



UNIVERSIDAD DE QUINTANA ROO
DIVISIÓN DE CIENCIAS E INGENIERÍA

**ESTUDIO EXPERIMENTAL DEL DESEMPEÑO
TÉRMICO DE UN INTERCAMBIADOR DE
CALOR TIERRA-AIRE EN LA CIUDAD DE
CHETUMAL, QUINTANA ROO.**

TESIS
PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRO EN MECATRÓNICA

PRESENTA
ING. VICTOR MANUEL ARCOS FERIA

DIRECTOR
DR. JORGE OVIDIO AGUILAR AGUILAR
CO-DIRECTOR
DR. JESÚS PERFECTO XAMÁN VILLASEÑOR

ASESORES
DR. INOCENTE BOJÓRQUEZ BÁEZ
DR. GLISERIO ROMELI BARBOSA POOL
DR. JOSÉ GONZALO CARRILLO BAEZA



CHETUMAL QUINTANA ROO, MÉXICO, OCTUBRE DE 2016



UNIVERSIDAD DE QUINTANA ROO
DIVISIÓN DE CIENCIAS E INGENIERÍA

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. JESÚS PERFECTO XAMÁN VILLASEÑOR

ASESOR:

DR. INOCENTE BOJÓRQUEZ BÁEZ

ASESOR:

DR. GLISERIO ROMELI BARBOSA POOL

ASESOR:

DR. JOSÉ GONZALO CARRILLO BAEZA



CHETUMAL, QUINTANA ROO, MÉXICO, OCTUBRE DE 2016.

Dedicatoria

Este trabajo está dedicado con todo mi amor y cariños a mi esposa ***Flor*** y nuestro hijo ***Matías***.

A la memoria de mis seres queridos mi madre ***Toñita*** mi tía ***Lolis*** y mis abuelos ***Manuel*** y ***Lupita***.

Agradecimientos

A mi esposa ***Flor María Segundo de Jesús***, por creer en mí y darme la confianza para emprender mis estudios de maestría, por su apoyo incondicional y por el regalo más grande del mundo, nuestro hijo ***Matías Gael Arcos Segundo***.

A mi director de tesis, el ***Dr. Jorge Ovidio Aguilar Aguilar*** por brindarme su confianza, apoyo, tiempo y dedicación para la elaboración de este trabajo, muchas gracias por su amistad.

Al comité revisor: ***Dr. Jesús Perfecto Xamán Villaseñor, Dr. Inocente Bojórquez Báez, Dr. Gliserio Romeli Barbosa Pool y Dr. José Gonzalo Carrillo Baeza*** por su apoyo y consejo para la realización del proyecto, por su tiempo y dedicación para la revisión del documento, por sus observaciones y comentarios siempre en pro de la excelencia académica y por su amistad.

A mis profesores: ***Dr. Jaime Silverio Ortega Aguilar, Dr. Victor Manuel Sánchez Huerta, Dr. Javier Vázquez Castillo, Dr. Gliserio Romeli Barbosa Pool, M.C. Juan Carlos Ávila Reveles, M.C. Roberto Acosta Olea, Dr. Freddy Ignacio Chan Puc, Dr. José Hernández Rodríguez, Dr. Homero Toral Cruz, Dr. Fernando Enrique Flores Murrieta y M.C. Emanuel Torres Montalvo*** por su invaluable tiempo y dedicación en mi formación académica y por su amistad.

A mis compañeros de maestría y ahora amigos: **Marlon Brando Alpuche Javier, Jesús Orifiel Álvarez Ruiz, José Eulogio Canul Hoil, Carlos Alejandro Cedano Martínez, José Raúl García Segura, Cesar Antonio Iuit Córdoba, Noel Hiram Pat Angula, Gilmer de Jesús Pat Sánchez, Omar Alejandro Pérez Martínez, Francisco Javier Rivas Aguayo y David Israel Rivas Orilla** por la hermandad con la que salimos delante de los proyectos, por la camaradería con la que enfrentamos este reto, por brindarme su apoyo y por su amistad.

A **mi familia** quien con su ejemplo, enseñanzas, consejos y apoyo me han permitido alcanzado mis logros académicos, muchas gracias a mi padre **Victor** y su pareja **Mabel**, a mi hermano **Iván**, a mis tíos **Edgardo, Nicerata, Dolores, Fabián, Graciela y Jesús**, a mis primos **Jesús, Liliette, Mirsha, Monserrat, Edgardo, Carlos, Violeta, Fabián, Lilia , Gustavo y Beatriz**, así como a mi familia adoptiva, mi suegra **Victoria** y mis tías **Aurora y Claudia**, por sus invaluables consejos y su apoyo incondicional, muchas gracias.

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

A **las secretarías, personal de apoyo, guardias e intendentes** por brindarme todas las facilidades en mis estancia en las instalaciones de la DCI y por su amistad.

A mi nueva Alma Máter, la **Universidad de Quintana Roo** por brindarme la oportunidad de realizar mis estudios de maestría dentro de sus instalaciones.

“Fructificar la razón, trascender nuestra cultura”

Índice

Lista de figuras	VI
Lista de tablas	X
Nomenclatura	XI
Resumen	XII
Capítulo 1. Estado del arte.	1
1.1 Panorama energético mundial y sus efectos nocivos.....	1
1.2 Antecedentes.....	5
1.3 Revisión bibliográfica.....	5
1.3.1 Estudios de transferencia de calor en el suelo.....	6
1.3.2 Estudios teóricos de intercambiadores de calor tierra-aire.....	9
1.3.3 Estudios teóricos - experimentales de intercambiadores de calor tierra-aire.....	17
1.3.4 Estudios experimentales de intercambiadores de calor tierra-aire.....	19
1.3.5 Conclusiones de la revisión bibliográfica.....	20
1.4 Planteamiento del problema.....	20
1.5 Objetivos.....	23
1.5.1 Objetivo general.....	23
1.5.2 Objetivos específicos.....	23
1.6 Alcances.....	23

Capítulo 2. Diseño y construcción de un intercambiador de calor tierra-aire.	25
2.1 Diseño del intercambiador de calor tierra-aire a utilizar.	25
2.2 Construcción del intercambiador de calor tierra-aire.	30
2.3 Instrumentación del intercambiador de calor.	35
2.4 Instalación y acoplamiento del intercambiador a la cavidad.	43
Capítulo 3. Pruebas experimentales del intercambiador de calor tierra-aire.	55
3.1 Condiciones del experimento y variables a medir.	55
3.2 Pruebas experimentales del intercambiador de calor tierra-aire.	57
3.2.1 Distribución de temperaturas del aire en el EAHE.	57
3.2.2 Influencia de la profundidad de instalación del EAHE.	62
3.2.3 Relación de temperatura del subsuelo con el funcionamiento térmico de EAHE. ...	65
3.2.4 Influencia de las variables meteorológicas sobre el EAHE.	67
3.4 Evaluación térmica del EAHE.	69
Capítulo 4. Conclusiones y trabajos futuros.	73
4.1 Conclusiones.	73
4.2 Recomendaciones y trabajos futuros.	75
Referencias	77
Anexo A Planos del intercambiador de calor tierra-aire.	82
Plano EAHE-VU-UQROO-01.....	83

Plano EAHE-VU-UQROO-02.....	84
Plano EAHE-VU-UQROO-03.....	85
Plano EAHE-VU-UQROO-04.....	86
Plano EAHE-VU-UQROO-05.....	87
Plano EAHE-VU-UQROO-06.....	88
Anexo B Datos meteorológicos de Chetumal, Q. Roo de 2012 a 2015.	89
B1. Condiciones climatológicas de Chetumal, Q. Roo, México 2012.....	90
B2. Condiciones climatológicas de Chetumal, Q. Roo, México 2013.....	91
B3. Condiciones climatológicas de Chetumal, Q. Roo, México 2014.....	92
B4. Condiciones climatológicas de Chetumal, Q. Roo, México 2015.....	93
Anexo C Datos de las mediciones de los días reportados	94
C1. Datos de temperatura del EAHE a 2 metros de profundidad y datos meteorológicos del día 30 de julio de 2016	96
C2. Datos de temperatura del EAHE a 1 metro de profundidad y datos meteorológicos del día 30 de julio de 2016.....	97
C3. Datos de temperatura del EAHE a 2 metros de profundidad y datos meteorológicos del día 9 de agosto de 2016.....	98
C4. Datos de temperatura del EAHE a 1 metro de profundidad y datos meteorológicos del día 9 de agosto de 2016.....	99

C5. Datos de temperatura del EAHE a 2 metros de profundidad y datos meteorológicos del día 10 de agosto de 2016.....	100
C6. Datos de temperatura del EAHE a 1 metro de profundidad y datos meteorológicos del día 10 de agosto de 2016.....	101
C7. Datos de temperatura del EAHE a 2 metros de profundidad y datos meteorológicos del día 11 de agosto de 2016.....	102
C8. Datos de temperatura del EAHE a 1 metro de profundidad y datos meteorológicos del día 11 de agosto de 2016.....	103
C9. Datos de temperatura del suelo a diferentes profundidades del día 30 de julio de 2016.....	104
C10. Datos de temperatura del suelo a diferentes profundidades del día 9 de agosto de 2016.....	105
C11. Datos de temperatura del suelo a diferentes profundidades del día 10 de agosto de 2016.....	106
C12. Datos de temperatura del suelo a diferentes profundidades del día 11 de agosto de 2016.....	107

Anexo D Estancia en Tecnológico Nacional de México

Lista de figuras

Figura 1 Efecto de la capacidad de absorción del suelo en la variación diaria del flujo de calor en el suelo ($z = 2$ m, $a_0 = 0,9$, $v = 7$ m / s, $r = 0.5$, $f = 0,5$) (Salah el-Din. 1999).	27
Figura 2 Corte de placas de foamula en secciones de 10 x 10 in.	31
Figura 3 A) Imagen ilustrativa de herramienta de corte fabricada en solera de acero al carbón de ¼” de espesor y ½” de ancho. B) Corte circular en placas de foamular.	31
Figura 4 A) Pieza de poliestireno extruido con dimensiones de 10 x 10 x 1 pulgadas. B) Acoplamiento de piezas de foamular® en tubería unidas con silicón.	32
Figura 5 Esquema de intercambiador de calor tierra-aire diseñado.....	32
Figura 6 Corte de tubo de pvc de las diferentes secciones del eahe.	33
Figura 7 Unión y sellado de placas de poliestireno extruido con silicón.....	33
Figura 8 Sección de salida del intercambiador aislada con láminas de foamular.	34
Figura 9. Vista del intercambiador de calor tierra-aire ensamblado con aislamiento térmico ..	34
Figura 10. Vista frontal y trasera del equipo 34970a data acquisition de la marca agilent technologies con capacidad de 3 módulos para medición de temperatura.....	35
figura 11. Tarjeta 3490LA. modulo multiplexor con 22 canales de entrada.....	36
figura 12. Carrete de termopar tipo T de alta ganancia y amplio intervalo de sensibilidad.....	37
Figura 13. Termopar fabricado con guía de acero inoxidable.....	38
Figura 14. Vista lateral, frontal e isométrica de arreglo de sonda de temperatura de uso industrial para monitoreo de perfil de temperatura del suelo a distintas profundidades. ..	39
Figura 15. A) Sonda de temperatura forrada de uso industrial. B) Tarjeta de interfaz de usb/gpib de adquisición de datos.....	40

Figura 16. Esquema de intercambiador de calor tierra-aire con tubería para el sistema medición.....	40
Figura 17. Colocación de abrazaderas de 6” con reducción a ½” para la instalación de los termopares.	41
Figura 18. Inserción de termopar con guía en el eahe.	41
Figura 19. A) Sellado de las perforaciones de tubo con plastilina epoxica. B) Sellado de los conectores con silicón.	42
Figura 20. Sistema de medición acoplado a intercambiador de calor tierra air.	42
Figura 21. Rosa de los vientos para la ciudad de Chetumal, Quintana Roo, México.....	44
Figura 22. Vista de México en donde se aprecia las direcciones del viento que inciden sobre la masa continental.	44
Figura 23. Temperaturas máximas y mínimas de los días representativos de cada mes de los años 2012, 2013, 2014 y 2015 para la región de Chetumal, Quintana Roo, México.	45
Figura 24. Temperatura anual promedio para la región de Chetumal, Quintana Roo, México, temperaturas anuales máximas y mínimas promedio en el periodo primavera-verano y otoño-invierno respectivamente.	46
Figura 25. Conformación del subsuelo en la región de Chetumal, Quintana Roo.	47
Figura 26. A) Delimitación del área para la zanja en terreno adyacente al conjunto habitacional. B) Retroexcavadora haciendo zanja para instalación del intercambiador....	48
Figura 27. A/B) Muestras del suelo travertino con un objetivo de 2.5 x. C/D) Muestras del suelo travertino con un objetivo de 4.0 x. E/F) Muestras del suelo travertino con un objetivo de 10 x	49
Figura 28. Colocación del intercambiador en la zanja para su instalación.	51
Figura 29. Vista ilustrativa del eahe instalado a dos metros de profundidad.....	51

