

Evaluación Térmica de un Intercambiador de Calor Geotérmico en la Ciudad de Chetumal, Quintana Roo

J.O. Aguilar^{1*}, V.M. Arcos¹, J. Xamán², R.Barbosa¹, J. Hernández¹, I. Bojórquez

División de Ciencias e Ingeniería, Universidad de Quintana Roo

¹ Boulevard Bahía s/n, esq. Ignacio Comonfort, Col. Del Bosque, Chetumal, Quintana Roo, C.P. 77019

Tel. 01 (983) 835 03 89

*ovidio@uqroo.edu.mx

² Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, Cenidet

Interior Internado Palmira s/n, Temixco, Morelos 62580, México

jxaman@cenidet.edu.mx

Abstract

En este trabajo se presenta el estudio del funcionamiento térmico de un intercambiador de calor geotérmico instalado en las Villas de la Universidad de Quintana Roo. El intercambiador está constituido por una tubería de PVC de 15.24 cm (6 in) de diámetro enterrada a 1 m en el suelo. La longitud de la tubería es de 6 m. Para reducir la pérdida o ganancia de calor a la salida del intercambiador de calor, se aisló térmicamente la tubería de salida con espuma de poliuretano de 5.08 cm (2 in) de espesor. El intercambiador de calor geotérmico se evaluó durante dos semanas bajo condiciones climáticas de la ciudad de Chetumal, Quintana Roo. El flujo másico utilizado fue de 1.1×10^{-2} kg/s. Los resultados mostraron una reducción de la temperatura de salida de hasta 4°C. Además, se encontró que durante la noche, la temperatura del aire a la entrada del intercambiador de calor es menor que a la salida, mostrando un efecto inverso al deseado. Por lo anterior, se recomienda un uso diurno para el verano (verano) para el caso de la Ciudad de Chetumal, Quintana Roo.

Introducción

Durante las pasadas tres décadas ha habido un crecimiento interesante en implementar sistemas de calentamiento y enfriamiento del aire en edificios basados en energías renovables. Debido a su elevada inercia térmica, el suelo atenúa las fluctuaciones de temperatura que ocurren a nivel superficial en la tierra. Además, dicha inercia ocasiona un retardo entre la temperatura del suelo y la superficie. Por lo anterior, a cierta profundidad (~10m), la temperatura del sub-suelo es más baja que la temperatura ambiente durante el verano y más alta en el invierno [1]. Para aprovechar la inercia térmica del sub-suelo, se utilizan los intercambiadores de calor geotérmicos (ICG) o intercambiadores de calor tierra-aire (EAHE), el cual consiste en una o más tuberías de PVC, concreto o algún otro material, enterradas en el suelo, a través de las cuales circula aire de forma natural (pasivo) o forzada (activo). A su paso por el ICG, el aire cede o absorbe calor, dependiendo de las condiciones ambientales del lugar en donde se instale.

A lo largo de los años, estudios numéricos y experimentales [2-15], han permitido determinar las variables más sensibles en el diseño de ICG, las cuales son flujo de aire, longitud y diámetro de la tubería y la profundidad a la que son instalados. Sin embargo, existen pocos trabajos experimentales para evaluar el funcionamiento térmico de ICG.

Entre los estudios experimentales más importantes se encuentran los realizados por [16-19]. Bojic y colaboradores [16] realizaron un estudio de un ICG constituido por dos tubos de PVC y acero,

conectados en paralelo y enterrados a la misma profundidad. Determinaron el calor transferido a través de cada tubo para varias distancias de separación entre éstos. Encontraron que el intercambio de calor entre los tubos y la tierra aumenta conforme la distancia de separación entre tubos aumenta. Lo anterior indica que existe una influencia térmica entre tubos debido a su cercanía. Pfafferott [17] reportó el funcionamiento térmico de tres intercambiadores de calor tierra aire instalados en edificios de oficinas en servicio, ubicados en Europa Central. Propuso un método para evaluar el comportamiento de la temperatura y la energía ganada mediante un criterio de funcionamiento estandarizado y de eficiencia energética. Los resultados mostraron que los parámetros del suelo (superficie y sub-suelo) son tan importantes como el diámetro de la tubería. Por su parte Ozgener y colaboradores [18, 19] han reportado diversas investigaciones experimentales sobre el comportamiento térmico de ICG y del suelo, principalmente para las condiciones climáticas de Turquía.

