

ESTUDIO PARAMÉTRICO DE UN INTERCAMBIADOR DE CALOR-TIERRA AIRE EN UN CLIMA CÁLIDO-HÚMEDO

PARAMETRIC STUDY OF EARTH-TO-AIR HEAT EXCHANGER IN A HOT-HUMID CLIMATE

Torres-Ruiz. F.¹, Hernández-Pérez I. ^{1*}

¹División Académica de Ingeniería y Arquitectura, Universidad Juárez Autónoma de Tabasco (DAIA-UJAT) Carretera Cunduacán-Jalpa KM. 1. Col. La Esmeralda CP. 86690 Cunduacán, Tabasco, México.

*ivan.hernandezp@ujat.mx

RESUMEN

Este artículo presenta el análisis de un intercambiador de calor tierra-aire (EAHE por sus siglas en inglés) de lazo abierto para un clima cálido húmedo, de tal forma que a través de los resultados se obtenga la posible viabilidad de un EAHE bajo estas condiciones. Se usó un modelo computacional desarrollado en Fortran para simular el comportamiento térmico del EAHE. El modelo se validó con resultados experimentales disponibles en la literatura. Se analizaron distintas longitudes, diámetros y número de tuberías con el fin de determinar el rendimiento de EAHE, potencia consumida por la unidad de tratamiento de aire, ahorro de energía, costo de la instalación y periodo de retorno de la inversión. Teniendo una máxima disminución en la temperatura a la salida del EAHE de 13.6% con respecto a la temperatura ambiente, se encontró que el

máximo ahorro de energía obtenido fue 42%. Además, se determinó que el periodo de retorno se ve afectado por el diámetro de tubería y su longitud.

Palabra clave: Ahorro de energía, Análisis económico, Intercambiador de calor tierra-aire, Unidad de aire acondicionado.

ABSTRACT

This article presents the analysis of an open-loop earth-air heat exchanger (EAHE) for a warm humid climate, so that through the results the possible feasibility of an EAHE under these conditions is obtained. A computational model developed in Fortran was used to simulate the thermal behavior of the EAHE. The model was validated with experimental results available in the literature. Different lengths, diameters and number of pipes were analyzed to determine the EAHE performance, power consumed by the air

treatment unit, energy savings, general installation cost and return on investment period. Having a maximum decrease in the temperature at the outlet of the EAHE of 13.6% with respect to the ambient temperature, it was found that the maximum energy saving obtained was 42%. In addition, it was determined that the return period is affected by the pipe diameter and its length.

Keywords: Energy savings, Economic Analysis, Earth-air heat exchanger, Air-conditioning system.

INTRODUCCION

México ocupa el decimocuarto lugar en el ranking internacional en consumo energético [1]. El consumo nacional total de energía representó 7 826.606 PJ en 2020, del cual 56.6% corresponde al consumo final, el sector comercial consume 145.407 PJ de la energía final que a su vez 37% es corresponde a la electricidad consumida [2].

El estado de Tabasco tiene un clima cálido-húmedo, con una temperatura media anual de 27 °C y una temperatura máxima promedio de 36 °C [3]. Entonces, para lograr condiciones de confort térmico se utilizan de manera generalizada equipos de aire acondicionado en las

edificaciones a lo largo de todo el año, principalmente en verano, lo cual se traduce en recibos del cobro de electricidad muy altos.

Existen diferentes tecnologías que se pueden implementar en una edificación ubicada en un lugar con clima cálido para mejorar su desempeño térmico; chimenea solar, recubrimientos reflectivos, intercambiador de calor tierra-aire, ventanas de vidrio doble, aislamiento térmico, entre otras. Un intercambiador de calor tierra aire (EAHE, por sus siglas en inglés) consiste en un sistema de tuberías enterradas en el subsuelo que transportan aire. Debido a la inercia térmica del subsuelo, éste permanece a una temperatura casi constante durante el año porque tiene la capacidad de atenuar las fluctuaciones de temperatura que ocurren en la superficie [4]. Entonces el aire que se introduce a un EAHE se puede enfriar en lugares con clima cálido debido a que la temperatura del subsuelo es menor.

En trabajos disponibles en la literatura se ha analizado el comportamiento de sistemas de acondicionamiento de aire integrados con un EAHE. En un trabajo previo [5], se estudió un EAHE de lazo cerrado conectado a una unidad de

tratamiento de aire (AHU, por sus siglas en inglés) en dos ciudades con clima cálido en Estados Unidos de América. Comparado con el AHU convencional, el sistema acoplado EAHE-AHU consumía menos energía debido a que el EAHE pre-enfriaba parcialmente el aire. En los resultados se demuestra que el EAHE proporcionó ahorros de 10% para Houston y 14 % para Dallas. Bansal et al. [6] demostró que un EAHE funcionando de manera individual es insuficiente para regular la temperatura en el interior de un edificio durante el verano. Se tuvo que integrar un sistema de enfriamiento evaporativo con el EAHE para regular la temperatura del interior. Los autores demostraron que el sistema integrado tuvo un retorno de la inversión de dos años.

Existen dos trabajos previos que han analizado un EAHE instalado en Tabasco. La primera investigación fue desarrollada por Díaz-Hernández et al. [7]. Los autores realizaron simulaciones de un modelo EAHE con salida aislada situado en Cunduacán, Tabasco. Se analizó el comportamiento del EAHE para tres velocidades de entrada de aire, 1, 3 y 5 m/s. Los resultados mostraron que una velocidad del aire de entrada de 1 m/s proporcionó una mejor capacidad de

enfriamiento; el EAHE redujo la temperatura del aire desde 36°C hasta 31°C. El segundo estudio fue desarrollado por Díaz-Hernández et al. [8]. Se realizaron pruebas experimentales de un EAHE en Cunduacán, Tabasco. Monitorearon las temperaturas del aire de entrada y salida de la EAHE y las temperaturas del suelo durante seis meses. Se encontró que el EAHE tuvo un potencial de enfriamiento máximo de 5.5°C. Además, se estimó que si el EAHE se conecta a la unidad condensadora de un aire acondicionado residencial se podría ahorrar el 20% de energía en verano y el periodo de retorno del EAHE fue dos años.

