuego incluso con niebla con un alcance de 15 km por puesto de vigilancia además de un mínimo número de falsos positivos mediante un algoritmo experto de detección (Indra, 2010). No obstante, como en el caso de los sistemas basados en cámaras infrarrojas, la implementación puede resultar costosa.

Por otro lado, existen trabajos en los cuales no se requiere de equipo tan especializado y por lo que es más viable su implementación. Uno de ellos es un sistema de detección visual de columnas de humo, en el cual se adquiere un *frame* cada 0.5 segundos, la imagen se procesa mediante *wavelets* y utiliza el análisis de *Fourier* para descomponer las señales recibidas en ondas sinusoidales (Arrue, 2010). Conviene señalar que este sistema se enfoca en la detección de humo por lo que en zonas semiáridas se tiene el reto adicional de discriminar entre el humo y las formaciones de polvo ocasionadas por el viento. De manera que la eficiencia del sistema podría afectarse considerablemente.

En (Domènech, 2011-2012) se presenta un reporte de dos métodos de detección de fuego. El primer método se basa en el espacio de representación del color RGB, los autores mencionan que los componentes rojo y verde presentan valores de intensidad más altos que el componente azul al detectar el fuego. El segundo método se basa en una representación Gaussiana adaptativa que realiza la separación del fondo con el resto de la imagen y detectar el color característico de éste puede determinar si existe un incendio o no. En contraste, en este trabajo se utilizaron valores de intensidad similares para los canales verde y azul, además consideramos la combinación de los tres canales para obtener un método más eficiente.

El trabajo realizado en esta investigación propone una nueva técnica la cual es una variación de una de las técnicas presentadas en (Domènech, 2011-2012), además de que, a diferencia de los trabajos citados, ambas técnicas son probadas en tiempo real.

Visión artificial

Se calcula que el 70% de las tareas del cerebro son empleadas en el análisis de la información visual. La visión humana es el sentido más desarrollado y por ende el más difícil de entender cómo se produce.

Desde el invento de la fotografía se ha intentado obtener características físicas de las imágenes. La astronomía avanzó con el análisis de las imágenes recibidas por telescopios, así como el análisis de las radiografías en el área médica (Dueñas., 2009).

La visión artificial es un campo de la inteligencia artificial en donde mediante el uso de algoritmos adecuados se puede obtener información adicional en una imagen digital. La visión artificial está compuesta por un conjunto de procesos destinados a realizar el análisis de las imágenes, con lo que se pueden realizar diferentes actividades como son: inspeccionar objetos sin contacto físico; determinar objetos en un espacio determinado; identificar patrones de cambio en algún ambiente; determinar las coordenadas de algún objeto. La visión artificial es aplicada en diferentes campos de estudio para el desarrollo de sistemas que ayuden en la automatización de procesos o en la prevención de eventos que pueden ser fatídicos para la sociedad y para el planeta, en nuestro caso la detección del inicio de un incendio.

Algunos campos de aplicación de la visión artificial son:

- Robótica. Para la navegación en robótica se recurre generalmente a técnicas de visión estereoscópica con el fin de poder reconstruir la escena 3-D (Pajares y otros, 2008).
- Biología. En el campo de la biología existen aplicaciones microscópicas y macroscópicas. En una imagen microscópica nos podemos encontrar con abundantes organismos, que mediante técnicas de segmentación orientadas a regiones pueden ser aislados para su identificación mediante las correspondientes propiedades. En las imágenes macroscópicas pueden utilizarse las regiones para la identificación de determinados tipos de texturas en vegetales o características de diferentes áreas naturales por su color o el crecimiento (Pajares y otros, 2008).
- Geología. Se puede utilizar visión artificial en esta área para detectar movimientos de terrenos captando dos imágenes en diferentes momentos de tiempo para observar la variación mediante una diferencia de imágenes (Pajares y otros, 2008).
- Meteorología. Se pueden utilizar las técnicas de detección y predicción del movimiento para observar la evolución de ciertas masas nubosas, u otros fenómenos meteorológicos. También se utiliza para determinar el grado de cobertura de una nevada en función de la superficie cubierta (Pajares y otros, 2008).

Las aplicaciones de la visión artificial son diversas y crecientes.

Sin embargo, en este trabajo nos enfocaremos en la tarea de detectar un incendio en su fase inicial para evitar una propagación de mayores dimensiones con consecuencias desastrosas.

La aplicación de técnicas de visión artificial posibilita la detección de un incendio y la fase en la que se encuentra con base en determinados umbrales en los valores de intensidad de la imagen adquirida con parámetros de comparación.

Metodología utilizada

En este trabajo se realizaron pruebas con 3 videos disponibles en Internet y con videos propios, en el caso de los últimos se probaron en tiempo real para validar la eficacia del sistema propuesto. A continuación, se describen los algoritmos implementados:

Algoritmo Uno

El algoritmo tiene la función de analizar el espacio de color RGB (Red, Green, Blue) de cada imagen que pertenece al vídeo, es decir, procesa cada uno de los canales de color. Para cada pixel de la imagen se compara el valor de cada uno de sus componentes RGB con un intervalo valido de valores de cada canal si los valores se encuentran dentro de dichos intervalos se considera que ese pixel en un indicativo en un incendio, y el valor del pixel se modifica a 0.

La determinación de los intervalos de valores para cada canal fue realizada mediante el análisis de diferentes imágenes, en las cuales se delimitaban las áreas de incendio y se obtenían los valores de cada uno de los píxeles en los diferentes canales RGB, obteniendo así todos los posibles valores indicativos de un incendio en cada canal.

Los cuales son: para el canal R (180 al 255), para el canal G (100 al 180) y para el canal B (70 al 170), esto es, en una imagen analizada se encontró que todos los píxeles del área de incendio presentaban un valor entre 180 y 255 en el canal R, y así para los otros dos canales.

Cabe mencionar que las técnicas presentadas en (Domènech, 2011-2012) indican que los valores del canal R y G son altos en comparación del B, en cambio nuestro algoritmo los valores del canal R son más altos mientras que los del canal G y B son similares.

A continuación, se presenta el algoritmo uno.

- Inicio
- Obtener vídeo.
- Obtener número de frames del vídeo.
- Recorrer de 1 hasta número de frames.
- Obtener frame.
- Obtener componentes RGB del frame.
- Para cada pixel del frame.

Si el componente R del pixel es mayor a 180 y menor a 255 entonces:

Si el componente G del pixel es mayor a 100 y menor a 180 entonces:

Si el componente B del pixel es mayor a 70 y menor a 170 entonces:

El valor del pixel es igual a 0.

En caso contrario no se modifica el valor del pixel

- Mostrar imagen original
- Mostrar imagen modificada
- Fin

Algoritmo Dos

Este algoritmo transforma la imagen basándose en la teoría del color, la cual establece que el color amarillo es formado por rojo y verde, es decir, únicamente valores de los canales R y G, por lo que se realiza una suma de dichos canales y se resta el canal B, obteniendo así una representación en amarillo de la imagen. Una vez obtenida dicha representación se binariza la imagen con base a la comparación de los valores de cada pixel de la representación en amarillo respecto a un umbral, aquellos pixeles que se encuentren por debajo de ese umbral serán considerados como indicativos de incendio y serán resaltados en negro en la imagen original.

El umbral que se utilizó fue 50 debido a que en las pruebas realizadas fue el valor con el cual se obtiene una detección de incendio más eficiente, con base en el área detectada en la imagen.

A continuación, se describe el algoritmo dos.

- Inicio
- Obtener vídeo.
- Obtener un frame del video.
- Obtener dimensiones del frame.
- Obtener componentes RGB del frame.
- Calcular el umbral de binarización:

$$\text{umbral} = ((R+G)/2) - B$$

- Binarizar frame con base a lo siguiente:

Para cada pixel de la imagen:

Si el valor del pixel es mayor al umbral entonces:

Pixel = 255;

En caso contrario:

Pixel = 0;

- En la imagen original sustituir los pixeles con valor de 0 de la imagen binaria.
- Mostrar imagen original
- Mostrar imagen modificada
- Fin

La codificación de ambos algoritmos fue realizada en MATLAB R2015 debido a la eficiencia que proporciona en el procesamiento de imágenes.

Como se mencionó, se realizaron diferentes pruebas con ambos algoritmos, las cuales dividimos en pruebas *estáticas* y *dinámicas*. Las primeras incluyen pruebas con videos ya existentes de incendios, para las segundas se grabaron y analizaron videos de incendios en tiempo real.

Para las pruebas estáticas se analizaron 3 videos obtenidos de Internet los cuales presentan condiciones similares a una región semiárida. Y para las pruebas dinámicas se generaron de manera controlada 2 incendios los cuales fueron grabados y analizados en tiempo real. La siguiente sección presenta los resultados obtenidos de las pruebas realizadas.

Resultados

Pruebas estáticas

Con los dos algoritmos presentados en la sección anterior, se analizan tres videos diferentes. Como resultado del análisis se resalta en color negro la región dentro del video que fue detectada como fuego por ambos algoritmos, las Figuras 1 y 2 muestran el resultado de ambos algoritmos en un *frame* del primer video, las Figuras 3 y 4 corresponden al análisis del segundo video y finalmente, las Figuras 4 y 6 al análisis del tercer video.

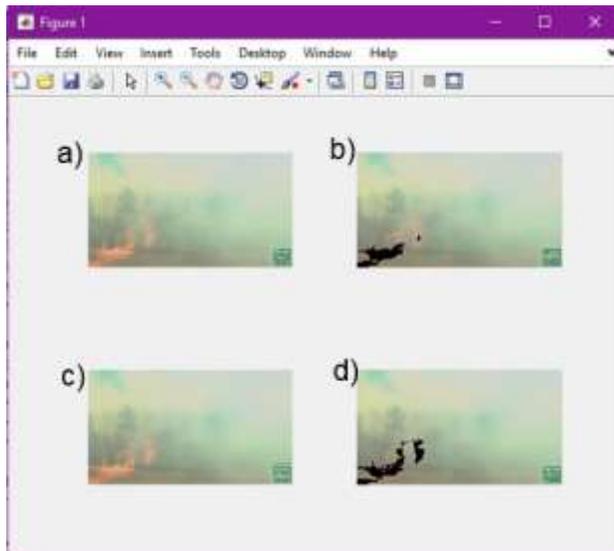


Figura 5 Análisis del Frame 1 del primer vídeo de las pruebas estáticas, a), c), son el frame original analizado, b) es la detección del algoritmo 2, y d) es la detección del algoritmo 1. Los pixeles en negro corresponden al área que fue determinada como indicativo de fuego

Fuente: elaboración propia

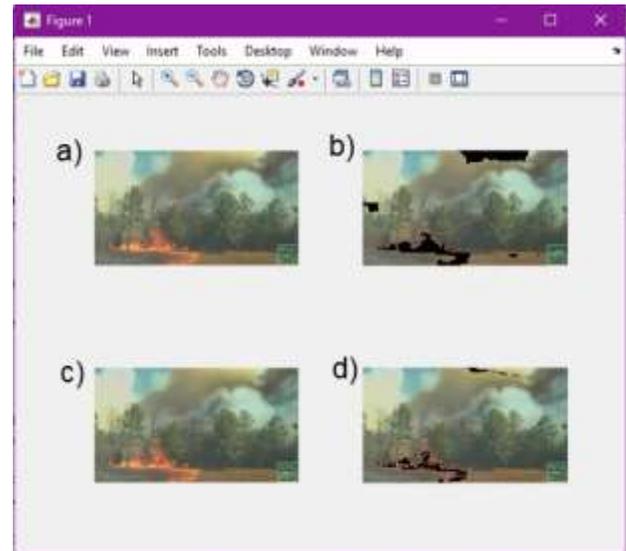


Figura 6 Análisis del Frame 15 del primer vídeo de las pruebas estáticas, a), c), son el frame original analizado, b) es la detección del algoritmo 2, y d) es la detección del algoritmo 1. Los pixeles en negro corresponden al área que fue determinada como indicativo de fuego

Fuente: elaboración propia

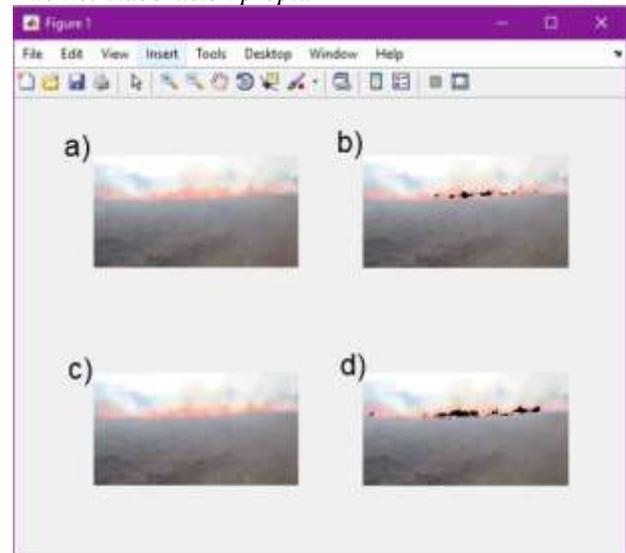


Figura 3 Análisis del Frame 5 del segundo vídeo de las pruebas estáticas, a), c), son el frame original analizado, b) es la detección del algoritmo 2, y d) es la detección del algoritmo 1. Los pixeles en negro corresponden al área que fue determinada como indicativo de fuego