En México no existen investigaciones experimentales sobre el comportamiento térmico de ICG para la edificación, por tanto, en esta investigación se propone la evaluación térmica experimental de un ICG para las condiciones climáticas de Chetumal, Quintana Roo. La investigación comprende el estudio del comportamiento de la temperatura del suelo en la superficie y a cuatro profundidades diferentes (0.5, 1, 1.5 y 2m), así como la distribución de temperatura a lo largo del ICG para dos profundidades (1 y 2m). Además, se presenta el coeficiente de operación del sistema.

Desarrollo Experimental

Condiciones Climáticas de Chetumal Quintana Roo

El ICG está ubicado en las Villas de la Universidad de Quintana Roo, en la Ciudad de Chetumal, Quintana Roo, ver Figura 1. El clima de Chetumal (18.5°N, 88.3°N) está clasificado como cálido sub-húmedo con lluvias en verano, su temperatura media anual varía entre 24 y 28°C y la precipitación total anual, entre 700 y más de 1500 mm [20]. En la Tabla 1 se muestran las variables climáticas promedio de 3 años de mediciones.

Tabla. 1. Variables Climáticas promedio anual (3 años) de la Ciudad de Chetumal, Quintana Roo.

Variable climática	Valor
Temperatura	26.8°C
Velocidad del viento	2.9 m/s
Irradiancia	232.4 W/m ²
Precipitación pluvial	1543.5 mm
Humedad Relativa	81.9%

Modelo Físico del ICG

El modelo físico del ICG se muestra en la Figura 2. Está constituido por una tubería de PVC de 15.24 cm (6 in) de diámetro y 6 m de longitud enterrados a 1m de profundidad. El efecto de enfriamiento/calentamiento se midió de forma individual para cada tubería, para ver el efecto de la

profundidad en el funcionamiento térmico del ICG. En la Fig. 2 se muestran los puntos en donde se realizaron las mediciones de temperatura, temperatura de entrada (T_{in}), temperatura de salida (T_{out}) y tres puntos en la zona horizontal del ICG (T_2 , T_3 y T_4) a 1.5 m de separación uno de otro. Se instaló un ventilador a salida de la tubería y se controló la velocidad del aire a 1.5 y 0.5 m/s, que son las velocidades máxima y mínima que se obtuvieron. Además, se midió la temperatura del suelo a diferentes profundidades (0, 0.5, 1, 1.5 y 2m).

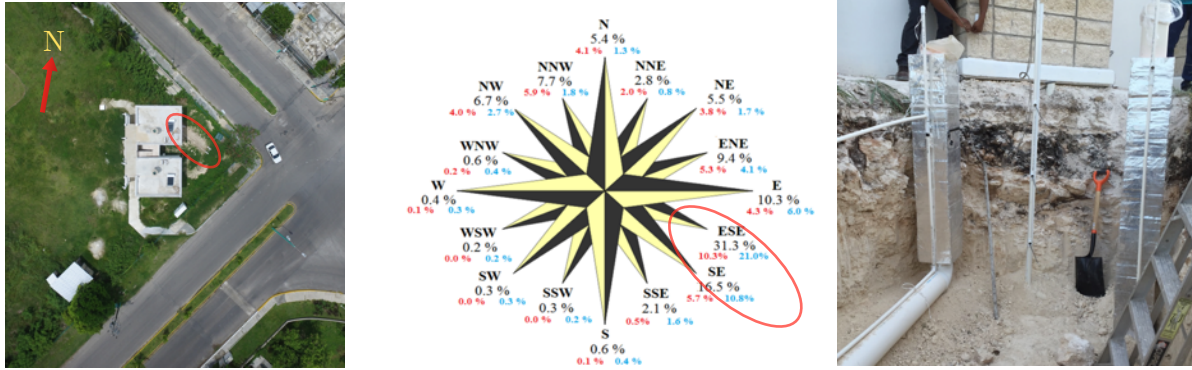


Figura 1. Vista de planta con la ubicación del ICG; velocidad y dirección del viento promedio anual en Chetumal, QRoo e instalación del ICG.