METODOLOGIA.

El presente trabajo tiene como objetivo determinar los ahorros de energía que se pueden obtener cuando se conecta un EAHE a un equipo de aire acondicionado central para edificios no residenciales del estado de Tabasco. Para ello, se realizó un estudio paramétrico usando un modelo validado con datos experimentales disponibles en la literatura. Se analizaron diferentes longitudes, diámetros y número de tubos del EAHE y se determinó el periodo de retorno de la inversión.

Modelo Físico. La **Figura 1** muestra un EAHE en forma de U de lazo abierto conectado a una unidad de tratamiento de aire (AHU) que a su vez se utiliza para climatizar un edificio no residencial. El aire que ingresa al EAHE se enfría por medio de convección y conducción debido a que la tierra que está en contacto con la superficie del tubo tiene una temperatura menor que el aire. De esta manera el EAHE suministra aire a una menor temperatura que la del ambiente a la entrada de la unidad de tratamiento de aire cuya función es climatizar una edificación. En este trabajo se considera que las

tuberías verticales (entrada y salida) son adiabáticas, por lo tanto, la transferencia de calor sólo ocurre en la tubería horizontal con una longitud L las cual está enterrada a una profundidad igual a 4 m.

Modelo matemático La temperatura de salida del EAHE se calcula a partir de un análisis de transferencia de calor, el cual usa como datos de entrada la temperatura del aire en la entrada y temperatura de la superficie de la tubería, la velocidad del aire en el mismo y las propiedades termofísicas de la tubería y del suelo.

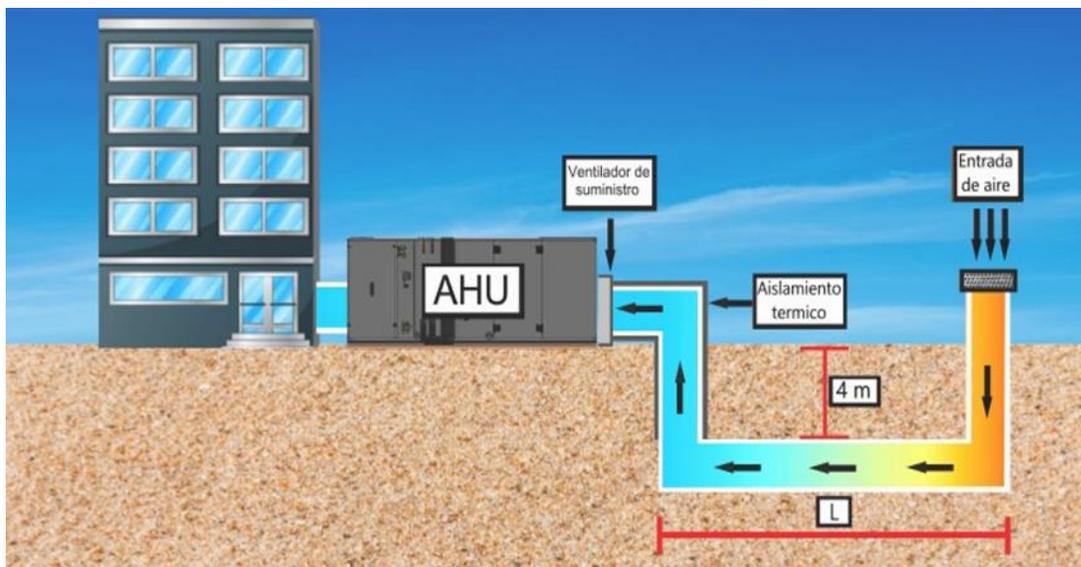


Figura 1. Diagrama de un EAHE de lazo abierto acoplado a un AHU

La transferencia de calor entre el suelo y el aire que fluye por medio de la tubería del EAHE se puede determinar suponiendo que las temperaturas de la superficie de la tubería y la temperatura del suelo son iguales y permanecen constantes [5]. El balance de energía para un elemento infinitesimal de la tubería se puede representar por medio de la siguiente ecuación [10]:

$$\frac{dT_m}{dx} = \frac{d(\Delta T)}{\Delta T} = \frac{1}{\dot{m}c_p R_{total}} \Delta T \quad (1)$$

La cual se puede resolver integrando ambas partes de la ecuación desde la entrada de la tubería hasta alguna posición a lo largo de la misma.

$$\int_{\Delta T_{in}}^{\Delta T_{out}} \frac{d(\Delta T)}{\Delta T} = - \int_0^L \frac{dx}{\dot{m}c_p R_{total}} \quad (2)$$

Resolviendo las integrales y evaluando sus límites, se obtiene:

$$\ln \frac{\Delta T_{out}}{\Delta T_{in}} = - \frac{L}{\dot{m}c_p R_{total}} \quad (3)$$

sustituyendo ΔT_{out} y ΔT_{in} se obtiene:

$$\ln \frac{(T_{ground} - T_{out})}{(T_{ground} - T_{in})} = - \frac{L}{\dot{m}c_p R_{total}} \quad (4)$$

Al resolver la ecuación (4) se puede obtener la temperatura en la salida del EAHE con una longitud L la cual se puede expresar como [10]:

$$T_{out} = T_{ground} + (T_{in} - T_{ground}) \times \exp \left[- \frac{L}{\dot{m}c_p R_{total}} \right] \quad (5)$$

Donde T_{out} es la temperatura del aire a la salida del EAHE, T_{ground} es la temperatura promedio de la tierra donde se instala, T_{in} es la temperatura del aire a la entrada del EAHE (en este estudio es temperatura del aire ambiente), c_p es el calor específico del aire y L es la longitud del EAHE.

