



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL  
ESTADO DE QUINTANA ROO

DIVISIÓN DE CIENCIAS, INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA

---

ESTUDIO TEÓRICO Y EXPERIMENTAL DEL  
COMPORTAMIENTO TÉRMICO ANUAL DE UN  
INTERCAMBIADOR DE CALOR GEOTÉRMICO

---

TESIS  
PARA OBTENER EL GRADO DE  
MAESTRO EN MECATRÓNICA

PRESENTA

ING. MIGUEL SANTIAGO PICAZO NOH

*DIRECTOR*

DR. JORGE OVIDIO AGUILAR AGUILAR

*CO-DIRECTOR*

DR. GUILLERMO BECERRA NUÑEZ

*ASESORES*

DR. FREDDY IGNACIO CHAN PUC.  
DR. JOSÉ HERNÁNDEZ RODRÍGUEZ.  
DR. GLISERIO ROMELI BARBOSA POOL.



CONACYT  
CONSEJO NACIONAL DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA

CHETUMAL, QUINTANA ROO, MÉXICO, JUNIO 2022





UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL  
ESTADO DE QUINTANA ROO

DIVISIÓN DE CIENCIAS, INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA

TRABAJO DE TESIS BAJO LA SUPERVISIÓN DEL COMITÉ  
DEL PROGRAMA DE MAESTRÍA Y APROBADA COMO  
REQUISITO PARA OBTENER EL GRADO DE:  
MAESTRO EN MECATRÓNICA

COMITÉ DE TESIS

DIRECTOR:

  
DR. JORGE OVIDIO AGUILAR AGUILAR

CO-DIRECTOR:

  
DR. GUILLERMO BECERRA NUÑEZ

ASESOR:

  
DR. FREDDY IGNACIO CHAN PUC

ASESOR:

  
DR. JOSÉ HERNÁNDEZ RODRÍGUEZ

ASESOR:

  
DR. GLISERIO ROMELI BARBOSA POOL



CHETUMAL, QUINTANA ROO, MÉXICO, JUNIO 2022

# Índice general

<b>Resumen</b>	<b>4</b>
<b>Dedicatoria</b>	<b>5</b>
<b>Agradecimientos</b>	<b>6</b>
<b>1. INTRODUCCIÓN</b>	<b>8</b>
1.1. Antecedentes . . . . .	9
1.2. Confort térmico . . . . .	11
1.3. Intercambiador de calor . . . . .	11
1.3.1. Estudios de transferencia de calor en el suelo . . . . .	13
1.3.2. Estudios teóricos de intercambiadores de calor tierra-aire . . . . .	17
1.3.3. Estudios experimentales de intercambiadores de calor tierra-aire . . . . .	22
1.3.4. Estudios numéricos y experimentales de intercambiadores de calor tierra-aire . . . . .	24
1.4. Planteamiento del problema . . . . .	26
1.5. Objetivo general . . . . .	26
1.5.1. Objetivos específicos . . . . .	27
1.6. Justificación . . . . .	27
1.7. Alcance del tema . . . . .	27
1.8. Hipótesis . . . . .	28
1.9. Desarrollo experimental de la transferencia de calor de un ICG . . . . .	28
1.9.1. Modelo físico del ICG . . . . .	29
1.9.2. Instrumentación . . . . .	29
1.9.3. Adaptaciones . . . . .	30
1.10. Adaptación de un modelo numérico de transferencia de calor en el ICG . . . . .	33
1.10.1. Modelo físico y matemático del ICG . . . . .	33
<b>2. ANÁLISIS DEL PERFIL DE TEMPERATURAS</b>	<b>36</b>
2.1. Introducción . . . . .	36
2.2. Perfil de temperaturas del suelo . . . . .	37
2.2.1. Temporada cálida . . . . .	38
2.2.2. Temporada fría . . . . .	39
<b>3. ANÁLISIS TÉRMICO ANUAL DEL ICG</b>	<b>41</b>
3.1. Transferencia de calor del ICG a 1.0 m de profundidad (temporada cálida) . . . . .	41
3.2. Transferencia de calor del ICG a 2.0 m de profundidad (temporada cálida) . . . . .	43
3.3. Transferencia de calor del ICG a 1.0 m de profundidad (temporada fría) . . . . .	46
3.4. Transferencia de calor del ICG a 2.0 m de profundidad (temporada fría) . . . . .	49

3.5. Rendimiento térmico . . . . .	51
3.6. Coeficiente de operación del ICG . . . . .	52
3.6.1. Coeficiente de operación del ICG 1.0 m de profundidad (temporada cálida) .	52
3.6.2. Coeficiente de operación del ICG 2.0 m de profundidad (temporada cálida) .	56
3.6.3. Coeficiente de operación del ICG 1.0 m de profundidad (temporada fría) . .	57
3.6.4. Coeficiente de operación del ICG 2.0 m de profundidad (temporada fría) . . .	62
<b>4. AHORRO DE ENERGÍA</b>	<b>66</b>
4.1. Ahorro de energía hipotético de un ICG . . . . .	66
4.2. Ahorro de energía proporcionado por ICG a 1.0 m (temporada cálida) . . . . .	67
4.3. Ahorro de energía proporcionado por ICG a 2.0 m (temporada cálida) . . . . .	68
4.4. Ahorro de energía proporcionado por el ICG el día más cálido . . . . .	68
4.5. Ahorro de energía proporcionado por ICG a 1.0 m (temporada fría) . . . . .	69
4.6. Ahorro de energía proporcionado por ICG a 2.0 m (temporada fría) . . . . .	70
4.7. Ahorro de energía proporcionado por el ICG el día más frío . . . . .	70
<b>5. CONCLUSIONES</b>	<b>72</b>
5.1. Conclusiones . . . . .	72
5.2. Productos Obtenidos . . . . .	74
<b>Bibliografía</b>	<b>74</b>

# Índice de figuras

1.1. Intercambiador de calor en una vivienda 1.1 [1]	12
1.2. Vista de planta de las villas universitarias (marcado en rojo la zona de instalación del ICG) [2].	28
1.3. Intercambiador de calor geotérmico a 2.0 m de profundidad [3]	29
1.4. Intercambiador de calor geotérmico a 1.0 m de profundidad [3]	30
1.5. Comportamiento del ICG el 30 de julio del 2016	31
1.6. Protección en la entrada del ICG	32
1.7. Modelo físico de la tierra con condiciones de frontera	34
1.8. Protección en la entrada del ICG	34
2.1. Promedio anual de $T_{amb}$ y del perfil de temperaturas	37
2.2. Perfil de temperaturas promedio en temporada cálida	38
2.3. Perfil de temperaturas promedio de enero 2018	40
3.1. Comportamiento de las temperaturas promedio del ICG en el mes de agosto del 2017	42
3.2. Comportamiento del ICG 27 de agosto 2017	43
3.3. Comportamiento de las temperaturas promedio en el ICG (agosto 2017)	44
3.4. Comportamiento de las temperaturas en el ICG (27 de agosto 2017)	45
3.5. Comportamiento del ICG enero 2018	47
3.6. Comportamiento del ICG 14 enero 2018	48
3.7. Comportamiento de las temperaturas promedio en el ICG (enero 2017)	49
3.8. Comportamiento de las temperaturas en el ICG (14 de enero 2017)	50
3.9. Comportamiento promedio del COP del ICG a 1.0 m de profundidad	55
3.10. Comportamiento del COP del ICG a 1.0 m de profundidad el 27 de agosto 2018	56
3.11. Comportamiento promedio del COP del ICG a 2.0 m de profundidad	58
3.12. Comportamiento del COP del ICG a 2.0 m de profundidad 27 de agosto 2018	58
3.13. Comportamiento promedio del COP del ICG a 1.0 m de profundidad	59
3.14. Comportamiento del COP del ICG a 1.0 m de profundidad el 14 de enero del 2018	61
3.15. Comportamiento promedio del COP del ICG a 2.0 m de profundidad	63
3.16. Comportamiento del COP del ICG a 2.0 m de profundidad 14 de enero del 2018	65
4.1. Energía promedio proporcionado por el ICG en un día (1.0 m)	67
4.2. Energía proporcionado por el ICG en un día (2.0 m)	68
4.3. Energía proporcionada por el ICG instalado a 1.0 m y 2.0 m	69
4.4. Energía promedio proporcionado por el ICG en un día (1.0 m)	69
4.5. Energía promedio proporcionado por el ICG en un día (2.0 m)	70
4.6. Energía proporcionada por el ICG instalado a 1.0 m y 2.0 m	71

# Dedicatoria

Este trabajo está dedicado a mi esposa con todo mi amor y cariño *Erika*, a mi hijo *Andrés*, a mis padres Sr. *Diego*, Sra. *Zoila* y a la memoria de mi ser querido mi abuelita Sra. *Celia* (Q.E.D.)

# Agradecimientos

A mi esposa **Lic. Erika Yolanda Perez Cruz** por darme la confianza, por creer en mí para iniciar esta etapa de estudios de la maestría, por darme su apoyo incondicional, amor y estar a mi lado. A mi hijo **Andrés Misael Picazo Perez** que es mi orgullo y gran motivación, me impulsas día a día a superarme en la carrera de ofrecerte siempre lo mejor.

A mi familia, gracias a su ejemplo, consejos y enseñanzas me han permitido alcanzado mis logros académicos, mis padres **Diego Picaso Jimenez y Zoila Aueria Noh Camas** por haberme educado y forjado como la persona que soy en la actualidad; muchos de los logros obtenidos se los debo a ustedes y este es una más. Me formaron con reglas y me inculcaron valores, con algunas libertades pero siempre con responsabilidades, pero siempre me motivaron y me animaron a alcanzar mis metas. A mis hermanos **Nancy y Pablo** por sus consejos y apoyo incondicional.

A mi tutor **Jorge Ovidio Aguilar Aguilar**, Dr. en Ingeniería (Energías). Gracias a su paciencia, consejos y constancia que tuvo en la dirección y supervisión para la realización de este trabajo. Sus consejos y ánimos fueron siempre útiles cuando no habían ideas ni pensamientos para avanzar en la redacción de lo que hoy se ha logrado. Usted forma parte importante de este trabajo con su guía y cada uno de los aportes profesionales que lo caracterizan. Muchas gracias por sus múltiples palabras de aliento, en los momentos que las necesite; por estar allí aclarando las dudas y brindando los consejos finales para la el termino de este trabajo.

A mi co-director de tesis **Dr. Jesús Perfecto Xamán Villaseñor** , (Q.E.D.). Gracias por su atención, asesoría, guía y enseñanzas brindadas durante la estancia en el Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (CENIDET). Gracias a su aporte, hoy he llegado a finalizar este trabajo de tesis.

A mis maestros; **Dr. Guillermo Becerra Nuñez, Dr. Víctor Manuel Sánchez Huerta, Dr. Freddy Ignacio Chan Puc, Dr. Javier Vázquez Castillo, Dr. Gliserio Romeli Barbosa Pool, M.C. Juan Carlos Ávila Reveles, Dr. Fernando Enrique Flores Murrieta (Q.E.D.), Dr. Roberto Acosta Olea (Q.E.D.)**. Sus enseñanzas y palabras fueron sabias durante el transcurso de esta etapa, sus conocimientos rigurosos, precisos y necesarios para mi formación académica, a ustedes mis estimados profesores les debo mis conocimientos y la preparación que hoy tengo. Donde quiera que vaya llevare conmigo cada una de sus enseñanzas en mí transitar profesional. Su semilla de conocimientos, germinó en el alma y el espíritu. Gracias por su paciencia, por compartir sus conocimientos día a día al impartir las clases de manera clara, profesional e invaluable, por su dedicación, perseverancia y tolerancia.

Al **Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT)** por brindarme el apoyo económico durante los estudios de maestría.

A la **Universidad Autónoma de Quintana Roo** por darme la oportunidad de cursar mis estudios de maestría en sus instalaciones.

Al **Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (CENIDET)**, por el apoyo con sus equipos e instalaciones durante el tiempo de estancia.



# Capítulo 1

## INTRODUCCIÓN

Con el paso de los años el consumo de energía en el mundo se ha convertido en un problema, los países industrializados y los que aun están en vías de desarrollo son afectados por las demandas requeridas para satisfacer cada una de sus necesidades económicas y sociales. Por tal motivo, en las ultimas décadas se ha visto como inevitable que la producción de energías deba sufrir un cambio, de la actual dependencia de los hidrocarburos y la quema de combustibles fósiles para la producción mediante la transformación de energías renovables.

El Sol es una fuente de energías inagotable a escala humana, la cual provee energía limpia, abundante y está disponible en la mayor parte de la superficie terrestre. Su uso reduce los problemas ambientales generados por la quema de combustibles fósiles y los generado en las centrales nucleares.

Sin embargo, a pesar de los avances en el estudio de otras alternativas energéticas, el aprovechamiento de esta opción ha sido limitado, comparándolo con el consumo de energías a nivel mundial [4]. Por tal motivo, es urgente modificar el enfoque del sistema actual de consumo, basado en los combustibles fósiles, hacia el uso de las energías renovables, entre las cuales destaca la energía solar. Conforme a las investigaciones realizadas a lo largo de los años en las diferentes aplicaciones de la energías solar, se puede asegurar que en la primera década del siglo XXI algunas de las tecnologías del ámbito solar, tales como la energías solar térmica y la energía solar fotovoltaica han logrado resultados importantes [5]. Por razones tanto económicas(escases de los hidrocarburos) como ecológicas (contaminación de la atmósfera y el suelo), es necesario el desarrollo y la implementación de nuevas alternativas energéticas, que sean de menor impacto ambiental.

De la energías que se consume anualmente en la república mexicana, el 44 % se debe a la necesidad del acondicionamiento y climatización del aire en las regiones con climas extremos. Para ello se hace uso de tecnologías convencionales (minis-

plit, aire acondicionado y calefactores) para mejorar las condiciones térmicas de las habitaciones, pero esto tiene un alto costo energético. El acondicionamiento del aire se hace para generar condiciones de confort térmico dentro de una habitación, dicho confort hace posible que los ocupantes de la habitación realicen sus actividades con un mejor desempeño [6].

Se han enfocado estudios en la búsqueda de alternativas que puedan satisfacer estas necesidades con un consumo mínimo de energía, dentro de las investigaciones realizadas acerca de viviendas sustentables, se han estudiado varios dispositivos que basan su funcionamiento en el uso de alguna fuente de energías renovable, tales como los intercambiadores de calor geotérmicos (ICG) que aprovechan las temperaturas casi constantes del suelo a cierta profundidad [7, 8] para calefacción o enfriamiento de viviendas y edificios.

En esta tesis se presenta el estudio teórico y experimental del comportamiento térmico anual de un intercambiador de calor geotérmico, con el fin de poder determinar si este tipo de dispositivos contribuyen a lograr el confort térmico reduciendo el consumo de energía por concepto de acondicionamiento del recinto.

## 1.1. Antecedentes

En el año 2010 se registró la mayor producción de CO<sub>2</sub> de acuerdo con la información publicada por la Agencia Internacional de la energía, emitiéndose más de 30 giga toneladas (Gt), siendo esta la marca más alta [9]. Por tal motivo, la búsqueda constante de tecnologías amigables con el medio ambiente para lograr el confort térmico en las viviendas y edificios ha llevado al estudio de sistemas de ventilación natural, que aprovechan las fuentes de energías renovables como el viento, la irradiancia solar y la energías térmica del suelo.

La disponibilidad de los recursos energéticos es uno de los factores más importantes en el desarrollo tecnológico en todo el mundo. Estos recursos energéticos son usados por el hombre para satisfacer algunas de sus necesidades, en la mayoría de los casos en forma de calor y trabajo. A mediados del siglo XIX se inventaron los primeros motores de combustión interna, que requerían combustibles específicos para poder funcionar. Con el tiempo, los motores de combustión interna, principalmente los de gasolina y diésel, se hicieron cada vez más seguros, confiables, económicos y por lo tanto, abundantes. Aparecieron otras máquinas térmicas, como las turbinas y los motores de reacción, que también consumen combustibles muy específicos. De esta manera la sociedad se fue haciendo cada vez más depen-

diente de los combustibles fósiles.

De los principales combustibles fósiles, se consideran los derivados del petróleo como gasolina, diésel, combustóleo, etc., además del gas natural y el carbón mineral. Al principio estos recursos, se consideraban ilimitados y se despreciaban los gases de efecto invernadero emitidos y su impacto ambiental. Sin embargo, los niveles de bióxido de carbono que se detectan actualmente son significativamente mayores que los que existían en 1950. Esto produce el conocido efecto invernadero, que está ocasionando un incremento en las temperaturas promedios mundiales. Los combustibles fósiles también son causantes de la lluvia ácida, que en los bosques cercanos a las áreas altamente industrializadas están causando grandes daños al suelo, y por lo tanto a la flora y a la fauna. Tanto por razones económicas (próxima escases de hidrocarburos) como ecológicas (alteración de la atmósfera y el suelo), es necesario el desarrollo de nuevas tecnologías energéticas, que sean menos agresivas contra el ambiente y que sean sustentables.

El panorama del consumo de energías que se tiene hoy en día no es sustentable, no podrá mantenerse indefinidamente sin amenazar su propia existencia. Una solución a estos problemas medioambientales y tecnológicos, son las energías alternativas que existen en la actualidad. Algunas de ellas no han sido desarrolladas por limitaciones técnicas, económicas y otras se han utilizado parcialmente.

El implementar el uso de las energías alternativas presenta una solución para mitigar en una parte la emisión de  $\text{CO}_2$  a la atmósfera, y esta puede aprovecharse ilimitadamente, es decir, su cantidad disponible en la Tierra no disminuye a medida que se aprovecha. Como se sabe, la principal fuente de energías renovable es el Sol, que en la atmósfera terrestre se convierte en una variedad de efectos, algunos ejemplos son: las corrientes de aire que se crean cuando una masa de aire se calienta, esta se desplaza y otra masa de aire fría ocupa su lugar debido a las diferencias de temperatura, otro ejemplo es la fotosíntesis donde los rayos del Sol son absorbidos por el pigmento fotosensible de la planta por lo cual son un elemento importante para que se lleve a cabo [10].

Las fuentes de energías renovable son aquellas que por su capacidad de regeneración natural y cantidad en relación a los consumos, son inagotables y su explotación con responsabilidad afecta poco al medio ambiente y están consideradas como fuentes que permiten sostener el consumo. Estas son: la biomasa (Biocombustibles, cultivos energéticos), las pequeñas centrales hidráulicas, eólica, geotérmica,

la oceánica y la solar (fotovoltaica y fototérmica). Debido a esto, la mayoría de los países del mundo están trabajando en la investigación científica y tecnológica para aprovechar las energías renovables. En México ha iniciado la incorporación del uso de tales fuentes a sus programas energéticos, ya que cuenta con abundancia de recursos en energías renovables, aun más que de hidrocarburos y con capital humano capaz de generar investigación y desarrollos para apropiarse o crear las tecnologías necesarias para su aprovechamiento [11].

## 1.2. Confort térmico

Hoy en día la mayoría de las personas realizan sus actividades cotidianas en el interior de edificios o viviendas, siendo de vital importancia la búsqueda del confort (térmico, visual y calidad del aire) en el interior de los mismos, con un consumo mínimo de energía. De acuerdo a la mayoría de los estándares internacionales el confort térmico se puede definir como *“aquella condición de la mente que proporciona satisfacción con el ambiente térmico”* [12]. El confort térmico es difícil de definir debido a que se consideran algunos factores ambientales y personales que contribuyen a lograr la sensación de comodidad en una persona tales como; condiciones de temperatura, humedad y movimiento del aire.

En la constante búsqueda para lograr el confort térmico se han realizado investigaciones de tecnologías amigables con el medio ambiente, las cuales aprovechan las distintas fuentes de energías renovables como el viento, la irradiancia y la energía térmica del suelo. Entre estas tecnologías se encuentran los intercambiadores de calor geotérmicos, los cuales se describen a continuación.

## 1.3. Intercambiador de calor

Los ICG aprovechan la energía geotérmica, la cual estudia los fenómenos térmicos que tienen lugar en el interior de la Tierra. El calor generado o almacenado en ella puede ser aprovechado y constituye la fuente de energías geotérmica. La energía geotérmica puede utilizarse de dos formas distintas, dependiendo del origen del calor que se utilice, que será útil para una u otras aplicaciones. Se puede utilizar directamente el calor generado por el magma en el interior de la tierra y que llega a la superficie de suelos volcánicos, aguas termales o géiseres [13]. En estas zonas se puede conseguir temperaturas de entre 70 a 450 °C, con las cua-

les se puede generar vapor de agua para procesos industriales e incluso lograr la generación de electricidad. Por otro lado, también es posible aprovechar el calor acumulado por la gran masa que forma el suelo, aunque no este a temperaturas tan elevadas como en el caso anterior, y producir agua caliente o calefacción en cualquier lugar. Es esta última forma de utilización se basa el funcionamiento de los ICG el cual, consta básicamente de un tubo que tiene una salida al interior de la vivienda y otra al exterior, como se aprecia en la Figura 1.1

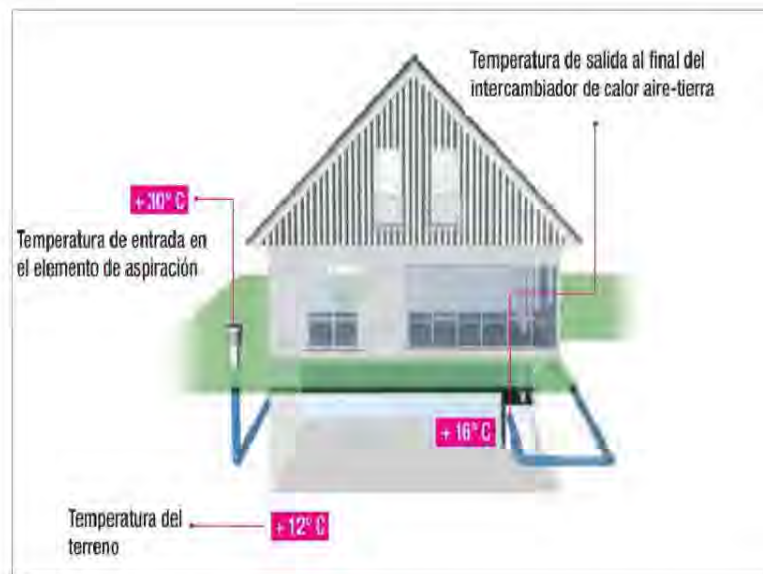


Figura 1.1: Intercambiador de calor en una vivienda 1.1 [1]

Para aprovechar la inercia térmica del subsuelo, se utilizan los intercambiadores de calor o geotérmicos, el cual consiste en una o más tuberías de PVC, concreto o algún otro material, enterradas en el suelo, a través de las cuales circula aire de forma natural (pasivo) o forzada (activo). A su paso por el ICG, el aire cede o absorbe calor, dependiendo las condiciones ambientales del lugar en donde se instale. Este tubo se encuentra enterrado a varios metros de profundidad en contacto con la tierra, el aire que circula a través del tubo se va calentando o enfriando dependiendo de la época del año, para posteriormente introducirlo en el recinto o vivienda.

