

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

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

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

Recibido Abril 27, 2017; Aceptado Junio 21, 2017

Resumen

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

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

Abstract

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

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

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

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

† Investigador contribuyendo como primer autor.

Introducción

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

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

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

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

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

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

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

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

Modelo del ICTA

El diseño del intercambiador se muestra en la figura 1. El cual consiste en un ICTA horizontal de 6 m de largo, enterrado a 2.5 m de profundidad. El material que se usó para el tubo fue PVC (policloruro de vinilo) de 4" (10.2 cm), el cual tiene: una densidad de 370 kg/m³, calor específico de 80 J/ kg-K y conductividad térmica de 0.25 W/m-K. El modelo horizontal y el tipo de material se seleccionó tomando en cuenta los trabajos reportados en la literatura, donde Rakesh *et al.*, (2016) indican que se ha obtenido una mayor eficiencia con el modelo horizontal en comparación con el vertical, así como, también concluyen que el material del tubo ha tenido una diferencia poco significativa en la eficiencia del ICTA, por lo cual, se obtuvo por un material comercial y de bajo costo.

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

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

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

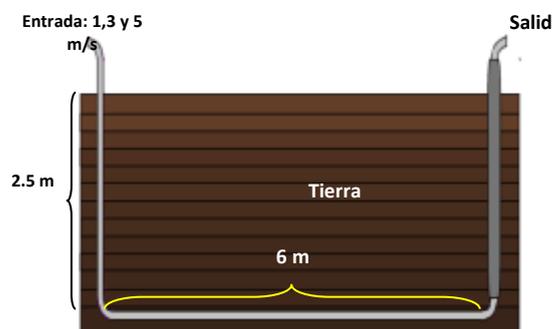


Figura 1 Diseño del ICTA

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

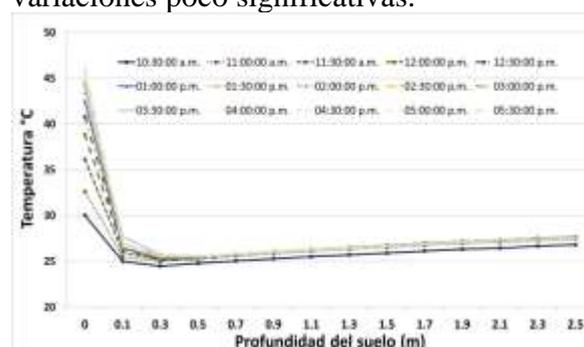


Gráfico 2 Comportamiento de la temperatura del suelo de estudio

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

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

Ecuación de continuidad:

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

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

X-Momentum:

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

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

Y-Momentum:

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

Z-Momentum:

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

Energía:

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

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

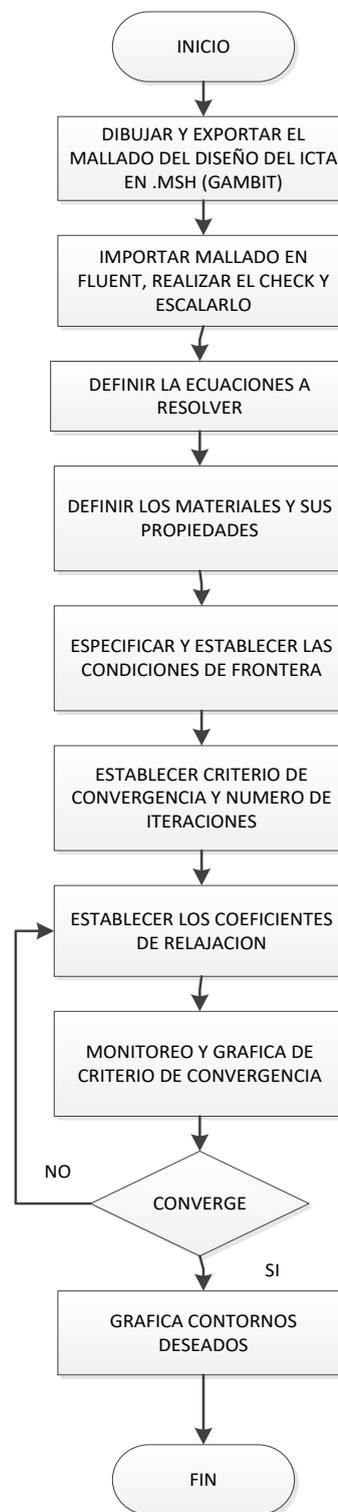


Figura 2 Metodología de simulación

Metodología

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

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

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



Figura 3 Dibujo y mallado en GAMBIT

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

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

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

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

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

Tabla 1 Características y propiedades del fluido y paredes

Resultados

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

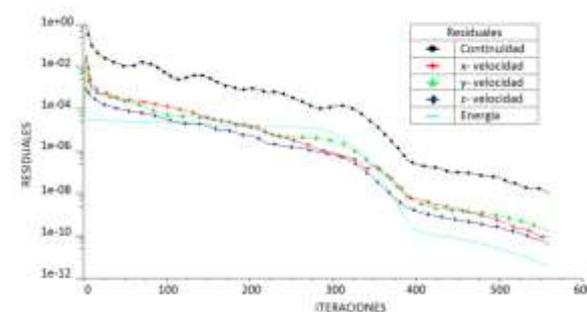


Figura 4 Residuales Caso I

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

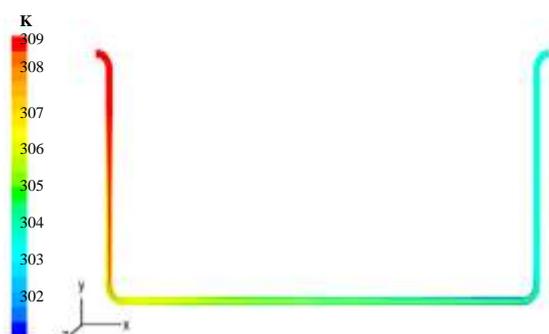


Figura 5 Contorno de temperatura Caso I

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

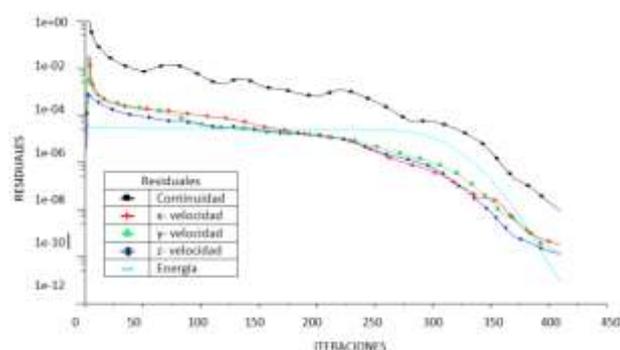


Figura 6 Residuales Caso II

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

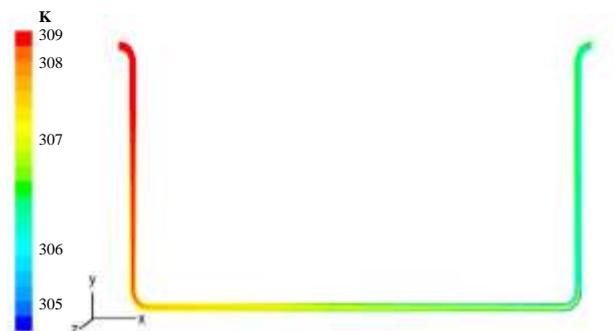


Figura 7 Contorno de temperatura Caso II

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

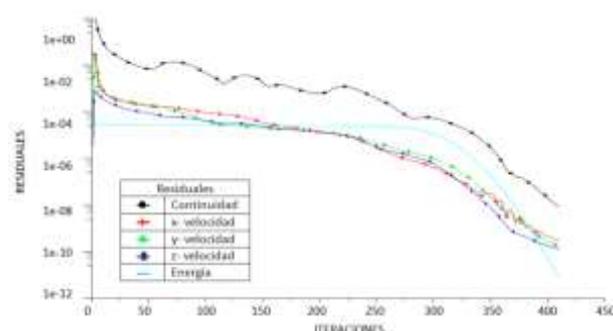


Figura 8 Residuales Caso III

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

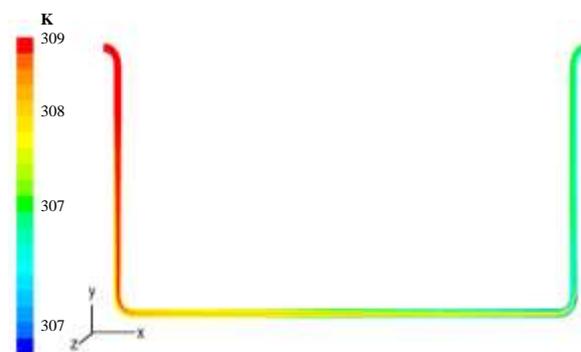


Figura 9 Contorno de temperatura Caso III

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

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

Tabla 2 Resumen de los resultados obtenidos

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

Agradecimientos

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

Conclusiones

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

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

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

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

2) implementar técnicas que ayuden a alcanzar temperaturas en el suelo por debajo de 27°C, tales como un sistema de riego o bien vegetación, ya que se ha demostrado que la vegetación puede mejorar la calidad del aire, así como también reducir los niveles de CO₂. Lo anterior, debido a que estos sistemas funcionan como reguladores de temperatura natural, lo cual ocasiona que las estructuras o capas que se encuentran debajo del suelo alcancen temperaturas frescas en verano y cálidas en invierno (Mata González y Galicia Serrano, 2016); y

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

Referencias

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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