Figura 30. Vista ilustrativa del eahe instalado a un metro de profundidad.	52
Figura 31. Arreglo de termopares para medir la temperatura del subsuelo a distintas profundidades.	52
Figura 32. Vista a nivel de piso de eahe enterrado.	53
Figura 33. Vista aérea de villas universitarias y eahe enterrado.	53
Figura 34. Acoplamiento de extractor de aire a la tubería de salida del intercambiador.	54
Figura 35. Grafica de las temperaturas del eahe a 2 metros de profundidad medidas el día 30 de julio de 2016.	58
Figura 36. Grafica de las temperaturas del eahe a 2 metros de profundidad medidas el día 9 de agosto de 2016.	59
Figura 37 Temperaturas medidas en el eahe a 1 metro de profundidad el día 30 de julio de 2016.	60
Figura 38. Temperaturas medidas en el eahe a 1 metro de profundidad el día 9 de agosto de 2016.	61
Figura 39. Temperaturas del aire a la entrada y salida de los EAHE's A) 30 de julio de 2016. B) 09 de agosto de 2016. C) 10 de agosto de 2016. D) 11 de agosto de 2016.	62
Figura 40. Grafica del perfil de temperatura del suelo A) 30 de julio de 2016. B) 9 de agosto de 2016. C) 10 de agosto de 2016. D) 11 de agosto de 2016.	64
Figura 41. Grafica de la relación entre temperatura de subsuelo y funcionamiento del eahe A) 30 de julio de 2016. B) 9 de agosto de 2016. C) 10 de agosto de 2016. D) 11 de agosto de 2016.	66
Figura 42. Grafica que muestra la influencia de las precipitaciones pluviales en el funcionamiento del eahe el día 28 de julio de 2016.	67

Figura 43. Grafica de la influencia de la irradiancia solar sobre la temperatura de entrada del
intercambiador.....68

Lista de tablas

Tabla 1. Capacidad instalada de generación eléctrica nacional de CFE por plantas de generación	21
Tabla 2.- Propiedades y análisis térmico de poliestireno extruido.	29
Tabla 3. Características del diseño del eahc.	30
Tabla 4. Propiedades termofísicas de tipos de suelos.	50
Tabla 5. Calor útil (QU) para los días analizados	71
Tabla 6. Coeficiente de operación (COP) para los días analizados.	72

Nomenclatura

°C.- Grados Celsius (unidad de medida de temperatura)

CO².- Dióxido de carbono

EAHE. - Earth to Air Heat Exchange (Intercambiador de calor tierra-aire)

KWe.- Kilo Watt eléctrico

KWh.- Kilo Watt hora

KW/°C.-Capacidad de refrigeración en Kilo Watt/grado Celsius.

m.- metros (unidad de medida de distancia)

m/s.- metros/segundo (unidad de medida de velocidad)

MWe.- Mega Watt eléctrico

T_{envo}.-Temperatura ambiente.

T_{in}.-Temperatura del aire a la entrada del intercambiador de calor tierra aire.

T_{out}.- Temperatura del aire a la salida del intercambiador de calor tierra aire.

T₂.- Temperatura del aire a 2 metros de profundidad y 1.5 metros longitudinales.

T₃.- Temperatura del aire a 2 metros de profundidad y 3.0 metros longitudinales.

T₄.- Temperatura del aire a 2 metros de profundidad y 4.5 metros longitudinales.

T_{0.0 m}.- Temperatura de la superficie del suelo.

T_{0.5 m}.- Temperatura del suelo a 0.5 metros de profundidad.

T_{1.0 m}.- Temperatura del suelo a 1.0 metros de profundidad.

T_{1.5 m}.- Temperatura del suelo a 1.5 metros de profundidad.

T_{2.0 m}.- Temperatura del suelo a 2.0 metros de profundidad.

Resumen.

El calentamiento global es un fenómeno que actualmente preocupa a la comunidad científica de todo el mundo. El aumento en la temperatura del planeta es consecuencia de la actividad humana y se debe principalmente a la quema de combustibles fósiles los cuales son usados en vehículos para el transporte (motores de combustión interna y turbinas) y en la generación de energía eléctrica.

La mayor parte de la energía eléctrica (44%) que se consume en regiones con climas extremos esta encausada al acondicionamiento y climatización del aire, para ello se hace uso de tecnologías convencionales (mini Split, 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.

El uso de los sistemas mecánicos para el acondicionamiento de aire tiene un alto costo de operación y de mantenimiento, además de que emiten gran cantidad de contaminantes lo que puede desencadenar en lo que se conoce como síndrome del edificio enfermo. Es por ello que se están realizando estudios para disminuir el uso de este tipo de sistemas, reduciendo así el impacto ambiental que esto conlleva.

La búsqueda de tecnologías amigables con el medio ambiente para el mejoramiento del confort térmico en las viviendas ha llevado al estudio sistemas de ventilación natural que aprovechan las fuentes de energías renovables como el viento, la irradiancia solar y la energía térmica del suelo. Los intercambiadores de calor tierra-aire o EAHE (por sus siglas en inglés) son sistemas que aprovechan la inercia térmica del suelo y constan de tuberías que están enterradas a cierta profundidad y que interactúan térmicamente con el subsuelo para calentar o enfriar el aire que circula a través del sistema, estos dispositivos puede ser pasivo o activo, dependiendo si la transferencia de calor genera la circulación del fluido por convección natural o es forzado el flujo de aire con algún elemento mecánico Estos sistemas acoplados a una

habitación tienen dos propósitos esenciales. En primer lugar sirven para climatizar el interior de la habitación y en segundo lugar proporciona aire limpio, lo que evita el problema del síndrome de edificio enfermo.

En este trabajo se presenta el estudio experimental del funcionamiento térmico de un intercambiador de calor tierra-aire instalado en las Villas de la Universidad de Quintana Roo. Los intercambiador están constituidos con tubería de PVC de 15.24 cm (6 in) de diámetro enterradas a 1 y 2 metros de profundidad. La longitud de los sistemas es de 6 metros. Para reducir la pérdida o ganancia de calor a la salida del intercambiador de calor, se aisló térmicamente la sección de salida con espuma rígida de poliestireno extruido de 5.08 cm (2 in) de espesor. El intercambiador de calor geotérmico se evaluó durante dos semanas bajo condiciones climáticas de la ciudad de Chetumal, Quintana Roo, México. El flujo másico utilizado fue de 1.1×10^{-2} kg/s.

Los resultados mostraron una reducción de la temperatura de salida de hasta 4°C. Además, se encontró que durante la noche, la temperatura del aire a la entrada del intercambiador de calor es menor que a la salida, mostrando un efecto inverso al deseado. Así mismo se encontró que las variables meteorológicas tienen un impacto importante en el rendimiento de estos sistemas. Por lo anterior, se recomienda el uso diurno del EAHE para la temporada de primavera-verano para el caso de la Ciudad de Chetumal, Quintana Roo.

Capítulo 1. Estado del arte.

En este capítulo se aborda el panorama energético mundial, la situación de México en cuanto a producción energética y la problemática a tratar. Se presentan los objetivos generales y específicos, justificaciones, alcances y limitaciones del proyecto de tesis. Se presenta el estado del arte de las investigaciones realizadas nacional e internacionalmente cuyos resultados aporten información para la elaboración de este documento. Finalmente, se describe brevemente la organización de esta tesis.

1.1 Panorama energético mundial y sus efectos nocivos.

Desde el inicio de los tiempos el ser humano ha tenido la necesidad de satisfacer sus necesidades energéticas, la primera fuente de energía que utilizó el humano fue el fuego, que desencadenó el desarrollo de grandes civilizaciones conllevando a la era del bronce en los siglos XVI al XIII a.C. y posteriormente a la era del hierro entre los siglos XII al X a.C. El carbón vegetal fue quien impulsó estas eras.

Pasaron siglos antes de que se desarrollara un cambio en cuestión energética, la cual ocurrió con la primera revolución industrial que inició en la segunda mitad del siglo XVIII d.C. en Gran Bretaña, siendo el vapor quien impulsara a la maquinaria, este vapor era obtenido de calderas las cuales estaban alimentadas de carbón mineral.

Las máquinas de vapor fueron remplazadas en la segunda mitad del XIX debido al desarrollo del motor de combustión interna y la llegada de la energía eléctrica. La primera guerra mundial marca el fin de la primera revolución industrial.

El comienzo de la segunda revolución industrial se dio a principios del siglo XX. Las innovaciones técnicas concentradas esencialmente en nuevas fuentes de energía como el gas, el petróleo o la electricidad trajeron como consecuencia la invención de nuevos sistemas de transporte (avión y automóvil) y comunicación (teléfono y radio), dando paso a la globalización y a la demanda de energía cada vez mayor. Dicha energía se obtiene de combustibles fósiles (carbón mineral, gas y petróleo) y fueron los impulsores de esta nueva era.

Las tecnologías utilizadas durante la primera y segunda revolución industrial tenían como fuente de energía principal los combustibles fósiles, los cuales al ser utilizados despiden gases de efecto invernadero, cenizas y contaminantes al ambiente. El calentamiento global y la contaminación de las grandes urbes alertó a los líderes mundiales y a la comunidad científica siendo en la década de 1970 que las energías renovables se consideraron una alternativa a las energías tradicionales, tanto por su disponibilidad presente y futura, como por su menor impacto ambiental.

Energía renovable o energía verde es un término que describe la energía generada a partir de fuentes de energía primaria respetuosas con el medio ambiente que no contaminan y no emiten subproductos. Actualmente, están cobrando mayor importancia a causa de las consecuencias provocadas por el efecto invernadero que conlleva al calentamiento global, acompañado por un aumento de conciencia a nivel internacional con respecto a dicho problema. De igual manera, economías que no poseen o que agotaron sus fuentes de energía tradicionales (petróleo y gas) y necesitan adquirir esos recursos de otras economías, buscan evitar dicha dependencia energética, así como la balanza negativa, comercialmente hablando, que representa la adquisición de dichos insumos.

Las energías renovables tienen un estrecho vínculo con el sol ya que son causadas por los efectos de la radiación emitida por el astro, es decir, es nuestra estrella quien genera los vientos y las mareas por el calentamiento de los cuerpos de agua marina y aire, provocando la evaporación del agua la cual se precipita en las masas continentales formando ríos. La biomasa también depende del sol, ya que sin irradiación solar las plantas no podrían llevar

acabo la fotosíntesis. Aunque el sol es la fuente primaria de muchas de las demás energía verdes, cada una tomo distintos nombres de acuerdo al fluido o a la fuente que las impulsa, de ahí que se denomine como energía eólica (viento), energía hidráulica (agua), mareomotriz (olas y mareas) y biomasa (plantas), además de las energías aprovechadas por la radiación solar (fototérmica, fotovoltaica y fotoquímica). Existe una fuente de energía que no depende directamente del sol, si no que depende del calor interno dela tierra, a esta fuente se le da el nombre de energía geotérmica.

La geotermia es una rama de la geofísica, que se encarga del estudio de las condiciones térmicas de la tierra. El término energía geotérmica se utiliza actualmente para indicar la parte del calor de la tierra que puede o podría ser recuperado y explotado por el hombre. Esta ciencia aprovecha el calor interno de la tierra, la energía termal acumulada bajo la superficie de la tierra en zonas de agua de alta presión, sistemas de vapor o de agua caliente es extraída del subsuelo y posteriormente es utilizada en plantas de vapor para mover las turbinas las cuales al estar acopladas mecánicamente a los generadores producen energía eléctrica.

En los 60 la energía geotérmica era considerada una energía limpia. Sin embargo, no existe actualmente ninguna forma de producir o transformar energía sin afectar de alguna forma al ambiente. La forma más sencilla de producir energía, quemar madera tiene consecuencias negativas en la calidad del aire y el ritmo de deforestación. De forma similar, la explotación de la energía geotérmica también tiene efectos en el ambiente, aunque es menos contaminante que la mayoría de fuentes convencionales de energía. El principal contaminante descargado al medio ambiente es el bióxido de carbono (CO_2), que en una planta geotérmica está en un intervalo de 13 a 380 g/ kWh, mientras que una planta de carbón emite 1042 g/kWh, una de hidrocarburo 906 g/kWh y una de gas natural 453 g/kWh. Las emisiones totales de gases de una planta geotérmica son el 5% de una planta de tamaño equivalente operada por combustibles fósiles (Instituto Nacional de Electrificación-INDE, 2007).

El aprovechamiento geotérmico está en constante aumento debido a las ventajas económicas y el bajo impacto ambiental que esto conlleva. México posee un gran potencial de este recurso, La (Comisión Reguladora de Energía, 2011) reporta que la Comisión Federal de

Electricidad tiene una reserva probada de 1142 MWe en cada uno de los campos en operación, una reserva posible de 7,422 MWe y una estimación probable de 2,077 MWe. (INEGI, El sector energético en México 2014. Serie estadística seccional 2015., 2015).

La energía geotérmica no solo tiene aplicación para la generación de electricidad, también es utilizado con otros propósitos, en la agricultura es utilizada para la calefacción de invernaderos y suelos, en el deshidratado de cultivos y en la acuicultura. La industria también utiliza esta energía para sus procesos químicos y para el secado e industrialización de maderas.