A lo largo de los años se han realizado trabajos de investigación acerca de los ICG, estos, consisten en el estudio de transferencia de calor en el suelo a diferentes profundidades, teóricos, experimentales, numéricos y con diferentes materiales.

### 1.3.1. Estudios de transferencia de calor en el suelo

En 1986 se realizó un estudio donde se propuso una fórmula para el cálculo de la difusividad térmica del suelo y de esta manera caracterizar el comportamiento térmico de acuerdo al uso y tipología, en el cual se analizaron datos de temperatura del suelo a tres profundidades diferentes (20, 50 y 100 cm) y los del aire a 1.0 m de altura, el estudio se realizó a dos suelos de diferente tipología cercanos entre si en los cuales se encontraban observatorios meteorológicos [14]. Se realizaron correlaciones entre la temperatura del aire a 1.0 m. de altura y la temperatura del suelo a 20 cm. de profundidad encontrando que existe una correlación del 99 % con un margen de error de 0.5 °C. Otro de los resultados encontrados fue que a mayor profundidad la temperatura se va homogeneizando, esto se observó al comparar el valor de la temperatura 1 (20 cm) y la temperatura 2 (50 cm) dónde existía una mayor diferencia entre las temperaturas y al realizar la comparación del valor 2 (50 cm) y el valor 3 (100 cm) no hubo una variación significativa, de esta manera se concluyó que la temperatura anual promedio es significativamente diferente para cada profundidad. Además, el comportamiento térmico del suelo es diferente para cada tipo de topología de acuerdo a su organización estructural.

En 1994 se demostró que la cubierta en la superficie del suelo es un factor importante que afecta el desempeño de un intercambiador de calor tierra-aire [15]. En dicho estudio se implementó un modelo numérico transitorio basado en el acoplamiento simultáneo de transferencia de calor y masa entre el suelo y el tubo intercambiador de calor. Los modelos propuestos se desarrollaron en el simulador TRNSYS. Este modelo fue validado con una serie de datos experimentales. Al comparar los resultados obtenidos en la superficie del suelo descubierto contra el suelo cubierto de pasto, se concluyó que una superficie descubierta aumenta la capacidad de calentamiento del intercambiador. Por lo tanto, las condiciones de frontera en la superficie del suelo son un factor que puede ayudar a mejorar el desempeño de un intercambiador de calor según los resultados que se deseen.

En 1995 se propone un modelo numérico transitorio para estimar la temperatura del suelo a varias profundidades debajo de los edificios [7]. El modelo propuesto se desarrolló calculando el calor que fluye al suelo desde un edificio, que depende de un proceso térmico tridimensional en el suelo. Dentro de las principales dificultades que se encontraron para obtener soluciones manejables del problema del flujo de calor son: el proceso térmico tridimensional, la variabilidad temporal de la temperatura exterior así como la gran cantidad de parámetros implicados en

la descripción de la geometría de la base del edificio al igual que el aislamiento térmico. Se utilizaron técnicas de superposición y análisis numérico para hacer frente con estas dificultades. El modelo se validó con datos experimentales y se encontró que podría predecir con precisión la temperatura del suelo debajo de un edificio.

En 1997 se utilizó un modelo para estimar la variación diaria y anual de temperatura de la superficie del suelo cubierto, desnudo y con pasto corto para las ciudades de Atenas y Dublín [8]. Este modelo se basa en la ecuación diferencial de conducción de calor en estado transitorio utilizando como condición de frontera la ecuación de balance de energías en la superficie del suelo. La ecuación de balance de energías implica el intercambio de energías por convección entre el aire y el suelo, la radiación solar absorbida por la superficie del suelo, el flujo de calor latente debido a la evaporación en la superficie del suelo, así como la radiación de onda larga. Se encontraron similitudes entre los valores de temperatura medidos y calculados. El modelo utilizado se comparó con los modelos que utilizan el análisis de Fourier para la predicción de la temperatura del suelo en la superficie y a diferentes profundidades, se concluyó que ambos modelos pueden predecir la temperatura de la superficie del suelo con suficiente precisión.

En 1997 se propuso un modelo para predecir el comportamiento térmico difusivo del suelo para múltiples tubos intercambiadores de calor que se encontraban en arreglo paralelo utilizando la ecuación de transferencia de calor en estado transitorio y en 3D [16]. En este estudio se despreció la transferencia de calor por gradiente de humedad en la tierra, además de considerar que los tubos tienen una sección transversal cuadrada con el fin de facilitar los cálculos sin sacrificar exactitud. Se determinó que la velocidad óptima a la que se debe hacer circular el aire en el interior de los tubos del EAHE es de 4 m/s. De igual manera se observó que la capacidad de almacenamiento de energías del suelo es mayor con el incremento de humedad, sin embargo, este efecto es despreciable al incrementar la longitud del tubo y al disminuir la velocidad del aire. Por último se concluyó, que al incrementar la profundidad a la cual son instalados los tubos aumenta la capacidad de almacenamiento del suelo.

En 1999 se desarrollaron dos expresiones para predecir la variación periódica de la temperatura del suelo con la profundidad [17]. Se basaron en la ecuación del balance de energía en la superficie del suelo y en la suposición de que la variación de la temperatura en la superficie del suelo tiene forma de una onda sinusoidal o

una serie de Fourier. La ecuación del balance de energía implica la variación periódica de la radiación solar, la temperatura atmosférica y el flujo de calor latente debido a la evaporación. Un estudio paramétrico mostró que la temperatura del suelo y la amplitud del flujo de calor en el suelo aumentan con el aumento en la humedad relativa del aire y la capacidad de absorción del suelo. Por el contrario, disminuyen con el aumento en la fracción de evaporación y la velocidad del viento. Los valores de la profundidad de amortiguación son casi los mismos, mientras que la temperatura del suelo correspondiente está influida significativamente por los diversos parámetros.

En 2002 se presentan dos métodos para estimar la variación de la temperatura en el suelo, un modelo determinista y el otro utilizando redes neuronales [18]. Los dos métodos son probados y validados con mediciones realizadas en suelos desnudos y cubiertos de pasto corto en Atenas y Dublín . Al realizar la comparación de los dos modelos se observó que la técnica inteligente propuesta es capaz de estimar la distribución de la temperatura superficial del suelo. En el modelo analítico determinista se utilizó la ecuación diferencial de conducción de calor en estado transitorio y utilizando como condición de frontera en la superficie del suelo la ecuación de balance de energía. El modelo de red neuronal fue basado en un algoritmo de retropropagación para la estimación de valores de la temperatura de la superficie del suelo durante cada hora. Este modelo utilizó varios parámetros climáticos de entrada tales como la temperatura ambiente del aire, la humedad relativa y la radiación solar.

En 2006 se realizó un análisis termodinámico donde se obtuvo parámetros importantes para la construcción de los intercambiadores de calor tales como: diámetro y longitud del tubo instalado bajo tierra, además de los parámetros de operación como el flujo másico y efecto de calentamiento o enfriamiento [19]. Basado en estudios previos se considera que el suelo puede ser utilizado para el almacenamiento de calor para calefacción o enfriamiento de edificios y viviendas ya que la temperatura subterránea es diferente a la temperatura ambiente. En este análisis se consideró minimizar la generación de entropía a para mejorar el rendimiento termodinámico del sistema ya que en trabajos anteriores en sistemas similares se refieren principalmente al rendimiento térmico de los sistemas y no en el diseño y criterios de operación. De los resultados se observó que a medida que se incrementa el diámetro del tubo la entropía disminuye logrando así un parámetro de diseño en este caso, en forma de una ecuación que relaciona el diámetro y la longitud del tubo.



En 2013 se propone mejorar un modelo para la predicción de las temperaturas diarias del suelo (cerca de la superficie) en función de la profundidad y del tiempo [20]. En esta investigación se pretende que la mejora del modelo proporcione resultados de las variaciones diarias de la temperatura del suelo, que se modelaron a partir de las fluctuaciones diarias de la temperatura del aire utilizando una función sinusoidal de tiempo y profundidad. Para este estudio se consideró flujo de calor transitorio unidimensional, suelo homogéneo y difusividad térmica constante. Las temperaturas del suelo medidas a profundidades de 5 cm, 10 cm, 20 cm y 300 cm se compararon con resultados experimentales para validar la precisión del modelo. Al comparar las mediciones realizadas durante un año a una profundidad de 5 cm, 10 cm, 20 cm y 300 cm el porcentaje máximo promedio de errores fueron 10.78 %, 10 %, 10.26 % y 14.95 %, respectivamente. Las mediciones de la temperatura del suelo a 3 m de profundidad fueron hechas en el sistema de intercambiador de calor tierra-aire (EAHE) instalado en el Instituto de energías Solar en la Universidad Ege, Bornova, Izmir. Se tomaron temperaturas medias diarias del suelo a profundidades de 5 cm, 10 cm y 20 cm de la estación meteorológica estatal de Izmir y finalmente se realizó un análisis de las fluctuaciones solares en la temperatura del suelo como una función de profundidad de 5 cm a 300 cm.

En 2016 se desarrolló un nuevo modelo para mejorar la predicción de la variación de temperatura en el suelo en función de la profundidad y el tiempo basado en datos meteorológicos [21]. El modelo utiliza la ecuación de balance de energías complementada con una correlación empírica para el cálculo de la temperatura promedio anual de la superficie del suelo. La ecuación de balance de energías se utiliza como una condición de frontera en la superficie del suelo con el propósito de determinar la amplitud y el ángulo de fase de la temperatura en este lugar, la temperatura media se calcula usando una correlación empírica. Este modelo es menos sensible a la variación de los factores de entrada, además de asumir una variación periódica de la radiación solar y la temperatura ambiente del aire. La validación del modelo se realizó con datos medidos en Varennes (Montreal-Canadá) y dos sitios en los EE. UU, Fort Collins (Colorado) y Temple (Texas ). De acuerdo a los resultados hubo variaciones máximas de las mediciones y las predicciones del modelo. Por lo tanto, el modelo desarrollado se propone como una herramienta útil para estimar la temperatura de los perfiles del suelo con el fin de que este modelo sea utilizado en diversas aplicaciones medioambientales y energéticas .

En 2016 se realizaron simulaciones numéricas para investigar el rendimiento

térmico y la temperatura del suelo alrededor de los túneles intercambiadores de calor tierra aire (EATHE) durante su funcionamiento en verano [22]. En este estudio se encontró que durante el funcionamiento de los EATHE se presentaba el problema de acumulación de calor alrededor de los tubos debido a que el suelo contaba con un alto calor específico y un bajo contenido de humedad, por tal motivo el rendimiento del EATHE era restringido con el paso del tiempo, con estos resultados, se propone tres estrategias de eliminación del calor acumulado, purga nocturna durante la operación en verano, operación diurna durante el invierno y se estimó la operación nocturna durante el invierno para estimar el grado de recuperación del suelo. Los resultados de la simulación mostraron que los COP promedio para el verano, con purga nocturna, el día en invierno y la noche de invierno fueron 4.23, 3.68, 5.01 y 6.65 respectivamente y que el funcionamiento día/noche de invierno ofrece calefacción y mejor suelo para el próximo verano.

### **1.3.2. Estudios teóricos de intercambiadores de calor tierra-aire**

En 1996 se realizó un estudio en Irlanda donde se propuso un modelo numérico preciso para la evaluación del potencial de calentamiento de un solo intercambiador de calor tierra-aire y de un sistema de tubos en paralelo, en donde se utilizaron datos climáticos reales [23]. Para los datos de entrada del modelo se utilizaron las mediciones registradas de la temperatura del suelo y la del aire a temperatura ambiente de la ciudad de Dublín. Además, se analizaron los efectos de los principales parámetros que influyen en el rendimiento térmico de los EAHE tales como: la longitud del tubo, el radio, la velocidad del aire en el interior del tubo y la profundidad a la cual se instalan los tubos. Se utilizó la técnica de superposición para calcular el rendimiento térmico de múltiples intercambiadores de calor tierra-aire en paralelo. Por lo tanto, las fórmulas que calculan el rendimiento de N tubos paralelos enterrados en el suelo se obtienen directamente del análisis térmico de un solo tubo utilizando la teoría de la conductancia térmica.

Se crearon un conjunto de curvas donde se observaron los cambios que se producen al variar los parámetros de diseño, como la longitud del tubo, el radio del tubo, la velocidad del aire dentro del tubo y la profundidad del suelo debajo de la superficie de la Tierra, logrando demostrar que debe usarse efectivamente para calefacción y para precalentar el aire en el interior de edificios.

En 1997 se realizaron simulaciones numéricas en un intercambiador de calor tierra-aire, evaluando el desempeño técnico y económico, acoplado al sistema de

calefacción y enfriamiento de un edificio [24]. Para calcular el gradiente de temperatura en el suelo se utilizaron ecuaciones de energías en estado permanente para cada paso de tiempo. La tierra fue dividida en capas horizontales y se consideró que cada capa tiene una temperatura uniforme. Todos los tubos fueron puestos en paralelo dentro de la misma capa horizontal. Los datos de entrada del código para la simulación con la distribución de las temperaturas externas y de la intensidad de la radiación solar durante el día. La eficiencia del Intercambiador de Calor Tierra-Aire mejoró a medida que se incrementó la longitud del tubo desde 5 hasta 50 m, en intervalos de 5 m. En esta configuración, la temperatura del aire a la salida del tubo fue de un valor cercano a los 16 °C en verano y a los 8 °C en invierno. Dichos valores son muy cercanos a los de la suelo a 2.4 m de profundidad, distancia a la que se instalaron los tubos del intercambiador, mientras que la temperatura ambiente promedio fue de 37.5 °C en verano y 2.5 °C en invierno.

En 2002 Se desarrolla un modelo matemático para calcular la temperatura del suelo y el aire en un intercambiador de calor para un sistema de ventilación [25]. El modelo se basa en la representación de la temperatura en forma de integral de Fourier utilizando una solución analítica. Se analizó la disminución de la eficiencia del Intercambiador con la reducción del espacio entre los tubos, así mismo se evaluó la dependencia de la potencia térmica en función de la longitud, profundidad de la instalación tasa del flujo másico del aire y diámetro de los tubos. Dentro de los resultados encontrados se obtuvo una expresión analítica para la longitud óptima del tubo y se realizó un cálculo de la evolución de la potencia térmica del sistema durante 10 años de funcionamiento solo en periodo invernal. Estos resultados fueron validados con datos experimentales.

En 2004 se desarrollo un modelo térmico para investigar el potencial del uso de la energías térmica que se almacena en el suelo para el calentamiento o enfriamiento de invernaderos, este sistema integrado al invernadero se encuentra ubicado en IIT, Delhi, India [26]. El modelo fue validado con datos experimentales realizados a lo largo del año 2003. Se realizaron estudios paramétricos al EAHE incorporado al invernadero cuyos resultados mostraron los efectos de la longitud de la tubería enterrada, el diámetro de la tubería, el caudal másico, la profundidad del suelo y los tipos de suelo en las temperaturas del aire en el interior del invernadero. Con los parámetros experimentales se encontraron temperaturas promedio entre 7 a 8 °C más altas en invierno y de 5 a 6 °C más bajas en verano utilizando el EAHE en el invernadero. De igual manera se encontró que las temperaturas del aire del invernadero aumentan en el invierno y disminuyen en el verano con el aumento

de la longitud de la tubería, la disminución del diámetro, la disminución del flujo másico de aire en el interior de la tubería y aumentando la profundidad hasta 4 m. Se hicieron comparaciones entre los datos experimentales y los estimados con el modelo por medio de coeficiente de correlación, mostrando pequeñas variaciones.

En 2005 se desarrollo un modelo numérico para predecir y comparar el rendimiento térmico de dos sistemas de tubos, un colector tierra aire y un intercambiador de calor tierra aire integrados a un invernadero en las instalaciones del Instituto Indio de Tecnología, Delhi, India [27]. En ambos modelos se mantuvo la misma longitud de los tubos, la comparación del rendimiento térmico se realizó para elegir un método de calentamiento adecuado en el clima de India. El modelo fue validado con datos experimentales realizados en el periodo de noviembre del 2002 a marzo del 2003 tomando de referencia los días claros y soleados. La comparación se realizo de acuerdo a la nivelación de la carga térmica y el potencial de calefacción total, de los resultados se observó que al utilizar el colector tierra aire la temperatura en el interior del invernadero eran 2 a 3 °C más altos que al utilizar el intercambiador de calor.

En 2006 se utilizan redes neuronales artificiales y diseño orientado para proponer una herramienta que pueda ayudar al diseño, evaluación del comportamiento de cualquier configuración final del intercambiador de calor tierra-aire [28]. Se desarrollaron dos modelos para determinar el rendimiento pasivo de enfriamiento y calefacción de un edificio. El modelo determinista se desarrolló analizando la transferencia simultanea de calor y masa en la tierra, el modelo inteligente es un desarrollo del modelo de red neuronal basado en datos. Las 6 variables que intervinieron en el rendimiento térmico del EAHE fueron: la longitud, humedad, temperatura ambiente del aire, temperatura de la superficie del suelo, temperatura de la profundidad del suelo y flujo másico del aire. Dentro de los resultado se encontró que el algoritmo desarrollado puede calcular la temperatura del aire a la salida y por lo tanto, el potencial de calentamiento y enfriamiento del EAHE. Este modelo se comparo con datos experimentales donde el modelo inteligente estima la temperatura del aire a la salida con una precisión de 2.6%, mientras que el modelo determinístico muestra una precisión de 5,3%.

En 2007 se desarrolló un modelo numérico transitorio e implícito basado en la transferencia de calor y dinámica de fluidos computacional, con el fin de estimar el rendimiento térmico y la capacidad de enfriamiento de los sistemas de tubería tierra-aire [29]. En el modelo se utilizó la tecnología de superposición y

se implementó en la plataforma CFD (dinámica de fluidos computacional) CFD PHOENICS, que incorporó el campo de temperaturas del suelo y el flujo de aire turbulento que hay en el interior de los tubos enterrados. El modelo fue validado con estudios experimentales realizados en el sur de China. Se evaluaron los parámetros operativos como: la longitud, el radio, la profundidad y el caudal de aire, obteniendo como resultado el rendimiento térmico y la capacidad de enfriamiento diaria hasta de 74.6 kWh.

En 2007 se desarrolló otro modelo teórico de un intercambiador de calor tierra-aire [30]. Este modelo tiene un enfoque numérico bidimensional transitorio que permite el cálculo de la temperatura del suelo en la superficie y a diferentes profundidades. El modelo numérico se utilizó para simular el funcionamiento del sistema de calefacción en Renania-Palatinado, Alemania. Se analizó el potencial de calentamiento y enfriamiento del sistema en condiciones climáticas reales. La condición de frontera en la superficie del suelo se deriva de una ecuación de balance de energía, que implica el intercambio de energías por convección entre el aire y el suelo, la radiación solar absorbida por la superficie del suelo y el flujo de calor latente debido a la evaporación en la superficie del suelo, así como la radiación. Se concluyó que la energía transferida entre el intercambiador de calor y el suelo depende significativamente de diferentes parámetros de diseño como la profundidad de la tubería, su diámetro y el material de fabricación. En este estudio, la temperatura del aire medida osciló entre 15 y 35 °C, aproximadamente. La temperatura del suelo a una profundidad de 1, 2 y 4 m fue mayor a 0 °C durante todo el año, con una media anual de 20, 7 y 4 °C, respectivamente. Estas observaciones sugieren que el uso de la energía térmica del suelo para la calefacción y refrigeración es útil.

En 2014 se realizó un estudio numérico donde se determinó el rendimiento térmico de un EAHE para tres ciudades de México [31]. Se analizaron tres diferentes condiciones climáticas, un clima templado (Ciudad de México), un clima húmedo (Mérida, Yucatán) y un clima extremo (Cd. Juárez, Chihuahua). Se analizó el efecto que tiene el aislamiento térmico a la salida del EAHE. Los resultados mostraron que para el clima de la ciudad de México se recomienda un aislamiento con un espesor de 0.05 m (2 in) debido a que este espesor mejoró el rendimiento térmico del EAHE. En invierno, el aislamiento aumentó el efecto de calentamiento hasta 2 °C con respecto al EAHE sin aislamiento. En verano, el aislamiento térmico proporcionó una mejora en el efecto de enfriamiento hasta 1.3 °C. En Mérida los resultados indican que el aislamiento térmico con un espesor de 0.05 m es adecuado. En Invierno, esta medida mejoró el efecto de calentamiento hasta

2.6 °C con respecto al EAHE sin aislamiento. Para Cd. Juárez durante el verano, el comportamiento térmico de la EAHE no mejoró con el aislamiento térmico. Por lo tanto, se concluye que el uso del aislamiento térmico para para la ciudad de México y Mérida logra un funcionamiento adecuado del EAHE durante todos los meses en verano, ya que evitó la ganancia de calor indeseable a la salida. En otras palabras, el aislamiento mejoró el efecto de enfriamiento hasta 5 °C con respecto al EAHE sin aislamiento.

En 2017 se presenta el modelado y la simulación de un intercambiador de calor tierra-aire (EAHE), empleado como un sistema de enfriamiento de aire para condiciones climáticas del sur de Argelia. [32]. La profundidad de instalación del sistema se calculó teniendo en cuenta las propiedades físicas del suelo en la región donde se realizó el estudio. En este estudio se llevó a cabo un análisis paramétrico considerando la longitud, el radio y la velocidad de aire en el interior del tubo, teniendo como resultado la máxima capacidad de enfriamiento de 1.755 kWh al día y de 246.815 kWh en un periodo de un año.

En 2018 se desarrolló un modelo numérico que puede ser usado para el diseño adecuado de los intercambiadores de calor tierra-aire (EAHE) multitubos, desde el punto de vista de las características del flujo [33]. El modelo fue desarrollado mediante el software CFD Ansys Fluent, fue validado con datos experimentales obtenidos de intercambiadores de calor tierra-aire de múltiples tubos. Con este modelo se investigaron las pérdidas de presión y el flujo de aire en cada uno de los tubos del intercambiador, los resultados mostraron que el flujo de aire en cada tubería no son iguales, de igual manera se pueden analizar otros parámetros que intervengan en el comportamiento del EAHE. El uso de este tipo de modelos y el uso de CFD son necesarios en el proceso de diseño de EAHE y para los ingenieros de HVAC (calefacción, ventilación y aire acondicionado), logrando una optimización la estructura geométrica de los EAHE de múltiples tubos con el fin de ahorrar energías y disminuir los costos operativos de los edificios.