El flujo másico es la cantidad de aire que se transporta a través la tubería y se calcula por medio de la ecuación (6)

$$\dot{m} = \frac{\rho_{air} \pi D_{in}^2 n V_{air}}{4} = \rho_{air} \dot{V}_{AHU} \quad (6)$$

donde \dot{m} es el flujo másico del aire, D_{in} es el diámetro interior de la tubería (m), n es el número total de tubos del EAHE, ρ_{air} es la densidad del aire, V_{air} es la velocidad del aire dentro de la tubería y \dot{V}_{AHU} es el flujo volumétrico requerido por la AHU.

El coeficiente de transferencia de calor por convección h depende de las propiedades térmicas del flujo del aire, el cual se calcula mediante [9]:

$$h = \frac{Nu k_{air}}{D_{in}} \quad (7)$$

donde k_{air} es la conductividad térmica del aire y Nu es el número de Nusselt el cual

se puede a determinar para enfriamiento y calentamiento como [9].

$$Nu = 0.023Re^{0.8}Pr^j \quad (8)$$

($j=0.3$ para enfriamiento y $j=0.4$ para calentamiento)

En este trabajo se utilizó $j = 0.3$ dado que el EAHE se usa únicamente para enfriamiento.

La resistencia térmica total se determinó considerando la conducción a través de la pared del tubo, los efectos de la convección por medio del interior de la tubería y la conducción entre la superficie exterior de la tubería y en el suelo a su alrededor (Fig. 2). La cual se define con la ecuación (9).

$$R_{total} = R_{conv} + R_{cond} + R_{soil} \quad (9)$$

En la cual R_{total} es la resistencia térmica total de la tubería, R_{conv} es la resistencia térmica convectiva entre el flujo del aire y el interior de la superficie de la tubería (10), R_{cond} es la resistencia térmica conductiva de la tubería (11), R_{soil} es la resistencia térmica entre la superficie exterior de la tubería y la tierra alrededor de la tubería (12) [9].

$$R_{conv} = \frac{1}{\pi D_{in} h} \quad (10)$$

$$R_{cond} = \frac{\ln(D_{out}/D_{in})}{2\pi k_{pipe}} \quad (11)$$

$$R_{soil} = \frac{1}{2\pi k_{soil}} \left[\ln \frac{D_{in} + D_{out} + \frac{D_{in}}{2}}{D_{in} + D_{out}} \right] \quad (12)$$

Donde D_{in} es el diámetro interior de la tubería (m), D_{out} es el diámetro exterior de la tubería (m), k_{pipe} es la conductividad térmica del tubo, k_{soil} es la conductividad térmica promedio de la tierra.

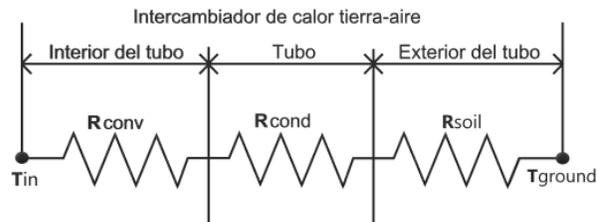


Figura 2. Diagrama de resistencia térmica de un tubo para el EAHE

Energía consumida. En el cálculo del ahorro de la energía que puede proporcionar un EAHE se tiene que obtener previamente variables dadas por las siguientes ecuaciones:

$$\Delta P = \frac{\rho_{air} V_{air}^2}{2} \left[\frac{f L_p}{D_{in}} \right] \quad (13)$$

Donde ΔP se define como la caída de presión en el sistema f es el coeficiente de fricción el cual se puede calcular por medio del número de Reynolds [11]:

$$f = \frac{0.316}{Re^{0.25}} \quad (14)$$

La potencia del ventilador es calculada por:

$$FP = \frac{\Delta P \dot{m}}{\rho_{air} \eta_{fan}} \quad (15)$$

Donde η_{fan} es la eficiencia del ventilador.

El ahorro de energía cuando se usa un EAHE se calcula de la siguiente forma:

% ahorro de energía

$$= \frac{\dot{W}_{c,without} - \dot{W}_{c,with} - FP}{\dot{W}_{c,without}} \quad (16)$$

Donde $\dot{W}_{c,with}$ y $\dot{W}_{c,without}$ son la energía consumida por el compresor de la unidad de tratamiento de aire AHU con y sin EAHE, respectivamente. La cual se puede calcular por:

$$\dot{W}_c = \frac{Q_c}{COP_R} \quad (17)$$

Donde Q_c es la capacidad de refrigeración total y COP_R es el coeficiente de rendimiento de la AHU.

Q_c se puede calcular en función del flujo másico y la entalpía del aire en el exterior H_o y al interior de la edificación H_s :

$$Q_c = \dot{m}(H_o - H_s) \quad (18)$$

H_o depende de la temperatura del aire T_{air} y H_s se calcula mediante la siguiente formula [12]:

$$H_s = 1.005T_{air} + \omega(2500.9 + 1.88T_{air}) \quad (19)$$

Donde H_s la entalpía del aire a la salida de la unidad de tratamiento de aire AHU depende la temperatura del aire T_{air} (°C) y la humedad específica ω , T_{air} es la temperatura del aire a la salida del AHU. La humedad específica se calcula mediante:

$$\omega = 0.622 \frac{P_v}{P - P_v} \quad (20)$$

Donde P_v es la presión del vapor, P es la presión atmosférica.

P_v se obtiene de la siguiente ecuación:

$$\varphi = \frac{P_v}{P_s} \quad (21)$$

Donde φ es la humedad relativa del lugar donde se instala la AHU, P_s es la presión de saturación que depende de la temperatura T_{air} , la cual se obtiene mediante la siguiente ecuación:

$$P_s = 0.61121 \exp \left(\left(18.678 - \frac{T_{air}}{234.5} \right) \left(\frac{T_{air}}{257.14 + T_{air}} \right) \right) \quad (22)$$

Análisis de costos. El costo anual total (ATC) de un AHU que tiene acoplado un EAHE, depende del coste de fabricación, instalación, mantenimiento, operación, el

coste de la energía consumida (AEC), se puede calcular mediante [14]:

$$ATC = AFC + AVC - ASV \quad (23)$$

Donde AFC es el coste fijo anual, AVC es el coste variable anual y ASV es valor residual anual. AFC es determinado por:

$$AFC = CRF \times Pi \quad (24)$$

El factor de recuperación de capital (CRF) es [15]:

$$CRF = \frac{i(1+i)^m}{(1+i)^m - 1} \quad (25)$$

Donde m es el tiempo de vida del EAHE, la cual se estima en 25 años.