La energía geotérmica también puede ser utilizada para la calefacción de espacios habitacionales y para el acondicionamiento del aire. Estas aplicaciones que se estudian y desarrollan se denominan geotermia de baja potencia, las investigaciones se basan en que la tierra al poseer una gran cantidad de masa tiene variaciones de temperatura menos bruscos en comparación con la atmosfera, además de que a cierta profundidad la tierra mantiene una temperatura constante a lo largo del año, el subsuelo suele estar a una temperatura neutra durante todo el año (más fresco en verano que el aire y más templado en invierno).

Dado que una gran parte de la energía primaria que se consume es para la calefacción y refrigeración de edificios, es necesario el utilizar más esta energía en el sector de la construcción, siendo esto crítico para asegurar la sostenibilidad de la energía y el medio ambiente.

La climatización geotérmica es un sistema de climatización (calefacción y/o refrigeración) que utiliza la inercia térmica (temperatura constante, dependiendo de los diferentes lugares) del subsuelo poco profundo y tiene gran aceptación alrededor del mundo.

Los métodos utilizados por la energía geotérmica de baja potencia para la climatización y el acondicionamiento de edificios incluyen sistemas tales como bombas de calor geotérmicas y los intercambiadores de calor tierra-aire (EAHE). Su funcionamiento es muy similar a un aire acondicionado tradicional que funciona para enfriar o como calefacción.

1.2 Antecedentes

Los beneficios que se pueden obtener del comportamiento térmico del suelo eran ya conocidos siglos atrás, en las viviendas tradicionales de Provenza al sur de Francia eran construidos ductos subterráneos de sección rectangular conocidos como pozo provenzal, cuya función era enfriar el aire para refrescar el interior de las casas. De igual manera se construían sistemas similares al norte del continente americano en el país de Canadá, pero en esta región lo que se buscaba con este tipo de sistemas era calentar el aire para tener un mejor confort térmico dentro de las viviendas, de ahí que a los intercambiadores de calor tierra-aire se les conozcan como pozo provenzal o pozo canadiense (Geoconsultores. Técnicos y Ambientales. S. L., 2008).

La construcción de estos sistemas de ductos para ventilación y el mejoramiento del confort térmico de las viviendas se basaban en el conocimiento empírico que poseían las personas. La falta de un sustento teórico y científico que validara la eficiencia de estas construcciones abrió un nuevo campo de estudio, es ahí donde científicos de diversas disciplinas se abocaron a realizar estudios que dieran sustento al uso de intercambiadores de calor tierra-aire para su implementación en construcciones modernas con la finalidad de ventilar y acondicionar de manera eficiente los casas y desplazar en lo posible a las tecnologías convencionales.

1.3 Revisión bibliográfica.

El trabajo a efectuarse requiere una profunda revisión bibliográfica para tener una visión general de los estudios que se han llevado a cabo tanto en la rama de confort térmico como en la de los sistemas de ventilación, es ahí en donde los EAHEs tienen mayor impacto. Específicamente dos áreas son las de mayor interés. En la primera área de interés se encuentran los trabajos de investigaciones realizadas para el cálculo de los perfiles de la

temperatura de la tierra a distintas profundidades y la transferencia de calor conductivo, convectivo y radiativo que existe en el suelo.

En la segunda área la búsqueda estará enfocada en la eficiencia térmica del intercambiador de calor tierra-aire, en donde se dividirán las investigaciones abordando el enfoque de los estudios teóricos que son modelos numéricos que tratan de representar los fenómenos de intercambio de calor que se lleva en el sistema; las investigaciones teórico-experimentales que de igual manera son estudios de modelos numéricos cuyos resultados son validados con un modelo experimental y las investigaciones experimentales que evalúan el comportamiento térmico del EAHE.

Para ello se realiza una búsqueda extensa a nivel nacional e internacional que amplíen el conocimiento y dé un enfoque general en el tema, con la finalidad de desarrollar un experimento de calidad con las condiciones presentes en el sureste de la república mexicana como lo son la humedad, la temperatura y el tipo de suelo característico de la región.

1.3.1 Estudios de transferencia de calor en el suelo.

Ingelmo et al (1986) analizaron los datos de temperatura del suelo a tres profundidades (20, 50 y 100 cm) y los del aire a 1 metro de altura en un periodo de 6 a 8 años, el estudio se llevó acabo en dos centros meteorológicos localizados en diferentes lugares y cuyos suelos eran de diferente topología. Validando las mediciones de las temperaturas con una correlación de unas series térmicas en un computador los autores encontraron que la temperatura del suelo a 20 centímetros de profundidad es 99% igual a la temperatura anual promedio del aire a 1 metro de altura con un margen de error de 0.5 °C. También, se observó que a mayor profundidad la temperatura se va homogenizando, esto se validó porque entre la temperatura 1 (20 cm) y la temperatura 2 (50 cm) existió una mayor diferencia entre las temperaturas en comparación con el valor 2 (50 cm) y el valor 3 (100 cm) y se deduce que la temperatura anual

promedio es significativamente diferente para cada profundidad. Además, el comportamiento de la transferencia de calor es diferente para cada tipo de suelo.

Mihalakakou et al (1997) utilizaron un modelo para la predicción de 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. Este modelo se basa en la ecuación diferencial de conducción de calor transitoria utilizando como condición de contorno de la ecuación de balance de energía en la superficie del suelo. La ecuación de balance de energía implica el intercambio de energía 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. En este trabajo, se encontraron similitudes entre los valores de temperatura medidos y calculados. El modelo utilizado en este experimento 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 y se concluyó que ambos modelos pueden predecir la temperatura de la superficie del suelo con suficiente precisión.

Salah El-Din (1999) desarrolló dos experimentos para predecir la variación periódica de la temperatura del suelo con la profundidad. Se basan en la ecuación de balance de energía en la superficie del suelo y el supuesto de que la variación de temperatura en la superficie del suelo es de forma de una onda sinusoidal. La ecuación de balance de energía consiste en la variación periódica de la radiación solar, la temperatura atmosférica y el flujo de calor latente debido a la evaporación. El flujo de calor en el suelo se ha derivado y se han calculado la profundidad de amortiguación y la temperatura del suelo correspondiente. El estudio paramétrico mostró que la temperatura del suelo y la amplitud del flujo de calor en el suelo aumento con el incremento de la humedad relativa del aire y la capacidad de absorción suelo. Por el contrario, la temperatura del suelo y la amplitud del flujo de calor disminuyen con el aumento en la fracción de la evaporación y la velocidad del viento. Los valores de la profundidad de amortiguación es casi el mismo en ambos casos y oscila entre los 2 metros de profundidad, mientras que la temperatura del suelo correspondiente está influenciada por los diferentes parámetros de manera significativa.

Maky & Ramadan (2010) realizaron un trabajo para el cálculo de la conductividad térmica, el flujo de calor y la producción de calor radiogénico de algunas unidades de rocas del Cretácico Superior. El cálculo de la conductividad térmica se determinó mediante ecuaciones de respuesta de los minerales presentes en cada modelo mineralógico. Para estimar la conductividad térmica, a partir de una fórmula de mezcla, la media geométrica de las conductividades individuales ponderados por la proporción volumétrica de cada componente; la producción de calor y el flujo de calor radiogénico pueden ser definidos. Se encontró que los minerales de arcilla como la illita, caolinita, esmectita y cuarzo son los principales minerales presentes en los pozos estudiados, en combinación con un poco de calcita y dolomita. El estudio encontró que la conductividad térmica media (THC) de la piedra caliza para las diferentes composiciones (arena, piedra caliza) se encuentra en un intervalo de entre 1.54 y 3.18 W/m·K.

Van Manen & Wallin (2012) hicieron un estudio experimental para caracterizar el comportamiento de la temperatura del suelo de Wairakei, Taupo, Nueva Zelanda. El terreno tenía un área de 0.5 m², mientras que la profundidad es de 7.39 m., los intervalos de los sensores son de 0.00, 0.05, 0.38, 0.43, 0.48, 0.53, 0.58, 0.68, 0.78, 0.88, 0.98, 1.08, 1.18 y 1.27 m. Los sensores que están en el pozo profundo se encuentran en 1.60, 1.80, 2.00, 2.20, 2.41, 2.65, 2.90, 3.15, 3.40, 3.89, 4.39, 4.89, 5.52, 5.89, 6.39, 6.89 y 7.39 m. Los datos fueron almacenados cada 15 minutos. Los pozos se ubicaron en una zona soleada cubierta de pastos y se cubrieron con una losa de cemento de 40 x 40 cm para ayudar a minimizar el agua. Las variables de temperatura y precipitación se han obtenido de la estación meteorológica más cercana. Se observaron que las temperaturas superficiales estaban en una escala de entre 6.14 y 23.7 °C, a partir de los 2.9 metros de profundidad las temperaturas oscilaba entre los 11.9 y 16.7 °C y a una profundidad de 7.35 metros los cambios eran mínimos, manteniéndose en una amplitud de entre 14.0 a 14.6°C. Las sondas superficiales muestran que la temperatura del suelo poco profundo siguen las variaciones de temperatura ambiental. Se concluyó que la temperatura del suelo hasta 0.53 metros tiene influencias visible de las variaciones de la temperatura atmosférica, siendo las de 0 a 0.05 m las más afectados. En cambio, en un intervalo de 0.53 a 1.27 m es más gradual la respuesta y solo es visible con variaciones más

largas. Por debajo de 1.27 m, hasta el punto más profundo medido a 7.385 m, la influencia estacional es menos visible.

1.3.2 Estudios teóricos de intercambiadores de calor tierra-aire.

Mihalakakou et al. (1994) presentaron un modelo numérico para la predicción del comportamiento térmico de los intercambiadores de calor tierra-aire. El modelo describe el calor y la transferencia de masa de manera simultánea en el interior del tubo y en la contabilización de la estratificación térmica de suelos, a su vez implementaron un modelo unidimensional para la distribución de temperaturas y humedad en la tierra. Para simular el tubo intercambiador de calor, desarrollaron un modelo bidimensional en coordenadas cilíndricas con 3 variables independientes (r , y , t) y 2 dependientes (T , h), el cual se basó en un balance de energía. Se concluyó que el modelo propuesto puede predecir con precisión la temperatura del aire en circulación y la distribución de temperatura del sistema así como el rendimiento térmico global de los EAHE, estos resultados fueron validados con datos experimentales. La diferencia máxima que se observó entre los datos teóricos y experimentales no superó los 0.3 °C.

Bojić et al. (1997) simularon numéricamente un intercambiador de calor tierra-aire para climatizar un edificio de 4 paredes, un techo falso y un piso. Una vez fijada la temperatura dentro del edificio, el modelo calcula la tasa de transferencia de calor promedio a través del mismo y se resolvió para un estado transitorio. Por otra parte, para calcular el gradiente de temperatura en el suelo se utilizaron ecuaciones de energía 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 son la distribución de las temperaturas externas y de la intensidad de la radiación solar durante el día. La eficiencia del EAHE 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 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 tierra a 2.4 m de profundidad, distancia a la que se enterraron los tubos del intercambiador.

Badescu (2007) desarrolló un modelo teórico de un intercambiador de calor tierra-aire. 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 código numérico se utilizó para simular el funcionamiento del sistema de calefacción en Renania-Palatinado, Alemania. Se investigó 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 energía 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. Se concluyó que la energía suministrada por el intercambio de calor del suelo depende significativamente de diferentes parámetros de diseño como la profundidad de la tubería, diámetro y material. La temperatura del aire medida oscila entre aproximadamente 15 y 35 °C. La temperatura del suelo a una profundidad de 1, 2 y 4 m es positiva 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.

Ascione et al. (2011) evaluaron el rendimiento energético de un intercambiador de calor tierra-aire acoplado a un edificio con aire acondicionado tanto en invierno como en verano. Se utilizaron códigos dinámicos comerciales de simulación energética para edificios, y se evaluó el comportamiento térmico de los sistemas para diferentes climas de Italia, se tomaron en consideración tres lugares significativos que representan los diferentes climas característicos de Italia (Nápoles, Roma y Milán). Las condiciones de contorno que se utilizaron fueron la tipología de suelo, material del tubo, la longitud del tubo y la profundidad, la velocidad del paso de aire del tubo, los caudales de aire de ventilación y modos de control. También, se consideró el acoplamiento de otros sistemas pasivos y se realizó un análisis técnico-económico. En este trabajo se llegó a la conclusión de que el EAHE ha demostrado la eficacia más alta para los climas fríos, tanto en invierno como en verano teniendo los mejores

resultados bajo las condiciones de tierra húmeda/húmeda de Milán, donde se obtuvo el máximo ahorro energético de aproximadamente el 44% en términos de energía térmica, alrededor del 37% de la energía primaria. La influencia del material del tubo (por lo general, PVC, metal u hormigón) sobre el rendimiento energético es insignificante. También, se concluyó que longitudes menores a 10 m son insatisfactorias y proponen una longitud óptima de 50 m a una profundidad de 3 metros. Por último, las tecnologías de sistemas pasivos son económicamente aceptable teniendo una recuperación de la inversión de 5 a 9 años, sólo en los casos donde la tierra es fácil de remover y el costo del proyecto es barato. En el caso de suelos rocosos (Hard Rock) donde el terreno es difícil de cavar y se tiene que instalar tubos de acero los EAHEs no son económicamente viables ya que inducen valores de recuperación de la inversión demasiado largos.