Fuente: elaboración propia

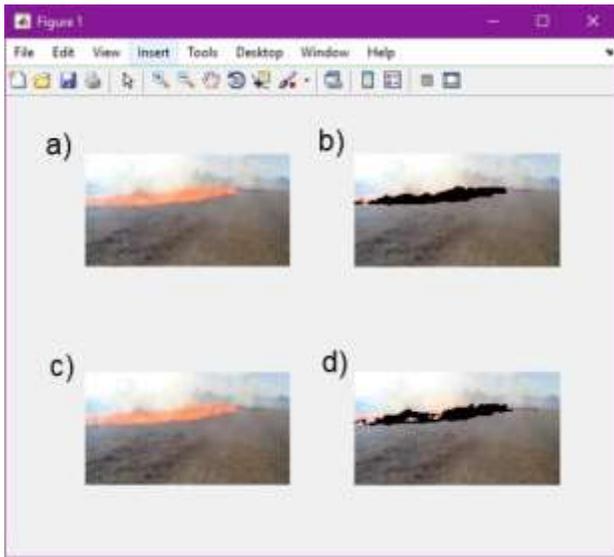


Figura 4 Análisis del Frame 10 del segundo vídeo de las pruebas estáticas, a), c), son el frame original analizado, b) es la detección del algoritmo 2, y d) es la detección del algoritmo 1. Los pixeles en negro corresponden al área que fue determinada como indicativo de fuego

Fuente: elaboración propia

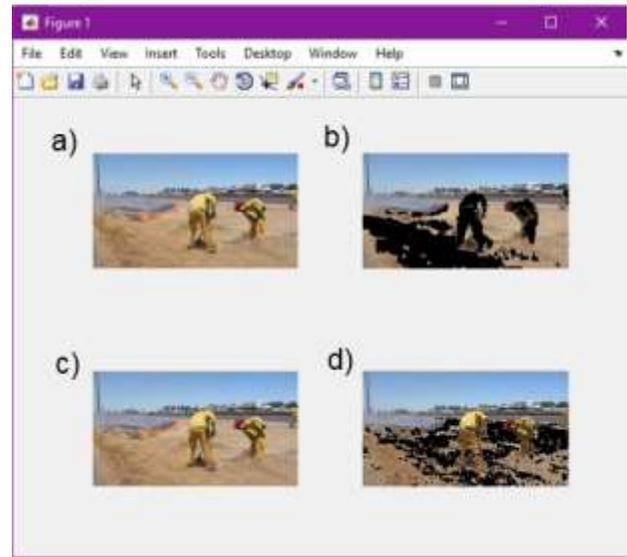


Figura 6 Análisis del Frame 10 del tercer vídeo de las pruebas estáticas, a), c), son el frame original analizado, b) es la detección del algoritmo 2, y d) es la detección del algoritmo 1. Los pixeles en negro corresponden al área que fue determinada como indicativo de fuego.

Fuente: elaboración propia

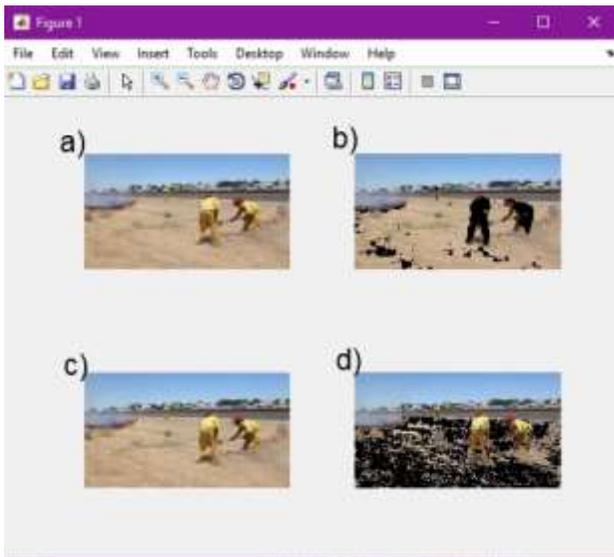


Figura 5 Análisis del Frame 5 del tercer vídeo de las pruebas estáticas, a), c), son el frame original analizado, b) es la detección del algoritmo 2, y d) es la detección del algoritmo 1. Los pixeles en negro corresponden al área que fue determinada como indicativo de fuego.

Fuente: elaboración propia

Como se muestra en las figuras anteriores, en los videos 1 y 2 el algoritmo 1 identifica con mayor precisión el fuego, esto es, discrimina mejor el área en donde existe éste, aunque en el video 3 el algoritmo 2 es más exacto en la detección del área identificada como fuego. Además, el costo computacional en tiempo de cada algoritmo en cada uno de los videos, se presenta en la Tabla 1.

Video	Tamaño en pixeles de un frame	Tiempo de procesamiento por frame (Seg.)	
		Algoritmo 1	Algoritmo 2
1	360x640/1487	11.16	0.68
2	352x640/6489	12.12	0.61
3	360x640/4217	12.32	0.76

Tabla 1 Costo computacional en tiempo del procesamiento de un frame de los algoritmos propuestos

Fuente: elaboración propia

En general, ambos algoritmos cumplen con la tarea de detección de fuego, dado que como muestran los resultados ambos algoritmos identifican áreas en donde existe fuego, pero queda manifestada la necesidad de mejorar los algoritmos propuestos para reducir la detección de áreas en donde no existe indicativo de fuego. Finalmente, de acuerdo a la Tabla 1 el algoritmo 2 es más rápido y por lo tanto sería más adecuado para la detección en tiempo real de un incendio.

Pruebas dinámicas

Para la realización de estas pruebas se provocaron de manera controlada 2 incendios, los cuales fueron analizados en tiempo real por ambos algoritmos. De la misma manera que en las pruebas anteriores, se registró el tiempo de procesamiento de un *frame* por ambos algoritmos, Tabla 2, y se resaltó en negro el área que es detectada como incendio en los videos.

Video	Tamaño en Pixeles de un frame	Tiempo de procesamiento por frame (Seg.)	
		Algoritmo 1	Algoritmo 2
1	1280x720	48.35	2.72
2	1280x720	49.05	2.86

Tabla 2 Costo computacional en tiempo del procesamiento de un frame de los algoritmos propuestos

Fuente: elaboración propia

La Figura 7 y 10 muestran los *frame* del video correspondiente al primer y segundo incendio controlado respectivamente, los cuales fueron analizados por ambos algoritmos. Las Figuras 8 y 9 muestran, enmarcadas en un recuadro rojo, el área identificada como incendio en el *frame* de la Figura 7. Así mismo, las figuras 11 y 12 son los resultados del análisis del *frame* de la Figura 10.



Figura 7 Frame del vídeo del incendio controlado 1

Fuente: elaboración propia



Figura 8 Identificación de fuego realizada por el algoritmo uno. Donde el recuadro rojo enmarca el área detectada

Fuente: elaboración propia



Figura 9 Identificación de fuego realizada por el algoritmo dos. Donde el recuadro rojo enmarca el área detectada

Fuente: elaboración propia

La Figura 10 presenta un *frame* del video correspondiente al segundo incendio controlado, las Figuras 11 y 12 presentan la detección realizada por los algoritmos uno y dos respectivamente.



Figura 10 Frame del vídeo del incendio controlado 2

Fuente: elaboración propia



Figura 11 Identificación de fuego realizada por el algoritmo uno. Donde el recuadro rojo enmarca el área detectada

Fuente: elaboración propia



Figura 12 Identificación de fuego realizada por el algoritmo dos. Donde el recuadro rojo enmarca el área detectada

Fuente: elaboración propia

Los resultados de las pruebas realizadas no fueron tan buenos en relación al área determinada como incendio como los obtenidos en las pruebas estáticas, esto se debe principalmente a las condiciones de iluminación, pues los videos fueron tomados en tiempo real y a la intemperie. Conviene señalar que el algoritmo 2 fue más eficiente en el tiempo de análisis pues el algoritmo 1 le tomaba mayor tiempo el analizar un *frame* del video, como se muestra en la Tabla 2. El desempeño de ambos algoritmos no es ideal por lo que es necesario el mejoramiento de ambos, pero cabe resaltar que son pruebas realizadas con equipo no sofisticado y en tiempo real, lo que es un primer paso para el desarrollo de un sistema más robusto.

Conclusiones y trabajo futuro

En este trabajo se presentó la implementación de dos algoritmos para la detección de incendios en zonas semiáridas a partir del procesamiento digital de *frames* de videos obtenidos de Internet y videos en tiempo real.

Los resultados de las pruebas realizadas mostraron que, si bien la aplicación de técnicas de visión artificial puede contribuir con la detección oportuna de incendios y con ello evitar que se propague con consecuencias devastadoras, factores tales como la iluminación, tipo de zona geográfica y la formación de polvaredas influyen en la eficiencia de los algoritmos.

Por lo anterior, es necesario realizar pruebas con otras técnicas de procesamiento digital de imágenes que ayuden a minimizar los factores que influyen en la eficiencia de detección de incendios, como pueden ser técnicas que exploten los valores de intensidad de los píxeles en los *frames* o inclusive otros espacios de representación del color.

Cabe destacar que el costo económico es la principal desventaja de los sistemas que se han utilizado hasta ahora, y a diferencia de ellos nuestro trabajo propone el uso de una cámara de bajo costo y los resultados presentados exhiben la factibilidad de los algoritmos propuestos aún con hardware de características básicas.

Como trabajo futuro se propone la extensión y/o robustecimiento de los algoritmos propuestos, así como la realización de pruebas adicionales en ambientes controlados. Además de extender el sistema actual para la generación de alertas una vez detectado el incendio.

Referencias

Dueñas Carlos. (junio 2009). Obtenido de elai.upm consultado en: http://www.elai.upm.es/webantigua/spain/Asignaturas/MIP_VisionArtificial/ApuntesVA/cap1IntroVA.pdf

Celula de Fabricacion Flexible ETI. (julio 2014). Obtenido de etitudela consultado en: <http://www.etitudela.com/celula/downloads/visi-onartificial.pdf>

Muñoz, C. Acevedo, P., Salvo, S., Fagalde, G., Vargas, F. (2007). “Detección de incendios forestales utilizando imágenes en la Región de La Araucanía, Chile”. Revista bosque (Valdivia). Vol. 28, No. 2

Arrue, F. G. R. (2010). Sistema de detección visual de columnas de humo. Obtenido de <http://intranet.ceautomatica.es/>

Domènech, D. M. B. (2012). Sistema de detección de incendios. Catalunya.

Victor Hugo Medina García, Juan Manuel Cueva Lovelle, Rubén González Crespo, y Enrique Torres Franco, 2009. Software para la detección y extinción de incendios forestales, Seventh LACCEI Latin American and Caribbean Conference for Engineering and Technology (LACCEI'2009), 1- 8.

Indra. (2010). Detección térmica de incendios: Sistema de detección automática, localización y monitorización de incendios forestales mediante imagen térmica. Moises de León: Indra.

Forestal, (2010). Incendios forestales. Zapopan. Gonzalo Pajares Martinsanz, Jesús M. De La Cruz Garcia, y Antonio Garcia Tome 2008, Visión por computador. Imágenes Digitales y Aplicaciones. 2ª Edición, RA-MA, ISBN-10: 8478978313.

Modelado de convertidores de electrónica de potencia basado en funciones continuas: Aplicación en el STATCOM

CONTRERAS-AGUILAR, Luis†*, VENEGAS-TRUJILLO, Tiberio, ARROYO-LEDESMA, Jaime y CONCHA-SÁNCHEZ, Antonio

Universidad de Colima, campus Coquimatlán, Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, Km 9 carretera Colima-Coquimatlán, Coquimatlán, Colima, México, C.P. 28400

Recibido 11 de Julio, 2017; Aceptado 29 de Septiembre, 2017

Resumen

Actualmente, la flexibilización de la red eléctrica mediante convertidores basados en electrónica de potencia (FACTS, por sus siglas en inglés), ha permitido mejorar el control e incrementar la capacidad de transferencia de potencia en los sistemas eléctricos. Por otro lado, las simulaciones digitales en el dominio del tiempo son una herramienta indispensable para el análisis y diseño de dichos sistemas. De tal forma, que al incluir convertidores con altas frecuencias de conmutación dentro de las simulaciones, es necesario reducir significativamente el tiempo de muestreo para reducir el error computacional que se pueda acumular. La forma más simple para modelar estos dispositivos es mediante interruptores ideales. En este artículo se utilizan funciones continuas para modelar los interruptores del dispositivo. Las funciones son del tipo exponencial, cotangente hiperbólica y la ecuación Frolich modificada. Más allá, las funciones continuas permiten desarrollar simulaciones con mayor amplitud en el tiempo de muestreo y convenientemente reducir el error computacional durante el proceso. Finalmente, se realizan simulaciones en el dominio del tiempo donde se muestran las ventajas de la propuesta, y se comparan con las desarrolladas en software Simulink/MATLAB.