En 2018 se analizó el rendimiento de un intercambiador basado en estudios experimentales utilizando un simulador de laboratorio [34]. De acuerdo a trabajos anteriores se ha demostrado que la profundidad de la tierra es capaz de producir enfriamiento y calentamiento durante todo el año y que es posible extraer el enfriamiento y la calefacción por medio de una técnica de intercambiador de calor tierra-aire(EAHE). En este estudio se analizó las limitaciones que tiene el método experimental ante las variaciones rápidas en el parámetro de entrada. Con este

simulador se analizó la variación de la temperatura del aire en la entrada de 31 a 35 °C, la temperatura del suelo (Tg) de 23 a 25 °C y la tasa de flujo de aire de 0.03-0.07 kg/s y se utilizaron 8.7 m de tubería de PVC. Al analizar los resultados se encontró que la mayor reducción de temperatura con 9.62 °C se dio cuando el flujo fue de 0.03 kg/s y una Tg de 23, esto es un 27.5 % con respecto a la temperatura de entrada. Los resultados experimentales fueron validados con resultados de campo de otros investigadores.

### **1.3.3. Estudios experimentales de intercambiadores de calor tierra-aire**

En 1999 se realizó un estudio de un EAHE que consta de 2 tubos enterrados en paralelo, cuyos materiales son PVC y acero [35]. Se determinó la cantidad de calor transferida a través de cada tubo para diferentes distancias de separación. Los resultados muestran que el intercambio de calor entre los tubos y la tierra aumenta al incrementarse la distancia entre tubos, lo cual sucede independientemente de la estación del año en la que se encuentren. Esto se debe a que la tierra se ve perturbada térmicamente ante la cercanía de los tubos intercambiadores de calor, calentándose y enfriándose más rápidamente en verano e invierno respectivamente. La contribución al intercambio de calor del tubo de acero osciló entre el 50 % y 54 % sobre la contribución al tubo de PVC.

En 2011 se realizó un estudio para determinar la factibilidad de utilizar un sistema Fougara (EAHE) para calentar, enfriar y ventilar [36]. Los datos del funcionamiento del EAHE fueron obtenidos experimentalmente de un Fougara instalado en el Desierto de Sahara y otro instalado en Adrar, Algeria. El Fougara están enterrado a una profundidad donde los cambios climáticos con respecto a la estación del año influyen en la temperatura del suelo, la cual se aproxima a la temperatura ambiente anual promedio, por lo tanto, el aire que circula a través del EAHE tiende a aproximarse a esta temperatura durante todo el año, mejorando el confort térmico dentro de la edificación.

En 2014 se investigó experimentalmente el potencial térmico de los Intercambiadores de calor Tierra-Aire (EAHE) se experimentalmente para una ubicación en Viamau, ciudad ubicada en el sur de Brasil [37]. Tres conductos independientes están enterrados en el suelo, los conductos A y B se instalan a una profundidad de 1.60 m y 0.60 m de distancia, mientras que el conducto C están instalado a una profundidad de 0.50 m. las las condiciones térmicas de una construcción llamada

Casa Ventura se mejoran con la EAHE. Las temperaturas para el suelo, el aire externo y los conductos enterrados en varias posiciones se adquieren a lo largo de un año(2007). El principal propósito aquí es el logro del comportamiento transitorio de los campos de temperatura para el aire exterior, el suelo y conductos enterrados y los mejores períodos de tiempo para el empleo del dispositivo. Los resultados mostraron que los meses de mayo y febrero fueron los mejores para calentar y enfriar el aire utilizado en Casa Ventura, respectivamente. Además, se desarrolló una base de datos completa sobre las temperaturas transitorias del suelo, externas aire y dentro del edificio.

En 2014 se realizó un estudio acerca de la viabilidad y eficiencia al acoplar el EAHE a un sistema de ventilación mecánica para obtener confort térmico en una casa típica en un entorno rural [38]. Se investigó la selección de los materiales de construcción de alta eficiencia energética que pueden reducir la energías operativa en toda la vida útil de la vivienda. Esto se hace mediante la consideración de diferentes materiales de construcción, junto con el uso de un intercambiador de calor tierra-aire para el suministro de aire fresco. Al conocer las condiciones interiores y exteriores se seleccionan los materiales de construcción, el controlador de ventilación determina la cantidad de caudal necesario y la temperatura del aire interior para lograr el confort térmico. Se asumen diferentes configuraciones de pared por cada una de las zonas. Se encontró que el uso de una configuración óptima de la pared en cada zona, junto con la incorporación de un EAHE contribuye a un ahorro de energías del 76.7 % en comparación con sistemas convencionales.

En 2017 se propone un nuevo diseño de sistema atmosférico de enfriamiento pasivo de aire que consiste en una tubería(intercambiador de calor de tierra-aire) [39]. El objetivo de este sistema es enfriar el aire ambiente cálido para aplicaciones en áreas cálidas y áridas. El sistema consta de un tubo de cobre de 1.5 m de longitud con un diámetro interno de 1.5 cm el cual fue enterrado bajo el suelo contenido en un tambor de acero galvanizado. Se utilizaron un ventilador y un calentador de aire en la entrada de la tubería para inducir aire caliente dentro de la tubería que se enfría en el intercambiador de calor tierra aire de la tubería. Las pruebas se realizaron bajo condiciones controladas tales como temperatura del aire inducido, flujo tasa y temperatura a granel del suelo. El rendimiento del intercambiador de calor se estudió para tres diferentes niveles de compactación del suelo con distintos valores de densidad relativa, relación de vacío y porosidad. Los resultados mostraron que la temperatura del aire inducido se redujo en el rango entre 8 y 24 °C a través de la tubería del intercambiador de calor tierra-aire y la efectividad



del sistema variaron entre 0.3 y 0.7 dependiendo de la operación condiciones y compactación del suelo.

En 2017 El presente estudio informa los resultados de una campaña de monitoreo de 12 meses de duración de un sistema de intercambiador de calor horizontal tierra-aire (EAHX) en un complejo escolar en Imola, Italia [40]. El sistema consta de más de 2 km de tuberías enterradas, representa una de las mayores aplicaciones italianas de esta tecnología. Se notaron diferencias considerables entre la temperatura del aire de entrada y de salida tanto en invierno como en verano. La temperatura del aire y la humedad relativa se presentaron en una gráfica psicrométrica, mientras que la energía y el rendimiento del sistema se analizó en base a datos de intercambio de calor sensible. Los resultados monitoreados se compararon con otros tres casos presentados en la literatura para verificar los valores de los parámetros de diferentes EAHX en diversos climas y condiciones de diseño.

En 2018 se presenta un estudio experimental de un Intercambiador de calor Tierra-Aire (EAHE) en Cunduacán, Tabasco donde las condiciones climáticas son cálidas y húmedas (referencia). El EAHE esta conformado de una tubería de 6.0 m de largo, la cual se encuentra enterrada 2.5 m, un tubo de sección de entrada de 3.0 m, y un tubo de sección de salida de 3.0 m. El EAHE fue fabricado con tubos de PVC con un diámetro de 101.6 mm (4 in), la sección de salida estaba aislada térmicamente para mejorar su rendimiento. Las mediciones se realizaron durante seis meses, así mismo, se se observó la temperatura del suelo de 0 a 2.5m en intervalos de 0.25 m, la temperatura del aire en la entrada y en la salida. Dentro de los resultados se encontró que la temperatura promedio del suelo a 2.5 m de profundidad se mantuvo entre 26-28 °C. El EAHE proporciono enfriamiento durante el día y calentamiento durante la noche, excepto en la temporada de invierno que trabajó la mayor parte del tiempo como un calentador. El potencial máximo de enfriamiento del EAHE fue de 5.5°C. La energía máxima eliminado como enfriador fue de 4.438 kWh para el mes de agosto. Los resultados muestran que con el EAHE es posible enfriar el aire que circula en el interior.

#### **1.3.4. Estudios numéricos y experimentales de intercambiadores de calor tierra-aire**

En 1995 se presenta el desarrollo de un nuevo método integrado para calcular la contribución de los intercambiadores de calor tierra-aire para reducir la carga de enfriamiento de los edificios [41]. El método se basa en el principio de la tempera-

tura del punto de equilibrio y permite calcular el valor horario de la temperatura de equilibrio del edificio, así como la carga de enfriamiento diaria del edificio y la contribución del EAHE. Se utilizan datos del software TRNSYS incluyendo rutinas detalladas para simular dinámicamente el funcionamiento de intercambiadores de calor de tierra aire. Los resultados muestran que el método es de precisión suficiente y por lo tanto, se puede utilizar durante la fase de diseño previo para el dimensionamiento de los intercambiadores de calor. Se realizan cálculos de la carga mensual y anual requerida por el edificio, estos cálculos se realizan con TRNSYS y con el nuevo método, donde se observa que existe una ligera variación entre los datos obtenidos. Respecto a la carga anual de enfriamiento, la diferencia absoluta entre los dos conjuntos de valores están entre 0.0 y 15% con una media valor cercano al 6.3%. La diferencia absoluta entre los valores pronosticados mensualmente oscilan entre el 0.0 y el 25%.

En 2010 se realizó el estudio experimental y numérico de un intercambiador de calor Tierra-Aire para enfriamiento de aire, conectado a un edificio residencial ubicado en Marrakech (Marruecos) que cuenta con clima semi árido caliente [42]. El sistema consta de tres tubos paralelos de PVC de 72 m de longitud cada uno y 15 cm de diámetro interior, instalados a una profundidad de 2,2-3,2 m. Cada tubo están equipado con un ventilador para forzar la circulación del aire, en verano se realizaron mediciones de la temperatura y humedad del aire en todo el intercambiador, en la entrada y salida para dos valores fijos del caudal de aire. Los resultados experimentales mostraron que es un buen sistema semi-pasivo para el enfriamiento de aire. Se registraron temperaturas de salida de aproximadamente 25 °C aun con temperaturas de 40 °C a la entrada. De igual manera se demostró que las distancias optimas del EAHE se encuentra entre 20 y 70 m para poder lograr una reducción de la temperatura del aire a la salida del EAHE.

En 2016 se presento estudio para saber si el potencial de calentamiento del EAHE puede ser mejorado integrando un conducto solar de calentamiento de aire (SAHD por sus siglas en ingles), debido a que son insuficientes para satisfacer los requisitos de confort térmico en condiciones de invierno [43]. El bajo potencial de calentamiento de estos sistemas puede mejorarse integrando el sistema con el conducto solar de calentamiento del aire (SAHD). El modelo se genera utilizando la herramienta de simulación TRNSYS 17 y se valida contra la investigación experimental en un montaje experimental en Ajmer, India. El experimento se realizó durante la temporada de invierno, donde se evaluó el sistema para diferentes velocidades de flujo de entrada, longitud y profundidad del tubo enterrado. De los

resultados experimentales, se observó que la profundidad de 3.7 m es suficiente para la instalación del EAHE y la longitud de tubería de 34 m es suficiente para obtener una temperatura de salida óptima. De igual manera se observó que el aumento de la velocidad del flujo produce una reducción de la temperatura de salida. El COP del sistema también aumentó hasta 6.304 cuando se asistía con el conducto solar de calentamiento del aire. Los resultados obtenidos de los datos del experimento están en buen acuerdo con los resultados simulados dentro de la variación de hasta el 7.9 %.

## **1.4. Planteamiento del problema**

La constante demanda de energías ha generado dificultades de abastecimiento, agotamiento de los recursos energéticos y considerables impactos ambientales (calentamiento global, cambio climático etc.). El consumo de energías a nivel mundial ha aumentado tanto a nivel residencial como comercial en forma constante, alcanzando cifras entre un 20 % y 40 % en los países desarrollados, superando a los otros sectores importantes: industrial y de transporte. El aumento de la población, la constante demanda en los servicios de construcción y niveles de confort, junto al aumento del tiempo de los edificios residenciales, aseguran una tendencia alcista en el consumo de energía, que esta aumentara en el futuro. Por esta razón el uso de las energías renovables y la eficiencia energética en los edificios es un objetivo primordial para las políticas públicas a nivel mundial [44].

Debido a la problemática que nos encontramos y con el fin de implementar sistemas que contribuyan a lograr el confort térmico esta tesis se presenta el estudio teórico y experimental del comportamiento térmico anual de un intercambiador de calor geotérmico (ICG).

## **1.5. Objetivo general**

Realizar el estudio teórico y experimental del funcionamiento térmico anual de un intercambiador de calor geotérmico ubicado en las villas de la Universidad de Quintana Roo, mediante la medición de las variables climáticas que intervienen en su funcionamiento y un análisis teórico, para cuantificar el ahorro de energías que se obtiene al implementar los intercambiadores de calor geotérmicos.

### **1.5.1. Objetivos específicos**

A continuación se presentan los objetivos específicos que se realizarán durante la ejecución del proyecto.

- Instrumentar y modificar el ICG actual.
- Instalar una sonda para medir el perfil de temperatura en el subsuelo (hasta 2.0 m).
- Medir temperatura e irradiancia in situ durante un año.
- Evaluar el funcionamiento térmico del ICG.
- Cuantificar el ahorro de energías anual del ICG

## **1.6. Justificación**

Es de suma importancia realizar estudios tanto experimentales como teóricos de los intercambiadores de calor geotérmicos. En México existen muy pocas investigaciones experimentales sobre el comportamiento térmico de ICG para la edificación, por lo cual, esta investigación propone la evaluación térmica experimental de un ICG para las condiciones climáticas de Chetumal, Quintana Roo, se pretende determinar si este tipo de dispositivos son adecuados en la contribución de alcanzar el confort térmico en viviendas y edificios.

## **1.7. Alcance del tema**

En este trabajo se tomará en cuenta el estudio del comportamiento de la temperatura del suelo en la superficie y a cuatro profundidades diferentes (0.5, 1.0, 1.5 y 2.0 m), temperaturas de entrada, temperaturas de salida, así como la distribución de temperatura a lo largo del ICG para dos profundidades (1.0 y 2.0 m), se presenta el coeficiente de operación del sistema, además de un análisis teórico del sistema.

## 1.8. Hipótesis

El intercambiador de calor geotérmico (ICG) que se encuentra instalado en las villas de la Universidad de Quintana Roo, de la ciudad de Chetumal, disminuye la temperatura del aire que se hace circular a través de él, en 25 a 30% del valor de la temperatura del aire a la entrada. Se realizarán las pruebas necesarias para su validación.

## 1.9. Desarrollo experimental de la transferencia de calor de un ICG

El sistema ICG está ubicado en las Villas de la Universidad de Quintana Roo, en la Ciudad de Chetumal, Quintana Roo mostrado en la Figura 1.2. El clima de Chetumal ( $18.5^{\circ}$  N,  $88.3^{\circ}$  N) está clasificado como cálido sub-húmedo con lluvias en verano, su temperatura media anual varía entre 24 y 28 °C y la precipitación total anual, entre 700 y más de 1500 mm



Figura 1.2: Vista de planta de las villas universitarias (marcado en rojo la zona de instalación del ICG) [2].

### 1.9.1. Modelo físico del ICG

El modelo físico de los ICG se muestra en la Figura 1.3 y 1.4 [3], están constituidos con tubería de PVC de 15.24 cm (6 in) de diámetro y 6.0 m de longitud enterrados a 2.0 m y 1.0 m de profundidad respectivamente. El efecto de enfriamiento/calentamiento se midió con la finalidad de observar el efecto de la profundidad en el funcionamiento térmico del los ICG. En cada figura se muestra los puntos en dónde se realizaron las mediciones; temperatura de entrada ( $T_{in}$ ), temperatura de salida ( $T_{out}$ ) y temperatura en tres puntos en la zona horizontal del ICG ( $T_2, T_3, T_4$ ) a 1.5 m de separación uno de otro. Se instalaron extractores de aire a salida de la tubería y se controló la velocidad del aire a 0.5 m/s. Además, se midió la temperatura del suelo a diferentes profundidades (0, 0.5, 1.0, 1.5 y 2.0 m).

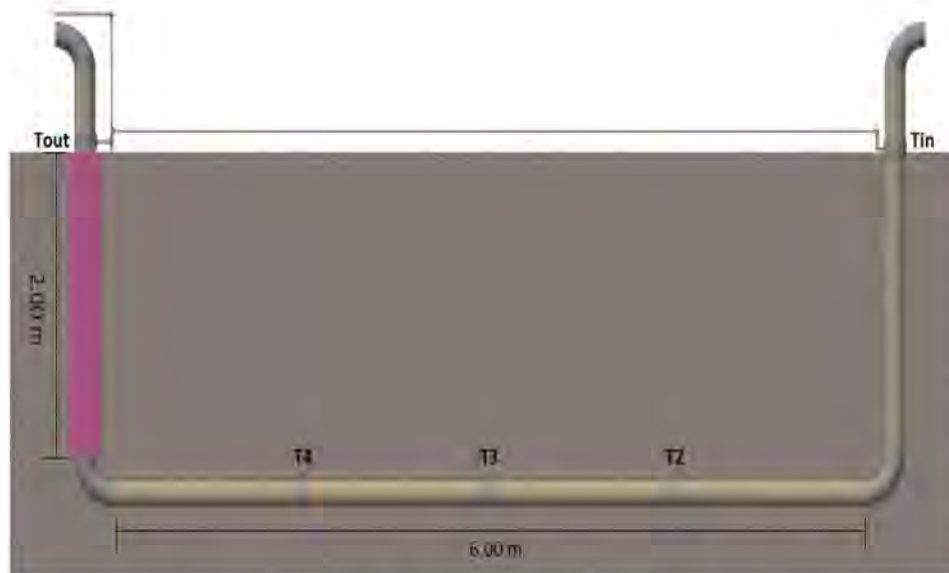


Figura 1.3: Intercambiador de calor geotérmico a 2.0 m de profundidad [3]

### 1.9.2. Instrumentación

En la instrumentación del ICG se utilizaron termopares tipo T (Omega, modelo TT-T30 de cobre-constantán de alta pureza, 99.9 % y aislamiento de Neoflón PFA), los cuales se conectaron a un sistema de adquisición de datos Agilent 34970A para su registro y almacenamiento en memoria. Posteriormente se realizó la reducción de datos en una computadora personal. Por otra parte, las variables climáticas como temperatura ambiente, humedad relativa, irradiancia, velocidad y dirección del viento y precipitación pluvial se registraron con una estación meteorológica automática de la marca DAVIS modelo Vantage PRO2. Los datos promedio anual

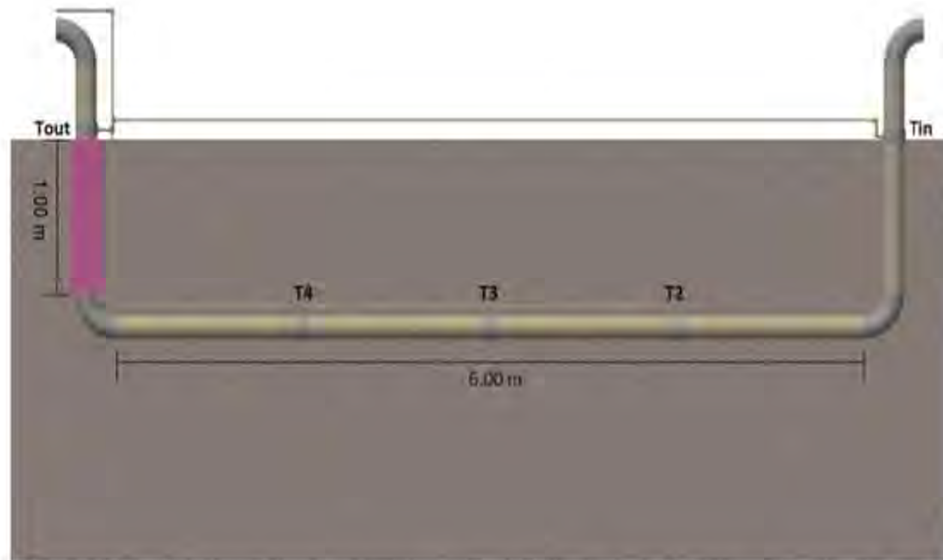


Figura 1.4: Intercambiador de calor geotérmico a 1.0 m de profundidad [3]

se muestran en la Tabla 1.1, finalmente, para determinar el perfil de temperaturas en el subsuelo, se instrumentó una tubería con cinco termopares con 50 cm de separación uno de otro. Dicha tubería fue instalada a 2 m de profundidad. Durante el proceso de experimentación se realizó el cambio de termopares, estos se reemplazaron por termopares las mismas características tipo T de la marca Omega modelo TT-T30 que es un cable dúplex de aleación cobre constantan con aislamiento de neoflon PFA de alto rendimiento cuyos valor máximo de temperatura es 150 °C. Dadas las características del termopar, estos no necesitan ser calibrados ya que su pureza es del 99.9 % lo que garantiza que las mediciones sean precisas y que la respuesta a cualquier cambio sea rápida para registrar los datos.

Tabla 1.1: Variables climáticas promedio anual (3 años) de la ciudad de Chetumal, Quintana Roo

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

### 1.9.3. Adaptaciones

De acuerdo a resultados anteriores [3] se observa que el aire que circula en el interior de los ICG sufre un calentamiento en su paso por la entrada, por lo que ( $T_{in}$ ) es mayor que ( $T_{amb}$ ) como muestra la figura 1.5, razón por la que fue necesario

realizar algunas adaptaciones a los ICG en la entrada y en la salida para evitar el calentamiento del aire, las modificaciones consistieron en colocar dos capas de fibra de vidrio al rededor del tubo de entrada y salida de un espesor de 2.5 cm cada una.