Su et al. (2012) desarrollaron un modelo de simulación numérica para sistemas de intercambiadores de calor tierra-aire enterrados a diferentes profundidades, en el cual un sub-modelo describe la temperatura del aire y la humedad transitoria por convección-difusión, y otro sub-modelo permite determinar la conducción de calor para conocer la temperatura de la roca. Se resolvió la ecuación de difusión-convección unidimensionalmente en estado transitorio para predecir la temperatura del aire y humedad dentro del EAHE a determinada profundidad. Un algoritmo de computación secuencial ha sido emitido para resolver el sub-modelo de aire y el sub-modelo de la roca, respectivamente. La precisión de este modelo numérico ha sido verificada por la comparación de las temperaturas del aire y de la roca. Se determina mediante varias simulaciones que la temperatura de la tierra permanece constante a partir de 10 metros de profundidad.

Ramírez-Dávila et al (2014) Realizaron un estudio numérico para la predicción del comportamiento térmico de un intercambiador de calor tierra aire (EAHE) para tres ciudades de México. Las condiciones climatológicas que presentan las entidades son un calor extremo en verano y bajas temperaturas en invierno (Cd. Juárez, Chihuahua), clima templado (Ciudad de México) y el clima cálido (Mérida, Yucatán). Evaluaron el EAHE con un código de dinámica de fluidos computacional desarrollado bajo el método de volumen finito. El suelo presente en las regiones es arena, limo y arcilla respectivamente para cada ciudad. La

evaluación considero tres diferentes números de Reynolds, $Re = 100\ 500, 1000, 1500$, esta simulación se hizo para un periodo de un año. Los resultados demostraron una disminución de la temperatura del aire en un promedio de 6.6 y 3.2°C para el verano y un aumento de 2.1 y 2.7°C para el invierno para Cd Juárez y la Cd de México respectivamente, Caso contrario para Mérida, el EAHE tuvo su mejor rendimiento térmico en invierno, el aumento de la temperatura del aire en 3.8°C . Se concluye que el uso de EAHEs es apropiado para la calefacción o refrigeración de edificios en tierras de temperaturas extremas y moderadas en el que el efecto de inercia térmica en el suelo es más alto.

Xamán et al. (2014) llevaron a cabo un estudio numérico para predecir el comportamiento térmico de un intercambiador de calor tierra-aire con aislamiento térmico (Poliestireno) en una tubería de salida. Este estudio se realizó en tres ciudades de México. Los lugares seleccionados fueron la Cd. de México que presenta un clima templado, la Cd. de Mérida, Yucatán, con un clima húmedo-caliente y Cd. Juárez, Chihuahua, con un clima extremo. Se consideró el suelo como un medio sólido donde el calor se transfiere por conducción, además de que no hay transferencia de calor por convección a través de la tubería, y un intercambio de calor entre las paredes de la tubería y el suelo. Estos fenómenos fueron modelados mediante las ecuaciones de conservación de masa, momentum y energía. Se encontró que el aislamiento con un espesor de 0.05 m ($2''$) mejora el rendimiento del EAHE en climas templados y húmedos-cálidos. En invierno, el aislamiento aumenta el efecto de calentamiento entre 2 y 2.6°C en comparación con el EAHE sin aislamiento. En verano, el aislamiento térmico mejora en el efecto de enfriamiento de entre 1.3 y 5°C en comparación con el EAHE sin aislamiento. En particular, para Cd. Juárez durante el verano, el comportamiento térmico de la EAHE no mejoró debido al aislamiento térmico. En conclusión, el aislamiento térmico de 0.05 m de espesor instalado en la salida del EAHE, demostró mejorar el rendimiento térmico del EAHE en climas templados y húmedos-cálidos, ya que evita la acumulación de calor indeseable del suelo en la salida. Caso contrario para climas extremos como el de Cd. Juárez, Chihuahua, no se observó ninguna mejora en el rendimiento del EAHE.

Shigh et al. (2014) desarrollaron un modelo tridimensional basado en la dinámica de fluidos computacional para evaluar el potencial de calentamiento del sistema intercambiador de calor tierra-aire. El modelo de simulación del EAHE fue desarrollado en la plataforma computacional de dinámica de fluidos CFX 12.0. Los resultados de la simulación fueron validados por observaciones experimentales tomadas en el montaje experimental instalado en Bhopal, India. Se observó una buena concordancia entre los resultados de las simulaciones y las observaciones experimentales con valores máximos de coeficiente de correlación y la raíz cuadrada media de la desviación porcentual 0.999 y 2.1%, respectivamente. Se llegó a la conclusión, que el máximo aumento en la temperatura del aire experimental fue de 8.2 °C y se produjo con velocidades de flujo de 2 m/s, el valor mínimo del aumento en la temperatura del aire experimentalmente fue de 6.8 °C y se produjo con velocidades de flujo de 5 m/s. Se observó que el aumento de la temperatura del aire es más rápido para la longitud inicial del tubo. La ganancia de energía o calentamiento potencial total por hora obtenida a partir de la configuración experimental del EAHE con tubería de PVC de 19.2 m de longitud y el diámetro 0.1016m enterrado a 2 m de profundidad varió de 0.59 a 1.22 MJ h para las velocidades de flujo de aire de 2 a 5 m/s.

Xamán et al. (2015) realizaron un estudio numérico pseudo transitorio del comportamiento térmico de un intercambiador de calor tierra-aire en tres ciudades en México. Las condiciones climáticas se corresponden con el día más caluroso en verano y el día más frío en invierno para: clima extremo (Juárez, Chihuahua), clima templado (Ciudad de México, D. F.) y el clima cálido (Mérida, Yucatán). Las simulaciones del EAHE se realizaron en un código basado en el método de volumen finito. Las simulaciones se realizaron por hora considerando cuatro números de Reynolds (100, 500, 1000, 1500) a través de un día. En ciudad Juárez, el EAHE funcionó correctamente con fines de refrigeración y calefacción durante todo el día. Para Mérida y Ciudad de México el EAHE no funcionó durante ciertos períodos. El potencial máximo de enfriamiento proporcionado por el EAHE fue de 17.4, 10.2 y 10 °C en Juárez, Mérida y Ciudad de México, respectivamente. El potencial de calentamiento máxima proporcionada por el EAHE fue de 6.3, 12.5 y 3.2 °C en Juárez, Mérida y Ciudad de México, respectivamente. Se concluyó que los intercambiadores de calor tierra-aire tiene un gran potencial en climas extremos como el de Cd. Juárez, aunque tiene un

rendimiento aceptable para climas como el de la Cd. de Mérida y la Cd. De México, por lo que estos sistemas pasivos son una opción viable en México para el acondicionamiento del aire para edificaciones.

Niu et al. (2015) realizaron un trabajo para el análisis del rendimiento de un intercambiador de calor tierra-aire y dedujo un modelo para predecir la capacidad de refrigeración de un EAHE. Un modelo de volumen de control en estado permanente unidimensional fue desarrollado y aplicado para simular el rendimiento del EAHE. Se acopló tanto calor y transferencia de masa entre el aire y el tubo. El modelo fue validado mediante la comparación con los datos experimentales a partir de una instalación de pruebas de energía renovable existente. Después de la calibración, seis factores, a saber, la temperatura del aire, la humedad relativa del aire, la velocidad del aire en la entrada del EAHE, la temperatura de superficie del tubo, la longitud del tubo y el diámetro, fueron analizados utilizando el modelo validado. Se obtuvieron los modelos de regresión polinomial para predecir las capacidades de refrigeración, incluyendo la capacidad total, sensible y latente de enfriamiento con gran precisión. Se concluyó que cuanto menor sea la temperatura del aire que entra, menor es la tasa de decrecimiento de la temperatura del aire. La temperatura del aire a lo largo del EAHE bajo las diferentes condiciones de humedad relativa del aire de entrada fue la misma y no se vio afectada por la humedad relativa del aire. Cuando la temperatura del aire de entrada es más alta, mayor es la tasa de disminución de temperatura, esto se observó cuando el aire entraba a 34 °C tenía una disminución cercana a los 15 °C. La tasa de cambio de la capacidad de refrigeración sensible fue 0.31 kW/°C y 0.79 kW/°C de la capacidad de enfriamiento latente. La tasa de variación de la capacidad total de enfriamiento fue de 1.1 kW/°C Por último, se observó que a menor velocidad del aire, la temperatura a la salida es más baja dado a que interactuará más con el sistema y también hacen énfasis que los tubos de menor diámetro tiene mejor rendimiento en comparación con tubos de diámetro grande.

Gan (2015) desarrolló un modelo numérico de tres dimensiones para la simulación del comportamiento térmico dinámico de intercambiadores de calor aire-tierra para el precalentamiento del aire de suministro. Se consideraron los factores que afectan el rendimiento y funcionamiento de los EAHEs como lo son los cambios de suelo, las

condiciones atmosféricas y los consiguientes cambios en las cargas térmicas tanto de calefacción como de refrigeración de un edificio en funcionamiento. La importancia de las interacciones dinámicas entre los tres medios (intercambiador de calor, suelo y la atmósfera) se toman a partir de la comparación de la temperatura del aire de las tasas de transferencia de calor y suministro a través del intercambiador de calor en funcionamiento continuo e intermitente en las temporadas de calefacción. Se observó que dejar de lado las interacciones entre dos o tres medios habría predicciones significativamente sobre o debajo de la tasa de transferencia de calor y la temperatura del aire. El descuido de las interacciones entre el intercambiador de calor, el suelo y el aire de ventilación que prediga el comportamiento térmico de EAHE mientras que dejar de lado las interacciones entre la superficie del suelo y la atmósfera sería un fracaso para producir datos fiables para el rendimiento operativo a largo plazo del EAHE instalado en el suelo poco profundo. El nivel de exceso de predicción podría ser mayor para funcionamiento intermitente que para un funcionamiento continuo. Se ha encontrado que la tasa de transferencia de calor disminuye a lo largo del intercambiador de calor y la tasa de disminución es no lineal. En consecuencia, la tasa de transferencia de calor y aumento de temperatura de aire de suministro por unidad de longitud disminuye al aumentar la longitud del intercambiador de calor para el precalentamiento. Sin embargo, la ganancia de calor total y la temperatura del aire de entrada aumentaron respecto a la longitud de la tubería. También se ha encontrado que las interacciones térmicas y de humedad directas entre un intercambiador de calor, el suelo y la atmósfera tienen un impacto significativo en la transferencia de calor a través del intercambiador de calor.

Kepes et al. (2015) presentaron un trabajo enfocado en la investigación numérica sobre diferentes configuraciones geométricas de los intercambiadores de calor tierra-aire utilizando el modelo de teoría constructal para obtener el máximo potencial térmico. Las simulaciones numéricas realizadas en este trabajo se realizaron utilizando un modelado computacional desarrollado en el software FLUENT, que se basa en el método de volúmenes finitos (FVM). Para ello, se desarrolló inicialmente una prueba de independencia de malla. Después de eso, se usó de la malla independiente para la validación del modelo calculado. Los resultados indicaron que, para la misma área ocupada por los conductos y la tasa de flujo de masa fija de aire, el aumento del número de conductos (complejidad de la geometría) mejoró el

rendimiento térmico de los EAHEs hasta aproximadamente 73% para la refrigeración y 115% para la calefacción bajo ciertas condiciones.

Benhammou et al. (2015) realizaron el estudio de un sistema de refrigeración pasiva (EAHE) asistido por la torre de viento. El modelo transitorio de análisis fue desarrollado con el fin de investigar la influencia de los parámetros de diseño en el rendimiento de los EAHEs. El modelo de los EAHEs se valida con datos teóricos y experimentales llevadas a cabo por otros autores. Puesto que es bien conocido que el rendimiento de los sistemas de EAHE está más influenciada por la velocidad del flujo de aire, otro modelo se presentó para predecir la velocidad del aire dentro de la tubería enterrada. Por otra parte, la profundidad a la que se enterró el EAHE de 2 m fue adoptado y el período considerado es julio donde la temperatura ambiente supere los 45 ° C. Este estudio se amplió para examinar el comportamiento del sistema durante todo el año. Los resultados mostraron que las dimensiones de torres eólicas (altura, sección transversal) no tienen un impacto importante en comparación a las dimensiones de la tubería (longitud, diámetro). Se encontró que la torre con una altura total de 5.1 m y un área de sección transversal de 0.57 m² puede generar un caudal de aire de 592.61 m³/h. De igual manera se observó que el potencial de refrigeración diario alcanzó un valor máximo de 30.7 kW h correspondiente a la longitud de la tubería de 70 m.