La Fig. 2 muestra un esquema de la instalación de la tubería enterrada a 1 m de profundidad. Es importante mencionar que la instalación del ICG coincide con la dirección promedio máxima anual en Chetumal, como puede verse en la Figura 1, con el objetivo de facilitar el ingreso del aire en caso de usarse como sistema pasivo.

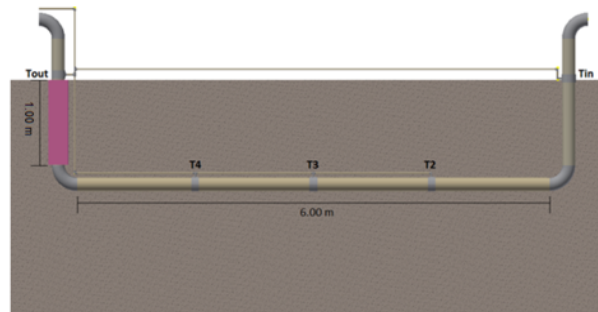


Figura 2. Vista transversal de la tubería de 6m de longitud y enterrada a 2 m de profundidad, indicando los puntos de medición de temperatura.

Instrumentación del ICG y variables climáticas.

Se utilizaron termopares tipo T (Omega, modelo TT-T30 de cobre-constantan de alta pureza, 99.9% y aislamiento de Neoflón PFA), los cuales se conectaron a un sistema de adquisición de datos Agilent 34970A para su registro y almacenamiento en memoria. Posteriormente se hizo la reducción de datos en una computadora personal. Por otra parte, las variables climáticas como temperatura ambiente, humedad relativa, irradianza, velocidad y dirección del viento y precipitación pluvial se registraron con

una estación meteorológica automática de la marca DAVIS modelo Vantage PRO2. Los datos promedio anual se muestran en la Tabla 1. Finalmente, para determinar el perfil de temperaturas en el subsuelo, se instrumentó una tubería con cuatro termopares con 50 cm de separación uno de otro. Dicha tubería fue instalada a 1.5 m de profundidad.

Resultados y Análisis de Resultados

Perfil de temperaturas del suelo

La evaluación térmica del ICG se realizó de la semana del 26 de julio al 11 de agosto de 2016, de estos días se eligieron dos de los más representativos (soleados). Como primera parte del experimento, se evaluó el perfil de temperaturas en el suelo donde se instaló el ICG. En la Figura 3 se muestran los perfil de temperaturas para los días 30 de julio y 9 de agosto