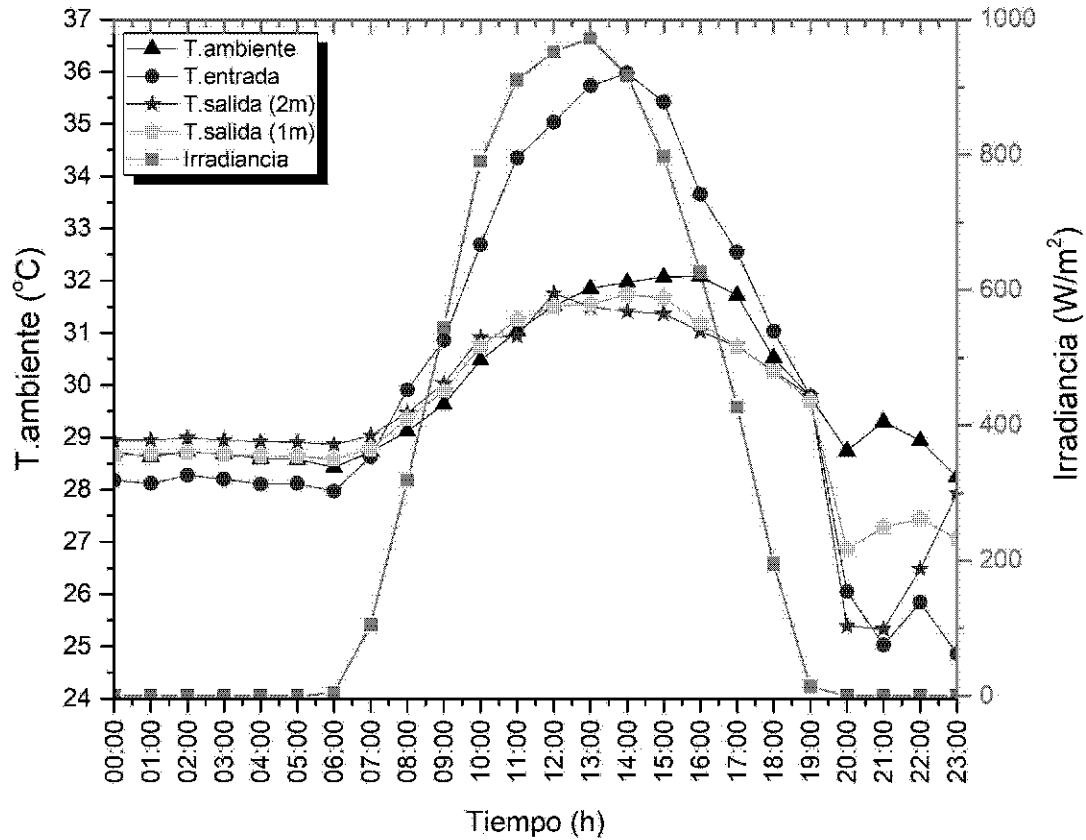


Figura 1.5: Comportamiento del ICG el 30 de julio del 2016

Otra de las adaptaciones que se realizaron fue instalar una malla en la entrada para evitar que los insectos entren al ICG como muestra la figura 1.6, así como la instalación de otra sonda para medir la temperatura del suelo en la superficie y a cuatro diferentes profundidades 0.5, 1.0, 1.5 y 2.0 m.





Figura 1.6: Protección en la entrada del ICG

## **1.10. Adaptación de un modelo numérico de transferencia de calor en el ICG**

En esta sección se presenta el modelo físico del ICG, así como las ecuaciones utilizadas para el análisis de transferencia de calor. Este modelo considera al fluido (aire) embebido en un medio sólido (tierra). El fluido se hace circular a través del tubo de manera que se enfría o calienta dependiendo de la temporada del año. En el capítulo 2 se describe el análisis de las temperaturas ambiente, superficie y el perfil de temperaturas a diferentes profundidades 0.5, 1.0, 1.5, y 2.0 m de profundidad. En el capítulo 3 se describe el análisis térmico anual del ICG, el coeficiente de operación (COP) instalado a 1.0 y 2.0 m de profundidad en la temporada cálida, el día más cálido, en la temporada fría y en el día más frío. En el capítulo 4 se describe el cálculo del ahorro de energía de los dos sistemas en cada temporada y en las dos diferentes profundidades para determinar la viabilidad del uso de los ICG

### **1.10.1. Modelo físico y matemático del ICG**

La tierra se puede considerar como un sumidero de calor, esto depende de la carga térmica que se haya almacenado durante la estación del año. A esta capacidad de almacenamiento de calor de la tierra se le llama inercia térmica y es utilizada para la calefacción o enfriamiento de edificios por medio de los ICG. El sistema que representa el modelo físico de la tierra se muestra en la figura 1.7 [31], en la cual se delimita el sistema a través de líneas punteadas representando la porción de la tierra donde ocurre el fenómeno de transferencia de calor, el calor extraído del tubo del ICG se transfiere del interior de la tierra hasta llegar a la superficie, donde es removido por el aire del medio ambiente.

La transferencia de calor dentro del ICG se presenta mediante la convección forzada, mientras que la transferencia de calor en la tierra se da a través de la conducción debido al contacto que existe entre el tubo y la tierra como se muestra en la figura 1.8 [45].

Para el análisis numérico se realizan las siguientes consideraciones:

- Ley de la conservación de masa. La cantidad de masa del fluido que entra menos la que sale es igual a la que se almacena.
- Primera ley de la termodinámica. Principio de conservación de energía, la energía puede cambiar de una forma, pero la cantidad permanece constante.

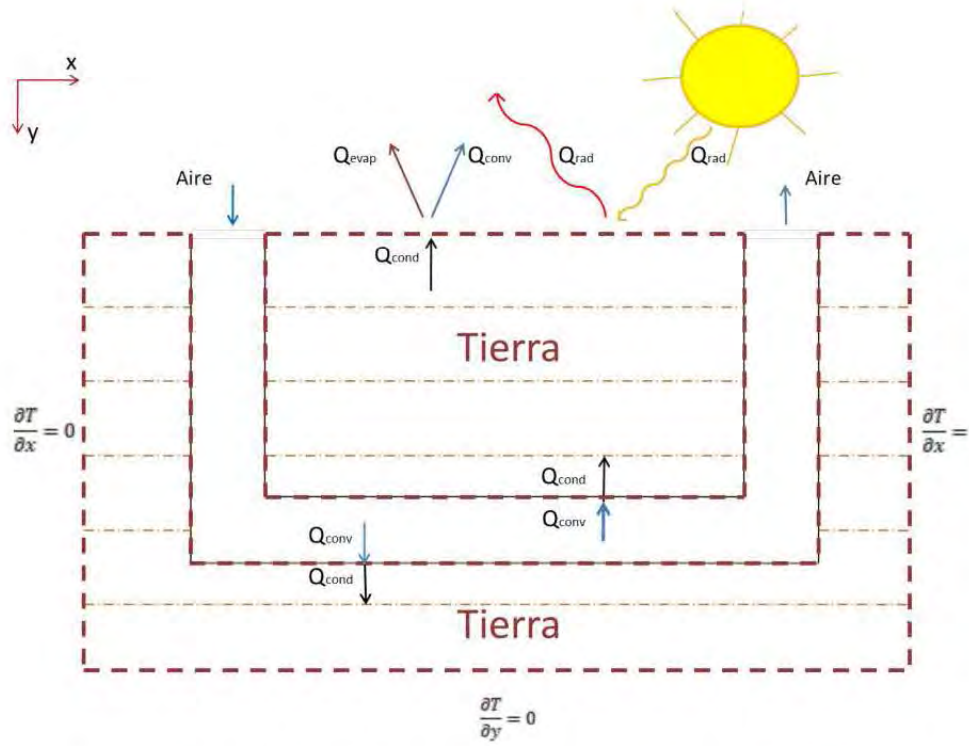


Figura 1.7: Modelo físico de la tierra con condiciones de frontera

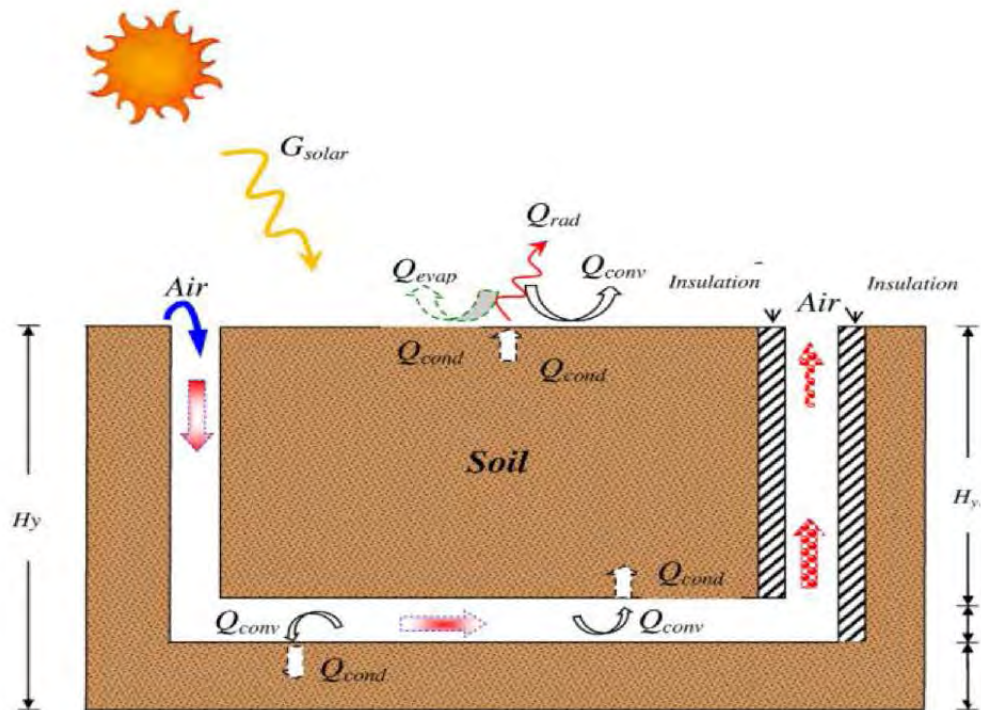


Figura 1.8: Protección en la entrada del ICG

- El sistema forma parte de un medio continuo. Los espacios intersticiales de las moléculas son tan pequeños que los efectos a nivel molecular en el fenómeno sujeto a estudio son despreciables.
- Se utiliza sistema de coordenadas rectangulares, con el fin de simplificar el modelo numérico sin sacrificar exactitud [46].

## Capítulo 2

# ANÁLISIS DEL PERFIL DE TEMPERATURAS

### 2.1. Introducción

En los últimos años hubo un incremento considerable en implementar sistemas para el acondicionamiento del confort térmico en edificios públicos y residenciales basados en sistemas que funcionan con algún tipo de energía renovable, entre ellas se encuentra el ICG que funcionan aprovechando la inercia térmica del suelo. Estos, consisten en una o más tuberías de PVC, concreto o algún otro material, enterradas en el suelo, a través de las cuales circula aire de forma natural (pasivo) o forzada (activo). A su paso por el interior, el aire cede o absorbe calor, dependiendo las condiciones ambientales del lugar en donde se instale.

A lo largo de los años, estudios numéricos y experimentales han permitido determinar las variables más sensibles en el diseño de [23–43], las cuales son flujo de aire, longitud, diámetro de la tubería y la profundidad a la que son instalados. Sin embargo, existen pocos trabajos experimentales para evaluar el funcionamiento térmico. En México existen muy pocas investigaciones experimentales sobre el comportamiento térmico que tiene el ICG en la edificación, por tanto, en esta tesis se propone la evaluación térmica experimental para las condiciones climáticas de Chetumal, Quintana Roo. La investigación comprende el estudio del comportamiento de la temperatura del suelo en la superficie y a cuatro profundidades diferentes (0.5, 1.0, 1.5 y 2.0 m).

Las mediciones realizadas en los ICG iniciaron el 01 de agosto del 2017 y finalizaron el 31 de julio del 2018. Estas, se realizaron de manera continua con intervalos de un minuto, posteriormente se realizó la reducción de datos obteniendo el promedio cada 10 min. y por último se sacó el promedio por hora en cada día.

## 2.2. Perfil de temperaturas del suelo

Para la evaluación de los ICG instalados a 1.0 y 2.0 m se realizó el análisis de la temperatura ambiente, del perfil de temperaturas las cuales comprenden la temperatura en la superficie ( $T_{surf}$ ) y de las cuatro diferentes profundidades (0.5, 1.0, 1.5 y 2.0m) en el lugar de instalación del ICG, la figura 2.1 muestra la temperatura correspondiente a cada mes durante el periodo de un año.

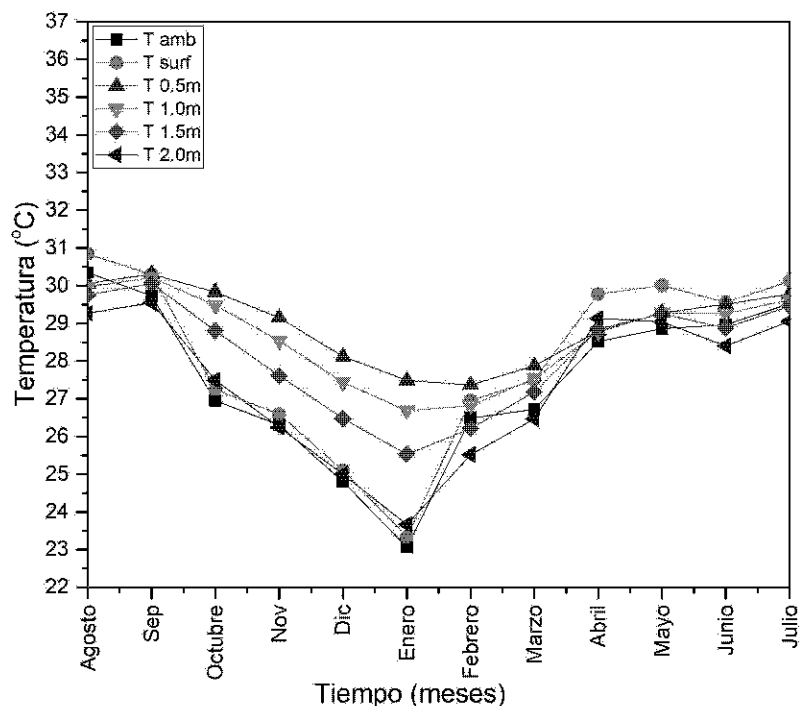


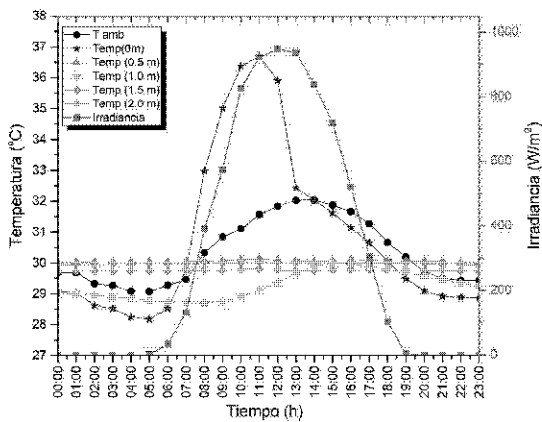
Figura 2.1: Promedio anual de  $T_{amb}$  y del perfil de temperaturas

Las temperatura promedio mensual más alta se registró en el mes de agosto y la más baja en el mes de enero. De acuerdo a estos resultados se realiza el análisis del de los ICG en dos temporadas, la temporada cálida que comprende los meses de agosto 2017, septiembre del 2017, abril, mayo, junio, julio del 2018, donde se registraron las temperaturas más altas y la temporada fría que comprende los meses de octubre a marzo del 2018.

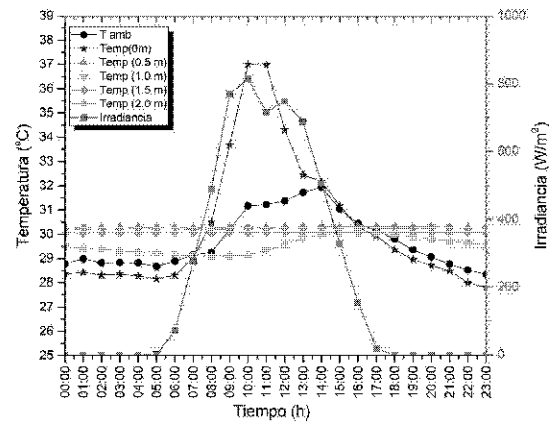
### 2.2.1. Temporada cálida

Conforme a los resultados anteriores a 2.0 m de profundidad se tiene una temperatura cercana a la temperatura ambiente promedio mensual en Chetumal, se observa que en los meses de agosto y septiembre se registran temperaturas promedio máximas, con temperatura ambiente de 30.34 °C y 29.72 °C respectivamente.

Los meses que presentan las temperaturas más altas se analizan de manera independiente con la figura 2.2 donde se muestra la temperatura ambiente, la temperatura en la superficie del suelo (0 m), la temperatura a diferentes profundidades y la irradiancia. En la figura se observa que la variación de temperatura es mínima en las profundidades (0.5, 1.0, 1.5 m), la temperatura a 0.5 y 1.0 m tienen un comportamiento similar a lo largo del mes debido a que tienen una variación promedio entre ellas de 0.8 °C, en estas profundidades se registran temperaturas de 30.02 y 29.94 °C respectivamente. La temperatura a 1.5 m tiene el mismo comportamiento que las temperaturas anteriores, sin embargo la temperatura más baja registrada es de 29.72 °C.



(a) Perfil de temperaturas promedio de agosto 2017



(b) Perfil de temperaturas promedio de septiembre 2017

Figura 2.2: Perfil de temperaturas promedio en temporada cálida

La temperatura a 2.0 m de profundidad no tiene el mismo comportamiento que las anteriores, en el horario de 0:00 a 13:00 hrs es menor que las anteriores, en esta profundidad la temperatura más baja se registra a las 8:00 hrs con un valor de 28.7 °C mientras que en el horario de 13:00 hrs la temperatura aumenta hasta llegar al mismo valor que la temperatura a 1.0 m de profundidad, al llegar las 16:00 hrs la temperatura desciende hasta que nuevamente la temperatura a 2.0 m es menor que las anteriores. Por otro lado, la temperatura ambiente así como

la temperatura en la superficie tienen un mínimo al amanecer, la temperatura ambiente aumenta y disminuye en función de la irradiancia, la temperatura en la superficie inicia el aumento con la irradiancia hasta llegar a un punto en que inicia el descenso el cual sucede cuando la sombra del edificio se proyecta en el punto de medición (lo cual ocurre a partir de las 11:00 hrs) aproximadamente. Se observa como la temperatura ambiente promedio del mes llega a los 32 °C a las 14:00 hrs en agosto y 31.9 °C a las 14:00 hrs en septiembre.

### **2.2.2. Temporada fría**

En los resultados mostrados en la sección 2.2 se observa que la temperatura ambiente, en la superficie y a 2.0 m de profundidad tiene un comportamiento similar a lo largo del año, sin embargo la temperatura más baja se registra en el mes de enero, en este mes existe una pequeña diferencia entre la temperatura ambiente, temperatura en la superficie y la temperatura a 2.0 m de profundidad, en las cuales se registran 23.06 °C, 23.33 °C, 23.67 °C respectivamente.

En la figura 2.3, la variación de temperatura es mínima en las diferentes profundidades (0.5, 1.0, 1.5 y 2.0 m), la temperatura a 0.5 y 1.0 m mantienen un comportamiento similar a lo largo del mes mostrando una variación promedio entre ellas de 0.8 °C, se registran temperaturas de 27.5 y 26.7 °C respectivamente, la temperatura a 1.5 m muestra el mismo comportamiento que las temperaturas anteriores, sin embargo la temperatura más baja registrada es de 25.4 °C.

Durante todo el mes a 2.0 m de profundidad se registra la temperatura más baja con un valor 23.1 °C a las 9:00 h. Por otro lado, la temperatura ambiente así como la temperatura en la superficie tienen un mínimo al amanecer de 19.6 y 19 °C respectivamente, incrementan con la irradiancia pero la temperatura en la superficie del suelo se reduce cuando la sombra del edificio se proyecta sobre el suelo (lo cual ocurre a partir de las 11:00 h) aproximadamente.



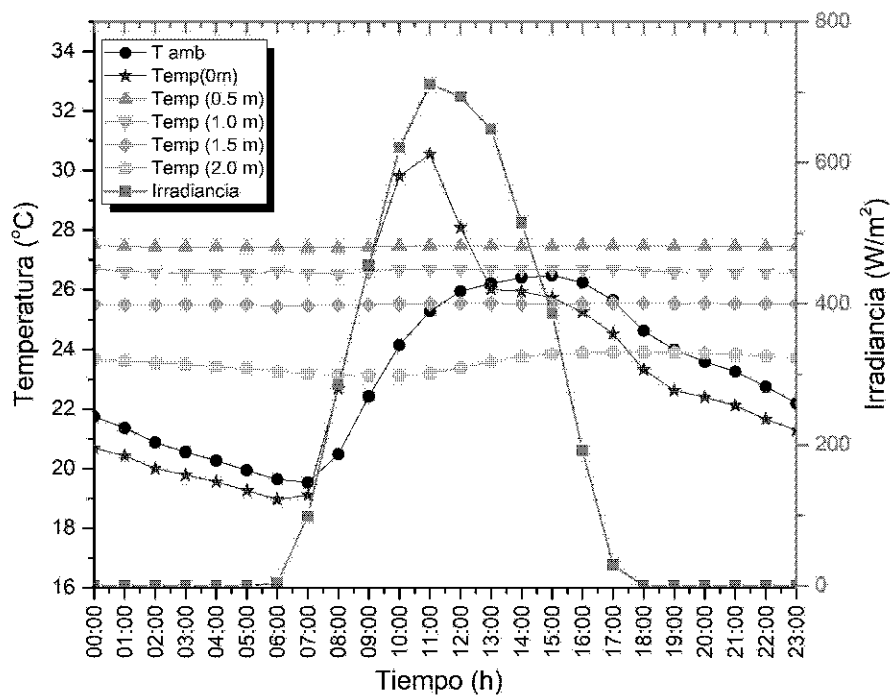


Figura 2.3: Perfil de temperaturas promedio de enero 2018

## Capítulo 3

# ANÁLISIS TÉRMICO ANUAL DEL ICG

### 3.1. Transferencia de calor del ICG a 1.0 m de profundidad (temporada cálida )

En esta sección se realiza el análisis del ICG instalado a 1.0 m de profundidad, la figura 3.1 muestra la  $T_{amb}$ ,  $T_{in}$ ,  $T_{out}$  e irradiancia promedio que se registraron durante el mes de agosto. En cada caso, la temperatura de entrada y salida se utiliza para analizar el desempeño térmico, es decir, evaluar el calor útil que se obtiene al intercambiar calor entre el suelo y el aire que circula en el interior del ICG. Este calor útil obtenido sirve para estimar el ahorro de energía que proporciona el ICG en el proceso de alcanzar condiciones de confort.

En la figura se observa que la temperatura promedio del aire en la entrada del ICG ( $T_{in}$ ) aumenta a partir de las 06:00 hrs, justo en el momento que la irradiancia incide sobre la superficie del suelo, afectando directamente la temperatura del aire en la entrada del ICG, el incremento de la temperatura es transmitida directamente al aire que entra al sistema, el cual se ve reflejado en el aumento de la temperatura de entrada hasta llegar a su valor máximo de 36.5 °C a las 14:00 hrs, en el lapso de 14:00 a 20:00 hrs  $T_{in}$  disminuye gradualmente hasta 30.5 °C. La incidencia de la irradiancia en la superficie del suelo es de 06:00 a 19:00 hrs teniendo un valor máximo de 950  $Wm^{-2}$  a las 12:00 hrs.