Serageldin et al. (2016) realizaron el estudio paramétrico para explorar el impacto de diferentes parámetros como el diámetro de la tubería, material de la tubería, el espesor tubería, longitud del tubo y la velocidad del fluido, el rendimiento de un EAHE. Se consideró las condiciones meteorológicas de Egipto. Se usó un modelo matemático en estado permanente, unidimensional para las ecuaciones de conservación de energía. Un método numérico de diferencias finitas se utiliza para resolver el modelo matemático desarrollado con la ayuda de un código de MATLAB. Una simulación en estado permanente en CFD de ANSYS Fluent es establecido para predecir la temperatura del aire y del subsuelo. Observaron que la temperatura del aire a la salida disminuyó de 20.4 a 18.7 °C cuando el diámetro de la tubería se expande de 2 a 3 pulgadas. Los cambios de temperatura de 19.7 a 19.9 °C se observaron cuando la longitud del tubo se alarga de 5.45 hasta 7 metros. Además, tres materiales de tuberías diferentes, tales como PVC, acero y cobre fueron considerados. La temperatura del

aire de salida fue de 19.7 °C en un tubo de PVC y 19.8 °C para el acero y el cobre, respectivamente. Se concluye que el material de la tubería no tiene gran influencia en la temperatura del aire a la salida del EAHE. Finalmente, se investigó el efecto de la velocidad del fluido. Por lo tanto, la salida de la temperatura del aire disminuye de 20.4°C a 19.2°C como aire acelera de 1 a 3 m/s.

1.3.3 Estudios teóricos - experimentales de intercambiadores de calor tierra-aire.

Santamouris et al. (1995) desarrollaron un modelo matemático transitorio para calcular el desempeño térmico para uno y múltiples tubos enterrados, el cual fue incorporado en TRNSYS. El modelo toma en cuenta la transferencia de calor y masa en la tierra a gradientes de temperatura y humedad determinados, también se considera la estratificación térmica vertical en la tierra, la cual rompe con la simetría axial del flujo de calor del tubo. Se instrumentó una casa cubierta de vidrio en Atenas. Los cálculos numéricos fueron validados con datos obtenidos experimentalmente. Las variables que influyen el desempeño térmico del sistema son la longitud de los tubos, su radio, y la velocidad del aire dentro del tubo y la profundidad del tubo debajo de la superficie de la tierra. Las simulaciones se hicieron para tubos con 5 longitudes diferentes. Se encontró que durante el invierno la temperatura de aire dentro de la casa se incrementa y durante el verano decremento al aumentar la longitud del tubo, disminuir su diámetro, incrementar la profundidad más de 4 m y disminuir la velocidad del aire dentro de los tubos. En cuanto a la carga de refrigeración anual, la diferencia absoluta entre los dos conjuntos de valores es de entre 0 y 15% con un valor medio cercano a 6.3%. La diferencia absoluta entre los valores predichos mensual es de entre 0 y 25%.

Bojić et al. (1999) realizaron un experimento de un EAHE, el cual consistía en enterrar dos tubos en el suelo, uno de PVC y uno de acero. Se observó durante el invierno que, el aire se calienta y durante el verano, se enfría, para después ser usado como un dispositivo de aire acondicionado. También se obtuvo un modelo matemático de un EAHE, se dividió el suelo y las tuberías en volúmenes elementales, usando ecuaciones de energía en estado permanente.

Se determinó el espaciamiento entre tubos que influye en la transferencia de energía desde el suelo al EAHE. Como resultado del estudio, se obtuvo que el intercambio de calor entre los tubos y la tierra aumenta al incrementarse la distancia entre tubos, esto sucede independientemente de la estación del año en la que se encuentren. Esto es debido 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 de intercambio de calor del tubo de acero osciló entre el 50 y 54% sobre la contribución que presentó el intercambiador fabricado con tubo de PVC.

Yoon et al. (2009) desarrollaron un modelo numérico para un intercambiador de calor con múltiples tubos, cuyo arreglo los posiciona muy cerca uno de otro para considerar la influencia térmica de los tubos adyacentes. Para el análisis numérico, todos los tubos curvados se consideraron rectos, y los tubos circulares fueron modelados de forma rectangular. Se asignó un coeficiente convectivo para la tierra y la losa del edificio, en cuanto al del aire, éste se determinó a partir del número de Nusselt. Se asumió que la humedad en la tierra es del 50% a un metro de la superficie, y saturada después de 2 m. El modelo se validó experimentalmente. La tasa de transferencia de calor anual calculada fue de 31.7 GJ, y la medida de 32.5 GJ, lo cual representa un error del 3% con respecto a los resultados del modelo teórico realizado. Se evaluaron 9 tubos de PVC con un diámetro de 0.5 m cada uno. Como resultado, se obtuvo que la máxima diferencia de temperaturas entre la entrada y salida de los tubos fue de 7.0 °C en invierno y 8.3 °C en verano. Mientras que las tasas promedio de enfriamiento/calentamiento en verano fueron de 30.3 MJ/h y en invierno de 23.2 MJ/h. Se observó que, al reducir la distancia de los tubos de 40 a 20 metros, la eficiencia del intercambiador disminuye debido a la perturbación en la temperatura de la tierra.

Vaz et al. (2011) presentaron un estudio experimental y numérico de los intercambiadores de calor tierra-aire. El experimento se llevó a cabo en el sur de Brasil, en la ciudad de Viamão. Los resultados se utilizaron para validar el modelado computacional. Se realizó la construcción de un EAHE acoplado a una casa el cual constaba de tres tuberías enterradas e interconectadas entre sí. Se investigó la variación de la temperatura del aire en el interior de los ductos en un ciclo anual. La solución numérica de las ecuaciones se realiza con

un código comercial (FLUENT) que se basa en el método de volúmenes finitos (FVM). Los campos de temperatura transitoria se predijeron numéricamente en comparación con los experimentales, la diferencia más alta encontrada fue inferior al 15% entre las temperaturas del modelo y las medidas en el experimento. Los resultados demostraron la validez y eficacia del modelo computacional empleado, lo que permite su utilización para futuras investigaciones y proyectos de desarrollo sobre los intercambiadores de calor aire-tierra.

1.3.4 Estudios experimentales de intercambiadores de calor tierra-aire.

Yassine et al. (2014) investigaron la viabilidad y eficiencia del acoplamiento de un EAHE con un sistema de ventilación mecánica para obtener confort térmico en una casa típica en un entorno rural. Se investigó la selección de los materiales de construcción de alta eficiencia energética que pueden reducir la energía 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. Se saben las condiciones interiores y exteriores y 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 energía del 76.7 % en comparación con el caso de referencia con sistemas convencionales.

Yoon et al. (2015) realizaron un estudio experimental en tres tipos de configuraciones de EAHEs, los tipos de intercambiador a estudiar fueron el furtivo horizontal, espiral-bobina y el tipo U, los cuales fueron instalados en una caja de acero de (5 m x 1 m x 1 m). Una arena seca comercial se utilizó para llenar la caja de acero, y se realizaron pruebas de respuesta térmica (TRTs) durante 30 horas para evaluar las tasas de intercambio de calor de acuerdo con los diversos tipos EAHEs. El tipo U mostró que la tasa más alta de intercambio de calor por unidad de longitud del tubo, cerca de 2 y 2.5 eficiencia térmica más alta que para el tipo de

furtivo horizontal y de tipo espiral-bobina, respectivamente. Por otra parte, las tasas de intercambio de calor por unidad de longitud de tubo con un intervalo de paso relativamente largo (tono / diámetro = 1) eran 100-150 % mayor que aquellos con un intervalo de paso relativamente corto (paso / diámetro = 0.2), tanto en espiral-bobina y horizontales de tipo furtivo. También, se realizó un análisis de coste-eficacia, y reveló que el tipo “U” era la opción económicamente más viable en proporción a su rendimiento térmico.

1.3.5 Conclusiones de la revisión bibliográfica.

Después de haber revisado la literatura de estudios acerca de sistemas para la ventilación y climatización de espacios habitacionales utilizando la energía geotérmica de baja potencia, se encontró que los intercambiadores de calor tierra-aire tienen una aceptación en el área científica por su desempeño, simplicidad arquitectónica y rendimiento térmico. Aunque al realizar un experimento se tiene que tomar en cuenta diversos factores como, el material de la tubería, el diámetro de los tubos, configuración del sistema, la profundidad a la que estará enterrado el intercambiador, el tipo de suelo existente en el sitio de instalación, la orientación de la entrada de aire, la arquitectura circundante en el terreno (edificios y bardas), el aislamiento en la tubería de descarga, el tipo de acoplamiento a la edificación, por mencionar algunos puntos. El rendimiento también está en función de las condiciones meteorológicas presentes en las diferentes zonas geográficas, ya que factores como la humedad presente en el ambiente, la irradiancia solar, la vegetación del terreno, pueden tener una influencia en el rendimiento.

1.4 Planteamiento del problema.

En México, la energía que se produce y se consume proviene principalmente de los combustibles fósiles como se puede observar en la Tabla 1. Datos reportados por la Comisión

Federal de Electricidad (Comisión Federal de Electricidad (CFE), 2015) en su informe anual 2014 señala que se tiene una capacidad instalada de 54,374.7 Megawatts (MW), de la cual 40,123.9 MW son generados de centrales operadas por la Subdirección de Generación (SDG); 1,400 MW de la Central Nucleoeléctrica Laguna Verde; y 12,850.8 MW de 28 centrales de Productores Independientes de Energía (PIE), estos datos se observa en la Tabla 1. Considerando que del total de capacidad instalada 39,289.3 MW son de centrales que utilizan combustibles fósiles, se observa que el 72.26 % de la electricidad proviene de fuentes de energía no renovables, el consumo de estos combustibles contamina y genera gases como el CO², uno de los principales causantes del efecto invernadero.

La Secretaría de Energía (Secretaría de Energía, 2015) cada año elabora un Balance Nacional de Energía (BNE). Del BNE realizado en 2014, se reporta que los hidrocarburos aportan el 87.9 % a la producción de energía primaria y que la producción de fuentes no fósiles de energía primaria aumentó su participación, pasando de 8.4 a 8.7 % de 2013 a 2014. (Beltrán et al, 2015).

Tabla 1. Capacidad instalada de generación eléctrica nacional de CFE por platas de generación

Generador	Tecnología	Capacidad efectiva (MW)		Numero de Centrales y de Unidades		Participación porcentual por tecnología	Variación 2013-2014 (%)
		2013	2014	Centrales	Unidades		
CFE	Hidroeléctrica	11,266.8	12,268.8	80	218	22.6	8.9
	Vapor (combustóleo y gas)	11,698.6	11,398.6	26	89*	21.0	-2.6
	Ciclo combinado	7,420.3	7,566.6	13	68	13.9	2
	Carboeléctricas	5,378.4	5,378.4	3	15	9.9	-
	Turbogás	1,510.4	2,303.4	46	110	4.2	52.5
	Geotermoeléctricas	823.4	813.4	4	38	1.5	-1.2
	Combustión interna	259.2	302.4	9	78	0.6	16.7
	Eoloeléctricas	86.8	86.3	3	8	0.2	-
	Solar fotovoltaica	6.0	6.0	2	2	< 0.1	-
	Nucleoeléctrica**	1,400.0	1,400.0	1	2	2.6	-
Total de CFE	-	39,849.9	41,523.9	187	628	75.4	4.3
Productores Independientes de energía (PIE)	Ciclo Combinado	12,339.9	12,339.9	23	77	22.7	-
	Eoloeléctricas	510.9	510.9	5	376	0.9	-
Total PIE	-	12,850.8	12,850.8	28	453	23.6	-
Total	-	52,700.7	54,374.7	215	1,081	100	3.2

Fuente: Dirección de Operación, Comisión Federal de Electricidad. Diciembre 2014. Cifras reportadas.

*De estas unidades, 6 utilizan gas natural, 66 usan combustóleo y 17 queman gas natural como combustóleo.

**La capacidad efectiva con tecnología nucleoeléctrica no incluye el aumento de capacidad autorizado por la Comisión Nacional de Seguridad Nuclear y Salvaguardias el 19 de diciembre de 2014

En lugares con clima cálido, el 44% de la energía anual que se consume es para el acondicionamiento del aire. Por otra parte, en regiones con clima templado, el acondicionamiento de aire representa solo el 6%. Sin embargo, el mayor consumo lo representan los sistemas de iluminación con el 40% del consumo anual total (Álvarez & Dorantes-Rodríguez, 2010). De lo anterior se puede observar que el factor clima es determinante en el consumo anual de energía en una edificación en zonas de clima cálido.

El acondicionamiento del aire para las viviendas y las edificaciones en general ha repuntado en décadas recientes siendo el uso de sistemas convencionales (aquellos que consumen energía eléctrica) el más utilizado para climatizar los interiores. El impacto tanto económico como ambiental que tiene el acondicionamiento del aire para el interior de los edificios ha provocado que se estén buscando utilizar sistemas que ayuden a mejorar el confort térmico de las viviendas. Es por ello que se están realizando una serie de investigaciones para mejorar el rendimiento de los sistemas pasivos. Estas tecnologías datan desde siglos atrás, pero su estudio se ha intensificado a partir de las tres últimas décadas. Los nuevos diseños bioclimáticos de edificaciones residenciales y/o comerciales contemplan el aprovechamiento de ciertas fuentes de energía renovables, y el estudio de los sistemas de enfriamiento y calentamiento pasivo se hace cada vez más interesante y eficiente.

