



# INSTITUTO TECNOLÓGICO SUPERIOR DE MISANTLA

---

## **INGENIERÍA ELECTROMECAÁNICA**

### **ANÁLISIS TÉRMICO DE UN INTERCAMBIADOR DE CALOR TIERRA- AIRE (EAHE)**

**Tesis**

**PARA OBTENER EL TÍTULO DE  
INGENIERO ELECTROMECAÁNICO**

QUE PRESENTA

**DANIEL GARCÍA PÉREZ**

ASESOR EXTERNO: DR. JESÚS PERFECTO  
XAMÁN VILLASEÑOR

ASESOR INTERNO: M.C. VLADIMIR ZAGOYA  
JUÁREZ

MISANTLA, VERACRUZ

Febrero, 2017



INSTITUTO TECNOLÓGICO SUPERIOR DE MISANTLA  
DIVISIÓN DE ESTUDIOS PROFESIONALES  
AUTORIZACIÓN DE IMPRESIÓN DE TRABAJO DE TITULACIÓN

FECHA: 09 de Febrero de 2017.

ASUNTO: AUTORIZACIÓN DE IMPRESIÓN DE TESIS PROFESIONAL.

A QUIEN CORRESPONDA:

Por medio de la presente hago constar que el (la) C:

DANIEL GARCÍA PÉREZ

pasante de la carrera de INGENIERÍA ELECTROMECAÁNICA con No. de Control 122T0168 ha cumplido satisfactoriamente con lo estipulado por el **Manual de Procedimientos para la Obtención del Título Profesional de Licenciatura** bajo la opción Titulación Integral (Tesis Profesional)

Por tal motivo se Autoriza la impresión del Tema titulado:

**"ANÁLISIS TÉRMICO DE UN INTERCAMBIADOR DE CALOR TIERRA-AIRE (EAHE)"**

Dándose un plazo no mayor de un mes de la expedición de la presente a la solicitud del Acto de Recepción para la obtención del Título Profesional.

ATENTAMENTE

ING. GERBACIO TLAXALO ESPINOZA  
DIVISIÓN DE ESTUDIOS PROFESIONALES

Archivo



# *Dedicatoria*

*A dios, por permitirme llegar al final de mi carrera.*

*A la memoria de mi madre Teresa Pérez González.*

*Al esfuerzo y educación de mi madre Martha y de mi padre Héctor.*

# *Agradecimientos*

*Quiero agradecer:*

*A Dios por haberme acompañado y guiado a lo largo de mi carrera, por ser mi fortaleza en momentos de debilidad.*

*A mi madre **Martha** y a mi padre **Héctor**, por su apoyo incondicional, por la educación que me han dado, por sus consejos que me han guiado con el paso de los años, por su cariño y su amor que me han hecho una persona de bien, que me han enseñado que la humildad y la perseverancia es la clave del éxito, y por qué a pesar de todo me han enseñado a ganarme la vida honradamente, muchas gracias.*

*A mis hermanos, **Héctor** y **Misael**, mis hermanas, **Martha Isabel** y **María del Carmen** por su apoyo, por estar siempre apoyando y más en los momentos difíciles, muchas gracias.*

*A mis tíos **Alfonso**, **Fidel**, **Francisco** y **Evodio** por sus mejores consejos y por su apoyo que me han brindado, gracias a mis cuatro tíos.*

*A mi tía **Carmen**, a mi tío **Jaime** y a mis primos **Jaime** y **Antonio** por el apoyo que me brindaron durante la carrera, y que siempre trataron de apoyarme de cualquier manera, muchas gracias.*

*A **Nancy Elizabeth**, a pesar del poco tiempo que ha estado a mi lado, me ha brindado su apoyo para finalizar la última etapa de mi carrera, muchas gracias.*

*A la **ing. María de los Ángeles Jiménez** por su amistad incondicional, por su apoyo durante la mayor parte de mi carrera, Muchas gracias.*

*Al **Dr. Jesús perfecto Xamán Villaseñor**, por haberme aceptado como su residente, por compartir su conocimiento conmigo, por sus sugerencias y comentarios, por su disponibilidad de tiempo, y por sus consejos que me han ayudado a decidir en cuestiones académicas, ha sido un honor trabajar con usted, muchas gracias Doctor.*

*Al **Dr. Jesús Arce**, por impartir su conocimiento y por el apoyo académico que me ha brindado, muchas gracias Doctor.*

*Al Dr. Irving Hernández , a la M.C. Yessenia Olazo, a la Dr. Elva Lilia Reynoso, al M.C. Javier Uriarte y al ing. Rogelio Vargas Quienes me brindaron su amistad incondicional y apoyo académico durante mi estancia en el CENIDET, muchas a gracias todos ustedes.*

*A mi asesor, M.C. Vladimir Zagoya Juárez, quien me brindo apoyo académico, por sus observaciones y sugerencias, muchas gracias M.C.*

*A mis profesores:*

*Ing. Rogelio Arroyo*

*Ing. Jorge Roa*

*Ing. Roberto Carlos Cabrera*

*Ing. Víctor Joel Loeza*

*Ing. Joel Maurilio Morales*

*Mc. Saúl Reyes*

*Ing. Mario Pérez*

*Ing. Ciro Alberto Ortega*

*Ing. Raúl Barrios*

*Por compartir su conocimiento.*

# ÍNDICE

<b>RESUMEN</b>	vi
<b>CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN</b>	1
1.1 Planteamiento del problema	2
1.2 Antecedentes	5
1.3 Objetivos	6
1.3.1 Objetivos generales	6
1.3.2 Objetivos específicos	6
1.4 Alcances	6
1.5 Estructura de tesis	7
<b>CAPÍTULO 2. MODELO FÍSICO Y MATEMÁTICO</b>	8
2.1 Definición del problema	9
2.2 Modelo físico	9
2.3 Modelo matemático	11
2.4 Metodología	12
<b>CAPÍTULO 3. RESULTADOS</b>	15
3.1 Clima cálido	16
3.2 Clima frío	23
3.3 Evaluación térmica	30

<b>CAPÍTULO 4. CONCLUSIONES</b>	34
4.1 Conclusiones del proyecto	35
4.2 Recomendaciones	36
<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	37
<b>LINKOGRAFIA</b>	38

## **RESUMEN**

El uso de Intercambiadores de Calor Tierra-Aire (*EAHE por sus siglas en inglés*) se ha llevado a cabo siglos atrás. Sin embargo, su importancia se ha reflejado en la actualidad, debido al alto consumo de energía por parte de sistemas activos para el confort térmico en edificaciones, ya que demandan generación de energía eléctrica a base de combustible fósiles. De esta manera EAHE está diseñado para reducir la demanda de energía mencionada, manteniendo el confort térmico dentro de las edificaciones.

Un EAHE, trabaja aprovechando la inercia térmica de la tierra, ocasionando que, para verano suministre aire a baja temperatura en comparación a la temperatura del medio ambiente, y para invierno, suministre aire a mayor temperatura que la de medio ambiente.

Se ha realizado un estudio numérico bidimensional de un EAHE, para determinar las temperaturas del fluido circundante, con base a la profundidad que se encuentre éste mismo y así determinar la profundidad óptima para un mejor desempeño del sistema. El estudio está enfocado al comportamiento térmico del tubo del sistema y la tierra, para ello se considera que la transferencia de calor se da por convección al interior del tubo, ya que el fluido (aire) está en movimiento, ya sea por convección natural o forzada, y en la tierra se da por conducción, ya que la tierra se considera un medio sólido.

El estudio se realizó bajo las condiciones climatológicas de la ciudad de Villahermosa, Tabasco para el día más caluroso y el día más frío del año 2005. El parámetro de estudio fue la profundidad del tubo del EAHE en la tierra.

Una vez realizado el estudio numérico, se obtuvieron resultados contrarios a los esperados. Sin embargo, estos fueron satisfactorios tanto para el clima frío como el clima cálido a profundidades a partir de 2.0 m. Se concluyó que para algunos horarios para el clima frío se recomienda instalar un sistema mecánico o eléctrico para obstrucción del paso del aire, ya que en estos mismos horarios se tienen pérdidas de calor. En el caso del clima cálido, se tiene efectos de enfriamiento a partir de una profundidad de 2.0 m.



# **CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN**

A continuación, se presenta la introducción en dos partes, en la primera parte se expone el planteamiento del problema. En ella se comenta el problema a solucionar, así como sus posibles alternativas de solución. Posteriormente se presenta la revisión bibliográfica, en la que se revisa de los avances que se han logrado del sistema EAHE, las recomendaciones y los resultados de algunos autores. Cabe señalar, que esta última parte es muy importante, ya que éste es un proyecto de investigación, en el cual se busca optimizar este sistema, tomando referencia las investigaciones y resultados obtenidos de otros autores y con ello proponer mejoras u otro análisis del mismo.

### **1.1 Planteamiento del problema**

Actualmente el cambio climático y sus consecuencias, en algunos casos desastrosas ha sido más notable con el paso del tiempo, desde el desecho que genera el hombre, hasta el derrame de petróleo en los océanos, este último se ha generado por la ambición de las empresas y como consecuencia de la demanda de los servicios del hombre que genera una cierta calidad de vida, en las cuales se tiene, transporte, productos derivados (plásticos, combustibles) o no derivados (para su proceso) del petróleo.

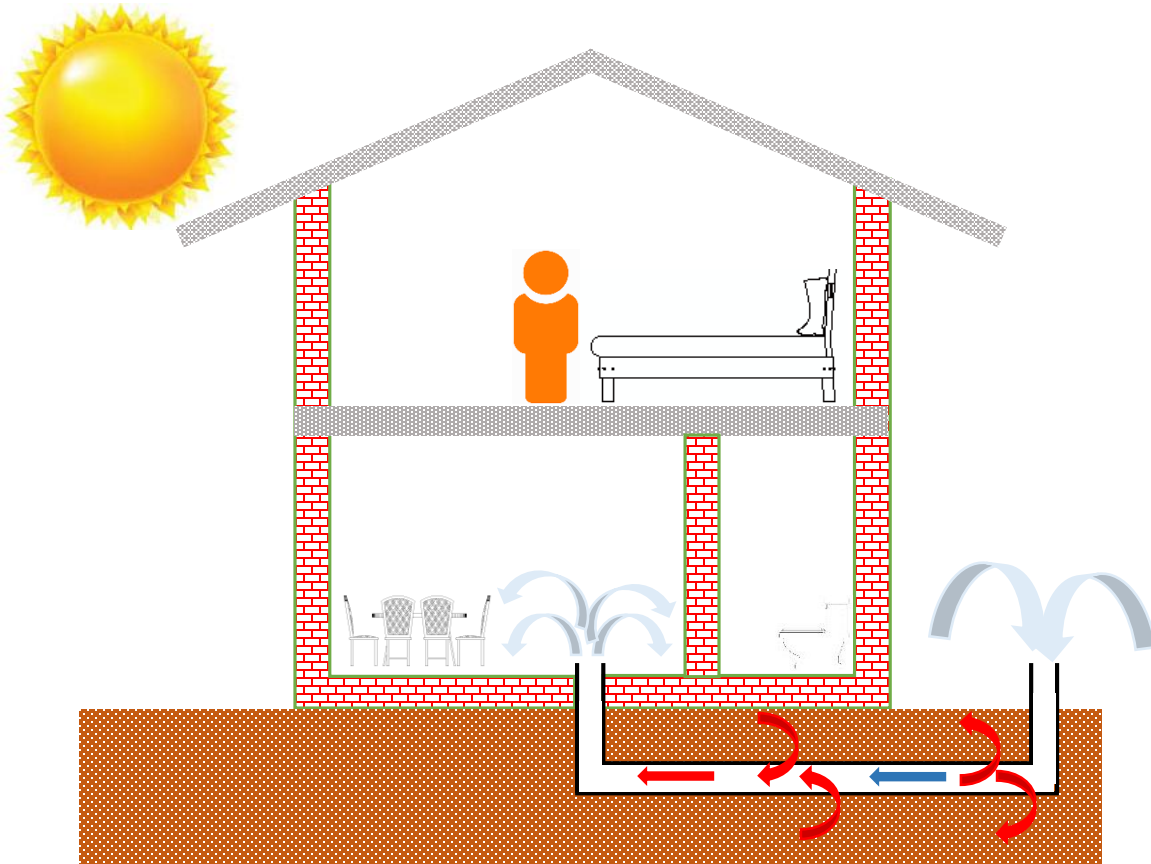
El cambio climático se ha vuelto un problema a nivel mundial por lo que es un enorme desafío contrarrestarlo debido al interés de cada país a nivel social, político o económico. Las consecuencias del cambio climático han ocasionado la necesidad de estar preparados ante cualquier tipo de desastres o catástrofes naturales (M. Sánchez et al., 2013).