Pi es coste inicial de la AHU (C_{AHU}) y Del EAHE.

$$Pi = C_{AHU} + C_e L \quad (26)$$

C_e es el coste por metro del EAHE, es determinado por los costes de los materiales, en el caso de Villahermosa es dado por:

$$C_e = 91.3684 - 68.6617 \frac{D_{in}}{0.0254} + 20.6955 \left[\frac{D_{in}}{0.0254} \right]^2 - 1.184221 \left[\frac{D_{in}}{0.0254} \right]^3 \quad (27)$$

El coste variable anual se determina por:

$$AVC = AMC + AOC + AEC \quad (28)$$

Donde AMC es el coste anual de mantenimiento, AOC es el coste anual de

operación. AMC Y AOC se define como el 15% de coste fijo anual [15].

El coste de la energía es determinado por:

$$AEC = EC \times AE \quad (29)$$

Donde EC es el coste por kWh de la energía en la región donde se instale el AHU y el EAHE, AE es la energía total consumida por año, la cual es:

$$AE = (\dot{W}_c + FP) \times \Delta t \times 180 \quad (30)$$

El valor residual anual ASV es calculado por:

$$ASV = SFF \times S \quad (31)$$

El factor de fondo de amortización SFF es determinado por:

$$SFF = \frac{i}{(1+i)^m - 1} \quad (32)$$

Donde i es la tasa de interés anual, la cual se asume que es 12% anual [16].

El valor residual anual S es:

$$S = 0.2 \times Pi \quad (33)$$

Por medio del análisis en el tiempo de vida del EAHE se puede determinar el periodo de amortización (PA), el cual se puede calcular con la siguiente ecuación [16]:

$$PA = \frac{\ln[(CF)/(CF-P \times i)]}{\ln[1+i]} \quad (34)$$

Donde P es la inversión inicial y CF es el gasto anual requerido por el sistema EAHE el cual se calcula con la siguiente ecuación:

$$CF = R - M \quad (35)$$

En el caso de este modelo R es el retorno de inversión de la instalación del EAHE y M son los gastos de mantenimiento y operación de este.

Solución. El modelo matemático del EAHE acoplado a un AHU en un lazo abierto descrito anteriormente se resolvió por medio de un código computacional desarrollado en Fortran.

Validación y Verificación del Modelo El modelo descrito anteriormente se validó usando los resultados experimentales de la temperatura de salida de Goswami y Dhaliwal [17] y se verificó usando los resultados teóricos de Al-Ajmi et al. [18] y Barakat et al. [19]. Se utilizó los parámetros de entrada descritos en la **Tabla 1**.

Tabla 1. Parámetros de entrada para la validación.

Parámetros	Valor (Barakat et al. [19];
	Goswami y Dhaliwal [17])
Temperatura del suelo (°C)	18.89
Diámetro de la tubería (m)	0.3
Profundidad de la tubería (m)	2.13
Longitud de la tubería (m)	0-24.7
Velocidad del aire (m/s)	1.5
Conductividad térmica del suelo (W/(m°C))	1.16
Difusividad térmica del suelo (m ² /s)	6.44x10 ⁻⁷

Como se muestra en la **Tabla 2**, se tiene una buena concordancia con los resultados experimentales obtenidos por Goswami y Dhaliwal [17] teniendo un máximo error de ~4.45 % y un error mínimo de ~0.32 %. Este error se puede atribuir a la incertidumbre de los datos experimentales. Para el caso de los resultados teóricos de Al-Ajmi et al., [18] y Barakat et al., [19] se tienen un máximo error de ~2.62%, ~3.08% y un error mínimo de ~0.56%, ~0.60% respectivamente. Entonces, con la comparación presentada en la Tabla 5, se puede afirmar que el modelo desarrollado es confiable y se puede usar para estudiar el comportamiento del EAHE en Villahermosa, Tabasco.

Tabla 2. Comparación entre modelos experimentales, teóricos y resultados numéricos.

Longitud de la tubería (L) [m]	Modelo actual	Temperatura de salida (T_{out})					
		Gosvami y Dhaliwal [17]	Error relativo %	Al-Ajmi et al. [18]	Error relativo %	Barakat et al. [19]	Error relativo %
0	25.56	25.56	0.00	25.56	0.00	25.56	0.00
3.35	25.08	25	0.32	24.94	0.56	24.93	0.60
6.4	24.68	24.4	1.15	24.43	1.02	24.39	1.19
9.95	24.24	25	3.04	23.97	1.13	23.84	1.68
12.5	23.94	24.4	1.89	23.54	1.70	23.47	2.00
15.55	23.61	23.8	0.80	23.15	1.99	23.07	2.34
24.7	22.74	23.8	4.45	22.16	2.62	22.06	3.08

CASO DE ESTUDIO

Los parámetros de entrada del EAHE se presentan en la **Tabla 3**. El modelo del AHU utilizado es LG AK-W120BC00 las especificaciones son descritas en la **Tabla 4**.

RESULTADOS

La temperatura del suelo se obtuvo del estudio realizado por Díaz-Hernández et al. [8] en Cunduacán, Tabasco. En la primera parte de los resultados se muestra los resultados del rendimiento térmico del EAHE. En la segunda parte sección se usaron resultados del modelo para calcular el ahorro de la energía y del costo para un AHU operativa.

Rendimiento del EAHE. El rendimiento del EAHE se estima a partir de la temperatura de salida. Se realizaron

simulaciones variando el tamaño del diámetro, el número de tubos y su longitud para determinar su influencia en el rendimiento del EAHE instalado en Villahermosa, Tabasco. Los parámetros utilizados en las simulaciones se enlistan en la **Tabla 3** y **Tabla 4**.