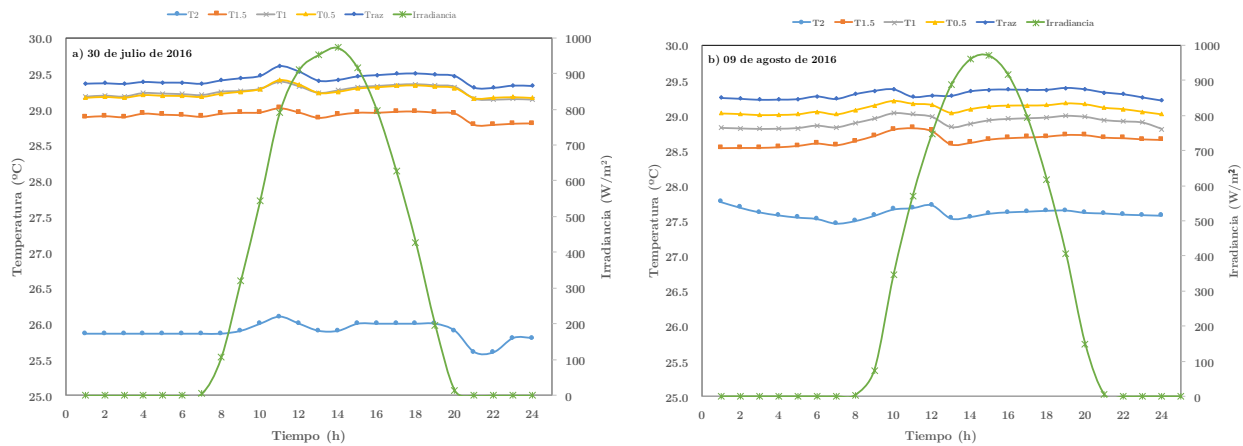


Figura 3. Perfil de temperaturas en el suelo donde se instaló el ICG.

Se observa de la Figura 3a que la variación entre las temperaturas a 0.5 y 1 m de profundidad son prácticamente iguales (29.2°C). Por otra parte, a 1.5 y 2 m las temperaturas promedio son 25.9 y 28.9°C, respectivamente, es decir, una diferencia de 3°C. Por otra parte, la Figura 3b presenta una mejor distribución del perfil de temperaturas, partiendo de 29.3°C para la superficie de la tierra, 29.1°C a 0.5 m, 28.9°C a 1m, 28.7 a 1.5 y terminando con 27.6°C para una profundidad de 2 m. En ambos casos se presenta una irradiancia solar muy similar. Sin embargo, la menor temperatura del suelo (2m) para el día 30 de julio se debe a que hubo precipitación pluvial el 28 y 29 de julio, lo que no ocurrió días antes de la medición del 09 de julio. Los resultados anteriores muestran que a 2m de profundidad, es posible tener una temperatura cercana a la temperatura promedio anual en Chetumal, pero debido al incremento en el costo de instalación, se utilizó una profundidad de 1m.

Distribución de temperaturas en el ICG.

La siguiente parte del estudio es verificar la distribución de temperaturas a lo largo del ICG. Las mediciones se realizaron a la entrada (T_{in}), puntos intermedios del tubo horizontal (T_2 , T_3 y T_4) y en la salida (T_{out}), como se muestra en la Figura 2. En la Figura 4 se presenta las temperaturas

registradas durante el día 30 de julio. Se incluye la temperatura ambiente (T_{amb}) para fines comparativos. Se observa que la temperatura del suelo se mantiene a 29°C en promedio durante todo el día, mostrando un ligero incremento de la 8:00 a las 14:00 horas. Por otra parte, de la 01:00 a las 7:00 horas la T_{in} presenta una temperatura más baja que la T_{amb} , T_{out} , y T_{suelo} , lo cual indica que el ICG presenta un efecto de calentamiento, en lugar de enfriamiento. Por tal razón, se recomienda su uso solo en el horario en que la T_{out} siempre sea menor que la T_{in} (08:00 a 20:00 horas). En la Figura 5 se presenta la distribución de temperaturas en el ICG para el día 09 de julio, en dónde se observa un comportamiento similar al 30 de julio.