Por otro lado la temperatura en la salida del ICG ( $T_{out}$ ) es menor que  $T_{in}$  en el periodo de 07:00 a 20:00 hrs y es menor que la temperatura ambiente ( $T_{amb}$ ) en el horario de 08:00 a 19:00 hrs, en el horario de 00:00 a 07:00 y de 20:00 a 23:00 hrs las temperaturas  $T_{in}$ ,  $T_{out}$  y  $T_{amb}$  tienen un comportamiento diferente al mostrado durante el día, en este horario  $T_{out}$  es mayor que  $T_{in}$  y que  $T_{amb}$ , de acuerdo a estos resultados, se observa que durante la temporada cálida el ICG opera de dos

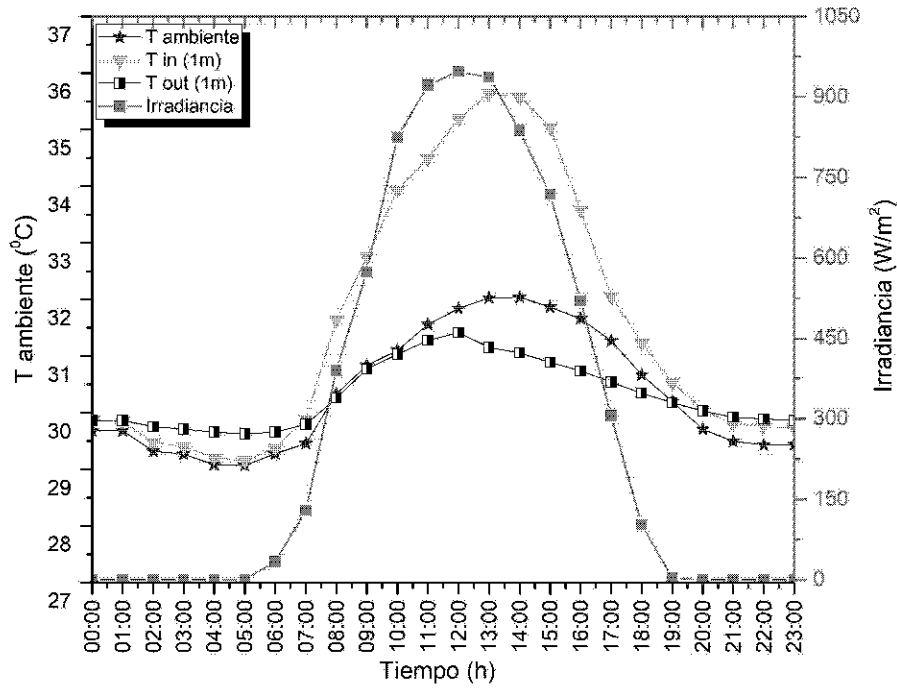


Figura 3.1: Comportamiento de las temperaturas promedio del ICG en el mes de agosto del 2017

maneras entre el día y lo noche.

El ICG proporciona enfriamiento durante el día en el horario de 07:00 a 20:00 hrs por lo que la  $T_{out}$  es menor que la  $T_{in}$ , existe un momento en que la diferencia de temperaturas entre la entrada y la salida es la máxima proporcionada por el ICG, esto se da a las 13:00 hrs con una diferencia promedio entre las temperaturas de 4.5 °C.

Los resultados obtenidos anteriormente fueron con valores promedio del mes de agosto en donde se obtuvo una diferencia de 4.5 °C entre las temperaturas  $T_{in}$  y  $T_{out}$ . Sin embargo, el día 27 de este mes se registraron las temperaturas más altas, las cuales se muestran en la figura 3.2. Se observa como la  $T_{in}$  inicia su incremento a partir de las 06:00 hrs alcanzando un valor máximo de 36.52 °C a las 14:00 hrs,  $T_{amb}$  un valor de 32.47 °C a las 14:00 hrs,  $T_{out}$  un valor de 31.12 °C y la irradiancia registra un valor de 966  $Wm^{-2}$  a las 12:00 hrs.

En este día el comportamiento del ICG es similar al del comportamiento mensual, la  $T_{in}$  aumenta a partir de las 06:00 hrs en el momento que la irradiancia incide sobre la superficie del suelo, se observa que la irradiancia solar afecta directamente

la temperatura del aire en la entrada del ICG. El aumento de la temperatura del suelo se transmite directamente al aire que ingresa al sistema, esta temperatura alcanza su máximo valor las 14:00 hrs, en el lapso de las 14:00 hrs a las 19:00 hrs  $T_{in}$  disminuye gradualmente hasta llegar a al mismo valor de la  $T_{out}$  a las 20:00 hrs. En el horario de 00:00 a 06:00 la  $T_{in} = T_{out}$  y en el horario de 20:00 a 23:00 la  $T_{in}$  es menor  $T_{out}$ .

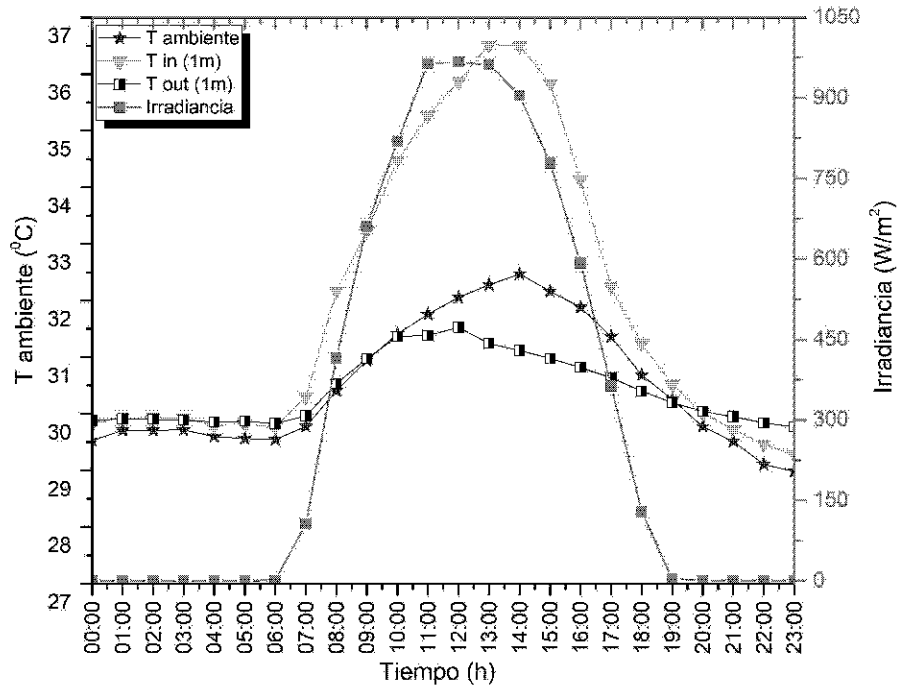


Figura 3.2: Comportamiento del ICG 27 de agosto 2017

En este día donde se registraron las temperaturas más altas el ICG tiene el efecto de enfriamiento, existe una diferencia entre la  $T_{in}$  y  $T_{out}$  de  $5.37^{\circ}\text{C}$ , por tanto, mientras más alta sea la  $T_{in}$  mayor será la diferencia con la  $T_{out}$ , sin embargo durante las noches el ICG proporciona aire con mayor temperatura a la salida, teniendo el efecto del calentamiento del fluido, este efecto no se desea en el uso de este tipo de sistemas durante la temporada cálida.

### 3.2. Transferencia de calor del ICG a 2.0 m de profundidad (temporada cálida )

En esta sección se realiza el análisis del ICG instalado a 2.0 m de profundidad, la figura 3.3 muestra la  $T_{amb}$ ,  $T_{in}$ ,  $T_{out}$  e irradiancia promedio registrados durante

el mes de agosto, de igual manera que en el ICG instalado a 1.0 m de profundidad la temperatura de entrada y salida se utiliza para analizar el desempeño térmico, es decir, evaluar el calor útil que se obtiene al intercambiar calor entre el suelo y el aire que circula en el interior del ICG.

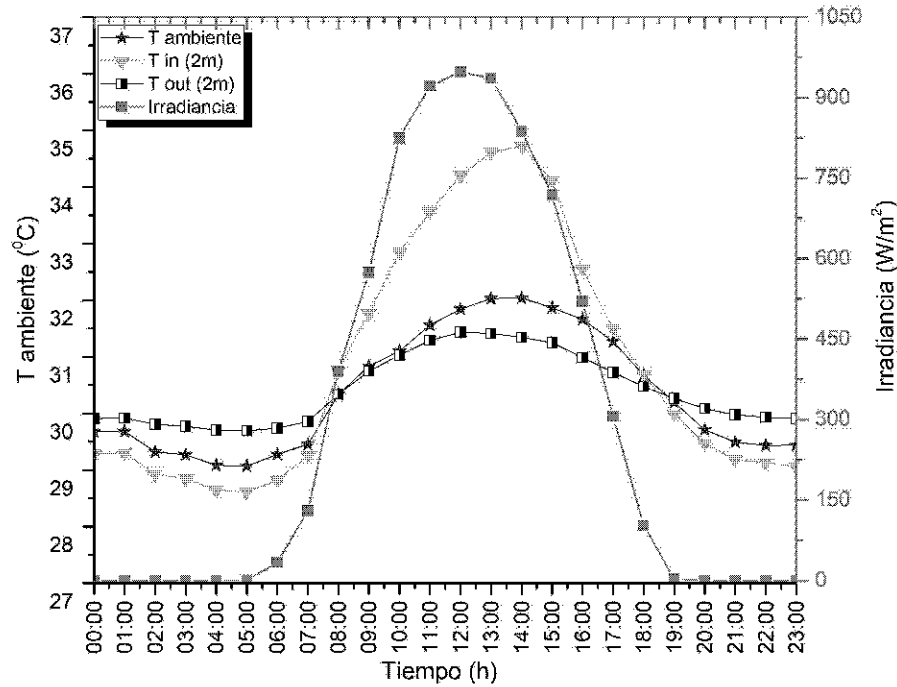


Figura 3.3: Comportamiento de las temperaturas promedio en el ICG (agosto 2017)

En la figura se observa que la temperatura en la entrada del ICG ( $T_{in}$ ) aumenta a partir de las 6:00 hrs, en el momento que la irradiancia incide sobre la superficie del suelo, afectando directamente la temperatura del aire en la entrada del ICG, el suelo que rodea la entrada del tubo incrementa su temperatura conforme avanza el día. Este incremento se transmite directamente al aire que entra al sistema, por lo que  $T_{in}$  aumenta y alcanza su valor máximo de  $34.73\text{ }^{\circ}\text{C}$  a las 14:00 hrs, en el lapso de las 14:00 hrs a las 18:00 hrs  $T_{in}$  disminuye gradualmente hasta llegar a un valor de  $30.69\text{ }^{\circ}\text{C}$ . La incidencia de la irradiancia en la superficie del suelo es de 06:00 a 19:00 hrs teniendo un valor máximo de  $950\text{ }Wm^{-2}$  a las 12:00 hrs.

Por otro lado la temperatura en la salida del ICG ( $T_{out}$ ) es menor que  $T_{in}$  en el periodo de 07:30 a 18:00 hrs y es menor que la temperatura ambiente ( $T_{amb}$ ) en el horario de 09:00 a 18:00 hrs, en el horario de 19:00 a 07:00 hrs las temperaturas  $T_{in}$ ,  $T_{out}$  y  $T_{amb}$  tienen un comportamiento diferente al mostrado durante el día, en este horario  $T_{out}$  es mayor que  $T_{in}$  y así mismo mayor que  $T_{amb}$ .

El ICG proporciona enfriamiento del aire ingresado durante el día, por lo que la  $T_{out}$  es menor que la  $T_{in}$ , durante este periodo cumple con la función de enfriar el aire que circula a través del sistema, esto sucede en el horario de 8:00 a 18:00 hrs, existe un momento en que la diferencia de temperaturas entre la entrada y la salida es la máxima proporcionada por el ICG, esto se da a las 14:00 hrs con una diferencia promedio entre las temperaturas de 3.39 °C.

De igual manera que el sistema instalado a 1.0 m de profundidad el análisis se realizó con valores promedio del mes de agosto, cuyos resultados muestran una diferencia de 3.39 °C entre las temperaturas  $T_{in}$  y  $T_{out}$ . Como se menciona en el apartado 3.1 el día 27 se registró las temperaturas más altas, las cuales se muestran en la figura 3.4. Se observa como la  $T_{in}$  inicia su incremento a partir de las 06:00 hrs alcanzando un valor máximo de 35.52 °C a las 14:00 hrs,  $T_{amb}$  un valor de 32.47 °C a las 14:00 hrs  $T_{out}$  un valor de 31.53 °C y la irradiancia registra un valor de 966  $Wm^{-2}$  a las 12:00 hrs.

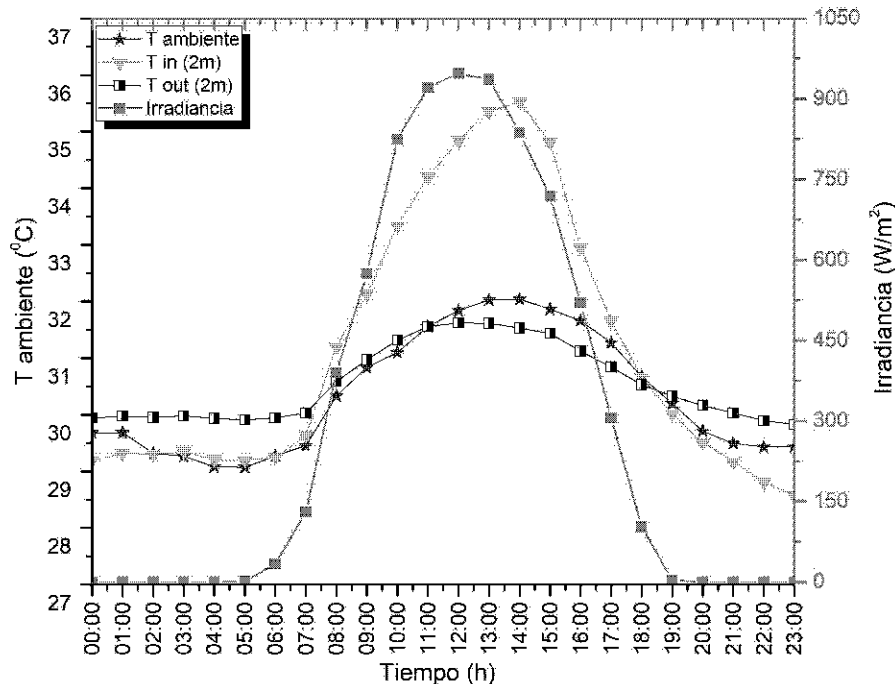


Figura 3.4: Comportamiento de las temperaturas en el ICG (27 de agosto 2017)

En este día el comportamiento del ICG es similar al del comportamiento mensual, la  $T_{in}$  aumenta a partir de las 07:00 hrs en el momento que la irradiancia

incide sobre la superficie y el suelo que rodea la entrada del ICG incrementa su temperatura. El aumento de la temperatura se transmite directamente al aire que ingresa al sistema, esta temperatura alcanza su máximo valor las 14:00 hrs, en el lapso de las 14:00 hrs a las 18:30 hrs  $T_{in}$  disminuye gradualmente hasta llegar a un valor cercano a la  $T_{out}$ . En el horario de 19:00 a 07:00 la  $T_{in} < T_{out}$ .

En este día donde se registraron las temperaturas más altas el ICG tiene el efecto de enfriamiento durante el día, existe una diferencia entre la  $T_{in}$  y  $T_{out}$  de 3.99°C, por tanto, mientras más alta sea la  $T_{in}$  mayor será la diferencia con la  $T_{out}$ , sin embargo durante las noches el ICG proporciona aire con mayor temperatura a la salida, teniendo un calentamiento del fluido el cual es un efecto no deseado en el uso de este tipo de sistemas durante la temporada cálida.

### **3.3. Transferencia de calor del ICG a 1.0 m de profundidad (temporada fría )**

De acuerdo a los resultados mostrados en la sección 2.2 el mes de enero presentó las temperaturas promedio más bajas registradas durante las mediciones. El ICG instalado a 1.0 m de profundidad se evalúa con las nuevas condiciones de  $T_{in}$ ,  $T_{out}$ ,  $T_{amb}$  e irradiancia, la figura 3.5 presenta el comportamiento de las temperaturas promedio del mes de enero, se analiza el comportamiento térmico en la temporada fría para conocer la capacidad de calefacción que proporciona el ICG, como se puede apreciar en la figura la  $T_{amb}$  desciende hasta 19.13 °C, mientras que la  $T_{in}$  a 19.83 °C, las temperaturas se registraron a las 7:00 hrs, se observa que las temperaturas tienen un comportamiento similar a partir de las 15:00 hrs hasta las 07:00 hrs con una diferencia mínima entre ellas.

En la figura se muestra que la temperatura del aire en la entrada del ICG ( $T_{in}$ ) inicia su descenso a partir de las 13:00 hrs hasta llegar a un valor mínimo de 19.83 °C a las 07:00 hrs, en esta hora inicia el aumento de la irradiancia afectando directamente la temperatura del aire en la entrada del ICG, la temperatura del suelo que rodea la entrada tubo incrementa conforme avanza el día y aumenta la irradiancia. El incremento de la temperatura es transmitida directamente al aire que entra al sistema. La incidencia de la irradiancia en la superficie del suelo es de 06:00 a 18:00 hrs teniendo un valor máximo de 711.37  $Wm^{-2}$  a las 11:00 hrs. En este caso la temperatura en la salida del ICG ( $T_{out}$ ) es mayor que  $T_{in}$  en el periodo de 15:00 a 13:00 hrs y es menor que la temperatura ambiente ( $T_{amb}$ ) durante todo el día, en el horario de 20:00 a 06:00 hrs las temperaturas  $T_{in}$ ,  $T_{out}$

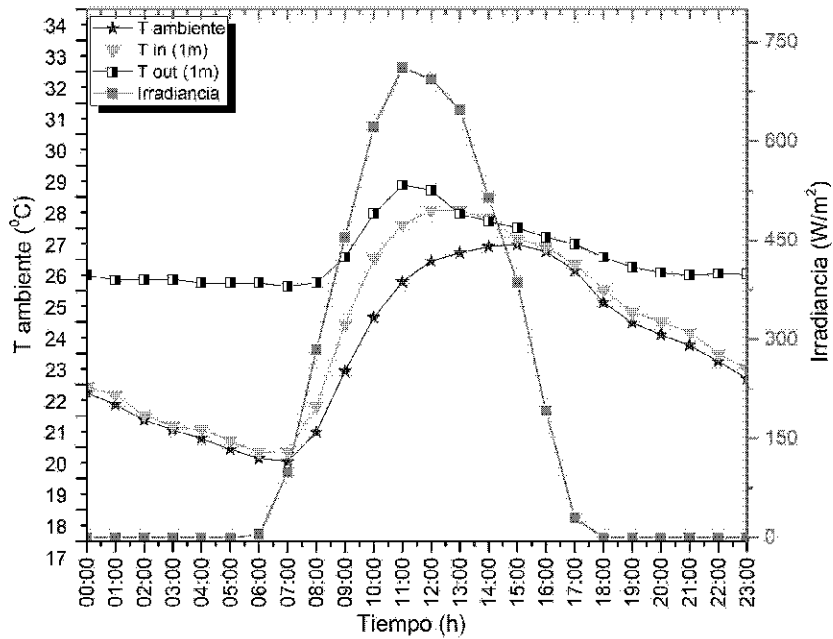


Figura 3.5: Comportamiento del ICG enero 2018

y  $T_{amb}$  tienen un comportamiento diferente al mostrado durante el día, en este horario  $T_{out}$  es mayor que  $T_{in}$  y así mismo mayor que  $T_{amb}$ , por lo tanto durante la temporada fría el ICG instalado a 1.0 m de profundidad proporciona calefacción.

La función que muestra el ICG durante la noche es de calefacción debido a que la  $T_{out}$  es mayor que la  $T_{in}$ , durante este periodo cumple con la función de calentar el aire que circula a través del sistema, esto sucede en el horario de 00:00 a 07:00 hrs, existe un momento en que la diferencia de temperaturas entre la entrada y la salida es la máxima proporcionada por el ICG, esto se da a las 06:00 hrs con una diferencia promedio entre las temperaturas de 5.41 °C.

Sin embargo, los análisis anteriores se realizaron con valores promedio del mes de enero, cuyos resultados muestran una diferencia de 5.41 °C entre  $T_{in}$  y  $T_{out}$ . Al analizar los datos se observó que el día 14 se registraron las temperaturas más bajas, las cuales se muestran en la figura 3.6.

En el horario de las 00:00 a 07:00  $T_{in}$  y  $T_{amb}$  tienen el mismo comportamiento y una diferencia mínima entre ellas con 17.92 y 18.02 °C a las 00:00 respectivamente, las temperaturas descienden a un valor mínimo a las 06:00 hrs llegando a valores de 14.13 y 14.29 °C. En este día  $T_{in}$  inicia su incremento a partir de las 07:00 hrs



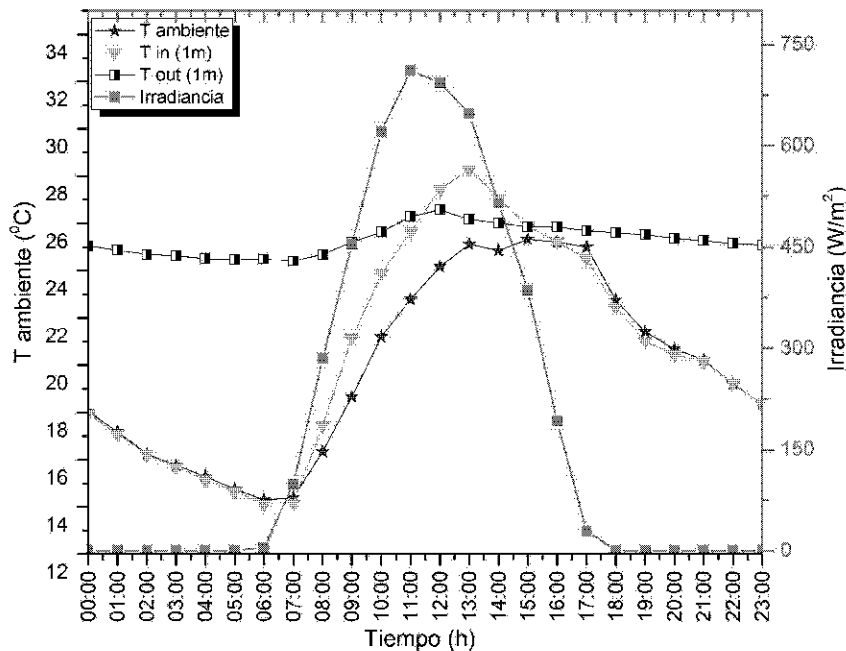


Figura 3.6: Comportamiento del ICG 14 enero 2018

alcanzando un valor máximo de  $28.29\text{ }^{\circ}\text{C}$  a las 13:00 hrs,  $T_{amb}$  a un valor de  $25.12\text{ }^{\circ}\text{C}$  a las 13:00 hrs,  $T_{out}$  mantiene un valor mayor que  $T_{in}$  en el periodo de 00:00 a 11:00 hrs y de 15:00 a 23:00 hrs, mientras que en el periodo de 11:00 a 15:00 hrs  $T_{in} > T_{out}$  y la irradiancia registra un valor de  $793.80\text{ }Wm^{-2}$  a las 13:00 hrs.