La **Figura 3** presenta el comportamiento de la temperatura del aire en la salida para un diámetro entre 6" y 16" cuando el EAHE tiene cinco tubos ($n=5$) y cien tubos ($n=100$). En la figura se observa que conforme aumenta la longitud de los tubos, la temperatura del aire a la salida del EAHE disminuye. Cuando $n=5$, se obtiene una reducción en la temperatura del aire en la salida de 13.6% cuando $D=8"$ y $L=200m$. Con un aumento en el número de tubos enterrados $n=100$, la

disminución de la temperatura del aire en la salida es menor que con $n=5$ pero aún es significativa. Cuando $D=6''$ y $L=170$ m el intercambiador de calor redujo la temperatura del aire un 4.1%. Para otras longitudes mayores que 170 m las reducciones de temperatura sólo cambian alrededor de 0.7% por lo tanto no se considera una reducción significativa.

Tabla 3. Parámetros de entrada del modelo.

Parámetros	Valor
Temperatura de entrada (C°)	39.55
Material	PVC
Diámetro del tubo (in)	6"-16"
longitud del tubo (m)	0-200
Flujo volumétrico requerido (m ³ s ⁻¹)	1.75
numero de tubos	5-100
Conductividad térmica del suelo (W/(m°C))	1.6

La **Figura 4** muestra el efecto del número de tubos (n) sobre la temperatura del aire en la salida del EAHE. Cuando el diámetro de los tubos es pequeño, $D=6''$, la temperatura del aire logra un descenso máximo del 13.4% cuando $n=5$ y $L=200$ m. Contrario a un número de tubos mayor $n=100$ donde la diferencia de temperaturas es de 4.8% a $L=200$. Con un diámetro más amplio $D=16''$ nuevamente se obtuvo que a números de tubos menores se obtiene las temperaturas más bajas con respecto a diámetros mayores

siendo este de un descenso del 12.8% a $n=5$ y $L=200$.

Tabla 4. Especificaciones del AHU.

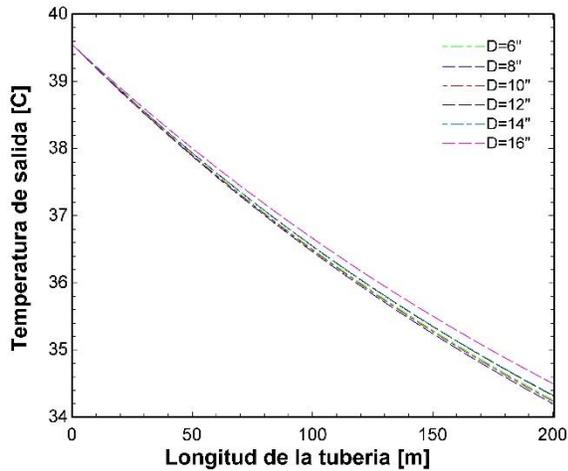
Parámetros	Valor
% Aire fresco requerido	100%
Capacidad nominal (TR)	10
Flujo volumétrico (m ³ s ⁻¹)	1.75
Consumo eléctrico (kW)	10.35
Modelo del ventilador exterior	Ventilador de propela
COP	3.5

Rendimiento del aire acondicionado. El rendimiento de la AHU acoplada a un EAHE se define por la energía consumida por el compresor de la AHU. El compresor consume menos electricidad si el aire que se introduce a la AHU es enfriado previamente por un EAHE.

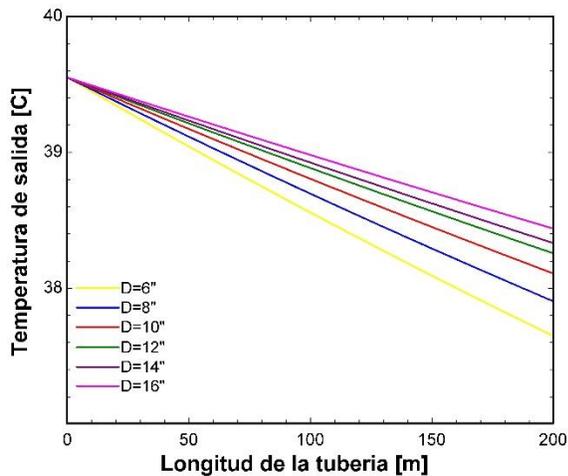
La **Figura 5** presenta el consumo de energía de la AHU en función de la longitud del EAHE para diferentes diámetros de tubos. Se aprecia que el consumo de energía del compresor disminuye si la longitud del EAHE se incrementa. La misma figura indica que conforme incrementa el diámetro de la tubería el consumo de la energía del compresor aumenta. Además, para un número de tubos reducido ($n=5$) con diámetros estrechos se consigue un menor consumo del compresor comparado cuando el número de tubos es mayor $n=100$. Cuando $n=5$, $D=6''$ y $L=200$

m se obtuvo la mayor reducción en el consumo del compresor de 43.5% comparado con el consumo del compresor de la AHU sin EAHE. La menor reducción (41%) en las mismas condiciones de longitud y número de tubos se obtiene a

$D=16''$ (Figura 5a). Con un número de tubos $n=100$, el consumo del compresor es mayor que cuando $n=5$, sin embargo, también existe una disminución del consumo del compresor comparado con el caso sin EAHE.