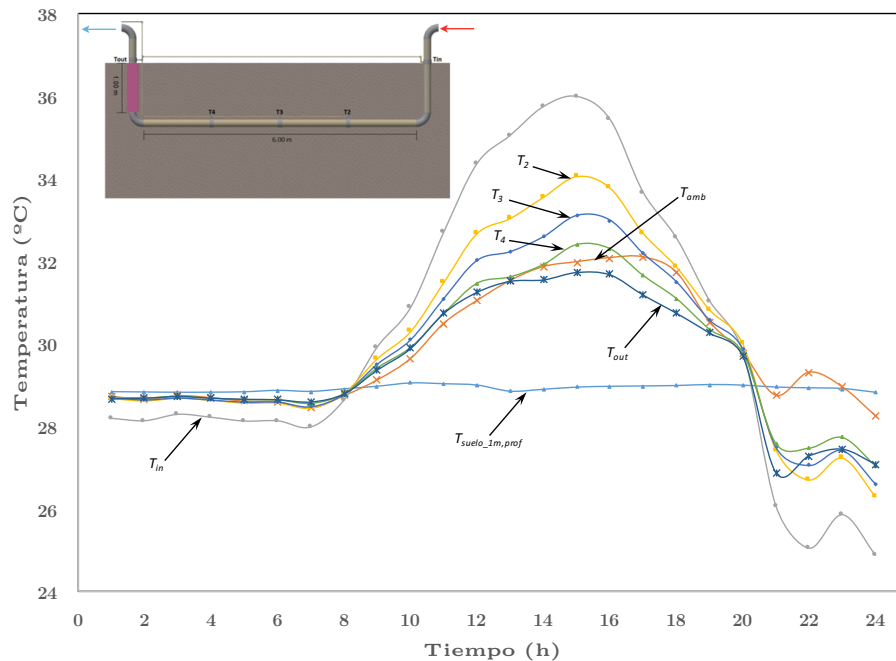


Figura 4. Distribución de temperaturas en el interior del ICG (30 de julio 2016).

Otro punto de interés que muestra la Figura 4 es que la T_{in} incrementa su valor a partir de las 8:00 horas, en donde la irradiancia inicia su valor ascendente. Esto se debe principalmente a que la tubería de entrada no tiene aislamiento térmico, además de la absorción de energía radiante del suelo a los alrededores de la tubería de entrada. Por otra parte, la reducción de temperatura en los puntos T_2 , T_3 y T_4 es de aproximadamente 0.5°C , en el horario con mayor irradiancia (12:00 a 15:00 horas). En trabajos previos [14] se han reportado reducciones de 2°C en 31m de longitud, por lo que una reducción de 0.5°C en 1.5 de longitud es aceptable. Finalmente, se observa de la Figura 4 la influencia de la precipitación pluvial en las temperaturas de entrada, salida e interiores en el ICG a partir de las 20:00 horas.

Desempeño térmico del ICG

La siguiente fase del estudio es evaluar el desempeño térmico del ICG para dos días representativos de las mediciones realizadas. Las Figuras 6 a y 6b presentan las temperaturas T_{in} y T_{out} a lo largo del día para las fechas 30 de julio y 9 de agosto de 2016.

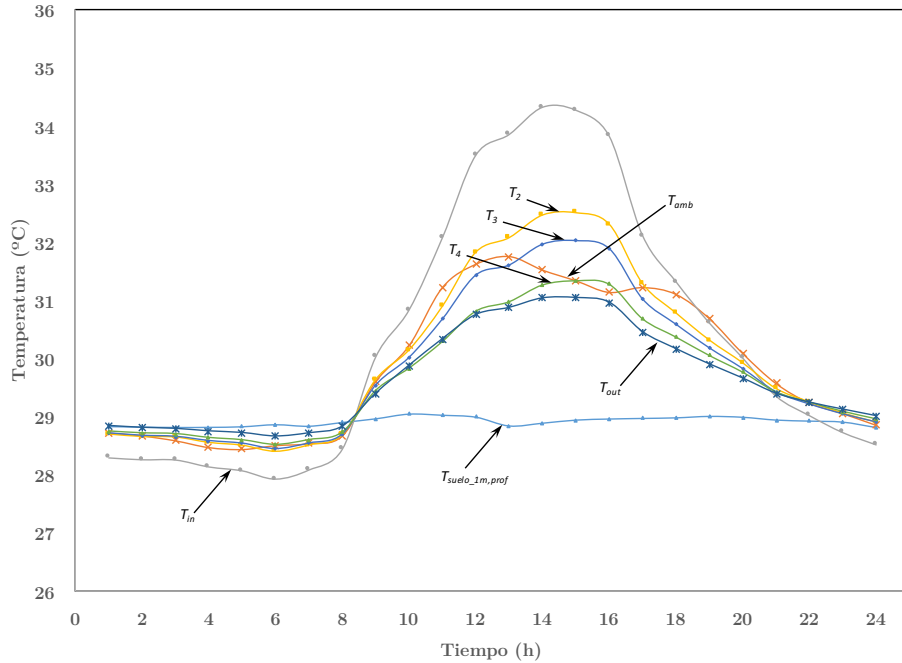


Figura 5. Distribución de temperaturas en el interior del ICG (09 de agosto de 2016).