La contaminación del aire por quema de combustibles ha generado que el efecto invernadero se incremente. Las desglaciaciones han aumentado drásticamente en los últimos años. La mayor parte de la contaminación se ha dado con el consumo de combustibles fósiles que se elevó exponencialmente, a tal grado que se advierte que, si el consumo sigue así, en pocos años los efectos serán irreversibles y también en pocos años se podrían acabar estos recursos. Cabe señalar que dentro del consumo de éstos mismos, está el uso de la energía necesaria para el confort térmico en edificaciones. Debido a que esto implica el consumo de combustibles fósiles, desde la fabricación de los equipos hasta el funcionamiento del mismo.

Con el paso de los años han surgido alternativas para el ahorro del consumo de energía eléctrica y combustibles fósiles. Para el ahorro de energía en las edificaciones existen las

cubiertas reflectivas, ventanas dobles, chimeneas solares, Intercambiadores de Calor Tierra-Aire (EAHE por sus siglas en ingles), entre otros.

Una alternativa específica para el confort térmico en edificaciones como se ve en la figura 1.1, es usar EAHE para el suministro de aire al interior de una edificación a temperatura baja con respecto al medio ambiente en temporada de calor y alta temperatura con respecto con al medio ambiente para la temporada de invierno. Ésta es una buena alternativa para el ahorro de energía pues en el caso de un EAHE sólo trabaja bajo la transferencia de calor por convección por lo que el aire dado a este fenómeno, se mueve dentro del tubo hacia la edificación Ramírez-Dávila et al. (2014).



**Figura 1. 1 Confort térmico en edificaciones.**

El EAHE es un sistema térmico pasivo el que cuenta con un sistema de tuberías para el caso de un arreglo de múltiples tubos (Figura 1.2 y 1.3) o en caso más sencillo de un solo tubo, el cual se encuentra enterrado a cierta distancia de profundidad con respecto a la superficie del suelo, la entrada del sistema se encuentra fuera de la edificación, es decir al aire libre, y la salida dentro de la edificación, por lo que el aire entra al sistema a temperatura

ambiente y dentro del tubo se presenta la transferencia de calor por convección, debido a que la tierra tiene cierta inercia térmica que ocasiona que en verano sea fría y en invierno sea caliente a determinadas profundidades, Ramírez-Dávila et al. (2013).

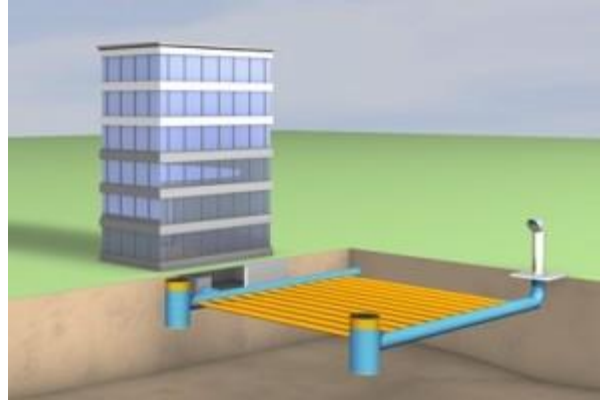


Figura 1. 2 EAHE de múltiples tubos [2].

Dado al fenómeno de la inercia térmica, se debe tomar en cuenta los factores que puede influenciar su comportamiento, como lo es la humedad, la profundidad, el tipo de suelo y el clima de la zona donde se realice el estudio o se implemente este sistema. Estudios recientes realizados por Xamán et al. Sobre el tema, han demostrado que en tres ciudades de México (Cd. de Mérida, Cd. México y Cd. Juárez) el EAHE a pesar de sus favorables resultados han tenido diferentes comportamientos térmicos, con base al horario, Xamán et al. (2015).

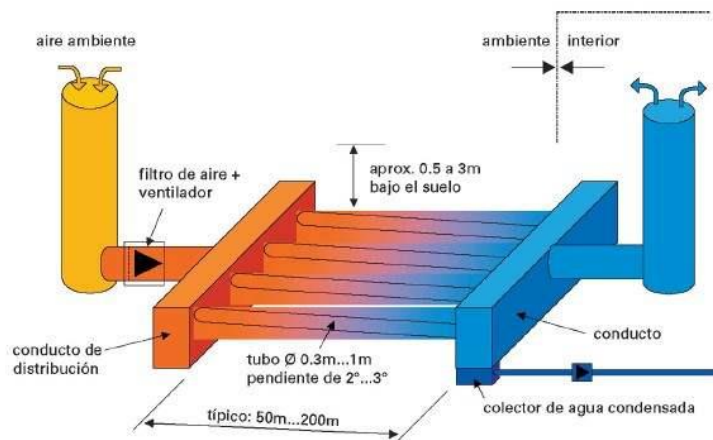


Figura 1. 3 Conexión de tubos para un EAHE [4].

Por lo tanto, se realiza un estudio numérico bidimensional de un EAHE para determinar las temperaturas del fluido circundante en el EAHE. Esto con el objetivo de determinar a qué profundidad se obtiene un mejor comportamiento térmico del EAHE. Se considera para el estudio el tipo de tierra y condiciones climáticas de diferentes estados representativos de México. A continuación, se presenta una breve revisión de la literatura acerca del tema.

## **1.2 Antecedentes**

En esta sección se presenta los trabajos realizados por otros autores, esto con la finalidad para entender más sobre el tema, como han desarrollado sus trabajos, que avances han logrado, sus resultados, observaciones y sugerencias para futuros trabajos.

Xamán et al. (2014 a) realizaron el estudio numérico de un (EAHE) para tres climas de México (ciudad de México, Cd. Juárez y Mérida), el estudio lo realizaron teóricamente. Para la modelación matemática se consideraron diferentes números de Reynolds,  $Re=100$ , 500, 1000, 1500 y que el espesor del tubo no tiene influencia térmica. Los resultados mostraron que el perfil de temperatura en la salida del tubo para el mes de enero aumenta conforme aumenta el número de Reynolds, esto contradice los resultados obtenidos por Mihalakakou et al. (1994). Esto debido a que mayor velocidad el flujo reduce el contacto con el tubo disminuye la cantidad de transferencia de calor con el suelo. Se concluyó que es importante aumentar  $Re$ . Por último, en temporada calurosa un incremento del 26 % en la radiación solar sobre la superficie incrementa la temperatura del EAHE ( $T_{out}$ ) en 13.98%.

Xamán et al. (2014 b) evaluaron numéricamente el comportamiento térmico del uso de aislante térmico en el tubo de salida de un intercambiador de calor Tierra-Aire. El estudio determino el comportamiento de un EAHE cuando cuenta con el aislamiento. Se usó el poliestireno como material aislante para diferentes espesores y se consideró la transferencia de calor a través del tubo por convección y por conducción en la tierra. Los resultados mostraron que para un  $Re=1500$ , un aislante de espesor de 0.025m no proporciona mejora significativa, para un de espesor de 0.05m hubo una mejora significativa y para espesor de 0.075m contra el de 0.05m no hubo mucha diferencia. En particular para el clima de la ciudad de México (templado) en temporada de invierno con el aislante de espesor de 0.5m

(Temperatura de salida de EAHE) alcanzó hasta 5.7 °C arriba de la (Temperatura de entrada) del EAHE mientras que en la temporada de calor que sólo disminuyó la temperatura hasta 1.3 °C contra el caso sin aislante. Para el clima de Mérida (cálido) en temporada de invierno  $T_{out}$  alcanzó hasta 5.8 °C arriba de  $T_{inlet}$  y para temporada de calor  $T_{out}$  alcanzó a disminuir hasta 4.3 contra  $T_{inlet}$ . Para el clima de ciudad Juárez (extremoso) en temporada de invierno  $T_{out}$  alcanzó hasta 2.8 °C con respecto al caso sin aislante y para temporada de calor  $T_{out}$  sólo en el mes de mayo alcanzó hasta 1.1 °C debajo con respecto al caso sin aislante. Se concluyó que no es necesario el uso de espesores mayores de 0.05m para el aislante debido a que no hay mucha mejora y en Cd. Juárez no hay mejora por escasas de humedad.

### **1.3 Objetivos**

#### **1.3.1 Objetivos generales**

Realizar un análisis térmico de un intercambiador de calor Tierra- Aire mediante un estudio numérico para determinar la profundidad adecuada para el desempeño óptimo del mismo para el ahorro de energía en edificaciones enfocado al confort térmico.

#### **1.3.2 Objetivos específicos**

1. Realizar el análisis dimensional del modelo físico.
2. Determinar las ecuaciones gobernantes (modelo matemático) del fenómeno físico.
3. Compilación de códigos computacionales para el análisis térmico de un intercambiador de calor tierra-aire.
4. Realizar gráficos de resultados obtenidos del problema de un intercambiador de calor tierra-aire para un clima de México.
5. Obtener correlaciones para la temperatura y velocidad de salida del intercambiador de calor.
6. Desarrollar ejercicios de programación en lenguaje C.

### **1.4 Alcances**

Se estudiara y se analizara un algoritmo en fortran y se utilizara el Tecplot para visualizar las líneas isotérmicas al interior del EAHE, se obtendrán datos para validar con un EAHE experimental construido y aplicado para la ciudad de Villahermosa, Tabasco.

## **1.5 Estructura de tesis**

En el capítulo 2 se presenta el modelo físico y matemático del estudio que se ha realizado del EAHE, para ello se presentan las consideraciones correspondientes para el modelo físico, el cual es muy importante para plantear el modelo matemático adecuadamente. Además se presenta los datos meteorológicos de la ciudad de Villahermosa, Tabasco, también se presenta los datos para ejecutar el código numérico correspondiente a cada profundidad.

En el capítulo 3 se presenta loa resultados obtenidos de los códigos numéricos para el EAHE, por lo que se presentan los resultados obtenidos de manera general, y para el día más caluroso y el día más frío representativos del año para la ciudad de Villahermosa, Tabasco, además se presenta la evaluación térmica a partir de los resultados obtenidos.

En el capítulo 4 se presenta las conclusiones y recomendaciones para futuros trabajos.

# **CAPÍTULO 2. MODELO FÍSICO Y MATEMÁTICO**



## 2.1 Definición del problema

Se realizará un estudio numérico bidimensional de un EAHE para determinar las temperaturas del fluido circundante en el EAHE, esto con el objetivo de determinar a qué profundidad se obtiene un mejor comportamiento térmico del EAHE. Se considera para el estudio el tipo de tierra y condiciones climáticas de Villahermosa, Tabasco.

Un EAHE puede ser de dos tipos, sistema pasivo o sistema activo, los dos tipos de sistemas trabajan bajo el mismo principio, el cual es el aprovechamiento de la inercia térmica de la tierra, es decir, durante el verano a cierta profundidad la temperatura es menor que la del medio ambiente y durante invierno la temperatura es mayor con respecto a este mismo. Ésta puede ser vista como una fuente o sumidero de calor según sea el caso (Ramírez-Dávila et al, 2014). Un sistema pasivo trabaja bajo convección natural dado que por diferencia de densidades en el aire en diferentes partes del EAHE se genera un movimiento de éste mismo, mientras que el sistema activo, cuenta con un ventilador que empuja el aire hacia el EAHE por el mecanismo de convección forzada (Figura 2.1).