Funciones continuas, convertidores de electrónica de potencia, STATCOM, simulación en tiempo

Citación: CONTRERAS-AGUILAR, Luis, VENEGAS-TRUJILLO, Tiberio, ARROYO-LEDESMA, Jaime y CONCHA-SÁNCHEZ, Antonio. Modelado de convertidores de electrónica de potencia basado en funciones continuas: Aplicación en el STATCOM. Revista de Ingeniería Tecnológica 2017. 1-3:38-45

Abstract

Nowadays, Flexible AC Transmission Systems (FACTS) based on power electronics devices allow enhance the control and increase the power transfer capability of the electrical networks. On the other hand, time-domain digital simulations are an essential tool for the analysis and design of electrical systems. In such way, when digital simulations are developed including power electronic converters with fast switching frequencies, it is required to decrease significantly the time step in order to reduce the computational error. Using ideal switches is the simplest way to model power electronic converters. This paper uses continuous functions in order to model the switches of the device. The functions are exponential type, hyperbolic cotangent and the modified Frolich equation. Furthermore, the continuous function allows carry-out simulations with greater time step and less computational error during the process. Finally, time-domain simulations are developed and compared with Simulink/MATLAB software in order to show the advantages of the proposal.

Continuous function, power electronics converters, STATCOM, time-domain simulation

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

† Investigador contribuyendo como primer autor.

Introducción

El interés en resolver problemas asociados a la vida real por medio de modelos matemáticos es característico de la ciencia y la tecnología (Galbraith y Stillman, 2006). Además, los modelos matemáticos simplificados han favorecido la solución rápida, pero se ha sacrificado la precisión y/o ventajas que los modelos más sofisticados puedan brindar. Por otro lado, con el gran avance del procesamiento de cómputo se ha incrementado el uso y desarrollo de modelos matemáticos y algoritmos más complejos para representar y predecir los comportamientos de fenómenos físicos asociados a las nuevas tecnologías.

En el sentido anterior, en las últimas décadas la red eléctrica se ha favorecido con los sistemas flexibles de transmisión en corriente alterna (FACTS, por sus siglas en inglés) (Hingorani, 2000). Los dispositivos FACTS son convertidores basados en electrónica de potencia que permiten controlar y regular variables eléctricas del sistema de potencia. Dentro de la familia de los dispositivos FACTS, el compensador estático síncrono (STATCOM, por sus siglas en inglés), permite controlar el voltaje en el nodo de conexión por medio de la inyección de potencia reactiva (Sen, 1998). El STATCOM está basado en un convertidor de fuente de voltaje conmutada (VSC, por sus siglas en inglés), que utiliza técnicas de control por modulación de ancho de pulso (PWM, por sus siglas en inglés) en el control de la inyección de potencia reactiva.

En la simulación de dispositivos FACTS basados en VSC se requiere de modelos matemáticos apropiados para obtener resultados rápidos y precisos. En este sentido, existen varios dispositivos FACTS basados en modelos de VSC ideales (Acha y Madrigal, 2001).

El modelo ideal se utiliza recurrentemente debido a su simplicidad. Sin embargo, tiene la desventaja de discontinuidades y/o eventos discretos relacionados con el proceso de conmutación del VSC, el cual puede afectar al proceso continuo de simulación dinámica del sistema. Esas dificultades analíticas son comunes en todos los dispositivos FACTS que operan basados con interruptores semiconductores (Segundo-Ramírez y Medina, 2009). El modelado de los interruptores se puede realizar con diferentes niveles de complejidad, de tal forma, que los modelos más detallados pueden ser justificados y necesarios cuando son de interés los fenómenos asociados con el proceso de conmutación. Sin embargo, el costo computacional es alto debido a la rigidez del sistema que se introduce con las altas diferencias entre las constantes de tiempo del sistema (Contreras-Aguilar y García, 2007). La fuente de estos problemas numéricos, en el caso de los modelos ideales de VSC, son las discontinuidades del sistema y que no existe derivada para el instante del switcheo cuando se usa el modelo de interruptor ideal (Segundo-Ramírez y Medina, 2009). Un problema importante que surge con el modelo ideal de interruptores es que el error numérico introducido por las discontinuidades no permite calcular la solución con una precisión muy alta. De tal forma, que en este trabajo se utilizan modelos matemáticos continuos y diferenciables para representar los interruptores del VSC y utilizarlos para simulaciones rápidas y eficiente del convertidor STATCOM y otros dispositivos FACTS basados en VSC. Las funciones están basadas en tipo exponencial, cotangente hiperbólica y la ecuación Frolich modificada. Las cuales son una extensión al trabajo propuesto en (Segundo-Ramírez y Medina, 2009) usando la tangente hiperbólica.

Modelado del STATCOM

La Figura 1 muestra un STATCOM típico, que consiste en un convertidor de fuente de voltaje conmutada (VSC) y un transformador de acoplamiento conectado entre el nodo de voltaje de AC y el VSC. La conexión del transformador de potencia es estrella-Delta con la dirección de flujo de potencia hacia los interruptores del VSC. Además, el STATCOM tiene un capacitor del lado de corriente directa para suministro de potencia reactiva.

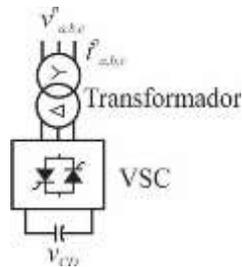


Figura 1 Circuito equivalente del STATCOM

Fuente: Elaboración propia

Modelo del transformador

El transformador estrella-delta es modelado como un banco de transformadores trifásico construido con tres transformadores lineales monofásicos. La impedancia se coloca en el lado primario y un transformador ideal con la relación de transformación de $a = N_p/N_s$. Aplicando las leyes de voltaje y de corriente de Kirchhoff al transformador lineal se puede obtener las siguientes tres ecuaciones diferenciales ordinarias,

$$L_p \frac{di_a^p}{dt} = [v_a^p - R_p i_a^p - a(v_a^s - v_b^s)] \quad (1)$$

$$L_p \frac{di_b^p}{dt} = [v_b^p - R_p i_b^p - a(v_b^s - v_c^s)] \quad (2)$$

$$L_p \frac{di_c^p}{dt} = [v_c^p - R_p i_c^p - a(v_c^s - v_a^s)] \quad (3)$$

p y s denotan primario y secundario respectivamente, v y i son los voltajes y corrientes. R_p y L_p es la resistencia e inductancia del transformador.

Modelo del VSC

La Figura 2 muestra el circuito del VSC. Un puente trifásico de seis pulsos con interruptores bidireccionales es usado para construir el VSC de dos niveles. Cada interruptor es un arreglo de un GTO, IGBT o MOSFET en anti-paralelo con un diodo. Además, se desprecian las pérdidas en los semiconductores. Se utiliza el modelo de conmutador ideal o función continua, según sea el caso, para este trabajo. Entonces, las funciones del interruptor bidireccional se identifican por S y S' para cada fase, que puede estar activada o desactivada, 1 o 0 respectivamente o con el modelo de la función continua. Además, S y S' en cada fase son complementarios, por lo que $S+S'=1$. El voltaje del VSC en el secundario del transformador es,

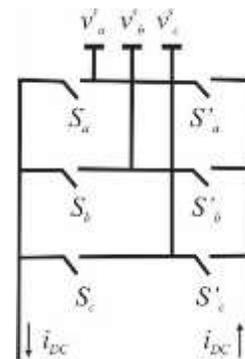


Figura 2 Circuito equivalente del VSC ideal

Fuente: Elaboración propia

$$v_a^s = \left[S_a - \frac{(S_a+S_b+S_c)}{3} \right] v_{CD} \quad (4)$$

$$v_b^s = \left[S_b - \frac{(S_a+S_b+S_c)}{3} \right] v_{CD} \quad (5)$$

$$v_c^s = \left[S_c - \frac{(S_a + S_b + S_c)}{3} \right] v_{CD} \quad (6)$$

donde v_{CD} es el voltaje del capacitor y $S_{a,b,c}$ depende de la técnica de control PWM.

Modelo del Capacitor

El comportamiento dinámico en el voltaje del capacitor del enlace de Corriente Directa (DC) es función de la sumatoria de las corrientes que ingresan al capacitor y se define como,

$$C \frac{dv_{CD}}{dt} = a \left[(i_a^p - i_c^p) S_a + (i_b^p - i_a^p) S_b + (i_c^p - i_b^p) S_c \right] \quad (7)$$

donde a es la relación de transformación, i denota las corrientes, el superíndice p indica que son las corrientes primarias a, b y c indican las fases.

Modelado del PWM-VSC mediante funciones continuas

El modelado de interruptores usando funciones de conmutación no es un problema nuevo, en (Lehn, 2002) se desarrolla un modelo de tiempo discreto lineal y variante en el tiempo del VSC trifásico. El procedimiento se basa en una solución exacta de forma cerrada de las ecuaciones del sistema y no se basa en técnicas iterativas. Además, generalmente los interruptores suelen ser modelados como un switch ideal usando una resistencia con valor infinito y cero para cuando el interruptor está abierto y cerrado, respectivamente. Bajo estos enfoques, los inconvenientes que se pueden tener son relacionados a problemas durante el proceso de solución en la simulación, tales como oscilaciones numéricas y necesidad de pasos de integración muy cortos para lograr una buena precisión.

De tal forma, que bajo el enfoque que se presenta en artículo se procura evitar estos problemas utilizando funciones continuas para representar los interruptores del VSC. Además, se puede utilizar pasos de integración más grandes durante el proceso de simulación.

Modulación por Ancho de Pulso (PWM) sinusoidal

En la técnica PWM se modifica el ciclo de trabajo de una señal periódica para controlar la cantidad de energía en los dispositivos FACTS. Extensos trabajos pueden ser referidos a la técnica PWM, entre las que destaca la técnica sinusoidal. Se basan en la comparación de una señal de referencia sinusoidal a modular y una señal portadora de forma triangular como se observa en la Figura 3 (a). La comparación generará un tren de pulsos de ancho específico que se utiliza como función durante el proceso de simulación de la conmutación los interruptores del VSC. La relación entre la amplitud de la señal portadora y la señal de referencia se llama índice de modulación de amplitud ma . El índice de modulación de amplitud permite obtener el voltaje variable del lado de AC. La relación entre la frecuencia de la señal portadora y la frecuencia de referencia se denomina índice de modulación de frecuencia y se representa por mf , en donde mf debe ser múltiplo de 3 de la frecuencia de la señal de referencia (Mohan y Undeland, 2007). El índice de modulación de frecuencia determina la distorsión armónica de la señal de salida la cual es una medida de su contenido armónico. La Figura 3 (b) muestra la función PWM requerida en el proceso de simulación para modelar los interruptores.

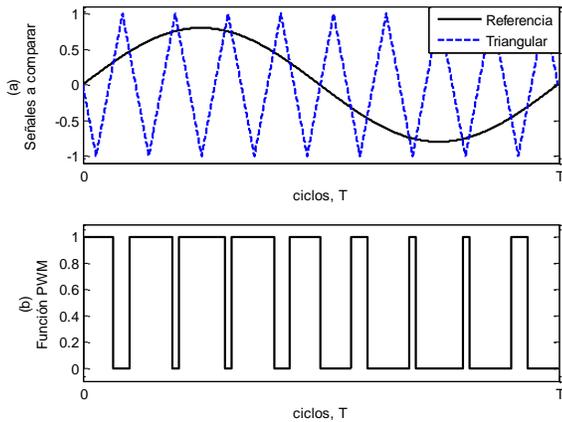


Gráfico 1 Función PWM

Fuente: Elaboración propia.

Funciones continuas PWM.

Basado en el trabajo de (Segundo-Ramírez y Medina, 2009), la función de conmutación PWM propuesta es del tipo tangente hiperbólica, la cual es una función continua, suave y diferenciable para todo tiempo,

$$S_i = \frac{\tanh(\alpha v_{com}) + 1}{2} \tag{8}$$

donde $i = a, b, c$, $v_{com} = (v_{ma} - v_{tri})$, v_{ma} es la señal de referencia, v_{tri} es la señal portadora y $\alpha = 7.5$, el cual está relacionado con la pendiente y la representación de los armónicos en el modelo. Las funciones propuestas en este trabajo para modelar la función PWM y que también son continuas, suaves y diferenciables, son: exponencial, la cual es una adaptación de la tangente hiperbólica,

$$S_i = \frac{1}{e^{-\beta v_{com}} + 1} \tag{9}$$

Función cotangente hiperbólica,

$$S_i = \frac{1}{2} \left[\coth\left(\frac{v_{com}}{a}\right) - \frac{a}{v_{com}} + 1 \right] \tag{10}$$

y la ecuación Frolich modificada,

$$S_i = \left[\frac{v_{com}}{a |v_{com}| + b \sqrt{|v_{com}|}} + \frac{1}{2} \right] \tag{11}$$

donde a y b son valores para ajustar la pendiente y el contenido armónico de la función PWM. Para todas las funciones anteriores la selección de la pendiente está basada como lo proponen en (Segundo-Ramírez y Medina, 2009), $\beta = 15$, $a = 3.75$ para la cotangente hiperbólica y $a = 2$ y $b = 0.01$ en la función de Frolich modificada.

La Figura 4 (a) muestra la Función PWM de referencia y las funciones continuas propuestas en este trabajo. La Figura 4 (b) muestra el contenido armónico de la Función PWM y las funciones continuas.