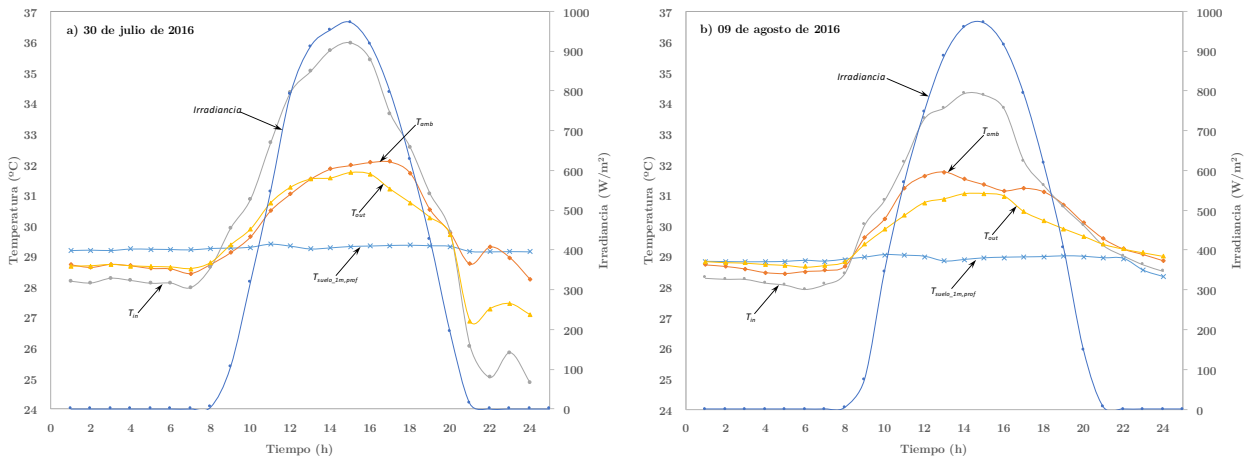


Figura 6. Funcionamiento térmico del ICG, a) 30 de julio de 2016 y b) 09 de agosto de 2016.

En las Figuras 6a y 6b se presenta un comportamiento térmico similar, la T_{in} presenta menores valores durante la noche en comparación con la T_{amb} y T_{out} . Como se mencionó anteriormente, el efecto que se tiene es de calentamiento, lo cual no es deseable para la temporada del año, en donde se requiere enfriamiento del aire que se introducirá a la edificación. Por otra parte, la T_{out} para el día 30 de julio (Figura 6a) es mayor que la T_{amb} hasta las 13:00 horas, y de ahí hasta las 20:00 horas se tiene un efecto de enfriamiento. En el día 09 de julio, se tiene un efecto de enfriamiento desde las 8:00 hasta las 22:00 horas, revirtiendo el efecto de 22:00 a 08:00 horas del día siguiente. Es importante mencionar que la influencia que tiene la tubería de entrada en la T_{in} es considerable, llegando a tener una diferencia de 4°C a las 15:00 horas, lo anterior afecta el desempeño térmico del ICG. Sin embargo, a pesar de que la T_{in} aumenta su valor durante del día, se logran valores de la T_{out} hasta 1°C menores que la T_{amb} . Se

considera que aislando la tubería de entrada del ICG, no más de 0.2 m debajo de la superficie, se tendrán menores valores de temperatura a la salida del ICG.