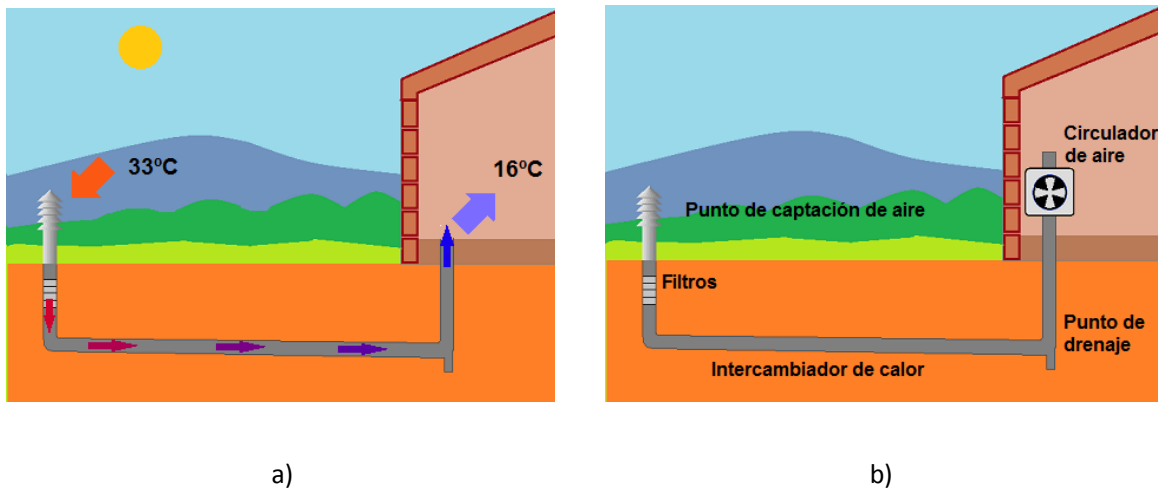


Figura 2. 1 EAHE, a) Pasivo<sup>[1]</sup> y b) Activo<sup>[3]</sup>.

## 2.2 Modelo físico

En la figura 2.2 se muestra el modelo físico el cual tiene las siguientes consideraciones:

1. La transferencia de calor se presenta en dos dimensiones.
2. Se considera pérdidas de calor por radiación y convección en la superficie del suelo.

3. Se considera evaporación de agua en la superficie del suelo.
4. La influencia térmica del tubo es despreciada debido al espesor de este mismo.
5. La evaporación y condensación dentro del tubo son despreciables.
6. Las propiedades termofísicas son constantes.
7. El mecanismo de transferencia de calor dominante es convección natural.
8. El aire es en régimen de flujo laminar.

En la Tabla 2.1 se muestra las dimensiones de manera general consideradas para las simulaciones del EAHE, y en la Tabla 2.2 se muestra las dimensiones específicas para cada configuración (variación de profundidad del tubo).

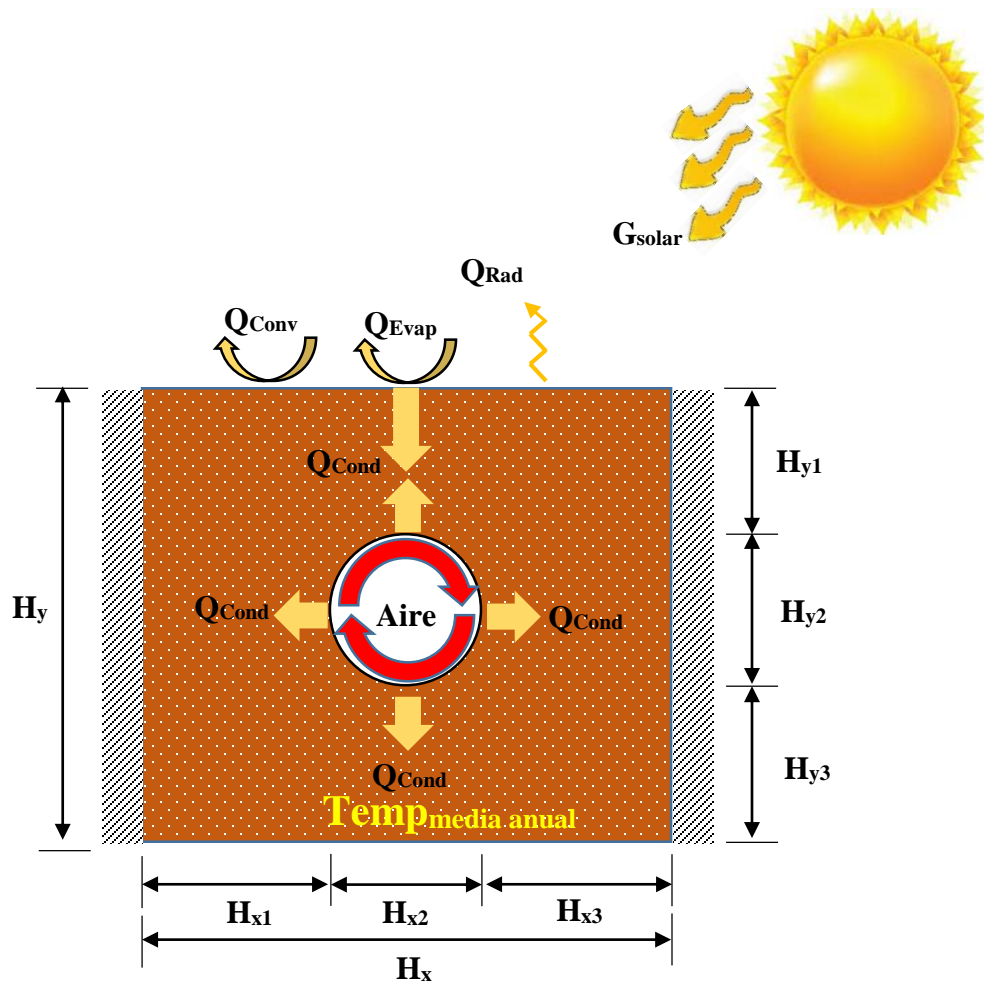


Figura 2. 2 Modelo físico del EAHE (seccion transversal).

**Tabla 2. 1 Malla no uniforme del EAHE (Ramírez-Dávila, 2014).**

<i>Sección</i>	<i>Longitud (m)</i>
<i>Distancia de la superficie del suelo al tubo</i>	$H_{y1}=0.425-4.425$
<i>Distancia del tubo al fondo</i>	$H_{y3}=4.425-0.425$
<i>Distancia entre la pared aislada y el tubo</i>	$H_{x1}=H_{x3}=0.5$
<i>Diámetro del tubo</i>	$H_{x2}=H_{y2}=0.15$

La profundidad se varió desde 0.5 m hasta 4.5 m con incremento de 0.5m. Para tener una mayor aproximación en los resultados se determinaron el número de nodos específicos para la malla del sistema, en la Tabla 3.2 se muestra el número de nodos considerados para cada profundidad para la simulación numérica, dichos valores se consideraron con base a resultados obtenidos por Rodríguez-Vázquez et al (2017).

**Tabla 2. 2 Datos de para cada configuración para la simulaciones.**

<i>No. De configuración</i>	<i>Longitud de <math>H_{y1}</math> (m)</i>	<i>Longitud de <math>H_{y3}</math> (m)</i>	<i>Numero de nodos <math>N_{y1}</math></i>	<i>Numero de nodos <math>N_{y3}</math></i>
1	0.425	4.425	21	81
2	0.925	3.925	21	81
3	1.425	3.425	21	81
4	1.925	2.925	51	51
5	2.425	2.425	51	51
6	2.925	1.925	51	51
7	3.425	1.425	81	21
8	3.925	0.925	81	21
9	4.425	0.425	81	21

### 2.3 Modelo matemático

Para el modelo matemático se debe considerar que el suelo es un medio sólido en el cual la transferencia de calor se da por conducción, dentro del tubo la transferencia de calor es por convección en régimen de flujo laminar, el intercambio de calor entre las paredes del tubo y la tierra. Por lo que el fenómeno esta descrito por las ecuaciones de conservación de masa, momentum y energía en dos dimensiones, Ecuaciones (2.1) a (2.2).

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} = 0 \quad (2.1)$$

$$\frac{\partial(\rho u.u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v.v)}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu \frac{\partial u}{\partial y} \right) - \frac{\partial P}{\partial x} \quad (2.2)$$

$$\frac{\partial(\rho u.u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v.v)}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu \frac{\partial u}{\partial y} \right) - \frac{\partial P}{\partial x} \quad (2.3)$$

$$\frac{\partial(\rho u T)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v T)}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\lambda}{c_p} \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{\lambda}{c_p} \frac{\partial T}{\partial y} \right) \quad (2.4)$$

Las consideraciones de frontera del sistema son las siguientes:

Para las fronteras Este y Oeste, se imponen condiciones de simetría:

$$\frac{\partial T}{\partial x} = 0 \quad \text{en} \quad x = 0 \quad \text{para} \quad 0 \leq y \leq Hy$$

$$\frac{\partial T}{\partial x} = 0 \quad \text{en} \quad x = Nx \quad \text{para} \quad 0 \leq y \leq Hy$$

Para la frontera Norte se debe considerar todas pérdidas y ganancias, como se muestra en el modelo físico, por lo que se debe aplicar un balance de energía implementada por Rodríguez-Vázquez et al. (2017):

$$-q_{cond} = -q_{conv}(CE) + q_{rad}(LR) - \alpha G(SR) + q_{evap}(LE) \quad (2.5)$$

Para la frontera Sur, con base a resultados obtenidos por otros autores como Brum et al. (2015) y Rodríguez-Vázquez et al (2017), se considera que la temperatura es igual a la temperatura ambiente promedio anual a partir de 4 m de profundidad.

## 2.4 Metodología

El estudio numérico se realizó con la finalidad de obtener el comportamiento de un EHAE a diferentes profundidades y determinar la altura más óptima para ambos climas (cálido y frío) para la ciudad de Villahermosa, Tabasco. En la Figura 2.3 se observa la malla, no es uniforme.

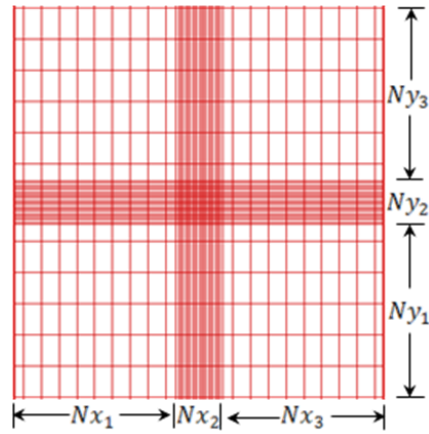


Figura 2. 3 Malla no uniforme del EAHE (Ramírez-Dávila, 2014).

Para el estudio del EAHE se consideró el día más caluroso y el día más frío del año, por lo que en la Tabla 2.3 se muestra los datos climatológicos de ambos días, los cuales son, la temperatura ambiente, la velocidad del viento, la humedad del ambiente y la irradiación, considerando para las 24 horas del día.