Estudios realizados en las diferentes áreas de la geofísica, en especial la geotermia, han demostrado que el suelo gracias a la masa que lo constituye posee propiedades térmicas que pueden ser explotadas por los sistemas pasivos, una de estas propiedades es que mantiene una estabilidad térmica a lo largo del año en comparación con la atmósfera, lo que evita picos de frío o calor. Esta estabilidad se hace más evidente a mayores profundidades. Así en las temporadas del año cuando en el exterior la temperatura es alta ($>35^{\circ}\text{C}$), el subsuelo se mantiene a temperaturas frescas ($\sim 25^{\circ}\text{C}$), dependiendo la ubicación geográfica. Y caso contrario en temporadas invernales, cuando en el exterior desciende la temperatura, el subsuelo se mantiene templado. Estas características hacen del suelo una fuente de energía térmica ideal para la climatización de las edificaciones mediante sistemas pasivos como lo son los intercambiadores de calor tierra-aire. (Instituto Nacional de Electrificación-INDE, 2007)

1.5 Objetivos

1.5.1 Objetivo general

Realizar la evaluación experimental del comportamiento térmico de un intercambiador de calor tierra aire con aislamiento térmico en la tubería de salida.

1.5.2 Objetivos específicos.

- Diseñar un prototipo y seleccionar los materiales necesarios para construir un intercambiador de calor tierra-aire con aislamiento.
- Realizar la construcción del intercambiador de calor tierra-aire.
- Instrumentar el prototipo para la medición de temperatura en puntos clave a evaluar en el experimento.
- Realizar la evaluación térmica de la eficiencia del sistema.

1.6 Alcances.

Diseñar y construir un intercambiador de calor tierra-aire con aislamiento térmico en la tubería de salida y evaluarlo experimentalmente por un periodo de 2 semanas en la temporada primavera-verano bajo condiciones meteorológicas de la ciudad de Chetumal, Quintana Roo.

Instrumentar el EAHE para la adquisición de datos de temperatura del aire en diferentes puntos del sistema así como la medición de los datos meteorológicos para el mismo periodo de evaluación.

Obtener datos relevantes que permitan dilucidar el potencial del aprovechamiento que el sistema puede tener en relación a la disponibilidad energética en este medio y condiciones climáticas.

También, es indispensable la documentación del experimento con lo cual se redactara una tesis para la obtención del grado académico en cuestión.

Capítulo 2. Diseño y construcción de un intercambiador de calor tierra-aire.

2.1 Diseño del intercambiador de calor tierra-aire a utilizar.

Un intercambiador de calor tierra-aire, es un sistema el cual puede ser pasivo o activo, dependiendo si la transferencia de calor por convección se genera de manera natural o es forzado el flujo de aire con algún elemento mecánico. El EAHE está formado por una serie de tuberías de plástico, metal o concreto, las cuales se encuentra enterradas a cierta profundidad, con una geometría definida y con una separación entre tubo y tubo, que les permita interactuar térmicamente con el subsuelo ya sea para enfriar o calentar el fluido que circula dentro de ellos. Estos sistemas acoplados a una habitación tienen dos propósitos esenciales.

El primer propósito de este sistema es enfriar o calentar el aire que circula a través de los tubos con la finalidad de climatizar la habitación a la cual esta acoplado, impactando directamente en las condiciones de confort térmico de la edificación. Por otro lado, el segundo propósito de los EAHE es ventilar y mejorar la calidad del aire. Esto se consigue gracias a la recirculación del fluido dentro de la habitación. Cuando se mejora la ventilación de las habitaciones se reducen los contaminantes y partículas suspendidas, lo que conlleva a mejorar la calidad del aire que se tiene en el interior de la habitación, mismo que es benéfico para los habitantes del inmueble, ya que reduce las molestias ocasionadas por el exceso de contaminantes en el aire como lo son los ojos irritados, problemas respiratorios y alergias.

La ventilación básicamente se define como el resultado de la penetración del aire exterior a través de aberturas en las habitaciones de las edificaciones. El aire es conducido al interior de las habitaciones como resultado de las diferencias de presiones y temperaturas (Serrano Arellano , 2012).

El acoplamiento del intercambiador a la habitación es crucial para garantizar que el aire de salida del EAHE tenga los efectos deseados tanto de confort térmico como de mejorar

la calidad del aire, de manera que el comportamiento de flujo de aire dentro de la habitación sea el adecuado. Para ello se han realizado una serie de estudios tanto teóricos como experimentales del comportamiento del fluido dentro de cavidades de las más diversas geometrías, ubicando las entradas y salidas de aire en diferentes puntos de las habitaciones para ver el comportamiento del aire dentro de los recintos y poder definir cuál es la opción más idónea en donde se tiene que acoplar la descarga del EAHE.

La Sociedad Americana de Ingenieros de Calefacción, Refrigeración y Aire Acondicionado (American Society of Heating, Refrigeration and Air Conditioning Engineer, 2005) especifica en el (ASHRAE Standar 62, 2004) que se requiere incrementar la cantidad de aire en el interior, el suministro mínimo de aire debe de ser de 2.5 a 7.5 l/s por persona.

El propósito es el suministro de aire “limpio” al espacio interior es para diluir la concentración de contaminantes generada por las personas, equipos y materiales; ya que la dilución de los contaminantes es influenciada por la cantidad y calidad del aire exterior, así como, la manera en que el aire es distribuido en el interior del espacio (Allard, 1998) (Awbi , 2003). La norma menciona que la calidad del aire interior se logra con el cuidado de cuatro elementos:

- Control de la fuente de contaminantes.
- Ventilación propicia.
- Control de la humedad.
- Filtración adecuada.

En general, puede decirse que el proceso de crear un microclima adecuado en espacios interiores se divide básicamente en dos categorías: calentamiento o enfriamiento para lograr el confort térmico y la ventilación para obtener la calidad del aire.

Al diseñarse un intercambiador de calor tierra-aire, se debe de considerar los factores que afecten el funcionamiento del sistema, los puntos a considerar son las variables inherentes

al aire; temperatura, velocidad, dirección y humedad. Estas variables están relacionadas de manera directa con el cambio climático tanto diario como estacionales.

También, se deben de considerar las variables arquitectónicas relacionadas directamente con las edificaciones adyacentes, la orientación con respecto al viento, localización de las aberturas de entrada y salida del aire, tipo de suelo, elementos arquitectónicos exteriores y tipo de acoplamiento con la habitación. Dentro de todas las variables mencionadas, para lograr diseños exitosos de ventilación, se requiere contar con información precisa de los coeficientes de transporte de calor y de masa. Estos coeficientes dependen de variables tales como; la geometría de la habitación, la localización de las aberturas, las fuentes de calor y contaminante, las propiedades termofísicas de la mezcla aire contaminante, la velocidad y dirección del viento circulante en el interior.

El diseño del intercambiador de calor tierra-aire depende en primer lugar de la profundidad a la que se pretende instalar el EAHE. Tomando como referencia el trabajo desarrollado por Salah El-Din (Salah El-Din, 1999), en donde menciona que a partir de 2 m de profundidad la variación diaria media de la temperatura del suelo y el flujo de calor tienden a amortiguarse, por esta motivo, se tomará este valor para la instalación del EAHE. En la Figura 1 se puede apreciar el amortiguamiento de la temperatura.

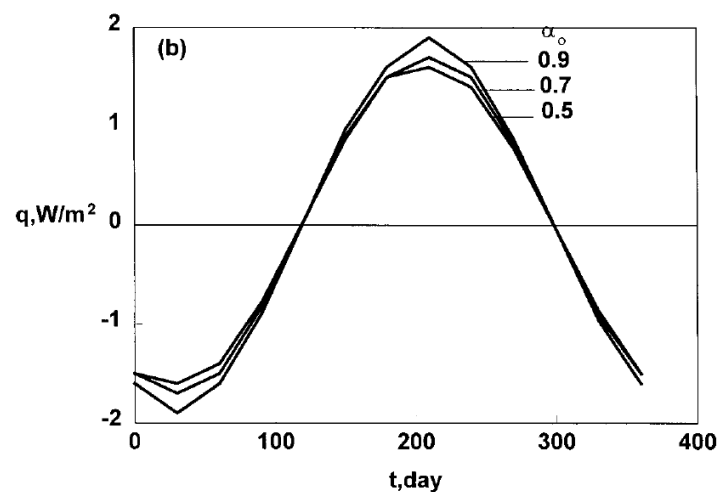


Figura 1 . Efecto de la capacidad de absorción del suelo en la variación diaria del flujo de calor en el suelo ($z = 2$ m, $\alpha_0 = 0,9$, $v = 7$ m / s, $r = 0,5$, $f = 0,5$) (Salah El-Din. 1999).

Continuando con el diseño se debe definir la longitud del EAHE ya que de ello depende el tiempo en que el fluido estará en contacto con el subsuelo. Santamouris (Santamouris et al. 1995) analizó el rendimiento de los edificios junto con un intercambiador de calor y concluye que al aumentar la longitud del tubo y disminuir su diámetro, se obtienen mejores resultados tanto en invierno calentando el fluido como en verano enfriando el aire que circula por el EAHE. En el estudio de J. Xamán (Xamán et al. 2014) se modeló una longitud de 5 metros.

Otro aspecto a considerar es el diámetro nominal de la tubería con la cual se pretende construir el EAHE, así como definir el material de los tubos. Bojić (Bojić et al. 1999) estudió el diámetro de los tubos para la construcción de EAHEs acoplados a edificios, los autores concluyeron que la eficiencia del intercambiador mejoró a medida que se incrementó la longitud del tubo, de hecho, para esta configuración la temperatura del aire a la salida del tubo fue casi igual a la de la tierra. Por tal motivo se opta por utilizar el mismo diámetro de la tubería, quedando asentado que el intercambiador tendrá un diámetro nominal de 6". Bojić (Bojić et al. 1997) mostró el rendimiento térmico de tuberías de PVC y acero para intercambiadores, y concluyó que la contribución de intercambio de calor del tubo de acero osciló entre el 50 y 54% sobre la contribución del tubo de PVC. Serageldin (Serageldin et al. 2016) evaluaron tuberías de PVC, acero y hormigón, concluyeron que el material de las tuberías tiene un impacto despreciable en el rendimiento de los intercambiadores. Por cuestiones de versatilidad, disponibilidad de material y por factores de recuperación económica a corto plazo se opta por utilizar la tubería de PVC.

La salida del EAHE estará aislada en su sección vertical y cuyo espesor del aislante será de 2". En estudios numéricos que realizó J. Xamán se encontró que el aislamiento aumenta el efecto de calentamiento de hasta 2 °C con respecto a la EAHE sin aislamiento. En verano, el aislamiento térmico proporciona una mejora en el efecto de enfriamiento de hasta 1.3 °C. En Mérida los resultados del trabajo indican que el aislamiento térmico con un espesor de 0.05 m es también la mejor opción, esta medida mejora el efecto de calentamiento de hasta 2.6 °C con respecto a la EAHE sin aislamiento (Xamán et al. 2014). Por la localización geográfica de Chetumal se tienen condiciones meteorológicas similares a las de Mérida y se

tomara los resultados obtenidos por Xamán para el espesor del aislamiento del intercambiador, el material a utilizar será espuma rígida de poliestireno extruido.

Tabla 2.- Propiedades y análisis térmico de poliestireno extruido.

Propiedades térmicas del FOAMULAR®				
Propiedades	Producto / Valores			
	Método ASTM (2)	Foamular 250/AGTEK	Foamular 400	Foamular 600
Conductividad térmica "K" (BTU in/°F ft² h) (máxima) @ temperatura media de 75°F @ temperatura media de 40°F	C518	0.20 0.18	0.20 0.18	0.20 0.18
Resistencia térmica "R" (°F ft²h/BTU) (mínima) @ temperatura media de 75°F @ temperatura media de 40°F	C518	5.0 5.4	5.0 5.4	5.0 5.4
Valores de resistencia a la compresión especificado (Mínima) valor lb/in² (3)	D1621	25	40	60
Valor de resistencia a la flexión mínimo lb/in² (4)	C203	75	115	140
Absorción de agua (máximo) (% por volumen)	C272	0.10	0.05	0.05
Permeabilidad al vapor de agua (máxima) (perm) (5)	E96	1.10	1.10	1.10
Afinidad al agua	Hidrofóbico			
Capilaridad	Ninguno			
Estabilidad dimensional (máxima) % de variación (6)	D2126	2.0	2.0	2.0
Coefficiente lineal de expansión térmica (máxima) (in/in °F)		2.7 x 10 ⁻⁵	2.7 x 10 ⁻⁵	2.7 x 10 ⁻⁵
Propagación de la flama (7) (8)	E84/UL 723	5	5	5
Desarrollo de humo (7) (8) (9)	E84/UL 723	45.175	45.175	45.175
Índice de oxígeno (mínimo) (7)	D2863	24	24	24

FOAMULAR® es un aislamiento térmico de espuma rígida de poliestireno extruido manufacturado en paneles. Tiene una superficie lisa y una estructura de celdas cerradas con paredes que se inter adhieren unas con otras sin dejar huecos. El producto se fabrica en diferentes resistencias a la compresión: 25, 40, 60 y 100 lb/in². Se utilizado en una gran diversidad de aplicaciones. Algunas ventajas que presenta es su alta resistencia a la humedad y vapor. No permite espacios por donde se filtre el agua. No favorece la condensación. Es muy ligero, fácil de cortar, manejar, instalar y almacenar. En la Tabla 2 se enlistan las principales propiedades térmicas de diferentes productos de FOAMULAR®.