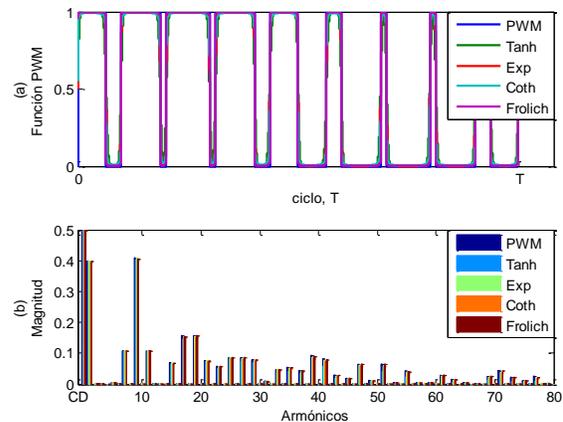


Gráfico 2 Funciones continuas PWM y su contenido armónico

Fuente: Elaboración propia

El gráfico 2 (b) muestra una muy buena caracterización de la función PWM y buena retención del contenido armónico, donde las más pequeñas discrepancias empiezan a partir del armónico 20.

Solución transitoria del STATCOM usando funciones continuas

El caso de prueba presentado en esta sección consiste en un STATCOM como el que se muestra en la Figura 1. El voltaje de primario del transformador es una fuente sinusoidal trifásica de 220 Vrms y 60 Hz. La resistencia del transformador es de 1.8929 ohms y la inductancia de 17.6 mH. El índice de modulación $ma = 0.8$ y el índice de modulación de frecuencia mf es de 15. Por practicidad, no se considera ningún sistema de control retroalimentado, tal que la simulación se tiene la respuesta en lazo abierto. El sistema es descrito por un conjunto de 4 ecuaciones diferenciales ordinarias y en todas las simulaciones las condiciones iniciales se seleccionan en cero. La solución en el dominio del tiempo del conjunto de ecuaciones es utilizando el algoritmo explícito Runge-Kutta de 4^{to} orden y un paso de tiempo de 1 μ s, para la simulación base o de referencia.

El gráfico 3 muestra la validación de la simulación en el dominio del tiempo del STATCOM. Las variables seleccionadas para mostrar son la corriente de la fase a del primario del transformador y el voltaje del capacitor en el lado CD. En esta figura se observa una buena correspondencia entre el modelo y Simulink de MATLAB®. Es importante remarcar que la solución base es utilizando el modelo de interruptores ideales con paso de integración de 1 μ s.

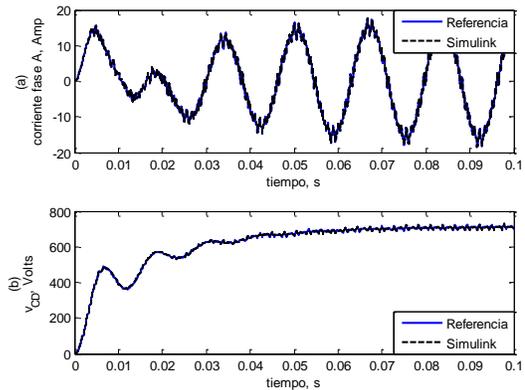


Gráfico 3 Simulación del STATCOM

Fuente: *Elaboración propia*

El gráfico 3 muestra los errores absolutos porcentuales entre la simulación base y las funciones continuas utilizando 1 μ s en las simulaciones. Por simplicidad se toma el voltaje del capacitor para comparar.

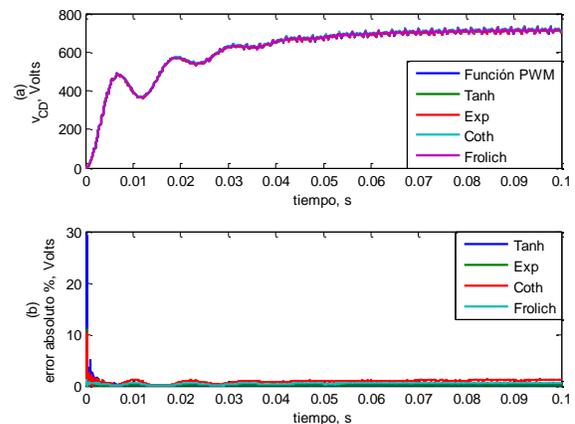


Gráfico 4 Simulación del STATCOM

Fuente: *Elaboración propia*

Los errores absolutos máximos son para la cotangente hiperbólica que están en alrededor del 1 % después del tercer ciclo. Mientras que el mínimo es la función tipo exponencial con cerca del 0.02 % del error absoluto. Al principio de la simulación se tiene los errores máximos porcentuales para la tangente hiperbólica, mientras que la de Frolich es la menor para el inicio de la simulación.

El gráfico 5 muestra los errores absolutos porcentuales máximos usando $100 \mu\text{s}$ en la simulación y comparado con la simulación de $1 \mu\text{s}$. Con base a los resultados se observa que la función PWM con modelo ideal y la de Frolich tienen los mayores errores porcentuales cercanos al 4 %. El error absoluto porcentual más pequeño es para la tangente hiperbólica y la exponencial con cerca del 0.5 %, mientras que la cotangente hiperbólica tienen un error máximo de aproximadamente de 2 %. Es evidente que la mejor aproximación se logra con la tangente hiperbólica y función exponencial.

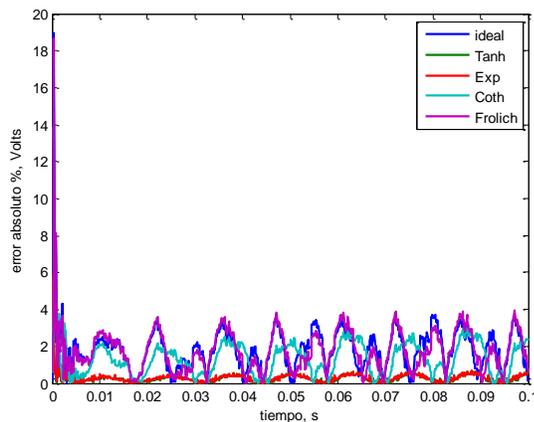


Gráfico 5 Simulación del STATCOM con un paso de integración de $100 \mu\text{s}$

Fuente: Elaboración propia

Conclusiones

En este trabajo se presentaron diferentes funciones continuas para simular la función PWM. Las funciones continuas son del tipo tangente hiperbólica, exponencial, cotangente hiperbólica y ecuación de Frolich modificada. Los resultados de las simulaciones muestran que la función continua tangente hiperbólica y exponencial tiene el menor error respecto a la simulación base de $1 \mu\text{s}$.

Se tiene un error absoluto porcentual máximo de 0.5 % utilizando funciones continuas en el modelado de la función PWM, lo cual indica que el uso de las funciones continuas permite incrementar el paso de integración ganando rapidez en la solución numérica de la simulación.

Algunas sugerencias para continuar con esta línea de investigación es experimentar dichas funciones dentro de algoritmos más robustos para la solución de sistemas eléctricos con el fin de cuantificar el tiempo de cómputo con respecto al software convencional de solución.

Agradecimiento

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

Referencias

- Galbraith, P. & Stillman, G. (2006). A Framework for Identifying Student Blockages During Transitions in the Modelling Process. *ZDM*, 38(2): 143-162.
- N. G. Hingorani & L. Gyugyi, Understanding FACTS. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2000.
- Sen, K. K. (1998). Static synchronous compensator-Theory modeling and applications. In Proc. IEEE Power Eng. Soc. Winter Meeting.
- Acha, E., & Madrigal, M. (2001). Power systems harmonics. John Wiley & Sons, Inc.
- Segundo-Ramírez, J., & Medina, A. (2009). Modeling of FACTS devices based on SPWM VSCs. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 24(4), 1815-1823.

Contreras-Aguilar, L., & García, N. (2007). Periodic solutions of stiff systems using the limit cycle method and an implicit integration technique. In Power Engineering Conference, 2007. IPEC 2007. International (pp. 854-859). IEEE.

Lehn, P. W. (2002). Exact modeling of the voltage source converter. IEEE Transactions on Power Delivery, 17(1), 217-222.

Mohan, N., & Undeland, T. M. (2007). Power electronics: converters, applications, and design. John Wiley & Sons.

Determinación experimental In Situ de la difusividad aparente del suelo por desfase de onda térmica

SILVA-AGUILAR, Oscar Fernando[†], ANDAVERDE-ARREDONDO, Jorge Alberto, BENÍTEZ-FUNDORA, Artemio Jesús y ESCOBEDO-TRUJILLO, Beatris Adriana

*Instituto de Energías Renovables, Universidad Nacional Autónoma De México
'Universidad Veracruzana, Campus Coatzacoalcos, Veracruz*

Recibido 10 de Julio, 2017; Aceptado 2 de Septiembre, 2017

Resumen

Este trabajo presenta la aplicación de una nueva metodología para la determinación experimental *in situ* de la difusividad térmica aparente (α) del suelo por desfase de onda térmica. En el diseño de bombas de calor e intercambiadores geotérmicos utilizados en tecnologías de energía renovables se requiere el valor de α del suelo para el cálculo del gradiente geotérmico y el calor a transferir entre el fluido y el suelo. Se realizaron corridas experimentales en el campus Coatzacoalcos de la Universidad Veracruzana (México), mediante una sonda de medición instrumentada con termopares cobre-constantán, distribuidos verticalmente de 0 hasta 1m para medir la variación cíclica de la temperatura del suelo. Con estos datos se calcula el espesor vertical del suelo (z) en que la temperatura se desfasa un periodo completo. Conocido el valor de z , la difusividad es calculada utilizando la ecuación diferencial de conducción unidireccional, en un cilindro semi-infinito con fuente de calor variable. La contribución de la metodología propuesta es una innovación al aplicar la propagación de error para obtener valores confiables de difusividad térmica *in situ*, utilizando la radiación solar en la superficie del suelo como fuente del calor cíclica. Los valores de α obtenidos se encuentran en los intervalos reportados para suelos arenosos.

Energía geotérmica, transferencia de calor, propagación de error, propiedades termofísicas

Abstract

This paper presents the implementation of a new methodology for the experimental determination *in situ* thermal diffusivity (α) of soil by thermal wave gap. Design of heat pumps and geothermal heat exchangers used in renewable energy technologies requires the value of α in the soil for the calculation of the geothermal gradient and heat transfer between the fluid and the soil. The experiments was done on campus Coatzacoalcos at the Universidad Veracruzana (Mexico), these experiments user a measuring probe instrumented with copper-constantan thermocouples, distributed vertically at from 0 up to 1m for measure the cyclic variation of soil temperature. This measures obtained of the experiments allows us calculated the vertical thickness of the soil (z) in which the temperature offset a period. Known the value of z , the diffusivity is calculated using the one-way conduction differential equation, in a semi-infinite cylinder with variable heat source. The contribution of the proposed methodology is an innovation by applying the error propagation to obtain reliable values of thermal diffusivity *in situ*, uses the solar radiation at the surface of the soil as cyclic heat supply. The obtained values of α are intervals reported for sandy soils.

Geothermal energy, heat transfer, propagation of error, thermophysical properties

Citación: SILVA-AGUILAR, Oscar Fernando, ANDAVERDE-ARREDONDO, Jorge Alberto, BENÍTEZ-FUNDORA, Artemio Jesús y ESCOBEDO-TRUJILLO, Beatris Adriana. Determinación experimental In Situ de la difusividad aparente del suelo por desfase de onda térmica. Revista de Ingeniería Tecnológica 2017. 1-3:46-57

[†] Investigador contribuyendo como primer autor.

Introducción

El conocimiento de las propiedades termofísicas del subsuelo es de suma importancia en aplicaciones de ingeniería e investigación de energías renovables. Las propiedades del subsuelo que determinan la respuesta a los cambios de temperatura son: el calor específico volumétrico C_v ($J\ kg^{-1}\ ^\circ C^{-1}$), la conductividad térmica K ($Wm^{-1}\ ^\circ C^{-1}$) y la difusividad térmica α ($m^2\ s^{-1}$). Dichas propiedades están en función de los componentes geoquímicos (minerales), porosidad y el contenido de agua, por lo que la variación de la difusividad a las condiciones específicas de cada lugar, tiempo y profundidad representa un problema a resolver.

En el campo de la Geotermia, las propiedades termofísicas del suelo así como las condiciones meteorológicas, son cruciales en el cálculo y simulación del flujo del calor hacia y desde el subsuelo, para el diseño de intercambiadores geotérmicos y bombas de calor frecuentemente utilizadas en acondicionamiento de confort humano. Estas propiedades también son importantes en lo que se refiere a edafología, ya que en las capas superficiales del suelo tienen lugar importantes procesos, por ejemplo la difusión gaseosa la germinación de semillas y la disponibilidad de nutrientes, fuertemente relacionados con la difusividad térmica (López-Santos et al., 2014). Es sabido que capas de tierra con baja conductividad y difusividad térmica dan como resultado un mayor gradiente geotérmico y viceversa (Pouloupatis et al., 2011). Por otra parte, la difusividad, la conductividad térmica y la capacidad calorífica del suelo son altamente dependientes de su contenido de humedad. Cuanto más grande es el contenido en agua, mayor serán sus valores. Se observa que la conductividad térmica del suelo es la propiedad más influyente en los resultados de transferencia de calor en el subsuelo (Demir et al., 2009; Florides y Kalogirou, 2004).

En el presente trabajo se expone una metodología para la determinación in situ de la difusividad térmica α , utilizando el concepto de onda térmica, basado en la propuesta original de Angström de someter un espécimen o muestra a periódicas variaciones de temperatura, donde un extremo es calentado y el extremo opuesto es enfriado en tanto se efectúan mediciones de temperaturas locales a diferentes distancias a lo largo del eje de la muestra (Bodzenta, 2008).