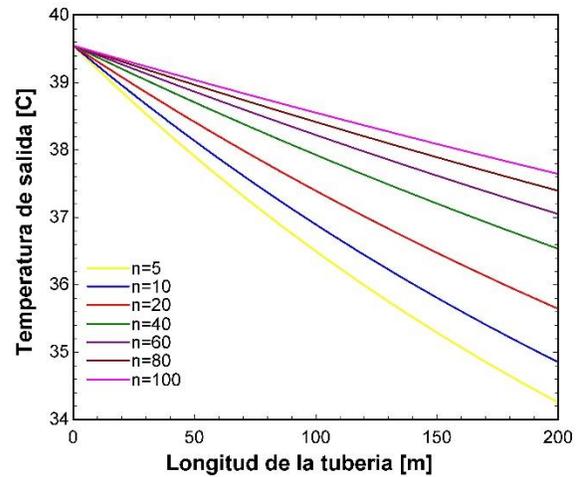


a) $n=5$

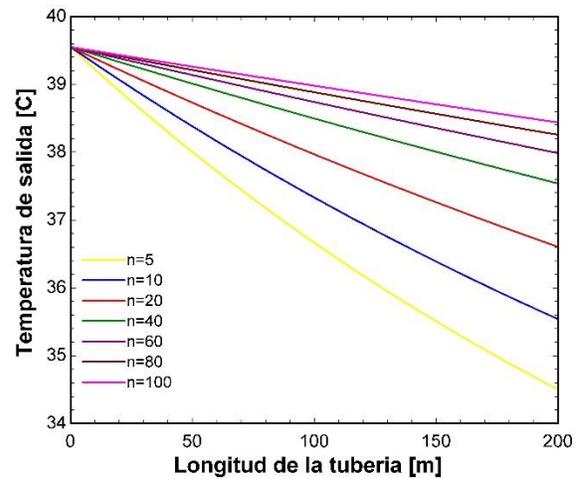


b) $n=100$

Figura 3. Temperatura de salida en función de la longitud de la tubería y diferentes diámetros.



a) $D=6''$



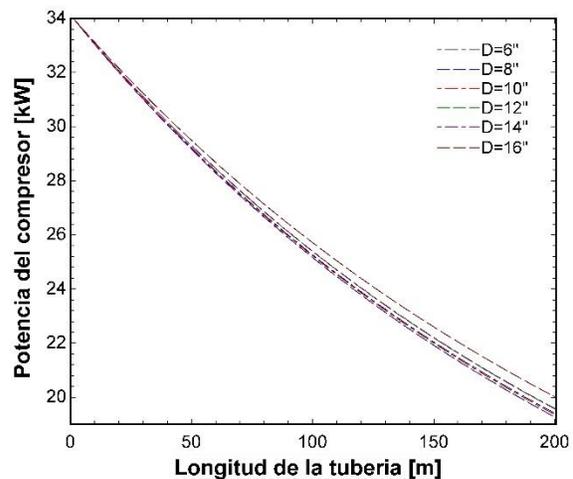
b) $D=16''$

Figura 4. Temperatura de salida en función de la longitud de la tubería y números de tuberías.

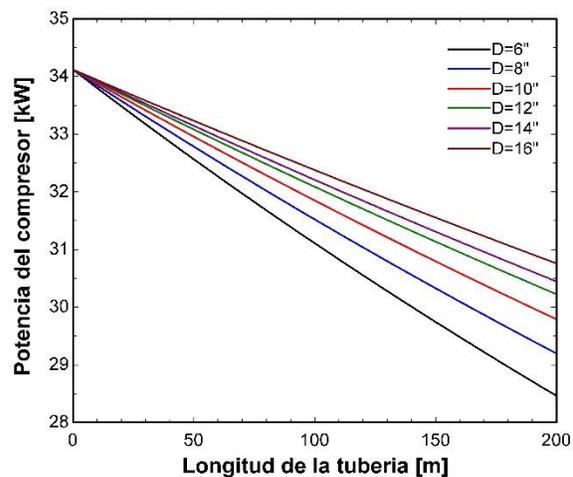
Cuando el EAHE tiene un diámetro $D=6''$ y una longitud $L=200$ m la reducción del consumo de energía del compresor fue 16.6% siendo este valor la reducción máxima obtenida cuando $n=100$ Por otro lado, la reducción del consumo de energía del compresor más baja para $n=100$ fue 9.8% cuando $D=16''$ y $L=200$. La reducción del consumo es dependiente de la temperatura del aire que suministre la EAHE (**Figura 5b**).

La **Figura 6** presenta el ahorro de energía global en función de la longitud y diámetro de los tubos del EAHE. El ahorro de energía se calculó de acuerdo con la ecuación (16) en la que están involucrados el consumo de energía de una AHU, el consumo de energía del AHU conectado a un EAHE y el consumo de energía del ventilador que introduce el aire al EAHE. Para un número de tubos pequeño $n=5$, el ahorro de energía mayor se obtuvo cuando $D=14''$ $L=200$ (42%), esto se debe a un menor consumo del ventilador del EAHE para cumplir con los requerimientos de la AHU. Siendo el menor ahorro a $D=6''$ de 11.4%. Con número de tubos mayor $n=100$ la potencia consumida por el ventilador es mucho menor, debido al aumento del aire transversal total, sin embargo, debido a la

temperatura suministrada por el EAHE bajo en estas condiciones se obtiene un menor ahorro de energía en comparación a un número de tubos menor, siendo de 9.8% a $D=16''$ y $L=200$ m, teniendo un máximo de 16.4% a $D=6''$ en la misma longitud.



a) $n = 5$



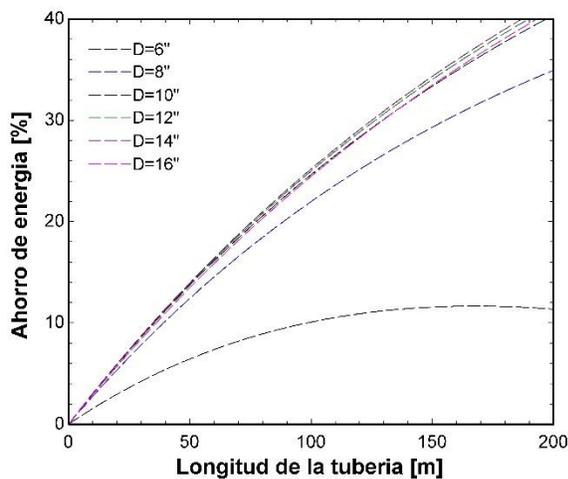
b) $n = 100$

Figura 5. Potencia consumida por el compresor en función de la longitud de la tubería y diferentes diámetros.