Algunas limitaciones que presenta este material es que tiene un intervalo máximo de temperatura que no supera los 74 °C (165 °F). Por lo que no se recomienda colocarlo en contacto con chimeneas, calefactores, tuberías de vapor y otras superficies que puedan alcanzar una temperatura mayor a los 74 °C (165 °F). No debe quedar expuesto (sin acabado) en instalaciones exteriores. Se elige este aislante por que se conocen todas sus propiedades termofísicas y esos datos serán de gran ayuda al validar numéricamente los valores obtenidos en este trabajo experimental.

En la Tabla 3 se puede apreciar los aspectos, características, parámetros y referencias que permitieron el diseño del EAHE a construir para evaluar su desempeño bajo condiciones meteorológicas de la ciudad de Chetumal.

Tabla 3. Características del diseño del EAHE.

Aspecto	Unidad/descripción	Referencia
Profundidad	2 metros	Salah El-Din, (1999)
Longitud	6 metros	Xamán et al (2014)
Diámetro del tubo	6 in	Bojić et al (1999)
Material del tubo	Policloruro de vinilo (PVC)	Serageldin et al (2016)
Aislamiento térmico	2 in (poliestireno extruido)	Xamán et al (2014)

2.2 Construcción del intercambiador de calor tierra-aire.

Una vez bien definidos los materiales a utilizar y las dimensiones del intercambiador, se procede a llevar a cabo la construcción física del proyecto, para ello se hizo uso de una sierra circular portátil y de una cortadora de aluminio para hacer los cortes necesarios en los distintos materiales que conforman el intercambiador. Se exhorta a siempre hacer uso de lentes de seguridad, guantes, tapones para oídos y cubre bocas para salvaguardar la integridad de la persona, ya que por la actividad que se realiza hay desprendimiento de partículas que pueden ser perjudiciales para la salud.

El mejor aislante térmico para el EAHE es la lana de vidrio con cubierta de aluminio, sin embargo por restricciones presupuestales se utilizó como material aislante FOAMULAR® que se tenía disponible. Como el material seleccionado comercialmente solo se encuentra en forma de láminas rígidas de 1" de espesor y con dimensiones de 1.22 x 2.44 metros, se realizaron cortes a las láminas utilizando una sierra circular para hacer los cuadrados de 10" x 10", siendo 6" del diámetro de la tubería y las 4" restantes son para el espesor de 2" que se requiere alrededor del tubo para aislarlo térmicamente del contacto con el subsuelo.



Figura 2 Corte de placas de FOAMULA en secciones de 10 x 10 in.

Para que el FOAMULAR® se pudiera colocar en el tubo se diseñó una herramienta (Figura 3A) la cual al ser calentada, se presionaba en contra de las placas, generando el corte de la geometría requerida para que embonaran en el tubo (Figura 3B).

A)



Figura 3 A) Imagen ilustrativa de herramienta de corte fabricada en solera de acero al carbón de $\frac{1}{4}$ " de espesor y $\frac{1}{2}$ " de ancho. B) Corte circular en placas de FOAMULAR.

En la Figura 4A y 4B se presenta la placa individual de poliestireno extruido con corte circular al centro y el empalme de 79 placas que se insertaron en el tubo de salida del EAHE.

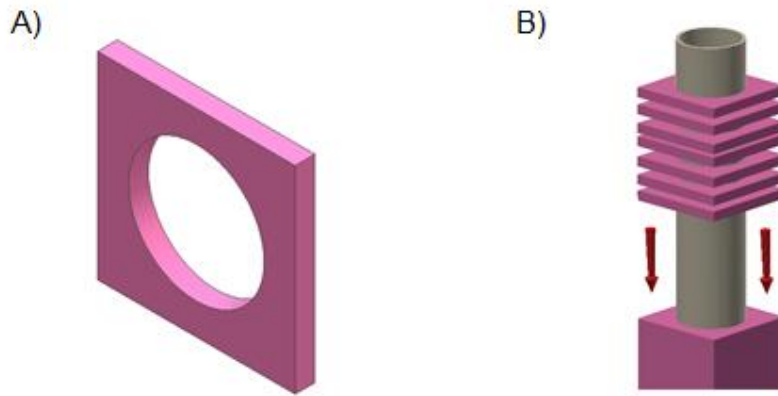


Figura 4 A) Pieza de poliestireno extruido con dimensiones de 10 x 10 x 1 pulgadas. B) Acoplamiento de piezas de FOAMULAR® en tubería unidas con silicón.

En la Figura 5 se muestra un esquema del EAHE diseñado, en las zonas A, B y C se instalaron tres termopares para medir la temperatura del aire a lo largo del tubo horizontal que está a 2 m de profundidad (1 m de profundidad para el otro EAHE).

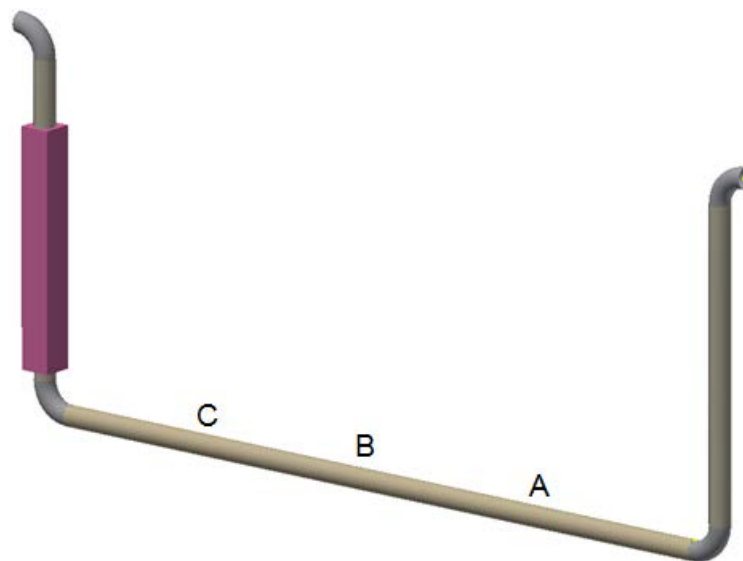


Figura 5 Esquema de intercambiador de calor tierra-aire diseñado.

Posteriormente, se realizan los cortes necesarios a un tramo de tubería para generar la salida y la entrada del intercambiador (Figura 6). Para estas dos secciones se necesitan dos tramos de tubería de PVC de 6 pulgadas de diámetro y de 2.5 metros de longitud (1.5 metros para el otro EAHE).



Figura 6 Corte de tubo de PVC de las diferentes secciones del EAHE.

En la etapa de diseño se mencionó que la profundidad a la que se instalará el EAHE es de 2 metros, no obstante las secciones se cortan más largas para que el prototipo no quede a ras de suelo y evitar de esta manera filtraciones de agua de lluvia por escurrimiento. Una vez que se tiene la sección de la tubería que se destinará a la salida del EAHE se aísla con los paneles de FOAMULAR®. En la Figura 7 se aprecia el procedimiento para aislar el tubo con las placas, uniéndolas y sellándolas con silicón para evitar filtraciones de líquidos.



Figura 7 Unión y sellado de placas de poliestireno extruido con silicón.

Como se muestra en la Figura 8 el resultado es una sección sólida de poliestireno extruido que cubre la tubería de salida del intercambiador, esto evitará que el aire enfriado en el subsuelo vuelva a ganar temperatura al subir a la superficie (en verano).



Figura 8 Sección de salida del intercambiador aislada con láminas de Foamular.

Las recomendaciones del fabricante del aislante específica en su hoja de datos que para evitar la pronta degradación del material se recomienda darle un acabado para no estar directamente expuesto, por lo que se opta por forrar con cinta de nylon adherible toda la salida del EAHE ya aislada.

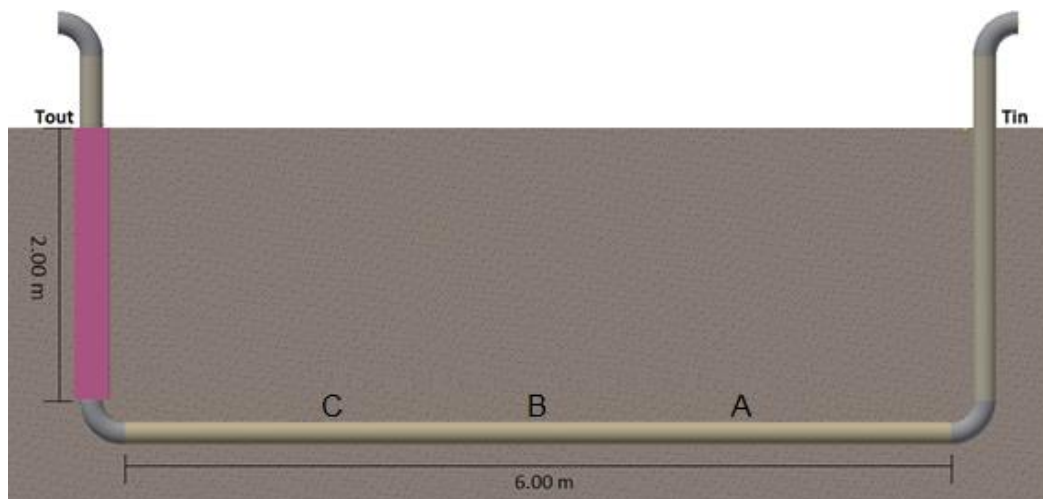


Figura 9. Vista del intercambiador de calor tierra-aire ensamblado con aislamiento térmico

Teniendo la descarga del EAHE ya terminada, se procede a ensamblar el intercambiador. Se unen los tres tramos de tubería que conformaran el sistema utilizando codos de PVC a 90° de 6” de diámetro. Para unir las piezas PVC se utiliza adhesivo de PVC el cual tiene un tiempo de secado de 24 horas y que adquiere una consistencia rígida, además de que rellena huecos e impide las filtraciones de líquidos. Este adhesivo funciona como soldadura química. La Figura 9 muestra un esquema del EAHE de cómo se instalará el dispositivo.

2.3 Instrumentación del intercambiador de calor.

El sistema de monitoreo y la instrumentación del experimento es de tipo punto a punto, esto permitió el monitoreo de la temperatura para observar el intercambio de calor entre el EAHE y el subsuelo.



Figura 10. Vista frontal y trasera del equipo 34970A Data Acquisition de la marca Agilent Technologies con capacidad de 3 módulos para medición de temperatura.

El sistema de adquisición de datos (data logger) es un dispositivo electrónico que registra datos en tiempo real, por medio de instrumentos y sensores propios o externos. Por lo general, son pequeños y usan batería de larga duración, son portátiles, conteniendo un microprocesador y una memoria interna para almacenamiento de datos o se pueden conectar con una interfaz a una computadora para almacenar las mediciones. Para la adquisición de datos se utilizará el equipo 34970A Data Acquisition de la marca Agilent Technologies

(Figura 10), el cual se utilizó para las mediciones de temperatura que se realizaron en el intercambiador de calor tierra-aire. Este cuenta con entrada para diferentes módulos (tarjetas de adquisición de datos) que se conectan internamente en el equipo, los cuáles pueden ser configurados para medir diferentes variables según las necesidades que se tengan.

En el caso del módulo para la medición de temperatura específicamente, se puede usar la tarjeta 34901A (Figura 11) que es un módulo Multiplexor de 22 canales, el cual permite medir temperatura mediante los siguientes dispositivos: Termopar, Detector de Temperatura Resistivo o RTD (resistance temperature detector) y termistores.

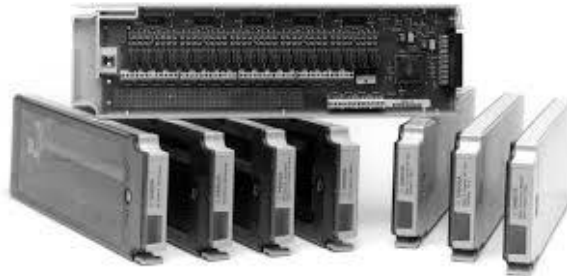


Figura 11. Tarjeta 34901A. Módulo multiplexor con 22 canales de entrada.

La principal ventaja a utilizar estas tarjetas es que el 34901A ya cuenta con todo el circuito electrónico de acondicionamiento de señales para realizar directamente las mediciones, es decir, ya no es necesario realizar un costoso acondicionamiento de señal externo.