Varias técnicas han sido desarrolladas para la determinación y la evaluación de propiedades térmicas, las técnicas de medición de difusividad térmica, se pueden clasificar en técnicas de laboratorio y técnicas *in situ*. La determinación de difusividad por técnicas de laboratorio requiere generalmente, equipos costosos (Gillies et al., 1991), la preparación de especímenes para prueba (Abu-Hamdeh, 2016), frecuentemente los especímenes en forma de disco o de barra, con dimensiones y acabados sólo obtenidos con equipo y herramientas especializadas como el método TRAC (Thermal Radiation Calorimetry) (Hisano et al, 1999), y la técnica de radiometría fototérmica (Martinsons et al., 2002).

Las técnicas *in situ* han sido desarrolladas con el objetivo de efectuar las mediciones en campo y sin requerir la elaboración de especímenes. Los métodos más conocidos son: el denominado REKA (Rapid Evaluation of K and Alpha) de Danko y Mousset-Jones (Danko et al, 2002), la Prueba de Respuesta térmica (TRT), que se ha utilizado como método muy efectivo para determinar la conductividad y difusividad térmica de la tierra (Ozgener, 2011). Otros métodos evaluados para determinar la difusividad aparente α a partir de dos conjuntos de datos con algoritmos de amplitud, fase, arcotangente, logarítmico, armónico y conducción-convección.

Estos métodos aportaron resultados diversos entre sí (Gao et al., 2009; Horton et al., 1983). Una característica común en las técnicas *in situ*, es la inserción de elementos de temperatura conocida (estímulo térmico) y la observación del cambio de la misma con respecto al tiempo, con o sin un fluido de por medio.

El método que se propone utiliza la variación cíclica de las condiciones climatológicas diurnas y estacionales, por lo que no se emplea un estímulo térmico artificial, ni fluido intermedio es la determinación de la difusividad. El método ofrece la ventaja de mantener la mínima perturbación posible a las condiciones naturales del suelo. Además se aplica a los resultados una evaluación de confiabilidad mediante reglas estadísticas de propagación de errores. El objetivo de este trabajo es mostrar que el método experimental *in situ* de la difusividad aparente del suelo por desfase de onda térmica con las características que se propone, aporta resultados de considerable confiabilidad de la difusividad térmica del suelo, equivalentes a valores publicados en la literatura, con una notable ventaja en costos y equipo utilizado por otros métodos de laboratorio.

Equipo y procedimiento

Para realizar la experimentación es requerida la previa perforación de un pozo en el subsuelo, el procedimiento de perforación debe de tener en consideración la mínima alteración posible de las condiciones naturales del suelo, evitando la compactación del suelo, por lo que se utiliza un proceso de corte mediante broca de perforación fabricada especialmente para tal efecto, el diámetro de la broca es ajustada a los requerimientos geométricos de la sonda de medición, para asegurar el íntimo contacto entre los sensores de temperatura y el subsuelo de la zona de medición.

Se utilizaron sensores termopares tipo T Cobre – Constantán para un intervalo de temperaturas de 0 a 350 °C, con una exactitud de ± 0.5 °C calibrados con un equipo AMETEK modelo CTC-140 a rango de -30 °C a 140 °C, con un error de calibración del orden de ± 0.02 °C; la captura de datos se realizó mediante un adquirente de Agilent modelo 34972A.

En la Figura 1 se presenta el esquema de la sonda de medición con sensores de temperatura localizados a profundidades de 0.0, 0.16, 0.25, 0.36, 0.49, 0.64, 0.81 y 1.00 m, donde se aprecia el contacto directo de los sensores con el material del suelo.

La ubicación de los sensores en la sonda en intervalos crecientes con la profundidad, obedece a que en la parte somera debe de registrarse con mayor detalle las temperaturas por ser la zona donde la variación diurna es más evidente. La ubicación de los sensores es comparable a la distribución reportada por López-Santos et al. (2014). Los sensores (termopares) se colocaron cuidando que la distancia entre ellos fuera la indicada, además que los termopares fueran rígidos pero de diámetro reducido. La sonda se construyó de PVC dado que es un material de baja conductividad térmica, para que el proceso de transferencia de calor se diera por el material del suelo y no por la sonda misma. Por último, el diámetro del pozo y por lo tanto de la sonda son reducidos (0.06 m) a fin de que no provoquen ruido térmico significativo al interior del subsuelo.

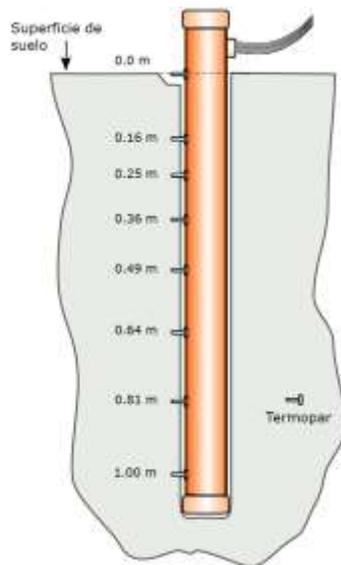


Figura 1 Distribución de termopares en sonda de medición

En la Figura 2 se muestra el prototipo de la sonda de medición con las características mencionada ya instalada en el lugar de medición de temperaturas.



Figura 2 Sonda de medición instalada

La sonda de medición se instaló en el campus Coatzacoalcos de la Universidad Veracruzana de coordenadas latitud $18^{\circ}08'39''$ N, longitud oeste $94^{\circ}28'36''$ y altitud 10 msnm localizada en la zona costera del Golfo de México, ubicación que se muestra en la Figura 3.



Figura 3 Ubicación geográfica de experimentación

Metodología

La presente sección describe la metodología empleada para determinar *in situ* la difusividad térmica del suelo.

La metodología consiste en realizar los siguientes pasos:

- (a) Mediante la sonda de medición obtener la variación de la temperatura del suelo en tiempo y profundidad.
- (b) Calcular el espesor vertical del suelo (z) en que la temperatura se desfasa un periodo completo.
- (c) Conocida z , la difusividad se calcula utilizando la ecuación diferencial de conducción unidireccional de Fourier.
- (d) Hacer un análisis de error de la regresión lineal y la propagación de error de la difusividad obtenida, causada por la incertidumbre o errores en las mediciones de desfase hasta z . Lo anterior permitirá encontrar intervalos de confianza que describirán la región dentro de la cual pudiera encontrarse el valor real de la difusividad.

Ya que existen diversos métodos para la determinación de la difusividad, del método armónico de desfase de onda mencionado en Horton et al., (1983), se decide en este trabajo utilizar la ecuación de difusividad por desfase de onda térmica propuesta por Beardsmore y Cull (2001). A continuación se presenta en forma sintética el fundamento térmico y matemático de la misma.

Se considera que la conducción de calor evoluciona de acuerdo a la ecuación diferencial de Fourier, Ec. (1):

$$\frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = \alpha \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

donde ∂T es la variación de la temperatura (K), ∂z la variación de la distancia (m) en este caso vertical, α la difusividad térmica ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$) y ∂t la variación en el tiempo (s).

El uso de la ecuación diferencial de Fourier (1) se debe a que el mecanismo de transferencia de calor en el suelo es fundamentalmente de conducción, los mecanismos de convección y radiación se omiten por considerar que en el suelo bajo estudio no existen movimientos sustanciales de gases o líquidos y la radiación en el subsuelo es prácticamente inexistente. El flujo de calor unidireccional por considerar los planos paralelos a la superficie del suelo como isotermas, se considera un medio homogéneo, flujo de calor en un cilindro semi-infinito en estado transitorio y sin generación de calor.

La solución analítica de la ecuación diferencial (1) tomando los efectos de la variación periódica de la temperatura fue propuesta por Carslaw y Jaeger (1989) y está dada por la Ec. 2:

$$T_U = T_S \times \exp(-\varepsilon z) \text{sen}(\omega t - \varepsilon z) \quad (2)$$

donde T_U es la amplitud de temperaturas a una particular profundidad ($^{\circ}\text{C}$), T_S la amplitud de temperaturas en superficie ($^{\circ}\text{C}$) (condición de frontera), ω la frecuencia (s^{-1}) y z la profundidad (m) (no necesariamente en la superficie del suelo). El término ε es función del periodo P (s) y la difusividad, y se calcula mediante la Ec. 3.

$$\varepsilon = \left(\frac{\pi}{P\alpha} \right)^{1/2} \quad (3)$$

Como mencionan los autores Carslaw y Jaeger (1989), la profundidad z en la cual la fluctuación de la temperatura se encuentra en fase con el ciclo de la superficie lo da el término de la función seno en (2), esto es, bajo la condición de que $\varepsilon z = 2\pi$. Así, esta última igualdad junto con la Ec. (3) implican que;

$$z = (4\pi P\alpha)^{1/2} \quad (4)$$

Para calcular el valor de la difusividad térmica del subsuelo se despeja α de la Ec. (4) y se obtiene como resultado la expresión para la difusividad térmica (Ec. 5).

$$\alpha = \frac{z^2}{4\pi P} \quad (5)$$

Espesor vertical del suelo (z)

En esta sección se aproximará usando regresión lineal el espesor vertical del suelo (z) en la cual la fluctuación de la temperatura se encuentra en fase con el ciclo de la superficie, para ello se usará el método de ecuación de fase propuesto por Horton et al., 1983; Persaud y Chang, 1985; Rejeev y Kodikara, 2015.

Para esta finalidad las corridas experimentales permiten obtener la variación de temperatura en cada uno de los puntos de medición.

Se llevó a cabo una campaña experimental, con corridas promedio de 4 días y una frecuencia de medición de temperatura de 15 segundos, simultáneamente a cada una de las profundidades de los termopares de la sonda. En el Gráfico 1, se presenta la variación de la temperatura en cada uno de los puntos de medición.

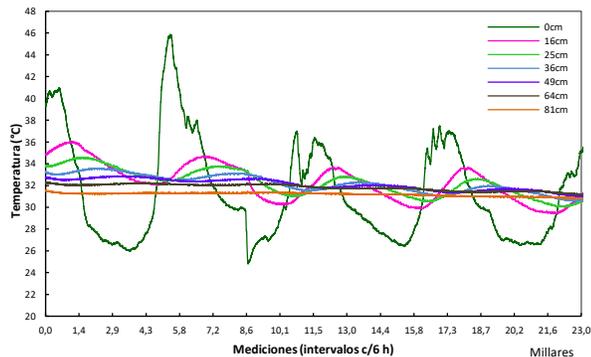


Gráfico 1 Variación de temperatura en tiempo y profundidad

A la profundidad experimental del presente estudio el comportamiento de la temperatura observado durante la medición a diferentes profundidades del suelo, posee cuatro características importantes;

- (a) La variación en el tiempo de la temperatura en todos y cada uno de los puntos de medición es de tipo sinusoidal y tienen en común la misma longitud de onda.

- (b) En una medición simultánea (sin variación del tiempo) existe una disminución en el gradiente de temperatura a medida que se incrementa la profundidad (menor diferencia de temperatura por unidad de longitud vertical de suelo)

- (c) La medición en el tiempo por cada termopar, presenta una disminución de la amplitud de onda térmica (la mitad del intervalo entre cresta y valle) a medida que se incrementa la profundidad del punto de medición.

- (d) La fase de la onda térmica correspondiente a cada termopar, se retrasa (desfasa) en el tiempo a medida que se incrementa la profundidad del punto de medición, debido al tiempo que tarda la onda térmica en recorrer una capa de suelo.

Es precisamente la característica (d) de retraso en tiempo de la onda térmica a medida que se incrementa la profundidad de medición, lo cual constituye el fundamento físico del presente trabajo de desfase de onda térmica.

Periodo-profundidad de onda térmica.

Uno de los métodos usados frecuentemente para calcular la difusividad térmica del suelo es el de ecuación de fase (Horton et al., 1983; Persaud y Chang, 1985; Rejeev y Kodikara, 2015). En estos trabajos se calcula la difusividad térmica a partir del registro de los tiempos de dos máximos de temperatura en dos profundidades diferentes. Este método, aunque sencillo de aplicar, tiene la desventaja de que la incertidumbre de la difusividad puede ser considerable y depende fuertemente de la incertidumbre de las dos mediciones.

Para atenuar esta incertidumbre se propone en este trabajo que se utilicen más de dos profundidades de medición del tiempo según lo sugerido por Miller y Miller (2000). Para aplicar la anterior recomendación es apropiado se emplee un modelo de regresión lineal entre los valores de tiempo de los máximos de temperatura y profundidades para calcular la profundidad a la que se tendría un periodo completo (un día) de desfase de la onda térmica. Se determinó el tiempo en que ocurre la máxima temperatura (cresta de onda) para cuatro periodos o días de experimentación, analizados a, b, c y d, a las profundidades correspondientes a los sensores, estos cuatro casos analizados son con el fin de corroborar estadísticamente que el fenómeno se repite. Los valores obtenidos se registran en la Tabla 1 en la cual el tiempo se expresa en formato decimal.