**Tabla 2. 3 Datos climatológicos para el día más cálido y el día más frío de la ciudad de Villahermosa, Tabasco (2005).**

Tiempo (hora)	Día más cálido (15 de febrero)				Día más frío (28 de mayo)			
	Irradiación (W/m <sup>2</sup> )	Temperatura ambiente (°C)	Velocidad Del viento	RH (%)	Irradiación (W/m <sup>2</sup> )	temperatura ambiente (°C)	Velocidad del viento	RH (%)
01:00	0	30.1	2.4	77	0	16.2	7.7	89
02:00	0	29.5	1.9	81	0	16.1	7.9	92
03:00	0	29.1	1.6	82	0	16.1	7.9	89
04:00	0	28.8	1.3	81	0	16	7.9	88
05:00	0	28.6	1.3	87	0	15.9	5.4	91
06:00	1	28.6	2.4	86	0	15.9	5.1	93
07:00	117	29.6	3.4	83	1	15.9	5.6	91
8:00	311	31.1	2.4	76	123	17.1	6.5	89
9:00	494	32.6	2.4	71	338	18.8	8.1	84
10:00	625	33.9	2.4	64	561	20.8	8.7	75
11:00	744	35.2	3.2	61	735	22.6	10.3	65
12:00	807	36.2	2.9	60	817	24.1	9.3	59
13:00	857	37.1	2.2	55	835	25.2	9	58
14:00	873	37.8	1.9	53	795	25.9	8.4	56
15:00	748	38.2	2.6	55	682	26.2	9.3	54
16:00	562	38.2	2.2	55	520	26.1	11.3	56
17:00	328	37.6	2.4	57	314	25.4	9.8	61
18:00	146	36.7	1.4	61	108	24.2	8.7	65
19:00	4	35.7	0.7	63	0	23	8.3	75
20:00	0	34.6	0.3	69	0	22.6	8.7	83
21:00	0	33.6	0.1	73	0	22.2	8.1	87
22:00	0	32.5	0.1	76	0	21.9	6.8	86
23:00	0	31.5	0.1	76	0	21.5	5.6	92
24:00	0	30.4	0.3	78	0	21.1	5.6	96

El código numérico que se ha utilizado fue proporcionado por el Dr. Jesús Perfecto Xamán Villaseñor del Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (CENIDET), por lo que para poder trabajar sobre este proyecto se llevó a cabo un curso de métodos numéricos para solución de ecuaciones diferenciales parciales, curso de transferencia de calor por convección y un curso de programación en compilador fortran y lenguaje C. Para la solución de las Ecuaciones de (2.1) a (2.4) se usó la técnica del método de volúmenes finitos (MVF).

## **CAPÍTULO 3. RESULTADOS**

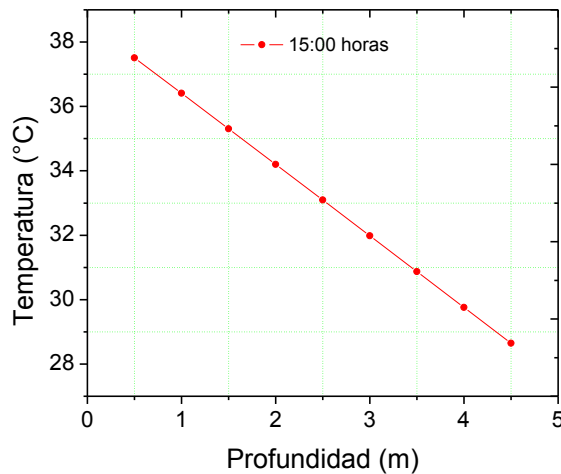
De la Tabla 2.3 se analizó la hora más cálida para el día cálido y la hora más fría para el día frío, esto para observar el comportamiento bajo condiciones climatológicas extremas, por lo que en la Tabla 3.1 se muestra los datos de las horas específicas junto con los datos meteorológicos y también se realizó un análisis en forma general, con ello se logra observar los diferentes comportamientos del EAHE a diferentes profundidades.

**Tabla 3. 1 Datos climatológicos específicos para la hora más cálida y la hora más fría de los climas, cálido y frío, respectivamente.**

<i>Villahermosa, Tabasco</i>					
<i>Día/Mes</i>	<i>Hora</i>	<i>G (W/m<sup>2</sup>)</i>	<i>T (°C)</i>	<i>RH (%)</i>	<i>velocidad del viento (m/s)</i>
28/5	15:00	748.00	38.2	55.00	2.6
15/2	05:00	00.00	15.9	91.00	5.4

### 3.1 Clima cálido

En la Figura 3.1 se muestra para la hora más cálida del día cálido el comportamiento de la temperatura del aire al interior del EAHE, como se puede observar la temperatura del aire disminuye conforme se aumenta la profundidad del tubo, el decremento de la temperatura es manera lineal, por lo que la temperatura desciende aproximadamente 1.38 °C por cada 0.5 m de incremento de profundidad logrando disminuir de 37.50 °C para una profundidad de 0.5 m hasta 28.64 °C para una profundidad de 4.5 m. Por lo que para la hora más cálida del año se comporta de manera satisfactoria, ya que logra disminuir la temperatura del aire.



**Figura 3. 1 Temperatura del aire dentro del EAHE para diferentes profundidades a las 15:00 horas del día cálido.**

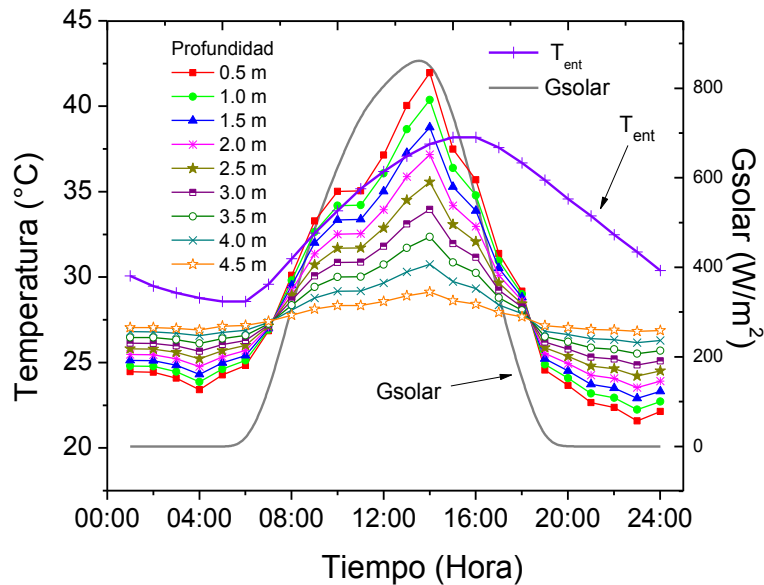


En la Figura 3.2 se presenta de manera general el comportamiento del EAHE. Se observa que a ciertas horas del día desde 0.5 hasta 1.5 m de profundidad, la temperatura del aire dentro del EAHE es mayor que la del medio ambiente, Esto se debe a que en esas mismas horas se tienen valores de irradiación y temperatura muy altos lo que afecta el efecto de la inercia térmica de la tierra. Entre 7:00 y 8:00 horas del día se puede observar que se cruzan las líneas que representan el comportamiento de las temperaturas en cada profundidad, esto se debe a que antes de las 7:00 horas el comportamiento del EAHE se ve afectado solo por la temperatura, ya que no se tiene irradiación por lo que la temperatura del aire al interior del EAHE tiende a aumentar cuando se aumenta la profundidad. Después de las 8:00 horas, debido a que hay un incremento drástico de irradiación y la temperatura ambiente comienza a aumentar gradualmente, hace que la temperatura del aire dentro del EAHE aumente drásticamente, por lo que a partir de las 8:00 hasta 18:30 horas el comportamiento del EAHE cambia. Finalmente la temperatura del aire tiende a disminuir en función de la profundidad dentro de este mismo intervalo. Entre las 09:00 y 11:00 horas del día, para una profundidad de 0.5 m el EAHE tuvo una ganancia de calor, por lo que la temperatura del aire aumentó entre 0.70 y 1.13 °C; para la misma profundidad entre 11:00 y 15:00 horas la temperatura fue de 0.95 hasta 4.18 °C mayor que la del medio ambiente. De la misma manera, a una profundidad de 1.0 m de 9:00 a 10:00 horas del día se tuvo ganancia de calor, ya que el aire dentro del EAHE aumentó entre 0.06 y 0.30 °C con respecto a la temperatura del medio ambiente y entre las 12:00 y aproximadamente 15:30 horas del día, se aumentó la temperatura del aire dentro del EAHE entre 1.57 y 2.58 °C respecto a la del medio ambiente. A una profundidad de 1.5 m entre 13:00 y 14:15 horas del día la temperatura fue mayor que la del medio ambiente entre 0.19 y 0.98 °C, por lo que se observa que debido a una irradiación y temperaturas, ambas muy altas afectan el comportamiento del EAHE de manera negativa para una profundidad de hasta 1.5 m.

Después de las 18:30 horas el EAHE vuelve a estar solo afectado por la temperatura del medio ambiente, ya que a las 19:00 horas la irradiación es de solo 4.00 W/m<sup>2</sup> y la temperatura vuelve a ser baja con respecto a la temperatura que se tienen entre 8:00 y 18:30 horas y la temperatura del aire al interior tienden a aumentar a medida que se aumenta la profundidad del tubo del EAHE.

La curva del comportamiento del EAHE a cualquier profundidad tiende a seguir el mismo comportamiento que el de irradiación. Por ello que en las horas mencionadas con cambios drásticos de irradiación, aumenta drásticamente la temperatura dentro de este intervalo (de 8:00 a 18:30 horas del día) y se tiene temperaturas mayores que la de los otros dos intervalos (de 00:00 a 8:00 y de 18:30 a 24:00 horas del día).

A partir de una profundidad de 2.0 m, el EAHE comienza a tener un mejor comportamiento debido a que comienza a disminuir la temperatura del aire dentro del EAHE para cualquier hora del día, ya que el mínimo decremento de temperatura es de  $0.61\text{ }^{\circ}\text{C}$ . A las 14:00 horas, la temperatura del aire al interior del EAHE a una profundidad de 4.5 m se encuentra entre  $26.84$  y  $29.15\text{ }^{\circ}\text{C}$ , la variación es de  $2.30\text{ }^{\circ}\text{C}$  por lo que tiende a ser constante conforme se aumente la profundidad y finalmente, a una profundidad de 0.5 m, el intervalo de temperatura del aire al interior del EAHE es entre  $21.61$  y  $41.98\text{ }^{\circ}\text{C}$ , como consecuencia la variación de temperatura es de  $20.36\text{ }^{\circ}\text{C}$ .



**Figura 3. 2 Comportamiento del EAHE en el día cálido para todas las profundidades.**

En la figura 3.3 se muestra el comportamiento de la entalpía, como se podrá observar gran parte de la energía que se tiene en el aire es cedida mediante el tubo del EAHE a partir de los 2.0 m de profundidad con respecto a la superficie del suelo. Se puede observar que

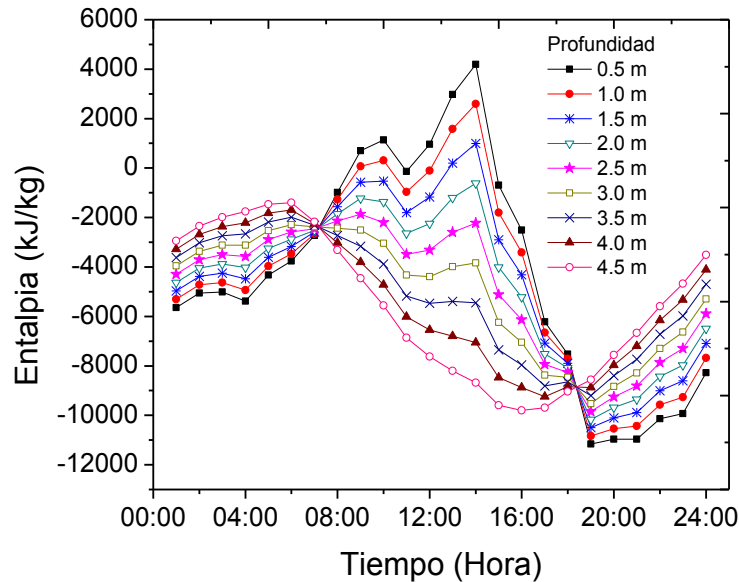
para una profundidad de 0.5 hasta 1.5 m, entre las 10:00 y 15:00 horas se tiene ganancia de calor, lo que para fines de enfriamiento no es bueno.