Un parámetro que permite evaluar el desempeño térmico del ICG es el Coeficiente de Operación (COP en inglés). Este parámetro relaciona la energía ganada por el ICG con la energía demandada por el ventilador que induce al aire a pasar a través de éste. La eficiencia energética del ICG es la razón entre la energía ganada y la demanda de energía del ventilador. De acuerdo a Pfafferot [17], el COP se puede calcular de la siguiente ecuación:

$$COP = \frac{\sum_{top} (Q_{heat} + Q_{cool})}{\sum_{top} (\Delta p \dot{V})} \quad (1)$$

donde Q_{heat} y Q_{cool} son la ganancia de calor de calentamiento (temporada de invierno) y ganancia de calor de enfriamiento (temporada de verano), respectivamente. Por otra parte, Δp (N/m²) es la pérdida de presión en la tubería y \dot{V} (m³/s) es el caudal de aire que pasa por el ICG, el cual se determina por el producto de la velocidad del aire y la sección transversal de la tubería. En este caso, se midió directamente la potencia consumida por el ventilador, la cual fue de 6 Wh y sólo se consideró la ganancia de calor de enfriamiento (Q_{cool}) en el horario de 8:00 a 21:00 horas para un día de funcionamiento. En la Tabla 2 se muestran los valores de Q_{cool} , potencia del ventilador (P_{fan}) y el COP para ambos días de mediciones.

Tabla 2. Coeficiente de funcionamiento para el ICG durante dos días de mediciones.

Tiempo (h)	30 de julio de 2016			09 de agosto de 2016		
	P_{fan} (W)	Q_{cool} (W)	COP (adim)	P_{fan} (W)	Q_{cool} (W)	COP (adim)
9:00	6	3293.25	548.88	6	3295.19	549.20
10:00	6	3298.38	549.73	6	3298.08	549.68
11:00	6	3309.95	551.66	6	3307.40	551.23
12:00	6	3323.54	553.92	6	3319.29	553.22
13:00	6	3328.45	554.74	6	3322.07	553.68
14:00	6	3336.31	556.05	6	3325.68	554.28
15:00	6	3337.07	556.18	6	3325.00	554.17
16:00	6	3331.18	555.20	6	3320.67	553.45
17:00	6	3316.05	552.68	6	3306.41	551.07
18:00	6	3308.17	551.36	6	3300.48	550.08
19:00	6	3295.86	549.31	6	3295.18	549.20
20:00	6	3287.81	547.97	6	3290.93	548.49
			552.31			551.48

Se puede observar de la Tabla 2 que el COP de ambos días difiere un 0.24%, lo cuál indica que su comportamiento es constante para ambos días. Lo anterior debido a la similitud de las condiciones climáticas durante los días de medición. Es importante mencionar que la forma recomendada de calcular el COP es durante el funcionamiento de un año completo, sin embargo, dado que el objetivo inicial fue diseñar, construir y poner en funcionamiento el ICG, no se considera en este trabajo el cálculo del COP anual. Por otra parte, el valor del COP es elevado, similar el reportado por Pfafferot [17].

Conclusiones

Se diseñó, construyó y evaluó térmicamente un ICG para las condiciones meteorológicas de la ciudad de Chetumal, Q. Roo. Los resultados mostraron una reducción de 4.25 °C (15:00 horas del 30 de julio) y de 3.29°C (14:00 horas del 9 de agosto) entre la T_{out} y la T_{in} . Sin embargo, el funcionamiento térmico del ICG no tendría un impacto mínimo en el ahorro de energía de una casa habitación, dado que si se compara la T_{out} con la T_{amb} , la diferencia es de 0.98°C (18:00 horas del 30 de julio) y 0.88°C (13:00 horas del 9 de agosto). Lo anterior se debe a que la tubería de entrada (entrada a 40 cm del suelo) esta expuesta a radiación solar y el aire incrementa su temperatura al ingresar al ICG (ras de suelo). Se recomienda aislar la tubería de entrada para evitar ganancias de calor que afecten en el rendimiento térmico del ICG.

Por otra parte, se observó que aislando la tubería de salida del ICG es de gran importancia, de no hacerlo el calor cedido al subsuelo se volvería a ganar a la salida. Además, se observó que de las 22:00 a las 8:00 horas, el ICG tiene un funcionamiento inverso, es decir, la T_{out} en mayor a la T_{amb} . Por lo anterior, no se recomienda su uso por las noche en época de verano.