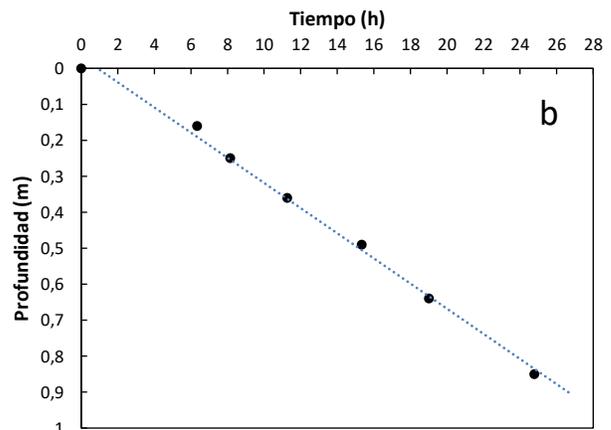
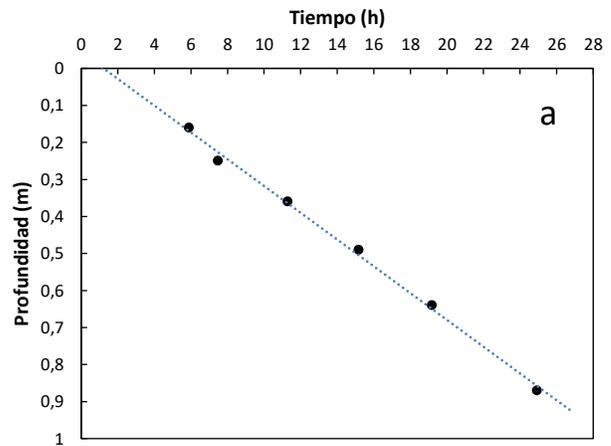
Periodo	Tiempo de cresta de onda (h)					
	0.0 0	0.16	0.25	0.36	0.4 9	0.6 4
a		19.2 2	20.8 0	0.61	4.4 9	8.5 1
b	13. 10	19.4 4	21.2 5	0.36	4.4 4	8.1 2
c	13. 21	18.3 7	20.3 2	23.3 8	3.4 4	6.9 4
d	13. 38	18.4 7	20.2 1	22.1 2	2.2 4	7.4 9

Tabla 1 Tiempo de temperatura máxima de onda térmica por periodo y profundidad

Se observa en la Tabla 1, que no se consideran los tiempos de los termopares a 0.81 y 1.00 m debido a que la amplitud de temperatura en la onda térmica es despreciable, tampoco se considera el tiempo a 0.0 m del periodo a, ya que la experimentación fue iniciada en tiempo posterior a la máxima temperatura superficial del día.

Al aplicar regresión lineal a los datos de profundidad de medición de temperatura máxima con el intervalo de tiempo entre crestas de onda se obtiene la ecuación que utilizamos para encontrar la mencionada profundidad z, haciendo el tiempo igual a un día. De no hacerlo así sería necesaria la instalación continua de termopares en la sonda de medición para encontrar la posición justa del termopar a la que concurre la temperatura máxima en 24 h.

En los Gráficos 2 a, b, c y d, cada marcador representan en que tiempo coincide la máxima temperatura de onda en el termopar a la profundidad indicada en el eje de ordenadas, el conjunto de marcadores nos indica la tendencia, por la que se aplica el método de regresión lineal por mínimos cuadrados de las variables profundidad-intervalo de tiempo.



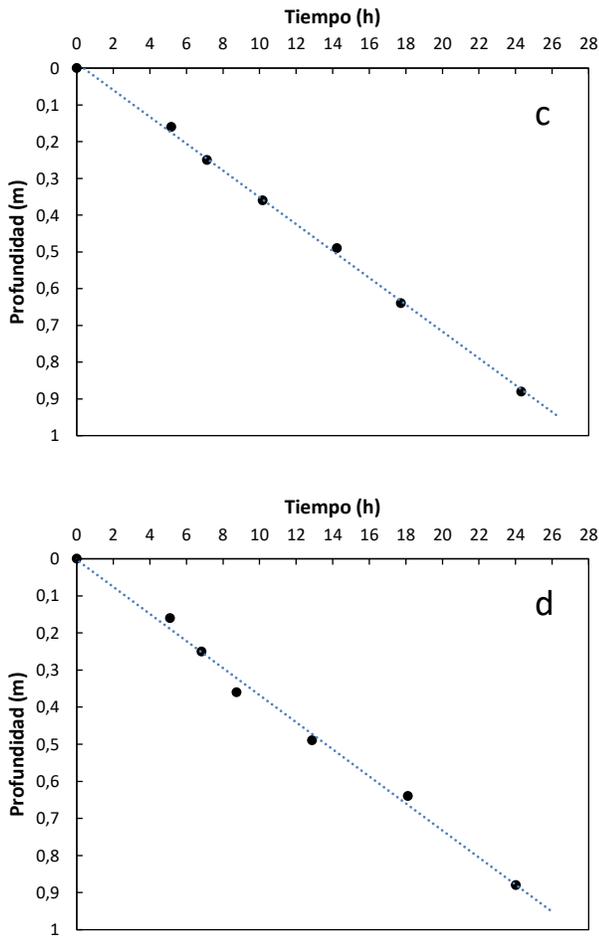


Gráfico 2 Regresión lineal de profundidad-intervalo de tiempo para periodos a, b, c y d

En estos gráficos el dato de mayor profundidad es el valor calculado por extrapolación, que corresponde a la profundidad z en la que la temperatura máxima del subsuelo se retrasa un periodo completo con respecto a la temperatura máxima superficial, a fin de cumplir con la condición $\epsilon z = 2\pi$ aplicada a la ecuación (3). Cabe aclarar que los tiempos en la tabla 1 corresponden al uso horario y el de los gráficos 2 son intervalos de tiempo entre temperaturas máximas.

Las ecuaciones de las líneas rectas obtenidas mediante el método de mínimos cuadrados, el coeficiente de determinación R^2 y la extrapolación cuando el periodo cumple 24 h para determinar la profundidad z calculada de desfase de onda por periodo analizado, se muestran en la Tabla 2.

Regresión lineal			
Periodo	Ec. Línea de tendencia	R^2	Profundidad (z) en 24 h (m)
a	$y = 0.9135 + 28.631x$	0.995	0.870
b	$y = 0.7719 + 29.205x$	0.993	0.848
c	$y = 0.3013 + 27.689x$	0.998	0.878
d	$y = 0.0120 + 27.142x$	0.988	0.885

Es de observar que los coeficientes de determinación son cercanos a la unidad y en todos los casos superan el valor crítico a un nivel de confianza del 95% indicado en Ebdon, (1991).

Propagación de error de la difusividad

En esta sección se determina en primer término los errores de la regresión lineal que son necesarios para la propagación de error de la difusividad. La elección de la ecuación de la recta tiene la forma de la Ec. 6. Donde el coeficiente a es el intercepto en el eje de ordenadas y el coeficiente b es la pendiente de la recta.

$$y = a + bx \tag{6}$$

Los parámetros de regresión lineal ordinaria (la pendiente b y el intercepto a) no están libres de error ya que los datos utilizados están sujetos a errores aleatorios.

Las ecuaciones propuestas por Miller y Miller, (2000) para el error estándar de los coeficientes de regresión para el intercepto y la pendiente se estiman con las Ec. 7 y 8, respectivamente.

$$S_a = \sqrt[2]{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 \sum x_i^2}{n(n-2) \sum (x_i - \bar{x})^2}} \tag{7}$$

$$S_b = \sqrt[2]{\frac{\sum (y_i - \hat{y}_i)^2}{(n-2) \sum (x_i - \bar{x})^2}} \tag{8}$$

donde S_a es el error estándar del intercepto, S_b el error estándar de la pendiente, y_i es el valor de la medición para el dato i ésimo, \hat{y}_i es el valor calculado para el mismo valor de x (del dato x_i, y_i) usando la ecuación de regresión. Los intervalos de confianza de la pendiente b y el intercepto a están dados por las Ec. 9 y 10:

$$\{b - (t_{(n-2)} S_b)\} < \mu_b < \{b + (t_{(n-2)} S_b)\} \tag{9}$$

$$\{a - (t_{(n-2)} S_a)\} < \mu_a < \{a + (t_{(n-2)} S_a)\} \tag{10}$$

donde $t_{(n-2)}$ es el valor crítico de t de Student, (two-tailed) con $(n-2)$ grados de libertad, que en el presente trabajo se considera a un nivel de confianza de 95%. En la Tabla 3 se muestra el resultado de los cálculos para cada uno de los periodos

Periodo	Error intercepto y pendiente		$t_{(n-2)}$	L. Confianza 95%	
	Sa	Sb		a ±	b ±
a	0.552	1.325	3.182	1.756	4.216
b	0.477	1.254	2.776	1.324	3.482
c	0.263	0.693	2.776	0.731	1.923
d	0.567	1.491	2.776	1.574	4.140

Tabla 3 Error de regresión lineal

El error estándar global de la profundidad S_Z a la cual el desfase de onda es de un periodo de 24 h se obtiene con la Ec. 11 (Miller y Miller, 2000).

$$S_Z = \frac{S_{y/x}}{b} \sqrt{1 + \frac{1}{n} + \frac{(y_i - \bar{y})^2}{b^2 \sum (x_i - \bar{x})^2}} \tag{11}$$

donde $S_{y/x}$ está dado por la Ec. 12

$$S_{y/x} = \sqrt{\frac{\sum (y_i - \hat{y}_i)^2}{(n-2)}} \tag{12}$$

La fórmula específica empleada en la propagación de error, de exponencial de variables $X = aU^b$, propuesta por Bevington and Robinson (2003), es la Ec. 13 en donde el signo \approx de la fórmula destaca la naturaleza aproximada, debido a que se desprecian los términos de alto grado en la expansión de la serie de Taylor.

$$\frac{S_X}{X} \approx b \frac{S_U}{U} \tag{13}$$

Aplicando la formula especifica 13 de propagación de error a la ecuación de difusividad 5 por desfase de onda térmica. La propagación de error de la difusividad S_α está dada por la Ec. 14:

$$S_\alpha = \frac{z S_Z}{2\pi P} \tag{14}$$

El resultado del cálculo de propagación de error para cada uno de los periodos se muestra en la Tabla 4, donde se observa la similitud en el error de la difusividad entre periodos.

Periodo	Propagación de error		
	S _{x/y}	S _z	S _α
a	0.683	0.036	5.73 X 10 ⁻⁰⁸
b	0.647	0.032	5.18 X 10 ⁻⁰⁸
c	0.357	0.020	3.17 X 10 ⁻⁰⁸
d	0.769	0.044	7.12 X 10 ⁻⁰⁸

Tabla 4 Propagación de Error de la difusividad

Resultados y Discusión

La aplicación de la Ec. 5, de difusividad utilizando la profundidad z determinada por extrapolación, así como el cálculo de error mediante la Ec. 14 de los cuatro periodos analizados, nos arrojan los resultados de la difusividad media aparente con sus intervalos de error correspondientes y su equivalente porcentual del error relativo mostrados en la Tabla 5:

Periodo	Difusividad (m ² /s)	α	Error %
a	(6.974 ± 0.6) x 10 ⁻⁷		8.22
b	(6.626 ± 0.5) x 10 ⁻⁷		7.42
c	(7.094 ± 0.3) x 10 ⁻⁷		4.39
d	(7.209 ± 0.7) x 10 ⁻⁷		9.88

Tabla 5 Resultados experimentales de difusividad

Es relevante constatar que los valores obtenidos de difusividad incluyendo los intervalos de error propagados del material de estudio, con el método experimental propuesto de desfase de onda térmica, están dentro del intervalo de valores de difusividad térmica reportados por Florides y Kalogirou (2004) para arena seca y húmeda. En la Tabla 6, se muestra el intervalo de difusividad.

Tipo de suelo	α (m ² /s)
Roca	2.0 x 10 ⁻⁶
Arena seca	1.0 x 10 ⁻⁷
Arena húmeda	1.0 x 10 ⁻⁶
Arcilla seca	2.0 x 10 ⁻⁷
Arcilla húmeda	1.5 x 10 ⁻⁶

Tabla 6 Valores de difusividad térmica (Tomada de Florides y Kalogirou, 2004)

En la figura 4 se muestra gráficamente los resultados obtenidos en la determinación de la difusividad térmica con el método utilizado mostrándose los límites reportados por Florides y Kalogirou (2004).

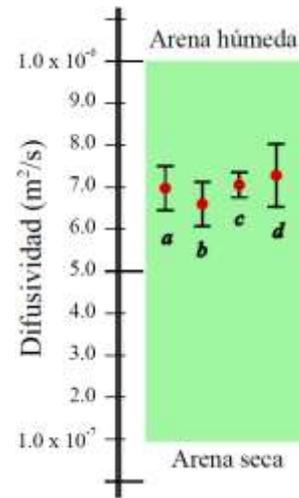


Figura 4 Comparativo de resultados con datos publicados

Agradecimiento

Los autores de este trabajo agradecen las facilidades proporcionadas para el uso de equipo e instalaciones del laboratorio de energía de la Facultad de Ingeniería y del Centro de Investigación en Recursos Energéticos y Sustentables de la Universidad Veracruzana.

Conclusiones

Se demuestra con los resultados de difusividad térmica obtenidos que el método experimental *in situ* de la difusividad aparente del suelo por desfase de onda térmica con las características propuestas se encuentran dentro del intervalo de valores de difusividad térmica de suelo arenoso publicados en la literatura.