En particular, para una profundidad de 0.5 m, la ganancia de energía se presenta en un horario de 9:00 a 10:30 horas y de 11:30 a 15:00 horas aproximadamente, en este último se tuvo la mayor ganancia de energía de 704.86 a 1136.29 kJ/kg y 961.99 a 4198.77 kJ/kg, respectivamente. Por lo que se genera un aumento de temperatura en estas mismas horas. Para una profundidad de 1.0 m la ganancia de calor se presentó alrededor de las 9:00 a 10:00 horas y aproximadamente de 13:00 a 15:00 horas, lo que generó una entalpía de 64.20 a 304.48 kJ/kg y 1585.52 a 2597.95 kJ/kg, respectivamente. Para 1.5 m de profundidad, el horario en que se tuvo ganancia de calor fue alrededor de 13:00 a 14:00 horas de 194.55 a 993.85 kJ/kg.

Para las 11:00 horas se observa que hubo un decremento de entalpía de manera drástica. Ésto se debe a la velocidad del aire, ya que a esta misma hora la velocidad aumenta de 2.4 a 3.2 m/s, por lo que genera que el aire interactúe con el EAHE menos tiempo causando menos ganancia de energía. Para este caso se tuvo pérdida de energía de 134.02 kJ/kg, por lo tanto, que a esta hora la temperatura del aire al interior del EAHE es menor (0.14 °C) que la del medio ambiente a una profundidad de 0.5 m.

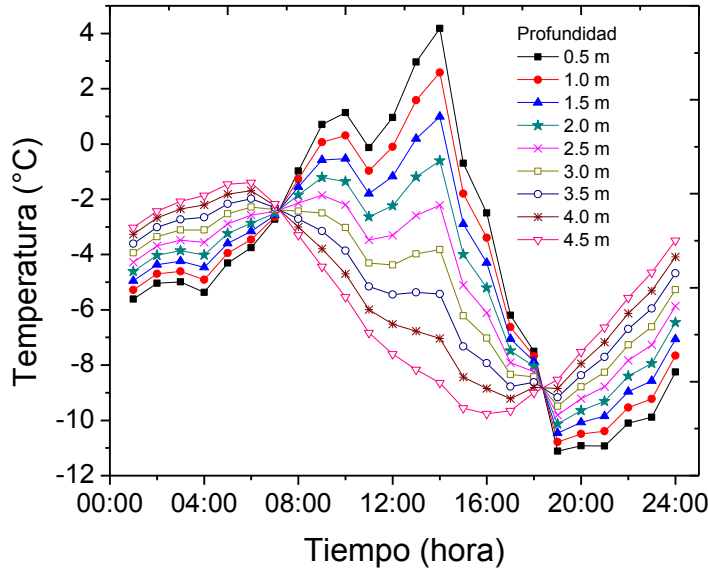
En el horario de 00:00 a 7:00 horas y 18:00 a 24:00 horas, la entalpía tiende a aumentar conforme se aumenta la profundidad del EAHE, para una profundidad de 0.5 a 1.5 m en comparación a los horarios donde se tiene ganancia de energía, se tiene pérdida de energía debido a que de 00:00 a 7:00 horas 18:00 a 24:00 horas la irradiación es de cero, por lo que la temperatura de la tierra es menor que la del medio ambiente causando que el aire ceda energía al interior del EAHE. Sin embargo, al aumentar la profundidad, la pérdida de energía es menor ya que la inercia térmica de la tierra aumenta. De 7:00 a 18:00 se tiene ganancia de calor dentro del EAHE debido a la irradiación que se tiene en este mismo horario. Sin embargo, a partir de 2.0 m, se comienza a tener el efecto de la inercia térmica de la tierra causando que se tenga pérdida de energía en el aire dentro del EAHE. Se observa que para una profundidad de 4.5 m se tiene una pérdida de energía de 9593.28 kJ/kg para la hora más cálida.

La mayor pérdida de energía se tuvo a una profundidad de 0.5 m a las 19:00 horas, ya que a esa hora se tiene una temperatura de 35.7 °C, una velocidad de 0.7 m/s y una irradiación de 4 W/m<sup>2</sup>, esto causa que la temperatura de la tierra a 0.5 m de profundidad sea menor que la del medio ambiente, ocasionando que el aire ceda parte de su energía.



**Figura 3. 3 Entalpía dentro del EAHE en el día cálido para todas las profundidades.**

En la Figura 3.4 se muestra la diferencia de temperatura para la hora más cálida, se puede observar que para una profundidad de 0.5 a 1.0 m, la diferencia es positiva, esto quiere decir que el EAHE tiene ganancia de calor, por lo que la temperatura dentro del EAHE es mayor que la del medio ambiente para un horario de 9:00 a 14:00. Para una profundidad de 2.0 m se comienza a tener diferencias negativas por lo que existe pérdida de calor por parte del aire al interior del EAHE. Se observa que para una profundidad de 4.5 m se logra tener una diferencia de temperatura de 8.44 °C para las 15:00 horas. Para el horario de 00:00 a 7:00 horas la diferencia de temperatura tiende a ser cero, ya que conforme se aumenta la profundidad del tubo disminuye la diferencia de temperatura esto indica que tiende a ser igual a la temperatura del medio ambiente para ese horario igual para el horario de 18:00 a 24:00 horas.



**Figura 3. 4 Diferencia de temperaturas entre la temperatura ambiente y la temperatura del aire al interior del EAHE para el día más cálido.**

En la Figura 3.5 y 3.6 se muestra las velocidades promedio del aire dentro del EAHE y el número de Reynolds respectivamente. Se observa ambos son similares cualitativamente, y que de 8:00 a 18:00 horas la velocidad disminuye drásticamente debido a las diferencias de temperatura, ya que al disminuir la temperatura del fluido su densidad aumenta ocasionando que la velocidad disminuya. Para la hora más calurosa, en la Figura 3.7 y 3.8 se observa el comportamiento de la velocidad del aire y el número de Reynolds respectivamente en función de la profundidad del EAHE.

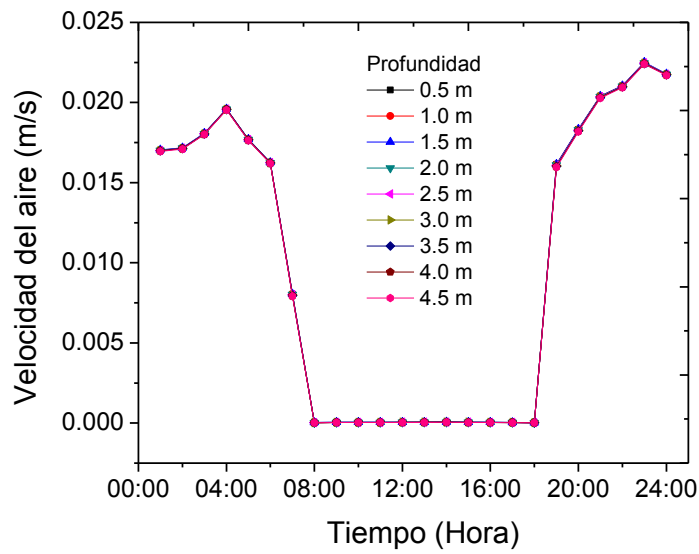


Figura 3. 5 Velocidad del aire promedio dentro del EAHE en día calido para todas las profundidades.

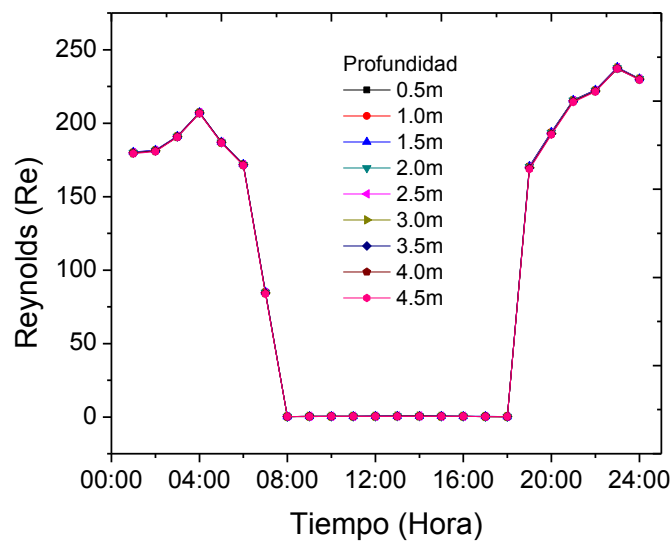


Figura 3. 6 Número de Reynolds para el día cálido en todas las profundidades.

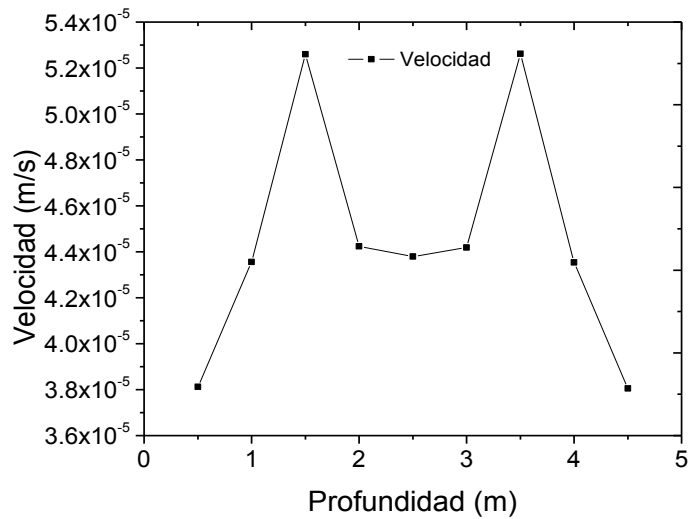


Figura 3. 7 Velocidad del aire promedio a las 15:00 horas del día cálido.

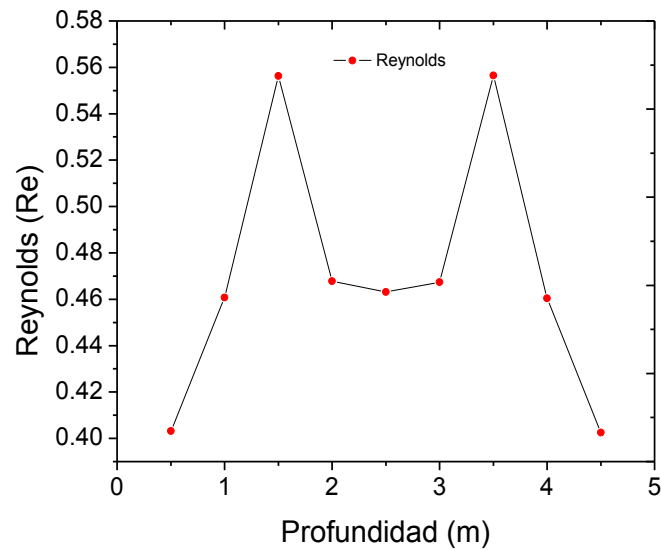
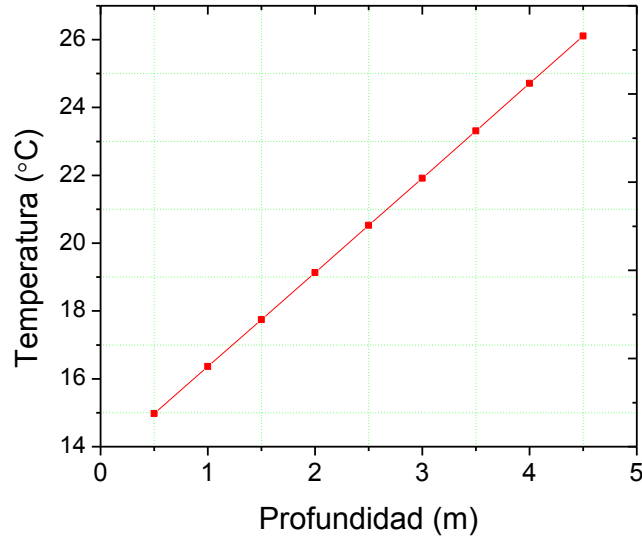


Figura 3. 8 Número de Reynolds a las 15:00 horas del día cálido.