Finalmente, dado que los resultados son alentadores, se harán mediciones a lo largo de un año para evaluar el COP anual del ICG. Lo anterior permitirá determinar si se justifica su uso en ambas temporadas, verano e invierno.

Agradecimientos

El Dr. J.O. Aguilar agradece al proyecto 271615 Red Temática de Energía Solar el apoyo otorgado para realizar una estancia de movilidad académica en el Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico.

Bibliografía

1. Salah El-Din, M.M., On the heat flow into the ground. *Renewable Energy*, 1999. 18: p. 473-490.
2. Mihalakakou, G., J.O. Lewis, and M. Santamouris, The influence of different ground covers on the heating potential of earth-to-air heat exchangers. *Renewable Energy*, 1995. 7(1): p. 33-46.
3. Santamouris, M., et al., On the performance of buildings coupled with earth to air heat exchangers. *Solar Energy*, 1995. 54(6): p. 375-380.
4. Mihalakakou, G., J.O. Lewis, and M. Santamouris, On the heating potential of buried pipes techniques-application in Ireland. *Energy and Buildings*, 1996. 24: p. 19-25.

5. Mihalakakou, G., et al., On the application of the energy balance equation to predict ground temperature profiles. *Solar Energy*, 1997. 60(3/4): p. 181-190.
6. Badescu, V., Simple and accurate model for the ground heat exchanger of a passive house. *Renewable Energy*, 2007. 32(5): p. 845-855.
7. Ascione, F., L. Bellia, and F. Minichiello, Earth-to-air heat exchangers for Italian climates. *Renewable Energy*, 2011. 36(8): p. 2177-2188.
8. Su, H., et al., A numerical model of a deeply buried air–earth–tunnel heat exchanger. *Energy and Buildings*, 2012. 48: p. 233-239.
9. Ramírez-Dávila, L., et al., Numerical study of earth-to-air heat exchanger for three different climates. *Energy and Buildings*, 2014. 76: p. 238-248.
10. Xamán, J., et al., Numerical study of earth-to-air heat exchanger: The effect of thermal insulation. *Energy and Buildings*, 2014. 85: p. 356-361.
11. Benhammou, M., et al., Performance analysis of an earth-to-air heat exchanger assisted by a wind tower for passive cooling of buildings in arid and hot climate. *Energy Conversion and Management*, 2015. 91: p. 1-11.
12. Benhammou, M. and B. Draoui, Parametric study on thermal performance of earth-to-air heat exchanger used for cooling of buildings. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2015. 44: p. 348-355.
13. Xamán, J., et al., Pseudo transient numerical study of an earth-to-air heat exchanger for different climates of México. *Energy and Buildings*, 2015. 99: p. 273-283.
14. Khabbaz, M., et al., Experimental and numerical study of an earth-to-air heat exchanger for air cooling in a residential building in hot semi-arid climate. *Energy and Buildings*, 2016. 125: p. 109-121.
15. Mathur, A., A.K. Surana, and S. Mathur, Numerical investigation of the performance and soil temperature recovery of an EATHE system under intermittent operations. *Renewable Energy*, 2016. 95: p. 510-521.
16. Bojić, M., G. Papadakis, and S. Kyritsis, Energy from a two-pipe, earth-to-air heat exchanger. *Energy*, 1999. 24: p. 519-523.
17. Pfafferott, J., Evaluation of earth-to-air heat exchangers with a standardised method to calculate energy efficiency. *Energy and Buildings*, 2003. 35: p. 971-983.
18. Ozgener, L. and O. Ozgener, An experimental study of the exergetic performance of a underground air tunnel system for greenhouse cooling. *Renewable Energy*, 2010. 35: p. 2804-2811.
19. Ozgener, O. and L. Ozgener, Exergetic assessment of EAHEs for building heating in Turkey: A greenhouse case study. *Energy Policy*, 2010. 38: p. 5141-5150.
20. INEGI, I.N.d.E.y.G. Mapas de Clima. 2011; Available from: <http://web.archive.org/web/20120127095024/http://mapserver.inegi.gob.mx/geografia/espanol/estados/qroo/clim.cfm>.