El comportamiento del ICG es similar al mensual, la  $T_{in}$  aumenta a partir de las 7:00 hrs en el momento que la irradiancia incide sobre la superficie del suelo, se observa que la irradiancia solar afecta directamente la temperatura del aire en la entrada del ICG, esto se debe a que la temperatura del suelo que rodea la entrada tubo incrementa conforme avanza el día y aumenta la irradiancia. El aumento de la temperatura se transmite directamente al aire que ingresa al sistema, esta temperatura alcanza su máximo valor las 13:00 hrs, en el lapso de las 13:00 hrs a las 23:00 hrs  $T_{in}$  disminuye gradualmente hasta llegar al mismo valor de la  $T_{amb}$  a las 22:00 hrs. En el horario de 00:00 a 011:00 la  $T_{in} < T_{out}$ .

Durante este tiempo se registraron las temperaturas más bajas del día por lo que el ICG tiene el efecto de calentamiento del fluido en su interior, existe una diferencia entre la  $T_{in}$  y  $T_{out}$  de  $10.35\text{ }^{\circ}\text{C}$ , por tanto, mientras más baja sea la  $T_{in}$  mayor será la diferencia con la  $T_{out}$ , durante las noches el ICG proporciona aire con mayor temperatura a la salida, teniendo un calentamiento del fluido el cual

es un efecto deseado durante las temporadas frías en el uso de este tipo de sistemas.

### 3.4. Transferencia de calor del ICG a 2.0 m de profundidad (temporada fría )

En esta sección se realiza el análisis del ICG instalado a 2m de profundidad, la figura 3.7 muestran la  $T_{amb}$ ,  $T_{in}$ ,  $T_{out}$  e irradiancia promedio registradas durante el mes.

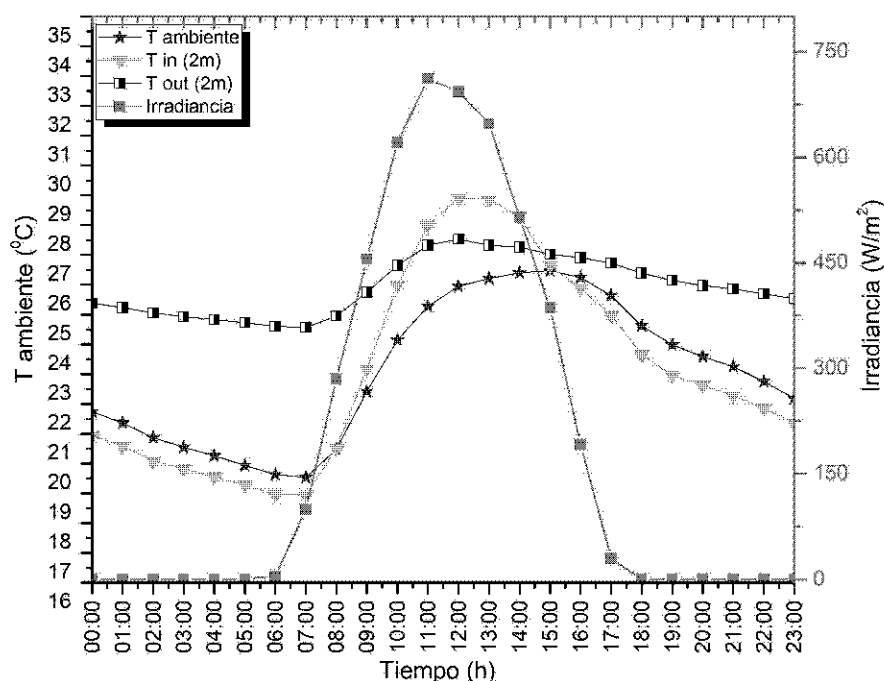


Figura 3.7: Comportamiento de las temperaturas promedio en el ICG (enero 2017)

Se observa que la temperatura ambiente ( $T_{amb}$ ) tiene el mismo comportamiento que  $T_{in}$  de 00:00 a 7:00 hrs con una diferencia promedio de 0.6 °C y valores mínimos de 18.9 y 19.5 °C, a partir de las 07:00 hrs ambas temperaturas aumentan gradualmente justo en el momento que la irradiancia incide sobre la superficie del suelo, se observa que la irradiancia solar afecta directamente la temperatura del aire en la entrada del ICG, la temperatura del suelo que rodea la entrada tubo incrementan su temperatura conforme avanza el día por lo que el incremento de la temperatura es transmitida directamente al aire que ingresa al sistema, esta temperatura alcanza su máximo valor de 28.9 °C a las 13:00 hrs, después de las

13:00 hrs  $T_{in}$  disminuye hasta llegar a un valor de 21.4 °C a las 23:00 hrs, mientras que  $T_{amb}$  es menor que  $T_{in}$  de 09:00 a 15:00 hrs y de 15:00 a 23:00 es menor. La incidencia de la irradiancia en la superficie del suelo es de 06:00 a 18:00 hrs teniendo un valor máximo de 711.37  $Wm^{-2}$  a las 11:00 hrs.

Por otro lado la temperatura en la salida del ICG ( $T_{out}$ ) es mayor que  $T_{in}$  en el periodo de 00:00 a 10:00 hrs, de 10:00 a 15:00 es menor que  $T_{in}$  y de 15:00 a 23:00 hrs  $T_{out}$  es mayor que  $T_{in}$ , El ICG calienta el aire de entrada proporcionando calefacción por lo que la  $T_{out}$  es mayor que la  $T_{in}$ , esto sucede en el horario de 00:00 a 10:00 hrs y de 15:00 a 23:00 hrs, existe un momento en que la diferencia de temperaturas entre la entrada y la salida es la máxima proporcionada por el ICG, esto se da a las 06:00 hrs con una diferencia promedio entre las temperaturas de 5.65 °C.

Al igual que en el sistema instalado a 1.0 m de profundidad el análisis se realizó con valores promedio del mes de enero donde los resultados muestran una diferencia de 5.65 °C entre las temperaturas  $T_{in}$  y  $T_{out}$ , sin embargo como se vio en la sección 2.2 la temperatura más baja se registro el día 14 de enero del 2018, las cuales se muestran en la figura 3.8.

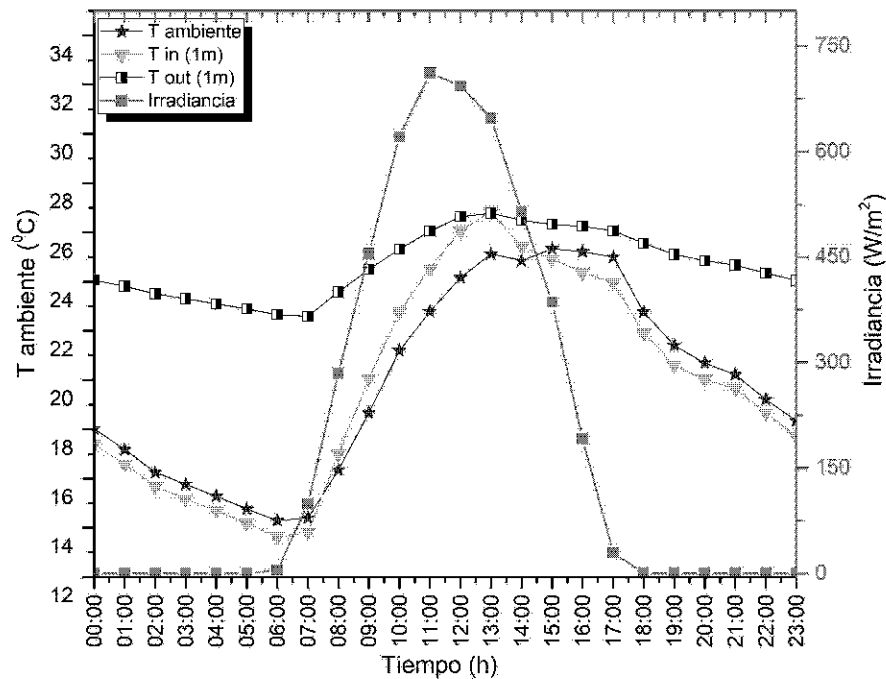


Figura 3.8: Comportamiento de las temperaturas en el ICG (14 de enero 2017)

Se observa que la  $T_{amb}$  tiene un comportamiento similar a la  $T_{in}$  iniciando a las

00:00 con valores de 18.02 y 17.39 °C y descendiendo a un valor mínimo de 14.29 y 13.64 °C a las 06:00 hrs, el aumento de estas temperaturas inicia a las 06:00 hrs en donde  $T_{amb}$  alcanza un valor máximo de 25.34 a las 15:00 hrs y  $T_{in}$  alcanza su valor máximo de 26.85 °C a las 13:00 hrs, de 00:00 a 08:00 y 15:00 a 23:00 hrs  $T_{amb} > T_{in}$ , de 08:00 a 15:00 hrs  $T_{amb} < T_{in}$ , mientras que la irradiancia registrada fue de 793.8  $Wm^{-2}$  a las 13:00 hrs.

El comportamiento del ICG es similar al del comportamiento mensual, la  $T_{in}$  aumenta a partir de las 7:00 hrs en el momento que la irradiancia incide sobre la superficie y el suelo que rodea la entrada del ICG incrementa su temperatura. El aumento de la temperatura se transmite directamente al aire que ingresa al sistema. En este día donde se registraron las temperaturas más bajas el ICG tiene el efecto de calentamiento, existe una diferencia entre la  $T_{in}$  y  $T_{out}$  de 9.02°C, por tanto, mientras más baja sea la  $T_{in}$  mayor será la diferencia con la  $T_{out}$ .

### 3.5. Rendimiento térmico

Para obtener el rendimiento térmico de los intercambiadores, se realizaron pruebas experimentales con los datos de las mediciones realizadas en los meses agosto del 2017 y enero del 2018, el mes más cálido y el más frío respectivamente, de acuerdo a la sección 2.2.

La cuantificación de la energía que proporciona la implementación de los ICG, realiza mediante la ecuación 3.1

$$\dot{Q}_u = \dot{m}C_{p,air}(T_{in} - T_{out}) \quad (3.1)$$

Donde:

$\dot{m}$  = Flujo másico en kg/s

$C_{p,aire}$  = Calor específico a presión constante en J/kg°C

$T_{in}$  = Temperatura de entrada en °C

$T_{out}$  = Temperatura de salida en °C

El flujo másico ( $\dot{m}$ ) se obtiene mediante la ecuación 3.2

$$\dot{m} = \frac{\Pi}{4} D^2 \rho_{aire} \nu_{aire} \quad (3.2)$$

Donde:

D = diámetro del tubo

$\rho$  = densidad del aire

$\nu$  = velocidad del aire

### 3.6. Coeficiente de operación del ICG

El parámetro que permite evaluar el desempeño térmico del ICG es el Coeficiente de Operación (COP en inglés), donde se relaciona la energía ganada por el ICG con la energía demandada por el ventilador que induce al aire a pasar a través de éste. La eficiencia energética del ICG es la razón entre la energía ganada y la demanda de energía del ventilador [47].

La energía que entra al sistema puede ser en forma de trabajo o de calor transferido necesaria para impulsar el fluido en el interior del sistema ICG tal como ventiladores, bombas, calentadores de respaldo, etc. De acuerdo a la definición, mientras mayor sea el COP mejor será el desempeño del sistema y puede ser calculado mediante la siguiente ecuación (3.3)

$$COP = \frac{Q_u}{W_s} \quad (3.3)$$

Donde:

$Q_u$  = Calor útil

$W_s$  = Potencia suministrada

En este trabajo se realiza el cálculo del COP del ICG en la temporada cálida, el día más cálido, en la temporada fría y el día más frío, para evaluar el desempeño térmico. De acuerdo a la ecuación (3.3) el  $COP$  está dado por el calor útil ( $Q_u$ ) entre la potencia demandada por el extractor de aire que hace circular el fluido ( $W_s$ ), donde el calor útil  $Q_u$  se calcula mediante la ecuación (3.1)

#### 3.6.1. Coeficiente de operación del ICG 1.0 m de profundidad (temporada cálida)

El cálculo del COP se realiza de acuerdo a la ecuación (3.1), la ecuación (3.2) y la ecuación (3.3) de la sección 2.7

Se realiza el cálculo del flujo másico ( $\dot{m}$ ), el valor de la densidad del aire a presión constante se toma de la tabla A-15 [48] con valor de  $1.3 \text{ Kg m}^{-3}$ , la velocidad del aire en el interior del tubo es de  $0.5 \text{ ms}^{-1}$ , de acuerdo a las características del ICG se utilizó tubo de 6 in, por lo que el área de la sección transversal es de

0.1524 m<sup>2</sup>

Sustituyendo los valores en la ecuación ecuación 3.3

$$\dot{m} = \rho \nu A \quad (3.4)$$

$$\dot{m} = \left(1.3 \frac{Kg}{m^3}\right) \left(0.5 \frac{m}{s}\right) \left(\frac{\pi(0.1524)^2}{4}\right) \quad (3.5)$$

$$\dot{m} = 11.85 \times 10^{-3} \frac{Kg}{s} \quad (3.6)$$

Una vez obtenido el flujo másico ( $\dot{m}$ ) se calcula el calor útil ( $Q_u$ ), el valor del calor específico a presión constante ( $C_p$ ) se toma de la tabla A-15 con valor de  $1005 JKg^{-1}/^{\circ}K$  [48]

El diferencial de temperaturas ( $T_{in} - T_{out}$ ) se obtiene de los valores registrados durante las mediciones, en el mes de agosto se toman los valores en el intervalo durante el ICG proporciona enfriamiento, de la sección 3.3 este horario es de 07:00 a 20:00 hrs, con los resultados se realiza el cálculo del calor útil ( $Q_u$ ) con la ecuación 3.1.

Con la ecuación 3.7 se calcula la potencia que demanda el extractor de aire, donde  $P$  es la potencia demandada por el extractor en Watts ( $W$ ),  $V$  es el voltaje aplicado en Volts ( $V$ ),  $I$  la corriente demanda en amperes ( $A$ ) y  $\cos \theta$  (adimensional) el factor de potencia. Al extractor se le suministra 62 V, la corriente que demanda es de 0.1000 A y el factor de potencia 0.9.

$$P = VI \cos \theta \quad (3.7)$$

$$P = (62V)(0.110A)(0.9)P = 5.54W \quad (3.8)$$

Una vez encontradas las variables que intervienen en la ecuación (3.3) se calcula el coeficiente de operación ( $COP$ ) para cada hora en que el ICG proporciona enfriamiento, los resultados se muestran en la tabla 3.1

Tabla 3.1: Calor útil y COP en el ICG a 1.0 m de profundidad

<b>Hora</b>	$T_{in}(^{\circ}C)$	$T_{out}(^{\circ}C)$	$T_{in} - T_{out}(^{\circ}C)$	$Q_u(W)$	<b>COP</b>
07:00	29.9	29.8	0.1	1.2	0.21
08:00	31.6	30.3	1.3	16.8	2.9
09:00	32.7	30.8	1.9	23.49	4.23
10:00	33.9	31.0	2.8	34.38	6.2
11:00	34.5	31.3	3.2	38.27	6.9
12:00	35.2	31.4	3.7	44.87	8.0
13:00	35.6	31.1	4.4	53.36	9.6
14:00	35.6	31.1	4.5	53.71	9.69
15:00	35.0	30.9	4.1	49.40	8.91
16:00	33.6	30.7	2.8	33.88	6.11
17:00	32.1	30.5	1.5	18.08	3.26
18:00	31.2	30.3	0.9	10.71	1.93
19:00	30.5	30.2	0.3	4.14	0.74
20:00	30.1	30.0	0.03	0.34	0.06

De acuerdo con los resultados de la tabla 3.1 se observa que los valores del COP inician con un valor de 0.21 a las 07:00 hrs, a partir de ese momento se incrementa hasta llegar a su máximo valor de 9.69 a las 14:00 hrs, en este horario se produce la máxima transferencia de calor en el sistema ICG, estos resultados se presentan en la figura 3.9.

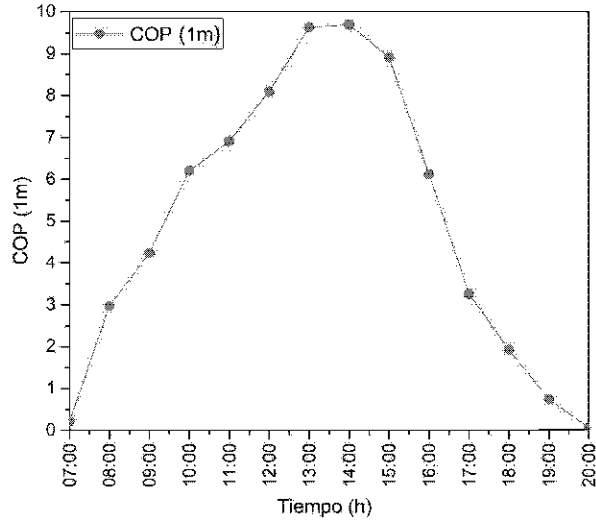


Figura 3.9: Comportamiento promedio del COP del ICG a 1.0 m de profundidad

Al igual que en la sección 3.3 se realiza el análisis del ICG en el día más cálido, donde se obtienen los valores de  $T_{in} - T_{out}$ , calor útil y el COP mostrados en la tabla 3.2

Tabla 3.2: Calor útil y COP en el ICG a 1.0 m de profundidad (27 de agosto)

Hora	$T_{in}(^{\circ}\text{C})$	$T_{out}(^{\circ}\text{C})$	$T_{in} - T_{out}(^{\circ}\text{C})$	$Q_u(W)$	COP
07:00	30.30	29.97	0.33	3.97	0.71
08:00	32.17	30.53	1.63	19.39	3.49
09:00	33.23	30.97	2.26	26.83	4.84
10:00	34.47	31.37	3.11	36.93	6.66
11:00	35.27	31.39	3.88	46.11	8.32
12:00	35.87	31.52	4.35	51.65	9.32
13:00	36.52	31.24	5.28	62.75	11.32
14:00	36.49	31.12	5.38	63.88	11.53
15:00	35.85	30.98	4.87	57.82	10.43
16:00	34.13	30.82	3.31	39.34	7.10
17:00	32.24	30.64	1.6	19.05	3.43
18:00	31.24	30.40	0.84	10.0	1.8
19:00	30.51	30.19	0.32	3.75	0.67
20:00	30.02	30.05	0.03	-0.32	-0.05

En la grafica 3.10 se observa que el ICG proporciona enfriamiento en el periodo de 07:00 a 20:00 hrs, la máxima transferencia de calor se da a las 14:00 hrs con un valor de  $Q_u = 63.8W$  y el COP de 11.53



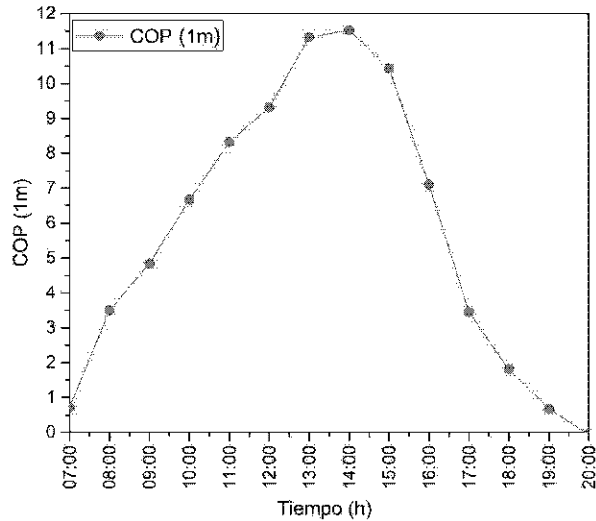


Figura 3.10: Comportamiento del COP del ICG a 1.0 m de profundidad el 27 de agosto 2018

### 3.6.2. Coeficiente de operación del ICG 2.0 m de profundidad (temporada cálida)

De acuerdo a la sección anterior, se obtiene el cálculo del COP con la ecuación (3.3) para realizar el análisis del coeficiente de operación del ICG instalado a 2.0 m de profundidad.

El diferencial de temperaturas ( $T_{in} - T_{out}$ ) se obtiene de los valores promedio registrados durante las mediciones en el mes de agosto, se toman los datos de 07:30 a 18:00 hrs, periodo en que el ICG proporciona enfriamiento, conforme a la sección 2.4, estos valores se muestran en la tabla 3.3.

En la grafica 3.11 se observa que los valores del COP inician con un valor de 0.89 a las 08:00 hrs, a partir de ese momento se incrementa hasta llegar a su máximo valor de 7.27 a las 14:00 hrs, horario dónde se produce la máxima transferencia de calor en el sistema ICG.

El día 27 de agosto se registraron las temperaturas más altas con valores de 35.52 °C a las 14:00 hrs, por lo que se realizó el cálculo y análisis del COP del ICG instalado a 2.0 m, los resultados se muestran en la tabla 3.4

La tabla 3.4 muestra que los valores del COP inician con un valor de 1.33 a las 08:00 hrs, a partir de ese momento se incrementa hasta llegar a su máximo valor de 8.56 a las 14:00 hrs, en este horario es donde se produce la máxima transferencia de calor en el sistema ICG, estos resultados se presentan en la figura 3.12 donde se observa que el ICG proporciona enfriamiento en el periodo de 08:00 a 18:00 hrs, la máxima transferencia de calor se da a las 14:00 hrs con un valor de  $Q_u = 47.44 W$

Tabla 3.3: Calor útil y COP en el ICG a 2.0 m de profundidad

Hora	$T_{in} (^{\circ}\text{C})$	$T_{out} (^{\circ}\text{C})$	$T_{in} - T_{out} (^{\circ}\text{C})$	$Q_u (W)$	COP
07:00	29.25	29.86	-0.61	-7.23	-1.31
08:00	30.76	30.34	0.42	4.97	0.89
09:00	31.77	30.75	1.02	12.1	2.2
10:00	32.85	31.03	1.82	21.5	3.89
11:00	33.56	31.29	2.27	26.9	4.87
12:00	34.20	31.43	2.77	32.8	5.93
13:00	34.61	31.41	3.2	38	6.87
14:00	34.73	31.34	3.39	40.3	7.27
15:00	34.11	31.25	3.21	33.9	6.13
16:00	32.56	30.99	1.86	18.66	3.36
17:00	31.49	30.72	0.77	9.0	3.36
18:00	30.69	30.47	0.22	2.52	1.63
19:00	29.99	30.26	-0.27	-3.31	0.45
20:00	29.47	30.09	-0.62	-7.27	-1.31

y el *COP* de 8.56

### 3.6.3. Coeficiente de operación del ICG 1.0 m de profundidad (temporada fría)

Para el cálculo del COP del ICG instalado a 1.0 m de profundidad durante la temporada fría se realiza de acuerdo a las ecuaciones (3.1), (3.2) y (3.3) de la sección 2.7, donde el flujo másico y la potencia demandada es constante en los ICG, el diferencial de temperaturas ( $T_{in} - T_{out}$ ) se obtiene de los valores promedio registrados durante las mediciones en el mes de enero, los valores encontrados de la diferencia de temperaturas se utiliza para el cálculo del calor útil ( $Q_u$ ) y el COP proporcionado por el ICG en cada hora, los resultados se muestran en la tabla 3.5.