### 3.2 Clima frío

Para el caso de la temporada de invierno se puede observar el comportamiento del EAHE en la Figura 3.9, para el horario de 05:00 horas del día la temperatura del aire al interior del EAHE tiende a aumentar en función de la profundidad, es decir a mayor profundidad aumenta la temperatura, al igual que para en el caso de la temporada calurosa se

comporta de manera lineal por lo que la temperatura aumenta aproximadamente  $1.38\text{ }^{\circ}\text{C}$  por cada  $0.5\text{ m}$  de profundidad del EAHE con respecto de la superficie del suelo.



**Figura 3. 9** Temperatura del aire dentro del EAHE para diferentes profundidades a las 5:00 horas del día frío.

En la Figura 3.10 se muestra el comportamiento del EAHE durante las 24 horas del día frío para diferentes profundidades, se observa que para una profundidad de  $0.5\text{ m}$  en un horario de  $00:00$  a  $7:30$  horas aproximadamente el EAHE se comportó de manera no deseada ya que el aire al interior del EAHE se presentó una temperatura más baja que la del medio ambiente, al igual que el horario de  $14:30$  a  $24:00$  horas. A diferencia del comportamiento en clima cálido, se tiene más lapsos en los que a pesar de que aumenta la temperatura, sigue siendo inferior a la del medio. Ésto se da en el horario de  $14:30$  a  $24:00$  horas a una profundidad de  $0.5$  a  $1.0\text{ m}$ . A una profundidad de  $1.5\text{ m}$  en un horario aproximadamente de  $4:30$  a  $24:00$  horas la temperatura del aire al interior del EAHE es inferior a la del medio ambiente pero mayor en comparación con la temperatura que se tiene a una profundidad de  $0.5$  a  $1.5\text{ m}$ . A una profundidad de  $2.0\text{ m}$  el horario donde se tiene temperatura del aire al interior del tubo inferior a la del medio ambiente es alrededor de  $15:00$  a  $20:00$  horas. Éste mismo efecto se presentó de horario de  $15:00$  a  $19:00$  horas a una profundidad de  $2.5\text{ m}$  y de  $15:00$  a  $18:00$  a una profundidad de  $3.0\text{ m}$ .



Al igual que para el clima cálido, la temperatura del aire al interior del EAHE es afectada por el comportamiento de la irradiación para el clima frío como se observa en la Figura 4.10, también se logra tener una temperatura cercana a un comportamiento constante conforme se aumenta la profundidad del tubo del EAHE, ya que para una profundidad de 4.5 m se tuvo una temperatura mínima de 26.10 °C y una temperatura máxima de 27.41 °C por lo que la variación máxima fue de tan solo 1.3 °C.

Para la hora más fría (5:00 horas) se observa que se tiene una pérdida de calor para una profundidad de 0.5 m, esto se debe a que en ese horario no se tiene irradiación, y debido a que es muy poca la profundidad se requiere de una irradiación que le proporcione calor a la tierra, para que aumente su temperatura y sea mayor que la del medio ambiente y pueda ceder calor al aire al interior del EAHE, esto indica que a poca profundidad el efecto de la inercia térmica de la tierra es muy baja, ya que se debe tener una irradiación. Este efecto que es causado por la ausencia de irradiación se puede observar también en los horarios mencionados anteriormente en los que la temperatura es menor que la del medio ambiente.

Comparando las temperaturas para diferentes profundidades en el horario donde se tiene mayor irradiación (de 11:00 a 14:00 horas), se puede observar que la diferencia de temperatura del aire al interior del EAHE que se tienen a cada profundidad con la del medio ambiente tienden a ser constante, es decir, a partir de una cierta profundidad ya no hay mayor diferencia de temperatura entre la temperatura del aire al interior del tubo y la del medio ambiente conforme se aumenta la profundidad, por lo que se tiene una temperatura del suelo igual a la temperatura promedio anual tal como se describe en la literatura.

En la Figura 3.10 se puede observar que la temperatura máxima que se tuvo para el clima frío fue de 27.41 °C a una profundidad de 4.5 m a las 14:00 horas con una diferencia de 1.51 °C con respecto a la temperatura del medio ambiente para esta misma hora que fue de 25.9 °C, y a las 5:00 horas se tuvo la temperatura mínima de 15.97 °C con una diferencia de temperatura de 0.92 °C con respecto a la temperatura del medio ambiente que fue de 15.9 °C ambas diferencias se pueden ver en la Figura 3.12.

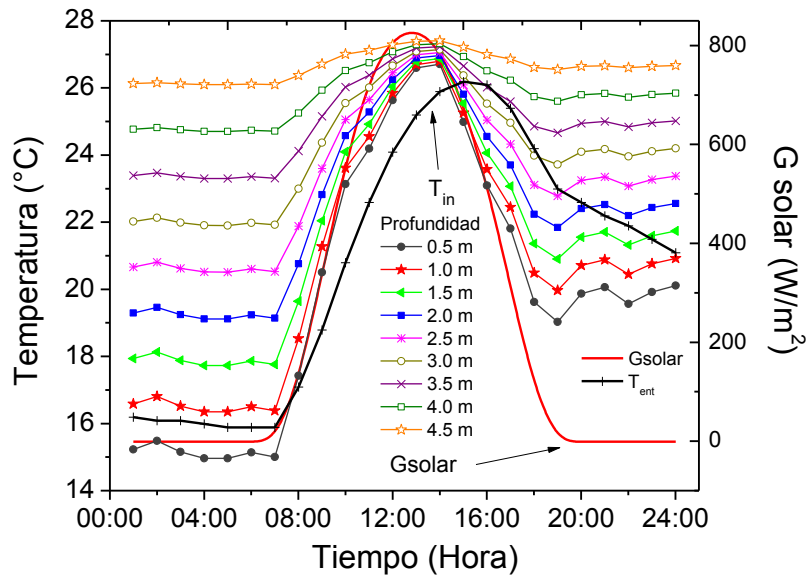
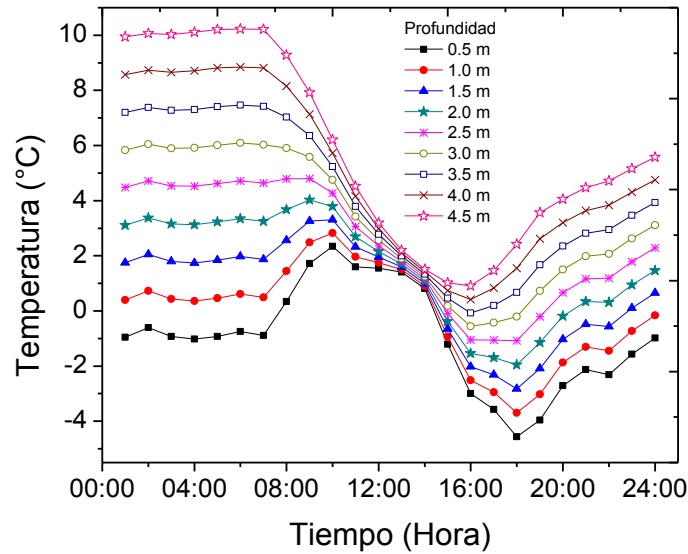


Figura 3. 10 Comportamiento del EAHE en el día frío para todas las profundidades.

En la Figura 3.11 se observa la diferencia que existe entre la temperatura del medio ambiente y la temperatura del aire al interior de EAHE, por lo que todas las diferencias positivas indican que la temperatura mayor es la del aire dentro del tubo con respecto a la temperatura del medio ambiente. Para el horario de 00:00 a 14:00 horas el EAHE proporciona resultados positivos para una profundidad de 1.0 m a 4.5 m, ya que la mínima diferencia de temperatura fue de  $0.36\text{ }^{\circ}\text{C}$  a las 4:00 horas a una profundidad de 1.0 m. Sin embargo a partir de las 14:00 el EAHE comienza a proporcionar resultados no tan satisfactorios ya que gran parte del resto del día solo se tiene calentamiento del aire en profundidades grandes, es decir solo a partir de una profundidad de 3.0 m se tiene el efecto de calefacción, por lo que esto disminuye el tiempo de trabajo del EAHE para profundidades bajas ya que a partir de 2.5 m se tiene enfriamiento del aire por lo que en este mismo horario no es conveniente que el EAHE suministre aire al interior de la edificación.



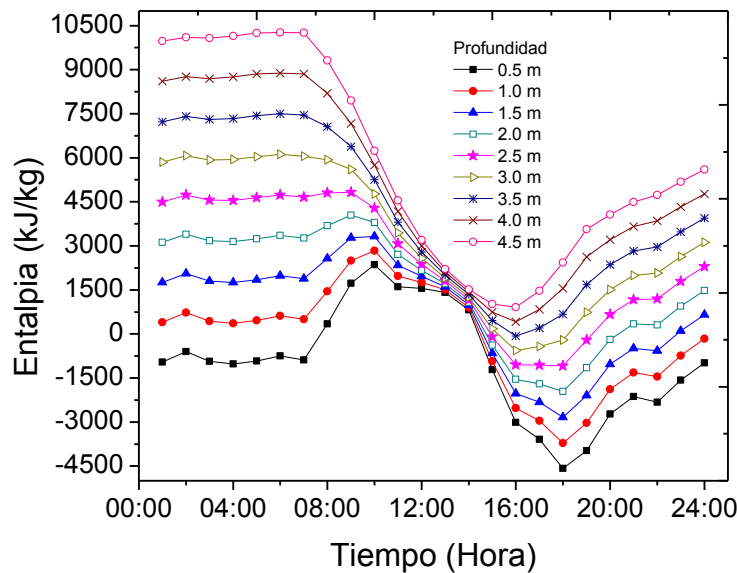
**Figura 3. 11 Diferencia de temperaturas entre la temperatura del medio ambiente y la temperatura al interior para el clima frío.**

Para los resultados de la entalpía se tiene la Figura 3.12 en la que se observa que en el mismo horario donde la temperatura del aire al interior del tubo es mayor que la de medio ambiente existe ganancia de energía. A una profundidad de 1.0 m a 4.5 m en el horario de 00:00 a 14:00 horas se tiene una entalpía máxima de 10268.38 kJ/kg y a una profundidad de 0.5 m se tiene la máxima pérdida de energía de 4580.58 kJ/kg, por lo que este resultado del EAHE no es satisfactorio para fines de calefacción.

A partir de una profundidad de 2.5 m en horario de 20:00 a 24:00 horas se tiene ganancia de calor, a las 19:00 horas solo de 3.0 a 4.5 m se tienen ganancia de calor, para una altura de 2.0 m se tienen ganancia de calor en horario de 20:00 a 24:00 horas. Se observa que solo en dos profundidades se tiene ganancia de calor durante todo el día, las cuales son a 4.0 y a 4.5 m, sin embargo a una profundidad de 3.5 m solo a las 16:00 horas se tiene pérdida de calor de 71.19 kJ/kg.

En el horario de 00:00 a 7:30 horas a una profundidad de 0.5 m se tiene pérdida de energía la cual va es desde 605.23 hasta 1025.12 kJ/kg y aproximadamente a las 8:00 horas comienza a mostrar una ganancia de energía de 339.04 kJ/kg hasta aproximadamente a las 14:30 horas con una ganancia de 819.86 kJ/kg para es este mismo horario se tuvo una ganancia de energía máxima de 2354.11 kJ/kg a las 10:00 horas.

El comportamiento de la entalpía muestra el intercambio de energía que se tiene al interior del EAHE, en la Figura 3.12 se observa la energía que gana el aire dentro del EAHE para aumentar su temperatura, es por ello que a diferencia de la entalpía que se tiene en clima caluroso, para el clima frío no tiene el mismo comportamiento en el horario que se tiene mayor irradiación, ya que en este mismo lapso, la diferencia de temperatura es baja debido a que la temperatura del medio ambiente es cerca a la temperatura promedio anual y por ello no se tiene mucho intercambio de energía, por ello en los horarios donde la temperatura es muy baja existe más intercambio de energía debido a que se tiene mayor diferencia de temperatura.