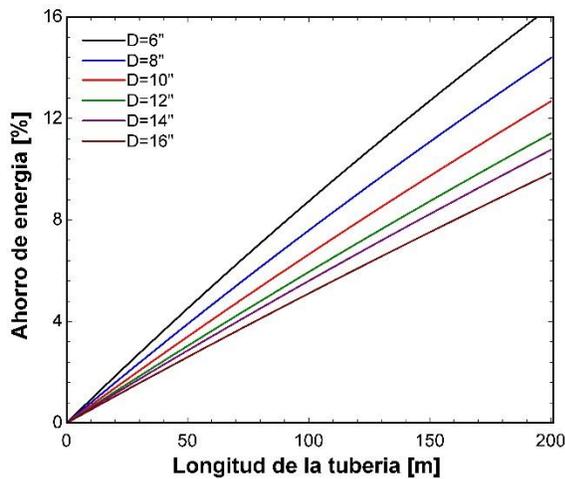
La **Figura 7** en la gráfica se muestra las menores temperaturas que alcanza el aire a la salida del EAHE en función de los de los diámetros, variando el número de tubos cuando su longitud es constante e igual a 200 m, teniendo una temperatura menor (13.5%) cuando $n=5$ y $D=8''$, de igual forma se muestra una

tendencia que a un mayor número de tubos la temperatura de salida de EAHE aumenta considerablemente.

La **Figura 8** muestra las velocidades internas de la tubería en función del diámetro variando el numero de tubos cuando el EAHE este acoplado a la AHU, debido a que la unidad de tratamiento de



a) $n = 5$



b) $n = 100$

Figura 6. Ahorro de energía en función de la longitud de la tubería y diferentes diámetros.

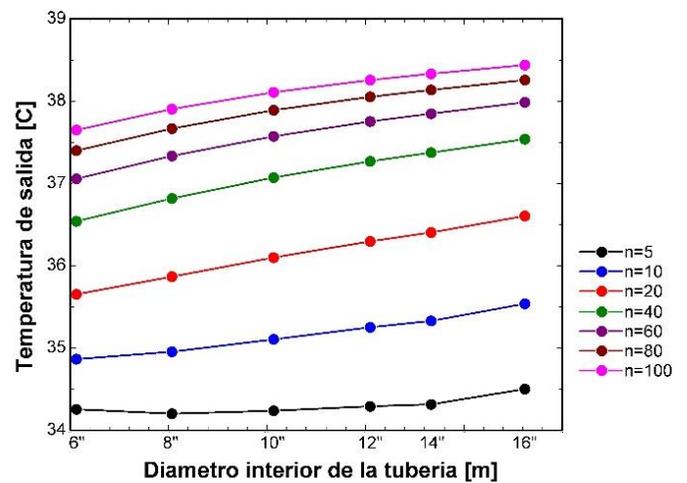


Figura 7. Menores temperaturas en función de diámetros con varios números de tubos.

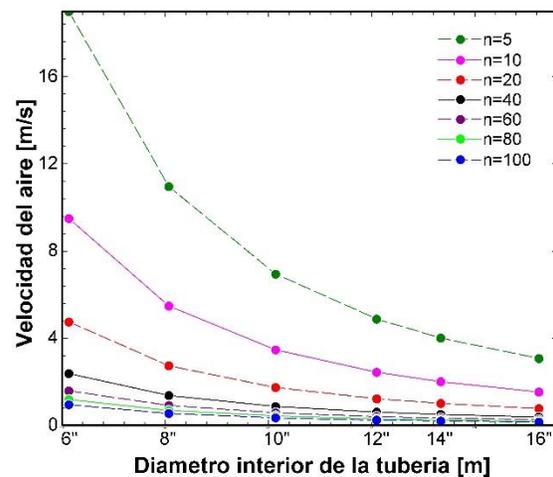


Figura 8. Velocidades internas en función de diámetros con varios números de tubos.

aire requiere un flujo volumétrico de aire para su correcto funcionamiento y acorde a la ecuación 6 existe una relación con la velocidad interna de la tubería, observándose que a un número menor de tubos y diámetros menores ($n=5$, $D=6''$) las velocidades aumentan de manera considerable en comparación del a números de tubos grandes y diámetros de tuberías mayores ($n=100$, $D=16''$), siendo la mayor velocidad interna registrada 124 veces más que la menor velocidad registrada en este estudio.

La **Figura 9** presenta el mayor ahorro de energía para cada diámetro y número de tubos estudiados en este trabajo. Se puede observar que el máximo ahorro (42%) ocurre cuando $n=5$ y $D=14''$, esto es debido al menor consumo tanto del compresor apoyado con una reducción de consumo del ventilador causado por un descenso en la velocidad del aire al interior de la tubería la cual se puede apreciar en la **Figura 8** y contrastando con la información obtenida en la **Figura 7** da como resultado que al tener un diámetro interno mayor la temperatura de salida del EAHE es baja dando como resultado un ahorro de energía mayor.

Figura 10 se muestra el periodo de retorno el cual se calculó mediante la ecuación (34) para diferentes números de tubos y diámetros. Teniendo que a un diámetro estrecho $D=6''$ y un número de tubos $n=20$ el periodo de amortización del EAHE es de 1.2 años, para diámetros mayores el coste del sistema es tan elevado que sobrepasa el tiempo de vida de la instalación para amortizar dicho coste.

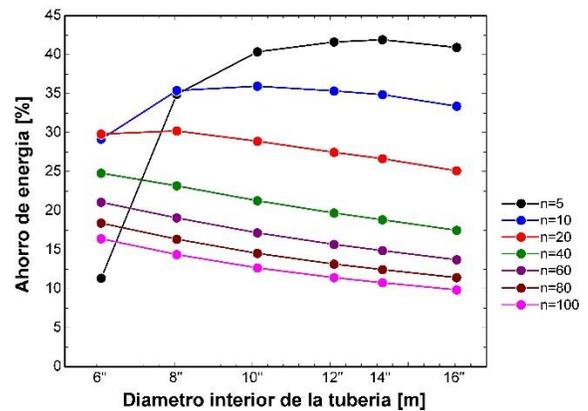


Figura 9. Mayores ahorros de energía en función de diámetros con varios números de tubos.