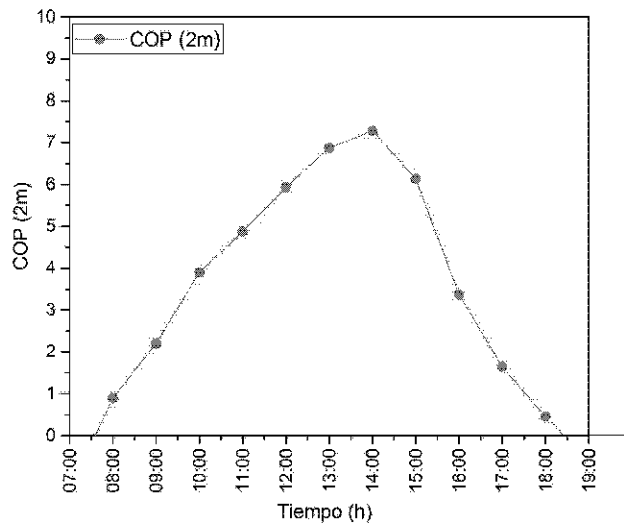


Figura 3.11: Comportamiento promedio del COP del ICG a 2.0 m de profundidad

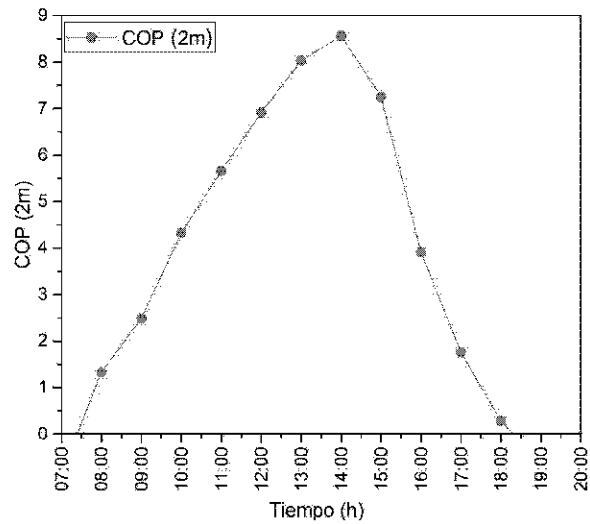


Figura 3.12: Comportamiento del COP del ICG a 2.0 m de profundidad 27 de agosto 2018

Tabla 3.4: Calor útil y COP en el ICG a 2.0 m de profundidad el 27 agosto 2018

Hora	$T_{in}$ (°C)	$T_{out}$ (°C)	$T_{in} - T_{out}$ (°C)	$Q_u$ (W)	COP
07:00	29.64	30.03	-0.39	-4.71	-0.85
08:00	31.21	30.59	0.62	7.37	1.33
09:00	32.13	30.97	1.16	13.7	2.49
10:00	33.33	31.31	2.02	23.9	4.32
11:00	34.20	31.56	2.64	31.3	5.66
12:00	34.85	31.62	3.23	38.30	6.91
13:00	35.36	31.61	3.75	44.5	8.03
14:00	35.52	31.53	3.99	47.4	8.56
15:00	34.82	31.44	3.38	40.1	7.25
16:00	32.95	31.13	1.82	21.65	3.9
17:00	31.66	30.84	0.82	9.71	1.75
18:00	30.66	30.53	0.13	1.56	0.28
19:00	30.01	30.16	-0.15	-3.73	-0.67
20:00	29.51	30.03	-0.52	-7.74	-1.39

De acuerdo a resultados anteriores, el ICG proporciona calefacción en temporada fría, en la figura 3.13 se observa que en el transcurso del las 24 hrs de funcionamiento el ICG no proporciona calefacción en el periodo de 13:00 a 14:00 hrs, sin embargo, durante el tiempo restante el sistema mantiene el aire de salida a una temperatura más alta que en la entrada con un COP máximo de -10.36 a las 06:00 hrs.

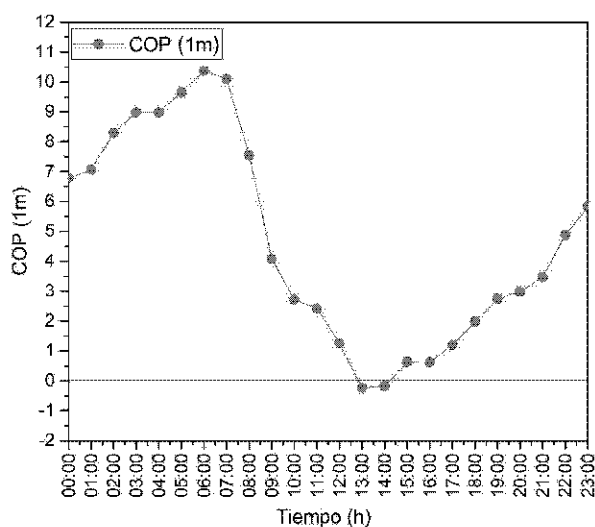


Figura 3.13: Comportamiento promedio del COP del ICG a 1.0 m de profundidad

Tabla 3.5: Calor útil y COP en el ICG a 1.0 m de profundidad

Hora	$T_{in}(\text{°C})$	$T_{out}(\text{°C})$	$T_{in} - T_{out}(\text{°C})$	$Q_u(W)$	COP
00:00	21.95	25.49	-3.54	-42.04	-6.7
01:00	21.65	25.34	-3.69	-43.81	-7.0
02:00	21.03	25.36	-4.32	-51.38	-8.28
03:00	24.93	25.35	-4.69	-55.68	-8.98
04:00	20.56	25.24	-4.69	-55.68	-8.98
05:00	20.20	25.24	-5.04	-59.90	-9.66
06:00	19.83	25.24	-5.41	-64.28	-10.36
07:00	19.87	25.14	-5.27	-62.61	-10.09
08:00	21.31	25.25	-3.94	-46.80	-7.54
09:00	23.93	26.06	-2.13	-25.30	-4.08
10:00	26.03	27.45	-1.42	-16.84	-2.71
11:00	27.11	28.38	-1.27	-15.06	-2.42
12:00	27.56	28.21	-0.65	-7.78	-1.25
13:00	27.56	27.44	0.12	1.42	0.22
14:00	27.30	27.21	0.09	1.04	0.16
15:00	26.67	27.00	-0.33	-3.93	-0.63
16:00	26.38	26.71	-0.33	-3.88	-0.62
17:00	25.85	26.48	-0.62	-7.41	-1.19
18:00	25.03	26.06	-1.03	-12.23	-1.97
19:00	24.31	25.75	-1.43	-17.00	-2.74
20:00	24.01	25.57	-1.56	-18.51	-2.98
21:00	23.68	25.50	-1.82	-21.58	-3.48
22:00	23.00	25.54	-2.54	-30.24	-4.87
23:00	22.48	25.52	-3.03	-36.06	-5.81

Debido a que el día 14 de enero se registraron las temperaturas más bajas se realizó el análisis del desempeño del ICG instalado a 1.0 m de profundidad, el cálculo de la diferencia de temperaturas ( $T_{in} - T_{out}$ ), calor útil el COP se muestra en la tabla 3.6

Tabla 3.6: Calor útil y COP en el ICG a 1.0 m de profundidad 14 de enero del 2018

Hora	$T_{in}(\text{°C})$	$T_{out}(\text{°C})$	$T_{in} - T_{out}(\text{°C})$	$Q_u(W)$	COP
00:00	17.92	25.06	-7.13	-84.78	-13.67
01:00	17.10	24.86	-7.76	-92.24	-14.87
02:00	16.24	24.70	-8.46	-100.52	-16.21
03:00	15.67	24.63	-8.96	-106.52	-17.17
04:00	15.16	24.52	-9.36	-111.52	-17.93
05:00	14.65	24.48	-9.83	-116.83	-18.84
06:00	14.13	24.49	-10.35	-123.2	-19.84

07:00	14.17	24.42	-10.25	-121.77	-19.64
08:00	17.45	24.70	-7.25	-86.14	-13.89
09:00	21.13	25.20	-4.07	-48.39	-7.80
10:00	23.88	25.63	-1.75	-20.85	-3.36
11:00	25.64	26.28	-0.64	-7.59	-1.22
12:00	27.44	26.58	0.86	10.26	1.65
13:00	28.29	26.17	2.12	25.20	4.06
14:00	27.07	26.02	1.06	12.57	2.02
15:00	25.88	25.84	0.04	0.42	0.06
16:00	25.22	25.84	-0.63	-7.43	-1.19
17:00	24.51	25.70	-1.19	-14.14	-2.28
18:00	22.47	25.61	-3.14	-37.33	-6.02
19:00	21.00	25.51	-4.51	-53.64	-8.65
20:00	20.44	25.38	-4.94	-58.67	-9.46
21:00	20.17	25.26	-5.10	-60.58	-9.77
22:00	19.26	25.15	-5.89	-70.02	-11.29
23:00	18.31	25.09	-6.78	-80.53	-12.98

Durante este día el sistema ICG proporciona calefacción de 00:00 a 11:30 y de 15:00 a 23:00 hrs, sin embargo, en el horario de 11:30 a 15:00 proporciona enfriamiento como se muestra en la grafica 3.14.

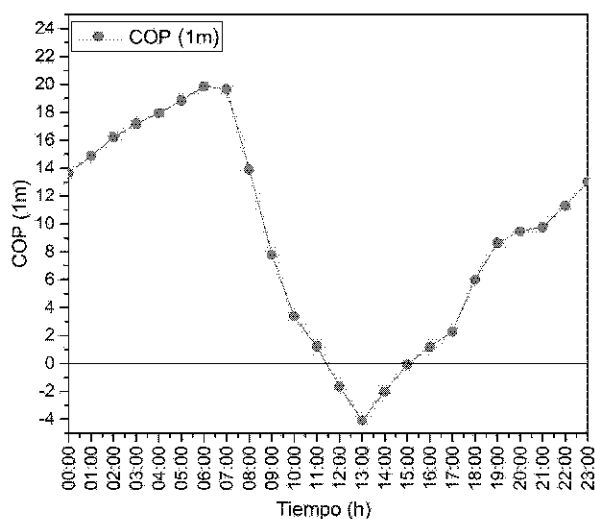


Figura 3.14: Comportamiento del COP del ICG a 1.0 m de profundidad el 14 de enero del 2018

### 3.6.4. Coeficiente de operación del ICG 2.0 m de profundidad (temporada fría)

El cálculo del  $COP$  del ICG instalado a 2.0 m de profundidad en temporada fría se realiza de acuerdo a las ecuaciones (3.3), el diferencial de temperaturas ( $T_{in} - T_{out}$ ) se obtiene de los valores promedio registrados durante las mediciones en el mes de enero, la potencia demandada por el extractor es constante en los dos ICG con un valor de 5.54 W de acuerdo a la ecuación 3.7

Tabla 3.7: Calor útil y COP en el ICG a 2.0 m de profundidad

Hora	$T_{in} (^{\circ}C)$	$T_{out} (^{\circ}C)$	$T_{in} - T_{out} (^{\circ}C)$	$Q_u (W)$	COP
00:00	20.93	25.38	-4.45	-52.2	-8.51
01:00	20.58	25.24	-4.65	-55.27	-8.91
02:00	20.09	25.06	-4.96	-58.98	-9.51
03:00	19.82	24.93	-5.11	-60.70	-9.79
04:00	19.56	24.84	-5.28	-62.71	-10.11
05:00	19.27	24.72	-5.45	-64.74	-10.44
06:00	18.97	24.61	-5.65	-67.08	-10.82
07:00	18.94	24.56	-5.62	-66.77	-10.77
08:00	20.50	24.95	-4.44	-52.80	-8.51
09:00	23.17	25.75	-2.58	-30.66	-4.94
10:00	25.96	26.65	-0.70	-8.26	-1.33
11:00	27.99	27.33	0.66	7.85	1.26
12:00	28.90	27.53	1.37	16.23	2.61
13:00	28.86	27.32	1.54	18.24	2.94
14:00	28.29	27.26	1.03	12.18	1.96
15:00	26.64	27.03	-0.39	-4.58	-0.74
16:00	25.87	26.90	-1.04	-12.31	-1.98
17:00	24.98	26.73	-1.74	-20.70	-3.33
18:00	23.66	26.39	-2.72	-32.34	-5.21
19:00	22.96	26.14	-3.19	-37.86	-6.10
20:00	22.62	25.97	-3.34	-39.74	-6.41
21:00	22.28	25.86	-3.59	-42.60	-6.87
22:00	21.84	25.69	-3.85	-45.76	-7.38
23:00	21.36	25.53	-4.17	-49.52	-7.98

Los valores encontrados de la diferencia de temperaturas se utiliza para el cálculo del calor útil ( $Q_u$ ) proporcionado por el ICG en cada hora, los resultados se muestran en la tabla 3.7.

De acuerdo a los resultados anteriores, el sistema ICG proporciona calefacción de 00:00 a 10:30 y de 15:00 a 23:00 hrs, sin embargo en el horario de 11:30 a 15:00 proporciona enfriamiento como se muestra en la grafica 3.15.

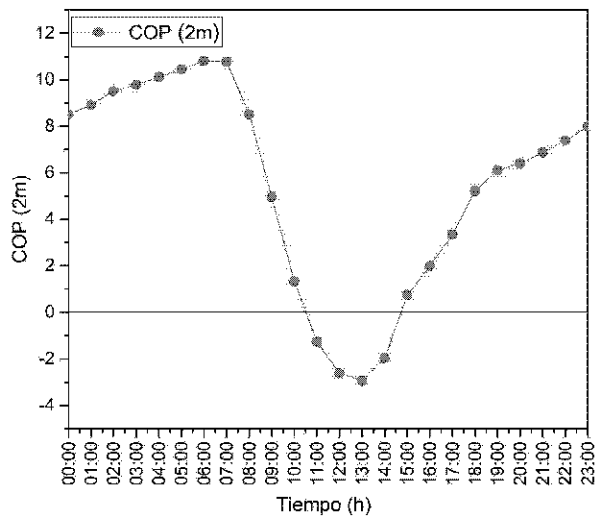


Figura 3.15: Comportamiento promedio del COP del ICG a 2.0 m de profundidad



De igual manera se realiza el análisis del ICG el día 14 de enero, fecha en que se presentaron las temperaturas mas bajas cuyos resultados se presentan en la tabla 3.8

Tabla 3.8: Calor útil y COP en el ICG a 2.0 m de profundidad el 14 de enero 2018

<b>Hora</b>	$T_{in}(^{\circ}\text{C})$	$T_{out}(^{\circ}\text{C})$	$T_{in} - T_{out}(^{\circ}\text{C})$	$Q_u(\text{W})$	<b>COP</b>
00:00	17.39	24.06	-6.67	-79.24	-12.78
01:00	16.59	23.82	-7.23	-85.85	-13.84
02:00	15.69	23.50	-7.82	-92.28	-14.98
03:00	15.17	23.30	-8.13	-96.64	-15.58
04:00	14.69	23.10	-8.41	-99.87	-16.10
05:00	14.18	22.89	-8.70	-103.41	-16.67
06:00	13.64	22.66	-9.02	-107.14	-17.28
07:00	13.82	22.60	-8.78	-104.30	-16.82
08:00	17.00	23.57	-6.57	-78.06	-12.59
09:00	20.05	24.49	-4.44	-52.75	-8.50
10:00	22.76	25.32	-2.55	-30.30	-4.88
11:00	24.55	26.04	-1.49	-17.71	-2.85
12:00	26.07	26.63	-0.57	-6.74	-1.0
13:00	26.85	26.78	0.06	0.76	0.12
14:00	25.44	26.50	-1.05	-12.51	-2.0
15:00	24.93	26.32	-1.39	-16.50	-2.66
16:00	24.37	26.24	-1.87	-22.19	-3.57
17:00	23.95	26.06	-2.10	-24.99	-4.03
18:00	21.93	25.55	-3.62	-42.96	-6.93
19:00	20.60	25.10	-4.50	-53.51	-8.63
20:00	20.03	24.85	-4.82	-57.29	-9.24
21:00	19.66	24.68	-5.01	-59.58	-9.60
22:00	18.67	24.35	-5.68	-67.48	-10.88
23:00	17.73	24.04	-6.31	-74.96	-12.09

El sistema ICG instalado a 2.0 m de profundidad proporciona calefacción durante todo el día como se observa en la gráfica 3.16

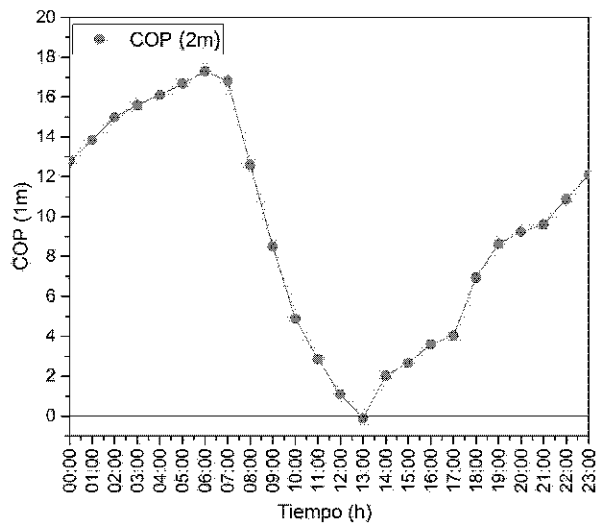


Figura 3.16: Comportamiento del COP del ICG a 2.0 m de profundidad 14 de enero del 2018

## Capítulo 4

# AHORRO DE ENERGÍA

### 4.1. Ahorro de energía hipotético de un ICG

Para cuantificar el ahorro de energía en edificaciones es necesario determinar el volumen de aire que se requiere remover cada hora del lugar, de acuerdo al uso que se le haya designado. Para este estudio se considera una habitación de las siguientes dimensiones: 3 m de ancho por 4 m de largo por 3 m de altura, teniendo un volumen de 36 m<sup>3</sup>. Para una habitación se requiere de 3.5 cambios de aire por hora (ACH) [49]. Para determinar el volumen de aire que proporciona el ICG se utiliza la ecuación 4.1

$$V = \frac{3600\dot{m}}{\rho ACH} \quad (4.1)$$

Donde:

$\dot{m}$  = flujo másico del sistema

$\rho$  = densidad del aire

$ACH$  = cambios de aire por hora

Al sustituir se tiene:

$$V = \frac{(3600 \text{ s})(0.0118 \text{ kgm}^{-1})}{(1.3 \text{ kgm}^{-3})(3.5)} = 9.33 \text{ m}^3 \quad (4.2)$$

De acuerdo a los resultados, cada ICG proporciona 9.33 m<sup>3</sup>, por lo tanto para renovar el volumen de aire de la habitación se requieren 4 dispositivos de acuerdo a la ecuación 4.3. Una vez conocido el volumen que se puede ventilar con el ICG, es posible determinar el ahorro de energía que se puede alcanzar.

$$V = \frac{36 \text{ m}^3}{9.33 \text{ m}^3} = 3.85 \quad (4.3)$$

## 4.2. Ahorro de energía proporcionado por ICG a 1.0 m (temporada cálida)

Para obtener la energía promedio proporcionada por el ICG en un día, se calcula el área bajo la curva de la grafica del calor útil, esta se aprecia en la figura 4.5.

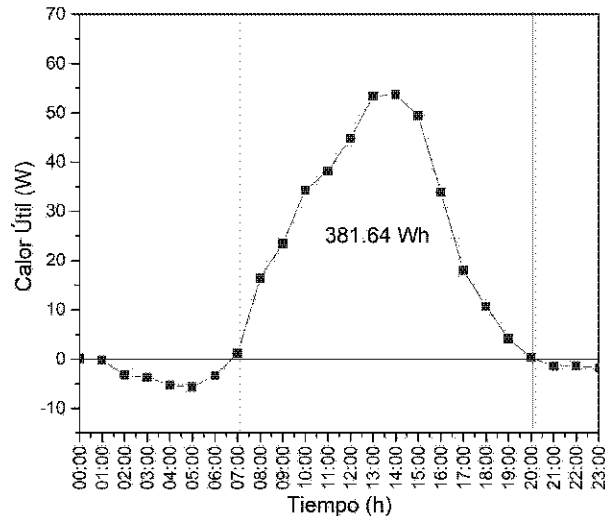


Figura 4.1: Energía promedio proporcionado por el ICG en un día (1.0 m)

Como se observa en la figura, la energía promedio que proporciona el sistema es de 381.64 *Wh* en 14 horas de funcionamiento, debido a que se necesitan 4 ICG para la renovación de aire de la habitación, se tendría 1.526.5 *kWh* de energía proporcionado al día, 45.8 *kWh* al mes y 549.5 *kWh* al año.

El sistema intercambiador se encuentra instalado en la región peninsular, por lo que el costo de energía que estipula la Comisión Federal de Electricidad (CFE) en tarifa horaria en media tensión (HM) es de \$ 1.1591 [50] en horario intermedio, por tanto, el costo del ahorro proporcionado por el ICG es de \$ 53.08 al mes y \$ 636.9 al año.

### 4.3. Ahorro de energía proporcionado por ICG a 2.0 m (temporada cálida)

El sistema instalado a 1m de profundidad proporciona 239 Wh promedio de energía en 11 horas de funcionamiento, como se observa en la figura 4.4, se tendría 54.5 kWh de energía proporcionado al mes por los cuatro sistemas y 654.72 kWh al año, el costo del ahorro proporcionado por el ICG es de \$ 63.34 al mes y \$ 760.13 al año.