**Figura 3. 12 Comportamiento de la entalpía durante el día frío para todas las profundidades.**

En las Figuras 3.13 y 3.14 se presenta el comportamiento de las velocidades promedio del aire dentro del EAHE y el número de Reynolds, respectivamente. En general ambos resultados son similares cualitativamente en su comportamiento, a las 8:00 horas para ambas figuras se puede observar que en ambos valores hubo un decremento hasta las 14:00 horas, a partir de las 14:00 comienza un aumento tanto de velocidad como de Reynolds, y se debe al mismo efecto explicado para el clima cálido, el cual es por la diferencias de temperaturas generando que la densidad del aire disminuya por lo que la velocidad aumenta. En las Figura

3.15 y 3.16 se muestra el comportamiento de las velocidades promedio y el número de Reynolds conforme se aumenta la profundidad.

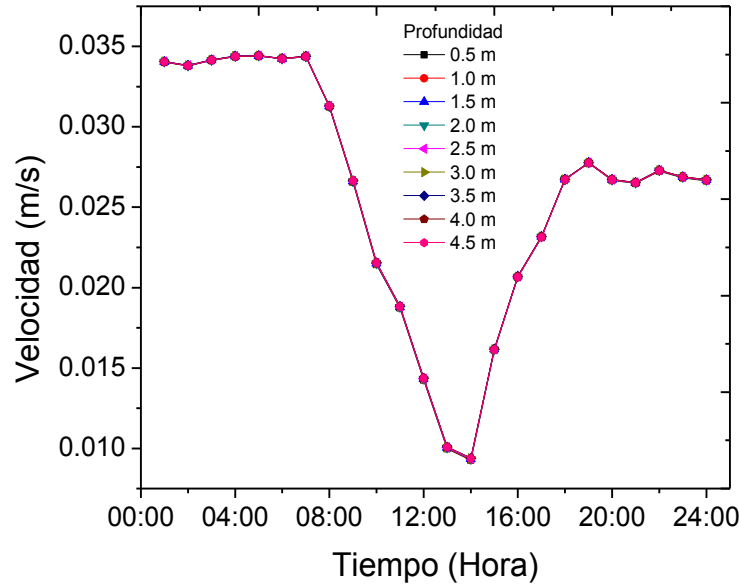


Figura 3. 13 Velocidades del aire al interior del EAHE en día frío para todas la profundidades.

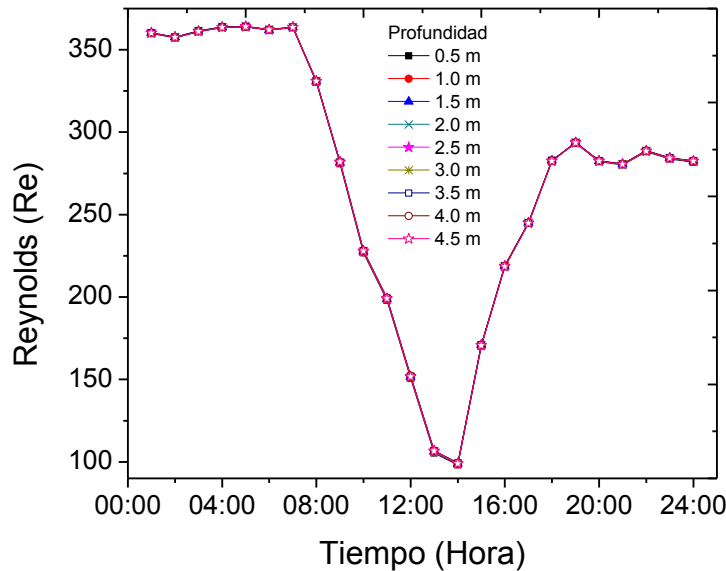


Figura 3. 14 Numero de Reynolds al interior del EAHE en día frío para todas la profundidades.

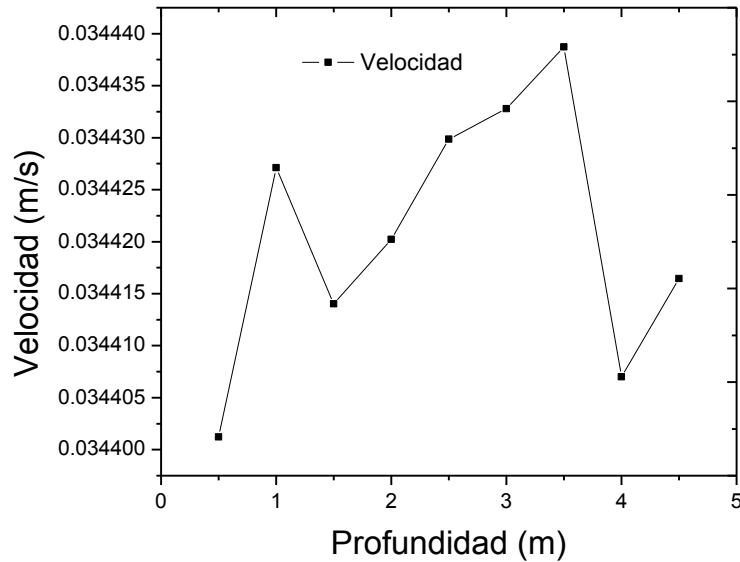


Figura 3. 15 Velocidades del aire al interior del EAHE en día frío a las 5:00 horas.

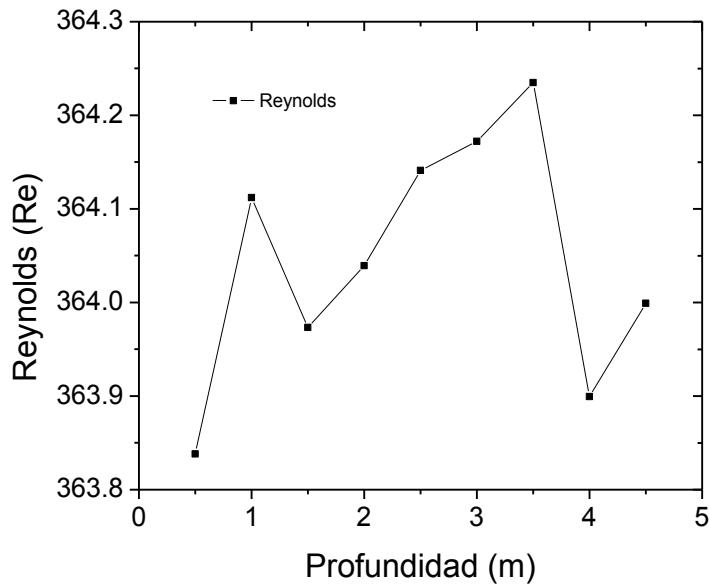


Figura 3. 16 Numero de Reynolds al interior del EAHE en día frío a las 5:00 horas.

### 3.3 Evaluación térmica

Como se mencionó anteriormente la ganancia o pérdida de calor dentro del EAHE dependerá de la profundidad a la que se entierre este mismo y de las condiciones meteorológicas, por lo que en la figura 3.17 se presenta el comportamiento del aire al interior

del EAHE a través de las isothermas dentro del tubo para una profundidad de 0.5, 2.5 y 4.5 m de profundidad para el día más caluroso. Se puede observar que se tiene diferentes temperaturas dentro del tubo del EAHE y que a todo lo largo de su diámetro verticalmente se tiene variación de temperaturas, por lo que se tiene una temperatura máxima de 37.48 °C y una mínima de 37.2 °C para una profundidad de 0.5 m esto se debe a que la parte norte del tubo tiene contacto con la tierra con una temperatura diferente que la de la parte sur a pesar de la distancia pequeña (15 cm) entre ambas fronteras del tubo y debido a las velocidades del aire la distribución de temperaturas de hacen de manera uniforme.

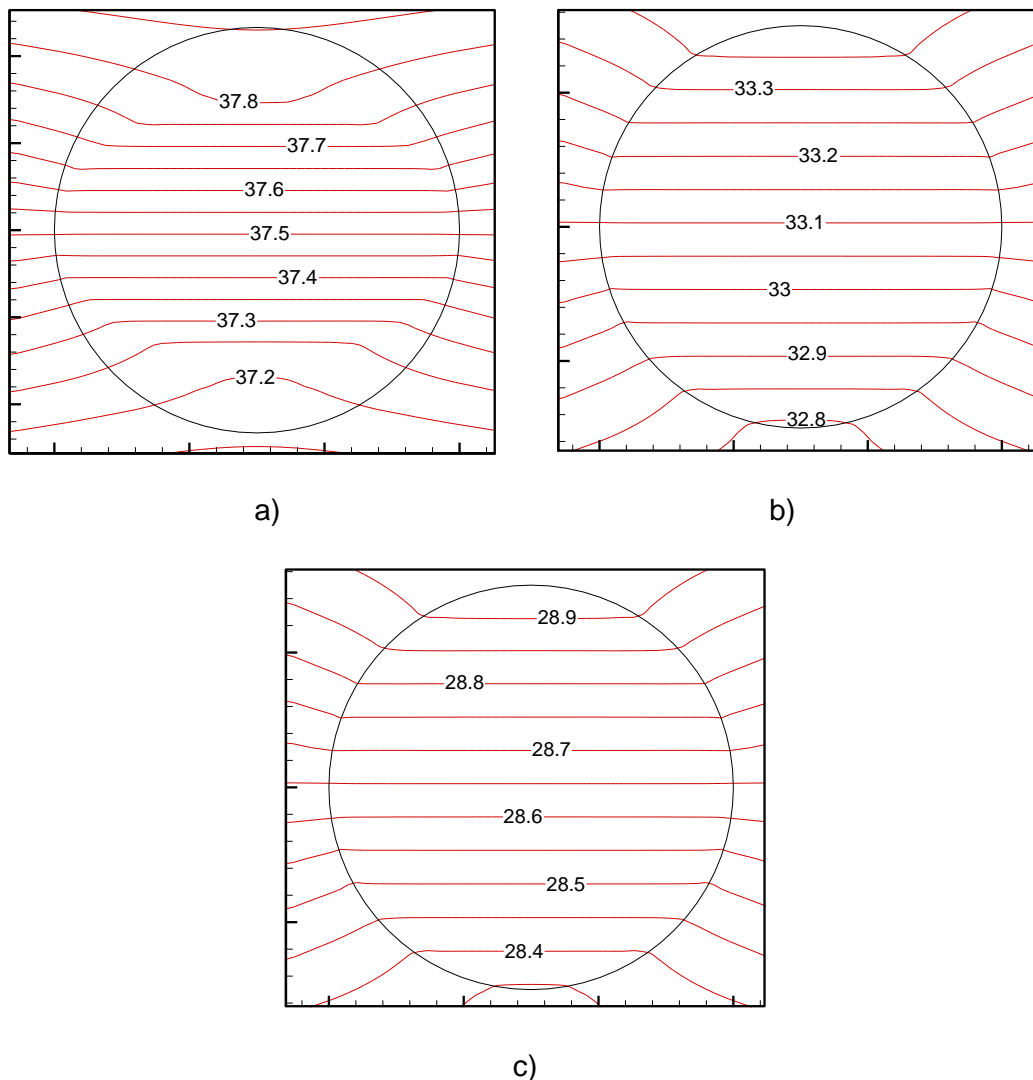


Figura 3. 17 Perfil de temperaturas del aire al interior del EAHE para el clima calido, a) 0.5 m, b)2.5 m y c) 4.5 m

Para la temporada de frío se tuvo el comportamiento el cual se muestra en la figura 3.18, se podrá observar que las isotermas tienen un comportamiento muy distinto que del clima cálido, a diferencia del clima cálido, se tiene menor diferencia de temperatura ya que la temperatura mayor que se tiene es de 15.1 °C y la temperatura menor es de 14.9 °C para una profundidad de 0.5 m, por lo que la temperatura es casi constante en cada punto al interior del tubo, el comportamiento de las isotermas se debe a la velocidad que se tiene al interior, ya que no permite que la temperatura sea de manera uniforme como se presenta en caso del clima cálido, pero sin embargo se tiene menos variación de temperatura.