Es de hacer notar que en la literatura no se indica el método aplicado para la obtención de los valores, y ni el intervalo de confianza de los mismos. La aplicación de la propagación de error en el método que se propone en este trabajo, confirma el alto grado de confiabilidad, por los reducidos intervalos de error de los valores obtenidos y la bondad del método para poder replicar los resultados.

Esta metodología ofrece ventajas económicas al requerir equipos no especializados y ahorro del consumo de energía para una fuente de calor.

Es de resaltar la ventaja de realizar las mediciones en las condiciones naturales del suelo, sin necesidad de sacar muestras para medirlas en el laboratorio.

Una limitante de la metodología propuesta es que puede ser aplicada sólo para mediciones de difusividad hasta profundidades donde la variación cíclica diaria afecta notoriamente al subsuelo, que se estima próximas a 1.0 m dependiendo esta de su composición mineral, porosidad y contenido de agua.

Se recomienda la instalación del primer sensor de temperatura a profundidades de 0.03 a 0.05 m en lugar del sensor de la superficie del suelo, para amortiguar las variaciones de temperatura por condiciones ambientales como vientos y nubes.

Esto facilitará la determinación estadística de las crestas de onda térmica en cada periodo.

Referencias

ABU-HAMDEH, NH. 2001. Measurement of the thermal conductivity of sandy loam and clay loam soils using single and dual probes. *Journal of Agricultural Engineering Research*. 80 (2), pp. 209-216. ISSN: 1095-9246, DOI:10.1006/jaer.2001.0730

BEVINGTON, P.R., ROBINSON, D.K. *Data reduction and error analysis for the physical sciences*. Third edition. Boston: Mc-Graw Hill, 2003. ISBN 0-07 247227-8.

BEARDSMORE, G., CULL, J. *Crustal Heat Flow. A Guide to Measurement and Modelling*. First edition. Cambridge. Cambridge University Press, 2001. ISBN 0-0521-79703-9.

BODZENTA, J. 2008. Thermal wave methods in investigation of thermal properties of solids, *European Physical Journal Special Topics* 154, pp. 305–311. ISSN: 1951-6355 DOI: 10.1140/epjst/e2008-00566-5

CARSLAW, H.S., JAEGER, J.C. *Conduction of Heat in Solids*. Second edition. Oxford. Oxford University Press, 1986. ISBN 13: 9780198533689

DANKO, G., SHAH, N., BAHRAMI, D. 2002. Evaluation of lithophysical conductivity, diffusivity, and porosity measurements using the REKA method. *WM'02 Conference*, February, Tucson, AZ., 1-13.

DEMIR, H., KOYUN, A., TEMIR, G. 2009. Heat transfer of horizontal parallel pipe ground heat exchanger and experimental verification. *Applied Thermal Engineering* 29, pp. 224–233.

ISSN: 1359-4311, DOI:10.1016/j.applthermaleng.2008.02.027

EBDON, D. *Statistics in geography: A Practical Approach*. Second edition. Oxford, Wiley & Sons, 1991. ISBN: 13 978-0-631-13688-0

FLORIDES, G., KALOGIROU, S. 2004. Measurements of ground temperature at various depths, *Proceedings, 3rd International Conference on Sustainable Energy Technologies*, Nottingham, UK.

GAO, Z., WANG, L., HORTON, R. 2009. Comparison of six algorithms to determine the soil thermal diffusivity at a site in the Loess Plateau of China, *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.* 6, pp 2247–2274. ISSN: 1812-2108

GILLIES, A.D.S., CREEVY, P., DANKO, G., MOUSSET-JONES, P.E. 1991. In-situ Mine Measurement of Rock Conductivity and Diffusivity Properties. *Proceedings Fifth Int. Mine Ventilation Congress*, Johannesburg, October, 139-144. ISBN-13: 978-0873350990

HISANO, K., SAWAI, S., MORIMOTO, K. 1999. Simultaneous Measurement of Specific Heat Capacity, Thermal Conductivity, and Thermal Diffusivity by Thermal Radiation Calorimetry. *International Journal of Thermophysics*. Vol 20, 2, pp 733-742. ISSN: 1572-9567 DOI:10.1023/A:1022633910850

HORTON, R., WIERENGA, P.J., NIELSEN, D.R. 1983. Evaluation of methods for determining the apparent thermal diffusivity of soil near the surface. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 47: pp. 25-32. ISSN: 0361-5995,

LÓPEZ, A., ZERMEÑO, A., GONZÁLEZ, J., GONZÁLEZ, G., CADENA, M., CAMPOS, S. 2014. Medición de la profundidad de flujo de calor y difusividad térmica en suelos con texturas diferentes por dos métodos de análisis.

Investigación y Ciencia, Universidad Autónoma de Aguascalientes, No 62: pp. 17-25. ISSN: 1665-4412

MARTINSONS, C. D., LEVICK, A. P., EDWARDS, G. J. 2003. Measurement of the Thermal Diffusivity of Solids with Improved Accuracy. *International Journal of Thermophysics*, Vol. 24, No. 4, pp.1171-1183. ISSN: 0195-928X

MILLER, J.N., MILLER, J.C. *Estadística y Quimiometría para Química Analítica*. Cuarta edición. Madrid. Prentice Hall, Pearson Education, 2002. ISBN: 84-205-3514-1

OZGENER, L. 2011. A review on the experimental and analytical analysis of earth to air heat exchanger (EAHE) systems in Turkey. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 15, pp. 4483– 4490. ISSN: 1364-0321, DOI:10.1016/j.rser.2011.07.103

PERSAUD, N., CHANG, A. 1986. Computing mean apparent soil thermal diffusivity from daily observations of soil temperature at two depths. *Soil Science*, 139, 4, pp. 297-303. ISSN: 0038-075X

POULOUPATIS, P.D., FLORIDES, G., TASSOU, S. 2011. Measurements of ground temperatures in Cyprus for ground thermal applications. *Renewable Energy* 36, pp. 804-814. ISSN: 0960-1481, DOI:10.1016/j.renene.2010.07.029

RAJEEV, P., KODIKARA, J. 2015. Estimating apparent thermal diffusivity of soil using field temperature time series. *Geomechanics and Geoengineering*, Vol. 11, 1, pp. 28-46. ISSN:1748-6025

Factibilidad técnica económica de colectores solares para temperatura media-baja disponibles en México

NAJERA-TREJO, Mario†*, MARTÍN-DOMÍNGUEZ, Ignacio, ESCOBEDO-BRETADO, Jorge y PINEDO-DÍAZ, Jesús*

Centro de Investigación en Materiales Avanzados, S.C. - Departamento de Ingeniería sustentable. CIMAV 110. Ejido Arroyo Seco 34147 Durango, Dgo. México.

'Instituto Tecnológico de Durango, Departamento Metal-Mecánica. Felipe Pescador 1830, Nueva Viscaya, 34080, Durango, Dgo. México.

Recibido 15 de Julio, 2017; Aceptado 7 de Septiembre, 2017

Resumen

Para desarrollar un proyecto de calor solar para procesos industriales es necesario contar con múltiples herramientas, conocimiento e información. (Muster-Slawitsch, Schmitt, Krummenacher, Helmke, Hess & Brunner). Por tal motivo, el objetivo de este trabajo es encontrar la factibilidad técnica económica de distintos tipos y marcas de colectores solares para temperatura media-baja, que se encuentran comercialmente disponibles en México. En su desarrollo se realiza una búsqueda de proveedores de equipo solar térmico en México que tengan algún tipo de validación técnica. Adicionalmente recabar los costos que permitan crear una base de datos completa. Basados en la información climatológica de meteonorm y los datos técnicos recabados, se desarrolla un simulador utilizando Simulación Studio de TRNSYS. Utilizando este simulador se realiza un análisis de variación paramétrica que involucre los valores económicos para finalmente obtener la factibilidad en el uso de los distintos colectores solares. Se presentan los resultados cuantitativos por zonas geográficas del país.

Calor solar, Colectores termo solares, factibilidad económica, simulación, TRNSYS

Abstract

Para desarrollar un proyecto de calor solar para procesos industriales es necesario contar con múltiples herramientas, conocimiento e información. (Muster-Slawitsch, Schmitt, Krummenacher, Helmke, Hess & Brunner). Por tal motivo, el objetivo de este trabajo es encontrar la factibilidad técnica económica de distintos tipos y marcas de colectores solares para temperatura media-baja, que se encuentran comercialmente disponibles en México. En su desarrollo se realiza una búsqueda de proveedores de equipo solar térmico en México que tengan algún tipo de validación técnica. Adicionalmente recabar los costos que permitan crear una base de datos completa. Basados en la información climatológica de meteonorm y los datos técnicos recabados, se desarrolla un simulador utilizando Simulación Studio de TRNSYS. Utilizando este simulador se realiza un análisis de variación paramétrica que involucre los valores económicos para finalmente obtener la factibilidad en el uso de los distintos colectores solares. Se presentan los resultados cuantitativos por zonas geográficas del país.

SHIP, Solar collectors, economic feasibility, simulation, TRNSYS

Citación: NAJERA-TREJO, Mario, MARTÍN-DOMÍNGUEZ, Ignacio, ESCOBEDO-BRETADO, Jorge y PINEDO-DÍAZ, Jesús. Factibilidad técnica económica de colectores solares para temperatura media-baja disponibles en México. Revista de Ingeniería Tecnológica 2017. 1-3:58-63

*Correspondencia al Autor (Correo Electrónico: mario.najera@cimav.edu.mx)

† Investigador contribuyendo como primer autor.

Introducción

De acuerdo con el balance nacional de energía (SENER, 2015), la industria utiliza más del 30% del total de la energía del país. Por otra parte, estudios realizados por la agencia de energía considera que cerca del 60% del consumo de energía a nivel industrial ocurre en procesos térmicos a temperaturas por debajo de los 250°C (IEA 2017).

México se localiza geográficamente entre los 14° y 33° de latitud septentrional; esta localización resulta ideal para el aprovechamiento de la energía solar, pues la irradiación global media diaria en el territorio nacional, es de alrededor de 5.5 kWh/m²/d, siendo uno de los países con mayor potencial en el aprovechamiento de la energía solar en el mundo (Semarnat- Ine. 2009).

A través de los últimos años se ha buscado incentivar a los distintos sectores del país para el aprovechamiento de este abundante recurso (Valle-Pereña, Ortega-Navarro, 2012). El sector residencial, tiene cubierta la parte de calentamiento de agua sanitaria y en mucho menor porcentaje calefacción por medio de tecnología solar. La tecnología de calentamiento solar residencial en su gran mayoría es manufacturada en China y ha inundado el mercado nacional con una gran cantidad de productos de diversas capacidades y calidades. El sector industrial en particular, requiere principalmente confiabilidad en sus equipos para el continuo funcionamiento de sus procesos. Es por esto que una instalación de calor solar para procesos industriales requiere tecnología certificada para su dimensionamiento. TRNSYS es un paquete de cómputo utilizado en la simulación dinámica de sistemas principalmente térmicos y que tiene como finalidad la obtención de datos que ayuden a optimizar la eficiencia tanto térmica como económica de diferentes sistemas.

Para el desarrollo de proyectos mediante simulación numérica computarizada es necesario conocer las características técnicas de los equipos que se van a considerar. Por tal motivo es indispensable contar con una librería de distintas fichas técnicas de los equipos como bombas, tanques, intercambiadores de calor, controladores, colectores solares y además conocer su costo actual y tendencia futura.

Este artículo presenta los resultados de un estudio realizado para conocer el mercado nacional referente a la tecnología de captación solar actual. La información adquirida en este estudio servirá como base para contemplar distintas marcas de colectores solares de Placa plana y Tubos evacuados en proyectos de calor solar de procesos industriales de media-baja temperatura. Con estos datos, se tendrá la capacidad de realizar corridas paramétricas mediante simulación dinámica con distintos equipos de captación solar, considerando su costo. Así poder dimensionar un sistema técnica y económicamente factible basado en el periodo de retorno de inversión más corto o en el mayor rendimiento del tiempo de vida del proyecto según sea requerido el análisis.

Metodología a desarrollar

Se realizó una búsqueda extensiva en el mercado de equipos de captación solar, en particular de tecnología de placa plana y de tubos evacuados para aplicación industrial. La búsqueda se realizó a través de los reportes de certificación como “Solar rating & certification corporation”, “DIN CERTCO” y “Solar keymark Certificate”, para encontrar equipos con distribución a nivel nacional que tuvieran alguna certificación (Fischer, Heidemann, Müller-Steinhagen, Perers, Bergquist, & Hellström, 2004).

Esta búsqueda demostró que existe un mercado muy limitado en la distribución y venta de equipos certificados. Como resultado, se encontraron 7 diferentes marcas de colectores, de los cuales 5 corresponden a colectores de placa plana y 3 a tubos evacuados. Una vez identificados los equipos, se recabaron todos los datos técnicos y económicos necesarios para incorporarlos al software de simulación dinámica TRNSYS como se muestra en la Figura 1.



Figura 1 Modelado en Software TRNSYS para la simulación de los colectores

Después se realizó una simulación variando cada uno de los distintos tipos de colectores, utilizando el archivo TMY-2 correspondiente a los datos climatológicos generados por el software METEONORM para las ciudades de Chihuahua, Durango y Monterrey.

Las simulaciones de los colectores de placa plana se realizaron utilizando colectores de eficiencia cuadrática con ángulos modificadores de 2do orden correspondiente (Rojas, Beermann, Klein, & Reindl, 2008). Para los colectores de tubos evacuados se utilizó el Type 71 (Klein, Beckman, Mitchell, & Duffie, 2014).