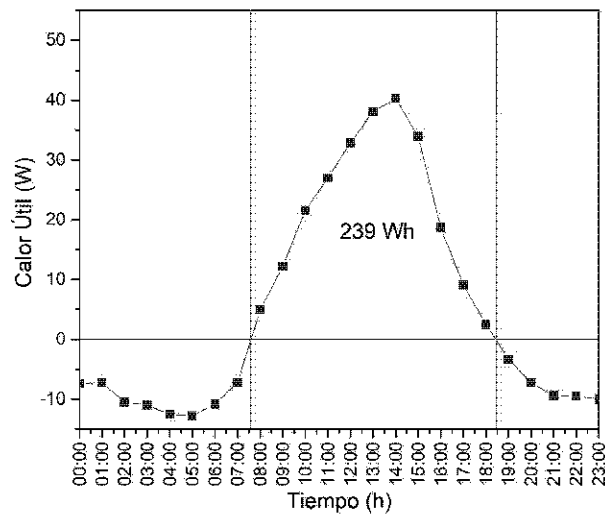
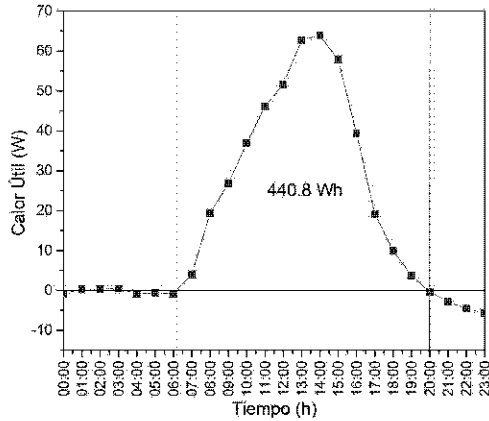


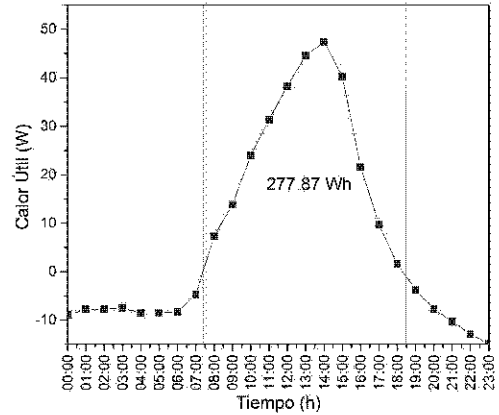
Figura 4.2: Energía proporcionado por el ICG en un día (2.0 m)

### 4.4. Ahorro de energía proporcionado por el ICG el día más cálido

La energía que proporcionada por el ICG instalado a 1.0 y 2.0 m el día más cálido se muestran en la figura 4.3. El sistema instalado a 1m proporciona 440 Wh al día en un promedio de 14 horas de funcionamiento, por tanto, con un sistema de 4 ICG se proporciona 1.763 kWh al día, 54.65 kWh al mes y 655.9 kWh al año, mientras que el costo de ahorro que proporciona es de \$ 754.2. Por otro lado, el sistema instalado a 2.0 m proporciona 277.87 Wh al día en un promedio de 11 horas de funcionamiento, por tanto, con un sistema de 4 ICG se proporciona 1.11 kWh al día, 34.45 kWh al mes y 413.47 kWh al año, mientras que el costo de ahorro que proporciona es de \$ 475.5.



(a) Energía proporcionada por el ICG (1.0 m, 27 de agosto)



(b) Energía proporcionada por el ICG (2.0 m, 27 de agosto)

Figura 4.3: Energía proporcionada por el ICG instalado a 1.0 m y 2.0 m

## 4.5. Ahorro de energía proporcionado por ICG a 1.0 m (temporada fría)

La figura 4.4 muestra la energía proporcionada por el ICG durante la temporada fría, con valores de  $657.7 Wh$  por cada ICG durante las 23 horas de funcionamiento  $2.63 kWh$  por 4 ICG,  $81.84 kWh$  al mes  $982.08 kWh$  durante el año. El costo de la energía que proporciona el sistema es de \$ 1, 129.3.

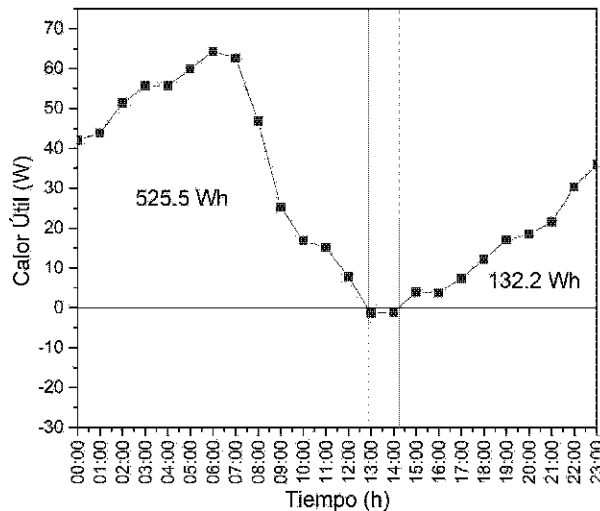


Figura 4.4: Energía promedio proporcionado por el ICG en un día (1.0 m)

## 4.6. Ahorro de energía proporcionado por ICG a 2.0 m (temporada fría)

El sistema instalado a 2.0 m de profundidad 4.4 proporciona 809.61 Wh por cada ICG durante las 20 horas de funcionamiento 3.23 kWh por 4 ICG, 100.39 kWh al mes 1204.69 kWh durante el año. El costo de la energía que proporciona el sistema es de \$ 1,385.4.

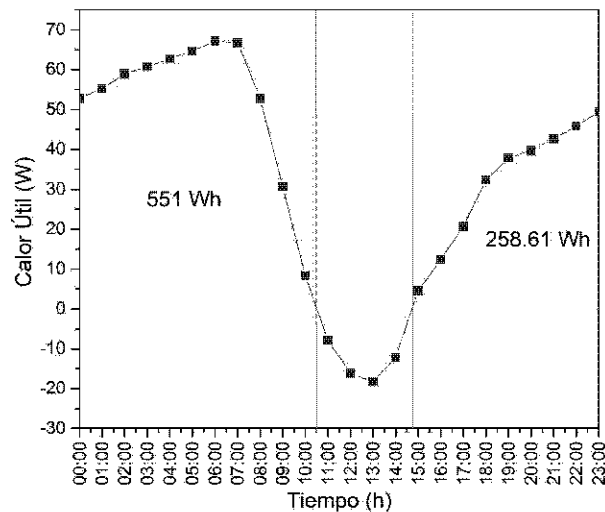
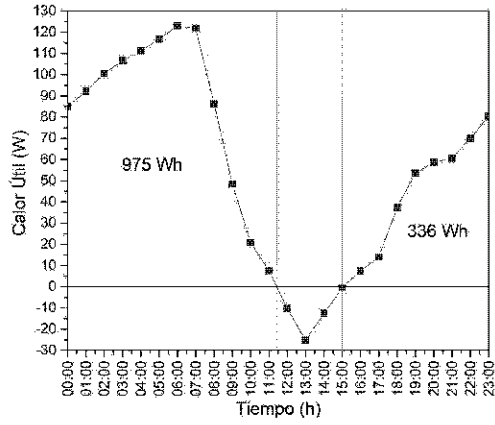


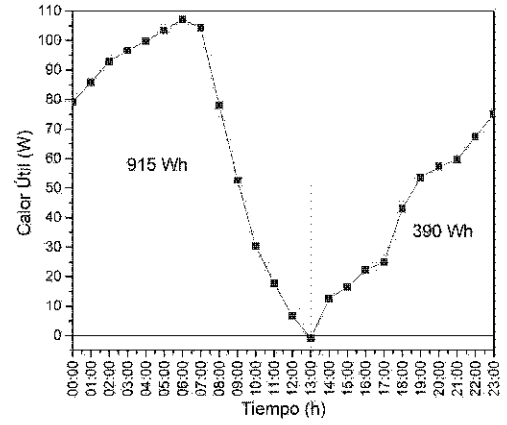
Figura 4.5: Energía promedio proporcionado por el ICG en un día (2.0 m)

## 4.7. Ahorro de energía proporcionado por el ICG el día más frío

La energía que proporcionada por el ICG instalado a 1.0 y 2.0 m el día más frío se muestran en la figura 4.6. El sistema instalado a 1m proporciona 1,311 Wh al día en un promedio de 22 horas de funcionamiento, por tanto, con un sistema de 4 ICG se proporciona 5.24 kWh al día, 162.5 kWh al mes y 1,950 kWh al año, mientras que el costo de ahorro que proporciona es de \$ 2,243. Por otro lado, el sistema instalado a 2.0 m proporciona 1,305 Wh al día en un promedio de 23 horas de funcionamiento, por tanto, con un sistema de 4 ICG se proporciona 5.22 kWh al día, 161.82 kWh al mes y 1941.8 kWh al año, mientras que el costo de ahorro que proporciona es de \$ 2,233



(a) Energía proporcionada por el ICG (1.0 m, 14 de enero)



(b) Energía proporcionada por el ICG (2.0 m, 14 de enero)

Figura 4.6: Energía proporcionada por el ICG instalado a 1.0 m y 2.0 m



# Capítulo 5

## CONCLUSIONES

### 5.1. Conclusiones

Se realizó el estudio teórico y experimental del comportamiento térmico anual de dos intercambiadores de calor geotérmicos instalados en los departamentos de invitados de la Universidad de Quintana Roo para determinar el rendimiento térmico y el ahorro de energía que proporciona cada sistema. Cada ICG fue construido de tubería de cloruro de polivinilo (PVC) de 6 metros de largo y 15.24 cm de diámetro enterrados a 1.0 m y 2.0 m de profundidad, se aislaron los tubos de entrada y salida de cada ICG para evitar el intercambio de calor con la superficie del suelo, se instaló una sonda con termopares para medir la temperatura a diferentes profundidades (0.0 m, 0.5 m, 1.0 m, 1.5 m, 2.0 m) y se instalaron termopares en la entrada y salida de cada sistema para medir las temperaturas correspondientes de entrada y salida del fluido.

En este trabajo fue posible determinar el rendimiento térmico, es decir, la ganancia y pérdida de calor del fluido que circula en el interior con respecto a la temperatura ambiente, de igual manera se determinó la ventaja de utilizar los ICG incorporados a los departamentos para ayudar a lograr el confort térmico necesario con consumo mínima de energía eléctrica durante la temporada cálida y la temporada fría. De acuerdo a los resultados de este trabajo se determinó el mes de agosto como el más cálido y el mes de enero como el más frío.

El estudio se realizó para todo el año pero haciendo énfasis en los meses de agosto y enero considerando que fue donde se presentaron las temperaturas más altas de cada temporada. Los resultados obtenidos son válidos para los periodos mencionados, con las condiciones que se describen, por lo tanto los resultados cambiarían si algunas de las variables de las condiciones climáticas y composición del suelo consideradas en este análisis es modificada.

Los resultados muestran que el ICG instalado a 2.0 m de profundidad propor-

ciono mayor ahorro con una disminución de la temperatura de 3.4 °C (3:00 pm) la temperatura disminuye de 34.7 °C a 31.3 °C entre  $T_{in}$  y  $T_{out}$  para el mes de agosto considerado el mas caluroso del año. Para el mes de enero, considerado el mes más frío del año en la zona, la temperatura del fluido aumenta mas de 5 °C (7:00 am) entre  $T_{in}$  y  $T_{out}$  pasando de 19 °C a 24.65 °C, lo que mejora el confort nocturno.

Además, se debe tener cuidado con la tubería de entrada para evitar la exposición a radiación solar, que puede aumentar la temperatura de entrada de la ICG (a nivel del suelo). Por lo tanto, se recomienda aislar la tubería de entrada para evitar la ganancia de calor que afectan el rendimiento térmico. También se observó que aislar el tubo de salida del ICG es de gran importancia para evitar la ganancia o pérdida de calor cuando el aire sale. Además, se observó que en un horario no deseado, el sistema tiene un funcionamiento inverso; es decir, puede bajar la temperatura en invierno y subirla en verano por lo que se recomienda su uso únicamente durante las horas de funcionamiento.

## 5.2. Productos Obtenidos

Becerra, G., Picazo, M., Aguilar, J.O., Xamán, J., Osorio,E., Hernandez, J. & Ledesma-Alonso, R. Experimental study of a Geothermal Earth-to-Air Heat Exchager at Chetumal, Quintana Roo, Mexico. *Energy Efficiency*. 16, 7 (2022). <https://doi.org/10.1007/s12053-021-100>.

M.Picazo, J.O. Aguilar, R. Ledesma, V. Arcos-Feria, R. Barbosa y J. Hernandez. Evaluación Térmica Pasiva/Activa de un Intercambiador de Calor Geotérmico, Chetumal Quintana Roo, México (2017)

Constancia de participación en la XLI SEMANA NACIONAL DE LA ENERGIA SOLAR 2017 en Guadalajara Jalisco.

Constancia de participación en estancia académica en el Centro Nacional de Investigación Y Desarrollo Tecnológico, (CENIDET), Cuernavaca, Morelos 2017

# Bibliografía

- [1] Polymer Solutions Unlimited. Unlimited polymer solution. International Organisation for Standardisation, 1994.
- [2] INEGI, I.N.d.E.y.G., Mapas de Clima. 2011,<http://web.archive.org/web/20120127095024/http://mapserver.inegi.gob.mx/geograa/espanol/estados/qroo/clim.cfm>.
- [3] -Arcos Victor”. Estudio experimental del desempeño térmico de un intercambiador de calor tierra-aire en la ciudad de Chetumal, Quintana roo. Master’s thesis, Universidad de Quintana Roo, 2016.
- [4] José Ma Fernández Fernández Salgado, José Ma y Salgado. Compendio de energía solar: fotovoltaica, térmica y termoeléctrica (adaptado al código Técnico de la Edificacióm y al nuevo RITE). Number 333.792315 F4C6. 2010.
- [5] Ibáñez Plana, MM Ibáñez Plana, JR Rosell Polo, and JI Rosell Urrutia. Tecnología solar. Number 04; TJ810, I2. 2005.
- [6] R. Álvarez, G.Dorantes. Energía sustentable en edificios y casa. Revista de la Academia Mexicana de Ciencia, 2010.
- [7] G. Mihalakakou, M. Santamouris, D. Asimakopoulos, and A. Argiriou. On the ground temperature below buildings. Solar Energy, 55(5):355 – 362, 1995.
- [8] G. Mihalakakou, M. Santamouris, J.O. Lewis, and D.N. Asimakopoulos. On the application of the energy balance equation to predict ground temperature profiles. Solar Energy, 60(3):181 – 190, 1997.
- [9] Energías Renovables. Energías renovables. España: Haya comunicación para todos, 2014.
- [10] Omar Guillén Solís et al. Energías renovables una perspectiva ingenieril. 2017.

- [11] Estrada Gasca Claudio. Islas Samperio Joorge. Energías alternas: Propuesta de investigación y desarrollo tecnológico para México. 2010.
- [12] ISO7730. Moderate thermal environment. determination of the pmv and ppd indices and specification of the conditions of thermal comfort. International Organisation for Standardisation, 1994.
- [13] Joan Escuer. Intercambiadores Tierra-aire En La Climatización De Construcciones. Technical report, GEOCONSULTORES, 2011.
- [14] F. Hernández F. Ingelmo, S. Cuadrado. Estudio de la conducta termica del suelo. correlaciones de su temperatura con la del aire en dos observatorios. STVDIA CHEMICA, 1986.
- [15] G. Mihalakakou, M. Santamouris, D. Asimakopoulos, and N. Papanikolaou. Impact of ground cover on the efficiencies of earth-to-air heat exchangers. Applied Energy, 48(1):19 – 32, 1994.
- [16] Carol Gauthier, Marcel Lacroix, and Hervé Bernier. Numerical simulation of soil heat exchanger-storage systems for greenhouses. Solar Energy, 60(6):333 – 346, 1997.
- [17] M.M.Salah El-Din. On the heat flow into the ground. Renewable Energy, 18(4):473 – 490, 1999.
- [18] G. Mihalakakou. On estimating soil surface temperature profiles. Energy and Buildings, 34(3):251 – 259, 2002.
- [19] V.A.F. Costa. Thermodynamic analysis of building heating or cooling using the soil as heat reservoir. International Journal of Heat and Mass Transfer, 49(21):4152 – 4160, 2006.
- [20] Onder Ozgener, Leyla Ozgener, and Jefferson W. Tester. A practical approach to predict soil temperature variations for geothermal (ground) heat exchangers applications. International Journal of Heat and Mass Transfer, 62:473 – 480, 2013.
- [21] Messaoud Badache, Parham Eslami-Nejad, Mohamed Ouzzane, Zine Aidoun, and Louis Lamarche. A new modeling approach for improved ground temperature profile determination. Renewable Energy, 85:436 – 444, 2016.
- [22] Anuj Mathur, Ankit Kumar Surana, and Sanjay Mathur. Numerical investigation of the performance and soil temperature recovery of an earth system under intermittent operations. Renewable Energy, 95:510 – 521, 2016.

- [23] G. Mihalakakou, J.O. Lewis, and M. Santamouris. On the heating potential of buried pipes techniques — application in Ireland. Energy and Buildings, 24(1):19 – 25, 1996.
- [24] M. Bojic, N. Trifunovic, G. Papadakis, and S. Kyritsis. Numerical simulation, technical and economic evaluation of air-to-earth heat exchanger coupled to a building. Energy, 22(12):1151 – 1158, 1997.
- [25] V.P. Kabashnikov, L.N. Danilevskii, V.P. Nekrasov, and I.P. Vityaz. Analytical and numerical investigation of the characteristics of a soil heat exchanger for ventilation systems. International Journal of Heat and Mass Transfer, 45(11):2407 – 2418, 2002.
- [26] M.K. Ghosal and G.N. Tiwari. Modeling and parametric studies for thermal performance of an earth to air heat exchanger integrated with a greenhouse. Energy Conversion and Management, 47(13):1779 – 1798, 2006.
- [27] M.K. Ghosal, G.N. Tiwari, D.K. Das, and K.P. Pandey. Modeling and comparative thermal performance of ground air collector and earth air heat exchanger for heating of greenhouse. Energy and Buildings, 37(6):613 – 621, 2005.
- [28] Rakesh Kumar, S.C. Kaushik, and S.N. Garg. Heating and cooling potential of an earth-to-air heat exchanger using artificial neural network. Renewable Energy, 31(8):1139 – 1155, 2006.
- [29] Huijun Wu, Shengwei Wang, and Dongsheng Zhu. Modelling and evaluation of cooling capacity of earth-air-pipe systems. Energy Conversion and Management, 48(5):1462 – 1471, 2007.
- [30] Viorel Badescu. Simple and accurate model for the ground heat exchanger of a passive house. Renewable Energy, 32(5):845 – 855, 2007.
- [31] J. Xamán, I. Hernández-Pérez, J. Arce, G. Álvarez, L. Ramírez-Dávila, and F. Noh-Pat. Numerical study of earth-to-air heat exchanger: The effect of thermal insulation. Energy and Buildings, 85:356 – 361, 2014.
- [32] Djamel Belatrache, Saïd Bentouba, and Mahmoud Bourouis. Numerical analysis of earth air heat exchangers at operating conditions in arid climates. International Journal of Hydrogen Energy, 42(13):8898 – 8904, 2017. Hydrogen Fuel Cell Y Renewable Energy Techniques: The 8th International Conference on Renewable Energy (CIER-2015), 21-23 December 2015, Sousse, Tunisia.

- [33] Łukasz Amanowicz and Janusz Wojtkowiak. Validation of cfd model for simulation of multi-pipe earth-to-air heat exchangers (eahes) flow performance. Thermal Science and Engineering Progress, 5:44 – 49, 2018.
- [34] Thermal analysis of earth-to-air heat exchanger using laboratory simulator. Applied Thermal Engineering, 134:130–140, 2018.
- [35] M Bojić, G Papadakis, and S Kyritsis. Energy from a two-pipe, earth-to-air heat exchanger. Energy, 24(6):519 – 523, 1999.
- [36] S. Amara, B. Nordell, and B. Benyoucef. Using fougara for heating and cooling buildings in sahara. Energy Procedia, 6:55 – 64, 2011. Impact of Integrated Clean Energy on the Future of the Mediterranean Environment?
- [37] Joaquim Vaz, Miguel A. Sattler, Ruth da S. Brum, Elizaldo D. dos Santos, and Liércio A. Isoldi. An experimental study on the use of earth-air heat exchangers (eahe). Energy and Buildings, 72:122 – 131, 2014.
- [38] Bilal Yassine, Kamel Ghali, Nesreen Ghaddar, Ghassan Chehab, and Issam Srour. Effectiveness of the earth tube heat exchanger system coupled to a space model in achieving thermal comfort in rural areas. International Journal of Sustainable Energy, 33(3):567–586, 2014.
- [39] Nabil A.S. Elminshawy, Farooq R. Siddiqui, Qazi U. Farooq, and Mohammad F. Addas. Experimental investigation on the performance of earth-air pipe heat exchanger for different soil compaction levels. Applied Thermal Engineering, 124:1319 – 1327, 2017.
- [40] Giacomo Chiesa, Marco Simonetti, and Mario Grosso. A 3-field earth-heat-exchange system for a school building in imola, italy: Monitoring results. Renewable Energy, 62:563 – 570, 2014.
- [41] M. Santamouris, G. Mihalakakou, A. Argiriou, and D.N. Asimakopoulos. On the performance of buildings coupled with earth to air heat exchangers. Solar Energy, 54(6):375 – 380, 1995.
- [42] Mohamed Khabbaz, Brahim Benhamou, Karim Limam, Pierre Hollmuller, Hassan Hamdi, and Amin Bennouna. Experimental and numerical study of an earth-to-air heat exchanger for air cooling in a residential building in hot semi-arid climate. Energy and Buildings, 125:109 – 121, 2016.
- [43] Sanjeev Jakhar, Rohit Misra, M.S. Soni, and Nikhil Gakkhar. Parametric simulation and experimental analysis of earth air heat exchanger with solar air

- heating duct. Engineering Science and Technology, an International Journal, 19(2):1059 – 1066, 2016.
- [44] Luis Pérez-Lombard, José Ortiz, and Christine Pout. A review on buildings energy consumption information. Energy and Buildings, 40(3):394 – 398, 2008.
- [45] J. Xamán, I. Hernández-López, R. Alvarado-Juárez, I. Hernández-Pérez, G. Álvarez, and Y. Chávez. Pseudo transient numerical study of an earth-to-air heat exchanger for different climates of México. Energy and Buildings, 99:273 – 283, 2015.
- [46] -Ramírez Dávila Leopoldo”. Estudio teórico de un intercambiador de calor tierra/aire. Master’s thesis, Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, 2013.
- [47] Jens Pfafferott. Evaluation of earth-to-air heat exchangers with a standardised method to calculate energy efficiency. Energy and Buildings, 35(10):971 – 983, 2003.
- [48] Transferencia de calor y masa, FUNDAMENTOS Y APLICACIONES, chapter chapter. publisher, year.
- [49] VentDepot, Ventilación General o Ambiental y sus Factores de Renovación de Aire, IE TOD TAB Factores de Renovación de Aire VentDepot MX, [www.VentDepot.com](http://www.VentDepot.com) .
- [50] Comisión Federal de Electricidad, <https://app.cfe.mx/aplicaciones/ccfe/tarifas/tarifas/negocio.as>.