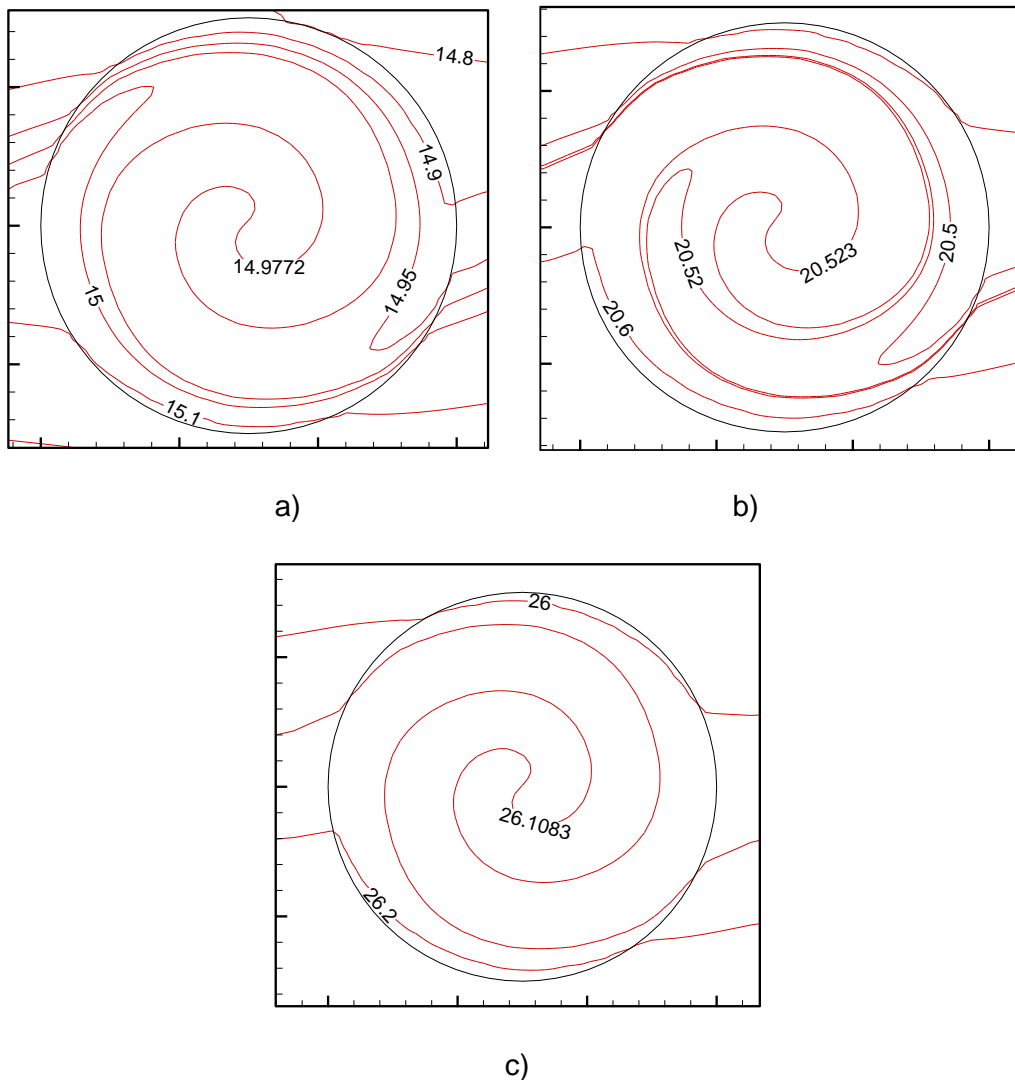


Figura 3. 18 Perfil de temperaturas del aire al interior del EAHE para el día frío, a) 0.5 m, b)2.5 m, c)4.5 m.



Como se observó en los resultados, a partir de una profundidad de 2.0 m se tiene un rendimiento aceptable para el clima cálido ya que a esta misma profundidad no se tiene ganancia de calor en las 24 horas y para el clima frío solo se tiene ganancia de calor para las 24:00 a partir de una profundidad de 4.0 m. sin embargo para la hora más fría (sin considera el comportamiento en las demás hora) se tiene ganancia de calor a partir de una profundidad de 1.0 m por lo que a una profundidad de 2.0 m se tiene mayor ganancia en esta misma hora. Por ello lo recomendable es instalar el EAHE a una profundidad de por lo menos 2.0 m, ya que con esta profundidad el EAHE trabajara de manera óptima para él hora más calurosa en temporada de calor y para la hora más fría en temporada de invierno, trabajaría de manera óptima en un horario de 00:00 a 15:00 horas y de 20:00 a 24:00, cabe destacar que en el horario en el que se tiene perdida de calor (de 15:00 a 20:00) se debería obstruir el paso del aire atreves del EAHE ya que la temperatura del medio ambiente es de 26.2 a 22.6 °C por lo que al interior del EAHE se tendría una pérdida de temperatura de hasta 1.95 °C como se muestra en la figura 3.11.

En comparación con el trabajo realizado por Arcos-Feria (2016) el comportamiento del EAHE es similar, debido a que las temperaturas tuvieron el mismo comportamiento gráficamente. Los valores de temperatura al interior son diferente ya que su estudio experimental lo realizo para otras condiciones climatológicas (Chetumal, Quintana Roo). Sin embargo esto ayuda a verificar si el comportamiento EAHE del cual se realizó el estudio Teórico-numérico es el adecuado con base a los resultados.

## **CAPÍTULO 4. CONCLUSIONES**

## **4.1 Conclusiones del proyecto**

Bajo las condiciones climatológicas de Villahermosa, Tabasco y variando la profundidad de 0.5 hasta 4.5 m con un incremento de 0.5 m, se obtuvieron resultados satisfactorios a profundidades moderadas. Se encontró que el funcionamiento del EAHE está en función de varios parámetros: de la temperatura ambiente, de la profundidad y de la irradiación, esta última tuvo más efecto sobre el EAHE.

Analizando el comportamiento de la temperatura del aire al interior del EAHE, la ganancia o pérdida de calor, la diferencia de temperatura entre la del medio ambiente y la del aire al interior de tubo, la velocidad al interior del tubo y el número de Reynolds, se observó que a partir de 2.0 m se tiene un desempeño positivo para las 24 horas para el clima cálido. Para la hora más cálida se tiene el mismo resultado, ya que a una profundidad de 0.5 a 1.5 m no se tiene el efecto de la inercia térmica de la tierra, esto debe al valor alto de la irradiación: la tierra alcanza una temperatura mayor que la del medio ambiente por lo que el aire tiene ganancia de calor generando que este intervalo de profundidad no sea óptimo.

Para el clima frío se encontró que sólo a partir de una profundidad de 4.0 m se tiene ganancia de calor durante todo el día. Sin embargo para la hora más fría (5:00 horas) se tiene ganancia de calor a partir de 1.0 m de profundidad. A pesar de esto, no es recomendable instalar el EAHE a esta misma profundidad ya que a partir de las 14:30 se tiene pérdidas de calor, por lo que no es recomendable.

Por cuestiones de costos, se recomienda al menos una profundidad de 2.0 m, ya que en el horario de 15:00 a 20:00 se tiene pérdida de calor pero a pesar de esto, se presenta una temperatura de medio ambiente cercana a la temperatura que se tendría dentro del EAHE a una profundidad de 4.0 m por lo que la inversión que se tendría para esta última profundidad no sería viable, ya que la ganancia de calor es baja, por lo que no se tendría mucho beneficio y para el horario de 15:00 a 20:00 para una profundidad de 2.0 m se recomienda obstruir el paso para no permitir que entre el aire al interior de la edificación.

Por último se encontró que durante el clima cálido la velocidad al interior del EAHE disminuye y durante el clima frío aumenta, esto se debe a que aumenta la densidad en el caso

del clima cálido disminuye y para el caso de clima frío aumenta por lo que afecta la velocidad del fluido.

## **4.2 Recomendaciones**

De acuerdo con los resultados que se han obtenido tanto satisfactorios y no satisfactorios en algunos casos, se recomiendan los siguientes puntos:

1. Instalar el EAHE a una profundidad de 2.0 a 3.0 m ya que con esto no se generan costos elevados de inversión y se tiene un desempeño óptimo del EAHE para ambos climas. Sin embargo para el clima frío debe instalarse un sistema mecánico en el EAHE para que se obstruya el paso del aire en el horario que se tiene pérdidas de calor.
2. Se recomienda realizar un estudio económico, para tener en conocimiento el ahorro monetario que se puede tener al acoplar un EAHE a una habitación.
3. Realizar el estudio para otras ciudades con el fin de conocer el comportamiento del EAHE con base a las diferentes condiciones meteorológicas y tener un historial más detallado sobre este sistema.
4. Validar los datos con EAHE experimentales.
5. Acoplar el sistema con otro sistema enfocado al ahorro de energía, tal como un muro trombe o una chimenea solar.

## **BIBLIOGRAFÍA**

- A. Yunus, A. Michael. Termodinámica. McGraw-Hill. 6ta. Edición, 2009.
- A. Yunus, J. Afshin. Transferencia de calor y masa. McGraw-Hill. 4ta. Edición, 2011.
- C. Kurt. Termodinámica. Pearson educación. 6ta. Edición, 2006.
- E. George. Mecanica del medio continuo. McGraw-Hill. 1era. Edición, 1978.
- <http://www.conacytprensa.mx/index.php/tecnologia/tic/7301-29-anosformandoinvestigadores-de-alto-nivel-en-el-cenidet-reportaje-investigadores-morelos>
- J. Xamán, M. Gijón-Rivera. Dinámica de fluidos computacional para ingenieros. Palibrio, 1ra. Edición, 2016.
- Meneses-Pérez Orlando A., Diseño de un intercambiador de calor Aire-Tierra para generar calefacción y climatización de edificios en Santiago. Tesis de ingeniería, Universidad de chile, Santiago de chile (chile), 2007
- Ramírez-Dávila L., Estudio teórico de un intercambiador de calor Tierra-Aire. Tesis de maestría, CENIDET, Cuernavaca, Mor. (México), 2013.
- Ramírez-Dávila L., Xamán J., Arce J., Álvarez G., Hernández-Pérez I. Numerical study of earth-to-air heat exchanger for three different climates. *Energy and Buildings*, Vol. 76, págs. 238-248, 2014.
- Sánchez-Sanabria M., Socarrás-Vega M., Herrera F., Marín-Picón L., Noriega-Galindo D mitigar consecuencias del calentamiento global y efecto invernadero: reflexiones para la formación en salud. *Hacia la promoción de la salud*, Vol. 18(2), págs. 110-122, 2013.
- Xamán J., Hernández-López I., Arce J., Alvarado-Juárez R., Hernández-Pérez I., Álvarez G., Chávez Y., Pseudo transient numerical study of an earth-to-air heat exchanger for different climates of México. *Energy and Buildings*, Vol. 99, págs. 273-238. 2015
- Xamán J., Hernández-Pérez I., Arce J., Ramírez-Dávila L., Noh-Pat F. Numerical Study of earth-to-air heat exchanger: the effect of thermal insulation. *Energy and Buildings*, Vol. 85, págs. 356-361,2014.

Zhong-Zhao M., Simulation of earth-to-air heat exchanger systems. Tesis de maestría, Concordia University, Montreal, Quebec, (Canadá), 2014.

## **LINKOGRAFIA**

- [1].<http://casi-cero.blogspot.mx/>fecha de consulta 03/02/2017
- [2].<http://eraikal.blog.euskadi.eus/blog/2012/11/27/climatizacion-pasiva-intercambiadores-tierra-aire/>fecha de consulta 03/02/2017
- [3].<http://espacioeco.es/los-pozos-canadienses-provenzales-geotermia-baja-potencia/>fecha de consulta 03/02/2017
- [4].[https://www.researchgate.net/figure/288835666\\_fig9\\_Figura-46-Intercambiador-tierra-aire-La-inercia-termica-la-hemos-mostrado-como-un/](https://www.researchgate.net/figure/288835666_fig9_Figura-46-Intercambiador-tierra-aire-La-inercia-termica-la-hemos-mostrado-como-un/)fecha de consulta 03/02/2017