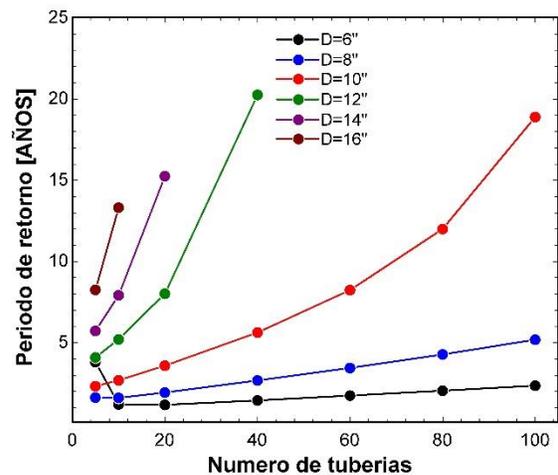


Figura 10. Periodo de retorno en función de números de tuberías para diferentes diámetros.

CONCLUSIONES

Un EAHE acoplado a una unidad de tratamiento de aire puede reducir significativamente el consumo eléctrico demandado por esta última, al ingresar aire a una menor temperatura que la temperatura ambiente en la entrada de AHU. EL estudio realizado con varios parámetros tales como diámetro de tubería, longitud, número de tubos, se obtuvo una tendencia del modelo que a diámetros estrechos y números de tubos menores se logran la menor temperatura posible con el menor consumo de compresor y del ventilador. Se encontró que el máximo ahorro de la energía proporcionado por el EAHE fue del 42%, teniendo a un diámetro menor el periodo de amortización de la instalación de 1.2-3.8 años para diferentes números de tubos, con un ahorro de energía de hasta el 30%.

REFERENCIAS

- [1] Subsecretaría de Planeación y Transición Energética (2020). Balance Nacional de Energía. Dirección General de Planeación e Información Energéticas. México. 159. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/707654/BALANCE_NACIONAL_ENERGIA_0403.pdf . Fecha de consulta 15 de febrero del 2023.
- [2] Sistema de información de energía (2020). SENER. México. <https://sie.energia.gob.mx/bdiController.do?action=temas>. Fecha de consulta 15 de febrero del 2023.
- [3] Secretaría de economía. (2016). Información económica y estatal Tabasco. Secretaria de economía. Villahermosa, Tabasco. 17. <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/113608/tabasco.pdf> . Fecha de consulta 15 de febrero del 2023.
- [4] Xamán J., Hernández-López I., Alvarado-Juárez R., Hernández-Pérez I., Álvarez G. y Chávez Y. (2015). Pseudo transient numerical study of an earth-to-air heat exchanger for different climates of Mexico, Energy and Buildings.99 273-283. Doi:<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.04.041>
- [5] Do S.L., Baltazar J.C, Haberl J. (2015). Potential cooling savings from a ground-coupled return-air duct system for residential buildings in hot and humid climates, Energy and Buildings. 103 206-215. Doi:<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.05.043>
- [6] Bansal, V., Misra, R., Das Agrawal, G., Mathur, J., (2012). Performance evaluation and economic analysis of integrated earth air tunnel heat exchanger evaporative cooling system. Energy and Buildings 55, 102–108. Doi:<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.08.047>

- [7] Díaz-Hernández H.P., Aguilar-Castro K.M., Macias-Melo E.V., Serrano-Arellano J. (2017). Diseño de un intercambiador de calor tierra-aire en clima cálido-húmedo. *Revista del Desarrollo Tecnológico* 1 44-51.
- [8] Díaz-Hernández H.P., E.V. Macias-Melo, K.M. Aguilar-Castro, I. Hernández-Pérez, J. Xamán, J. Serrano-Arellano, L.M. López-Manrique (2020). Experimental study of an earth to air heat exchanger (EAHE) for warm humid climatic conditions, *Geothermics*. 84 101741 1-13. Doi:<https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2019.101741>
- [9] Incropera, F.P., (2015). *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. New York.
- [10] Trombe A., Serres L. (1994). Air-earth exchanger study in real site experimentation and simulation, *Energy Build* 21(2) 155–162.
- [11] Mitchell J.W. (2020). *Fox and McDonald's introduction to fluid mechanics*. Editorial Wiley, Hoboken.
- [12] Cengel Y.A., Boles M.A. (2006). *Thermodynamics An Engineering*. Editorial McGraw-Hill, Boston. Doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.05.043>
- [13] Buck A.L., (1981). New equations for computing vapour pressure and enhancement factor. *Journal of Applied Meteorology* 20 (12), 1527–1532.
- [14] Hegazi A.A, Abdelrehim O., Khater A. (2021). Parametric optimization of earth-air heat exchangers (EAHEs) for central air conditioning, *International Journal of Refrigeration*. 129 278-289. Doi:<https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2021.05.009>
- [15] Kabeel A.E., Elmaaty T.A., El-Said, E.M.S. (2013). Economic analysis of a small-scale hybrid air HDH-SSF (humidification and dehumidification-water flashing evaporation) desalination plant, *Energy*. 53 306-311. Doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2013.02.042>
- [16] Chel A., Tiwari G.N. (2009). Performance evaluation and life cost analysis of earth to air heat exchange integrated with adobe building for New Delhi composite climate, *Energy and Buildings*. 41 56-66. Doi:<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2008.07.006>
- [17] Goswami D. Y. and Dhaliwal A. S., (2015). *Heat Transfer Analysis in Environmental Control Using an Underground Air Tunnel*. vol. 107.
- [18] Al-Ajmi, F., Loveday, D.L., Hanby, V.I. (2006). The cooling potential of earth-air heat exchangers for domestic buildings in a desert climate. *Build. Environ*. 41 (3), 235–244. Doi:<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2005.01.027>

- [19] Barakat, S., Ramzy, A., Hamed, A.M., El Emam, S.H. (2019). Augmentation of gas turbine performance using integrated EAHE and Fogging Inlet Air Cooling System. Energy.189, 116133. Doi:<https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.116133>