La asociación de cada uno de los datos técnicos de los diferentes colectores en la simulación, fue realizada por medio de ecuaciones con “strings”.

Además de estos datos técnicos incorporados como parámetros a los Types, fue necesario generar un archivo (.dat) para cada uno de los colectores de tubos evacuados. Esto con el fin de incorporar la información de los Ángulos modificadores de incidencia “IAM”. Este archivo contiene una matriz generada por la multiplicación de todos los valores de los IAM transversales y longitudinales.

El flujo másico de agua a través del colector es manejado por medio de una bomba que corresponde al Type 3d en la simulación. El valor de flujo másico utilizado, corresponde al indicado en la certificación de cada colector bajo las condiciones de prueba.

Para el encendido y apagado de la bomba se toma como referencia la radiación solar que incide en el colector, por lo que se determinó una función en la que la bomba funcione sólo cuando la radiación solar es igual o superior a 200 W/m^2 .

Resultados

Por motivos de confidencialidad de las marcas analizadas, se decidió asignar un nombre arbitrario a cada uno de los distintos colectores, solo se especifica entre paréntesis el tipo de colector de Placa Plana (PP) o Tubos Evacuados (TE).

Se presenta una comparación grafica de la energía útil anual obtenida por los distintos colectores solares para las ciudades de Monterrey, Durango y Chihuahua.

Se observa que dos de los colectores de tubos evacuados analizados presentan la mayor cantidad de energía útil. Sin embargo, la marca Delta se encuentra desplazada, por dos marcas de colectores de placa plana.

Como es posible observar en el Gráfico 1, las ciudades Chihuahua y Durango presentan un comportamiento similar en la energía útil a lo largo del año, quedando Monterrey un 12% promedio abajo con respecto a Chihuahua.

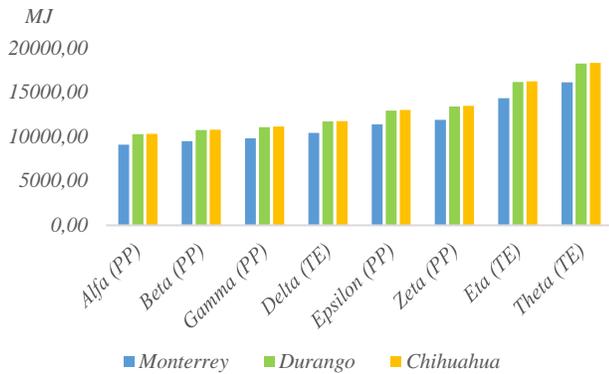


Gráfico 1 Energía Útil Anual de 8 diferentes colectores solares variando la ubicación

Existen aplicaciones en las que el área neta disponible juega un papel primordial en una instalación, por tal motivo se presenta una comparación gráfica entre los distintos colectores y su energía útil anual por unidad de área. En el Gráfico 2, se observa que los tres colectores de tubos evacuados presentan desventaja con respecto a los de placa plana al comparar su energía útil por unidad de área neta. Esto ocurre debido a que los colectores de tubos evacuados presentan una menor área de apertura y una mayor área neta.

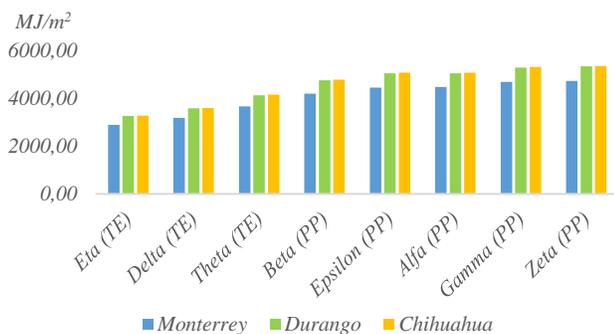


Gráfico 2 Energía útil anual por unidad de área neta de 8 diferentes colectores solares variando la ubicación

Uno de los objetivos más importantes en un proyecto de instalación de calor solar para procesos industriales, es el cálculo de la inversión inicial, que en cuyo caso, uno de los costos más significativos corresponde al de los colectores solares. Si bien es posible hacer una comparación de la energía útil entre el costo de varios colectores, esto definitivamente no determinara cual es el mejor colector. Esto será determinado principalmente por el tipo de aplicación, la ubicación, temperaturas requeridas, entre varias otras. Para poder considerar dichas variables es necesario realizar corridas paramétricas por medio de software, utilizando toda la información antes mencionada, así como la de los distintos equipos disponibles, entre ellos los distintos tipos de colectores.

En el gráfico 3 es posible observar que los colectores de tubos evacuados quedan en desventaja con respecto a los colectores de placa plana. Esto se debe principalmente a que los colectores de placa plana con certificación se encuentran más disponibles en el mercado, a diferencia de los colectores de tubos evacuados que son muy escasos al solicitarlos con cualquier clase de certificación a nivel nacional.

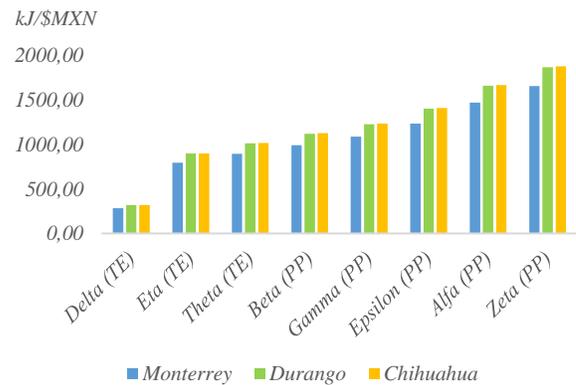


Gráfico 3 Energía útil anual entre el costo de 8 diferentes colectores solares variando la ubicación

Agradecimiento

Se agradece el apoyo económico recibido por parte del:

Centro Mexicano de Innovación en Energía Solar (CeMIE-Sol),

A través del Proyecto:

P13 “Laboratorios de pruebas para baja y media temperatura, laboratorio para el diseño e integración de sistemas termo solares asistido por computadora”

Perteneciente a la Convocatoria 2013-02, del:

FONDO SECTORIAL CONACYT - SENER - SUSTENTABILIDAD ENERGÉTICA.

Para el desarrollo y presentación de éste trabajo.

Conclusiones

Se modelaron, simularon y analizaron el comportamiento de diferentes colectores solares por medio del software TRNSYS, con lo cual fue posible obtener un diagnóstico de su comportamiento térmico, así como también un factor de Energía/Costo que servirá como referencia para la consideración de los distintos tipos de colectores en proyectos con la industria. Fue posible obtener un panorama general, respecto a la energía útil que puede proporcionar cada uno de los diferentes colectores en un año para tres ciudades distintas. También fue posible determinar los colectores que proporciona mayor energía por unidad de área neta, ya que en algunas aplicaciones el área puede ser escasa y esta información sería de considerable importancia.

Por último se proporciona un esquema en el que se distingue que colector podría proporcionar mayor energía a un menor costo, sin embargo, existen otros factores como las temperaturas, los flujos, el almacenamiento, entre otros requeridos para determinar cuál será la tecnología más adecuada para la aplicación específica. Los resultados referidos a las marcas utilizadas para la realización de este estudio podrán ser compartidas a consideración del CIMAV.

Referencias

Muster-Slawitsch, B., Schmitt, B., Krummenacher, P., Helmke, A., Hess, S., Brunner, C. (2015). Solar Integrating Solar Heat into Industrial Processes (SHIP) Booklet on results of Task49/IV Subtask B, 10049(2014). Retrieved from <http://task49.iea-shc.org/>.

SENER. (2015) Balance Nacional de Energía

International Energy Agency (IEA). (2017). WORLD ENERGY BALANCES: AN OVERVIEW Global trends. Retrieved from <http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/WorldEnergyBalances2017Overview.pdf>

Valle-Pereña, J., & Ortega-Navarro, H. (2012). Prospectiva de Energías Renovables 2012-2026. Secretaría de Energía, 1–156. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>

Fischer, S., Heidemann, W., Müller-Steinhagen, H., Perers, B., Bergquist, P., & Hellström, B. (2004). Collector test method under quasi-dynamic conditions according to the European Standard EN 12975-2. Solar Energy, 76(1–3), 117–123. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2003.07.021>

Rojas, D., Beermann, J., Klein, S. A., & Reindl, D. T. (2008). Thermal performance testing of flat-plate collectors. *Solar Energy*, 82(8), 746–757.

<https://doi.org/10.1016/j.solener.2008.02.001>

Klein, S. A., Beckman, W. A., Mitchell, J. W., & Duffie, J. A. (2014). TRNSYS 17 Mathematical Reference. *Trnsys* 17, 4, 474.

Semarnat- Ine. (2009). México Cuarta Comunicación Nacional ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático.

Instrucciones para autores

[Título en Times New Roman y Negritas No.14]

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

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

Resumen

Título

Objetivos, metodología

Contribución

(150-200 palabras)

Abstract

Title

Objectives, methodology

Contribution

(150-200 words)

Keywords

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

Cita: Apellidos en Mayúsculas -1er Nombre de Autor †, Apellidos en Mayúsculas -2do Nombre de Autor. Título del Artículo.
Título de la Revista. 2017, 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]

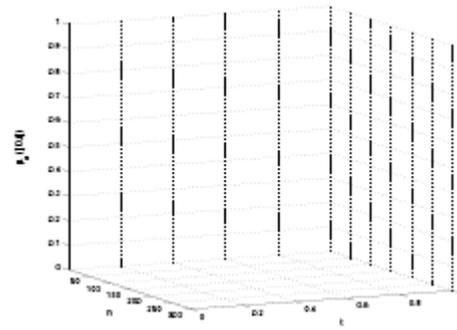


Grafico 1 Titulo y Fuente (en cursiva).

No deberán ser imágenes- todo debe ser editable.

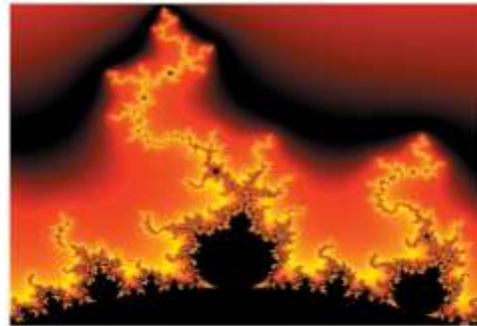


Figura 1 Titulo y Fuente (en cursiva).

No deberán ser imágenes- todo debe ser editable.

Tabla 1 Titulo y Fuente (en cursiva).

No 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

Referencias

Formato de Originalidad



Taipei-Taiwan 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



Taipei-Taiwan 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- Taiwan a difundir mi trabajo en las redes electrónicas, reimpresiones, colecciones de artículos, antologías y cualquier otro medio utilizado por él para alcanzar un mayor auditorio.

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

Artículo (Article):

Firma (Signature)

Nombre (Name)

Revista de Ingeniería Tecnológica

“Mejoramiento de películas delgadas de CdTe/CdS mediante activación húmeda de CdCl₂ en una atmosfera de aire para aplicaciones en celdas solares”

VALADEZ-RENTERÍA, Ernesto, DE LA TORRE, J., ESPARZA, D. y RIVAS, J. M.

*Unidad Académica de Ingeniería Eléctrica
Universidad Autónoma de Zacatecas*

“Aplicación móvil inteligente para prevención de cáncer de mama”

CUAYA-SIMBRO, Germán, RUÍZ-HERNÁNDEZ, Elías, HERNÁNDEZ-HERNÁNDEZ, Luis Ángel y LIMA-LUNA, Luis Alberto

Instituto Tecnológico Superior del Oriente del Estado de Hidalgo

“Modelo matemático completo para Robots Seriales”

CAMPOS-CALDERA, Carla, CAMPOS-CALDERA, Carlos, HAYNES, Arely y ALDERETE-ALDERETE, Javier Enrique

*Tecnológico Nacional de México
Instituto Tecnológico de Parral*

“Sistema de detección de incendios basado en visión artificial”

CUAYA-SIMBRO, Germán, GUTIERREZ-FRAGOSO, Karina, JIMÉNEZ-MEDINA, Eduardo y SALDIVAR-DELGADILLO, Edgar

Instituto Tecnológico Superior del Oriente del Estado de Hidalgo

“Modelado de convertidores de electrónica de potencia basado en funciones continuas: Aplicación en el STATCOM”

CONTRERAS-AGUILAR, Luis, VENEGAS-TRUJILLO, Tiberio, ARROYO-LEDESMA, Jaime y CONCHA-SÁNCHEZ, Antonio

Universidad de Colima

“Determinación experimental In Situ de la difusividad aparente del suelo por desfase de onda térmica”

SILVA-AGUILAR, Oscar Fernando, ANDAVERDE-ARREDONDO, Jorge Alberto, BENÍTEZ-FUNDORA, Artemio Jesús y ESCOBEDO-TRUJILLO, Beatris Adriana

*Universidad Nacional Autónoma De México
Universidad Veracruzana*

“Factibilidad técnica económica de colectores solares para temperatura media-baja disponibles en México”

NAJERA-TREJO, Mario, MARTÍN-DOMÍNGUEZ, Ignacio, ESCOBEDO-BRETADO, Jorge y PINEDO-DÍAZ, Jesús

*Centro de Investigación en Materiales Avanzados
Instituto Tecnológico de Durango*