La instrumentación de campo está compuesta por un conjunto de sensores de temperatura, los cuales son termopares de alta sensibilidad, estos sensores medirán en tiempo real la temperatura de un punto específico del intercambiador, los datos serán recopilados por el adquirente de datos para ser almacenados en una computadora para su posterior interpretación y uso en la evaluación del desempeño térmico del EAHE.

Un termopar es un sensor de temperatura que consiste en dos conductores metálicos diferentes, unidos en un extremo, denominado junta caliente suministrando una señal de tensión eléctrica que depende directamente de la temperatura; este sensor puede ser conectado a un instrumento de medición de fuerza electromotriz (Fem) o sea un milivoltímetro o potenciómetro.



Figura 12. Carrete de termopar tipo T de alta ganancia y amplio intervalo de sensibilidad.

Para la aplicación y el intervalo de temperaturas no tan altas (valores) que se esperan medir, se tiene una opción viable. El termopar tipo T, conocido también como termopar cobre-constantan, el cual está formado por un alambre de cobre como conductor positivo y una aleación de 60% de cobre y 40% de níquel como elemento conductor negativo, tiene un costo relativamente bajo, dependiendo del fabricante varían el intervalo de temperaturas siendo su intervalo mínimo de $-270\text{ }^{\circ}\text{C}$ y como límite superior se puede considerar los $350\text{ }^{\circ}\text{C}$, ya que el cobre se oxida violentamente a partir de los $400\text{ }^{\circ}\text{C}$. Dentro de las opciones del mercado se optó por el termopar 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 valores máximo de temperatura es $150\text{ }^{\circ}\text{C}$. 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.

Los termopares para el sistema de medición se hicieron según las longitudes necesarias para cada punto del sistema y se procedió a fabricar el termopar utilizando un variac para unir las puntas mediante un arco eléctrico. Los termopares estarán pegados a una guía de 3" de longitud para mantener la punta del termopar en la parte central del tubo (Figura13).



Figura 13. Termopar fabricado con guía de acero inoxidable.

No se recomienda el uso de extensiones ya que al ser de otro material se generan un segundo y hasta un tercer termopar y por lo tanto pueden existir errores ya que la tensión se dividirá entre el número de puntas y esto se evidenciará en las lecturas del adquisidor de datos, en el caso necesario de tener que usar las extensiones se recomienda conseguir los conectores adecuados para evitar una mala instrumentación.

Otro factor a medir es la temperatura que existe en el subsuelo a diferentes profundidades, ya que la conformación del suelo de la región es principalmente del tipo travertino y el comportamiento del intercambiador puede variar de los modelos numéricos computacionales por este factor.

Para ello se realizó un arreglo de 5 sondas de temperatura, cada sonda es de 5 metros de longitud como se aprecia en la Figura 15 A. Las sondas están instaladas desde los 2 metros de profundidad hasta la superficie, espaciados entre si cada 0.5 metros para observar la temperatura a distintas profundidades. Estos sensores especiales incluyen un tubo hueco de acero inoxidable, recubierto de epoxi y reforzadas para uso de estilo industrial (Figura 14).



Figura 14. Vista lateral, frontal e isométrica de arreglo de sonda de temperatura de uso industrial para monitoreo de perfil de temperatura del suelo a distintas profundidades.

El adquisidor de datos puede almacenar información, aunque la memoria con la que cuenta es de poca capacidad y está limitada, por lo que es necesario conectarlo a una computadora para descargar las mediciones realizadas y poder continuar con el proceso de medición. Posteriormente estos datos pueden ser procesados en la computadora ya que la información puede ser exportada a diferentes formatos.

La interface entre adquisidor y PC se hace mediante una tarjeta USB/GPIB (Figura 15 B). La PC debe de contar con el software BenchVue de Keysight Technologies el cual presenta una interfaz sencilla y facilita el registrar los resultados con los instrumentos sin necesidad de programación. El software exporta datos e imágenes generando gráficos y tabulando las mediciones. Algunos de los usos de BenchVue son visualizar simultáneamente múltiples mediciones y facilitar el registro de datos, imágenes de pantalla y estado del sistema.

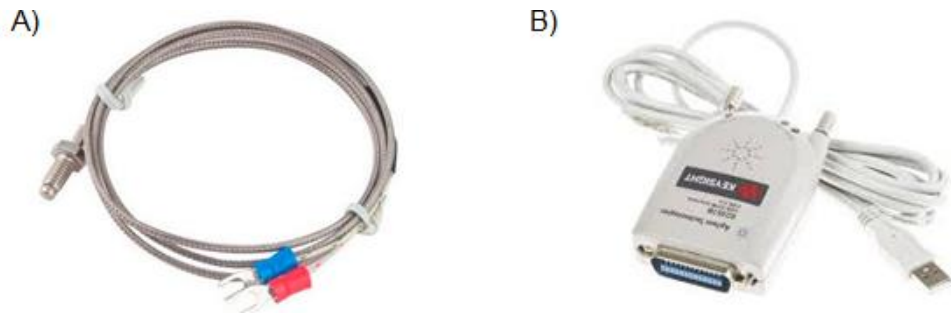


Figura 15. A) Sonda de temperatura forrada de uso industrial. B) Tarjeta de interfaz de USB/GPIB de adquisición de datos.

Todo el sistema de adquisición de datos estará situado en el interior de una habitación para resguardo de los equipos. El cableado de los sensores que se canalizó por tubería conduit hidráulica de ½” de diámetro y fue llevado hasta la habitación para ser conectados a un registrador de datos. Se recomienda el debido etiquetado de los cables ya que una vez enterrado el EAHE será imposible identificar los cables del tubo horizontal. En la Figura 16 se puede apreciar el sistema de medición acoplado al EAHE.



Figura 16. Esquema de intercambiador de calor tierra-aire con tubería para el sistema medición.

El sistema de medición se encontrará monitoreado en 5 puntos del sistema para recopilar los datos de las temperaturas del aire a lo largo del EAHE, los puntos a medir son la entrada del intercambiador, 3 puntos (C, B y A) de la sección horizontal del sistema y la temperatura a la salida del intercambiador, ver Figura 9.



Figura 17. Colocación de abrazaderas de 6" con reducción a 1/2" para la instalación de los termopares.

Las temperaturas serán medidas con los termopares mencionados anteriormente. El sistema de monitoreo que va en la tubería de 1/2" se acopla a la tubería principal utilizando abrazaderas de 6" con reducción a 1/2" (Figura 17).



Figura 18. Inserción de termopar con guía en el EAHE.

Se hizo una perforación de 1/8" en la tubería del EAHE para introducir el termopar (Figura 18), dicho agujero se selló con plastilina epoxica para evitar filtraciones, además de que el cople de 1/2" se rellenó con silicón como medida precautoria (Figura 19 A/B).

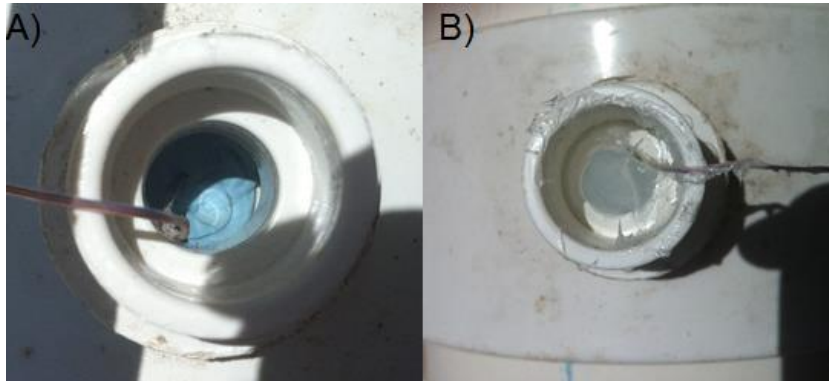


Figura 19. A) Sellado de las perforaciones de tubo con plastilina epoxica. B) Sellado de los conectores con silicón.

El intercambiador ya ensamblado y acoplado con el sistema de medición se trasladó al terreno adyacente a las villas universitarias donde se enterró.



Figura 20. Sistema de medición acoplado a intercambiador de calor tierra air.

2.4 Instalación y acoplamiento del intercambiador a la cavidad.

Para poder instalar el EAHE se debe de direccionar en la orientación adecuada de donde provengan la mayoría de los vientos que inciden en la zona en los meses de primavera y verano que son las temporadas en que el sistema puede tener mejor desempeño. Esto ayudara a que el sistema tenga un suministro constante del fluido. Para ello se analizaron los datos de 4 años de la estación meteorológica ubicada en las instalaciones de la División de Ciencias e Ingeniería perteneciente a la Universidad de Quintana Roo en la ciudad de Chetumal. Esta estación es de la marca DAVIS modelo Vantage PRO2, para más información consultar Anexos.

El análisis de los registros meteorológicos regionales aportó datos útiles. El primero de ellos es la dirección del viento, con ello se observó la incidencia de los vientos en el edificio donde se instalará el EAHE, el porcentaje en que incurre el viento se representó en un diagrama (Figura 21), en azul se visualiza la dirección del viento durante el otoño e invierno, en rojo se observa la dirección del viento en primavera y verano. En el diagrama se observa que la región donde prevalecen la incidencia de la mayoría de las corrientes de aire es en la dirección este sureste que comprende de los 315° hasta los 0° y son el 58.1 % del flujo de aire. Esta dirección se debe a que la masa oceánica que influye en esta región es el mar caribe y se encuentra geográficamente al este-sureste.

Existen estudios realizados por el (National Renewable Energy Laboratory, 2000) en la península de Yucatán donde evaluaron y midieron el potencial eólico de diferentes zonas geográficas para la explotación de este recurso, en el Mapa de Recurso Eólico para Campeche, Yucatán y Quintana Roo - México que se generó de estos estudios se puede apreciar que se tiene una velocidad del viento medido para la ciudad de Chetumal en un intervalo de entre 4.4 y 5.6 m/s.

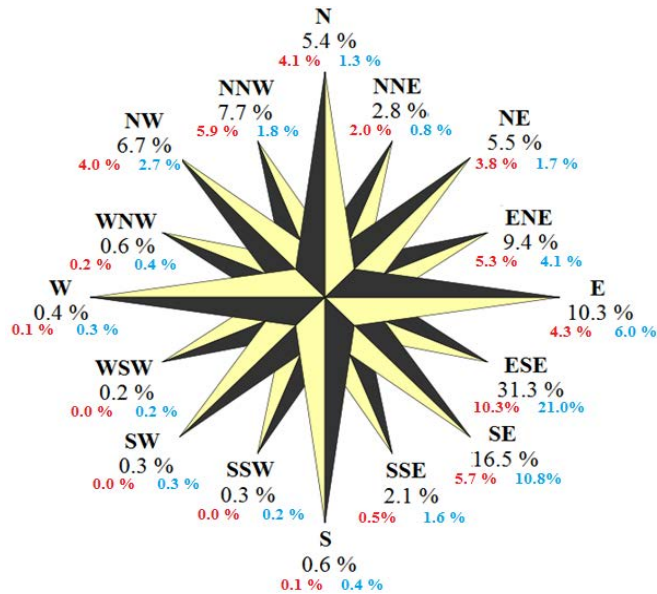


Figura 21. Rosa de los vientos para la ciudad de Chetumal, Quintana Roo, México.

Estos datos fueron corroborados en Windyty (windyty, 2014) que es un sitio web que muestra una representación gráfica de algunos parámetros meteorológicos, como el viento desde la superficie hasta 45000 pies, temperatura, presión, humedad, y la precipitación. Los datos que este sitio muestra son obtenidos del Servicio Meteorológico de Estados Unidos, la NOAA, y el sitio suizo, Meteoblue. (Figura 22)

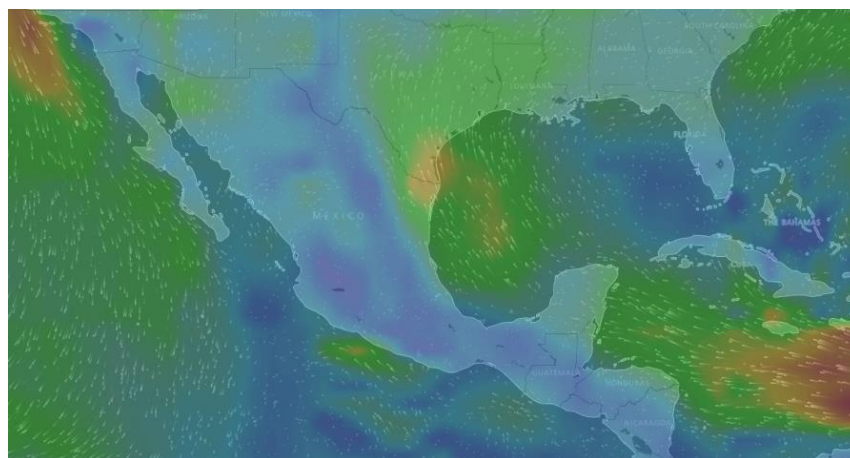


Figura 22. Vista de México en donde se aprecia las direcciones del viento que inciden sobre la masa continental.

Como segundo dato relevante para el proyecto se obtuvieron las temperaturas máximas y mínimas mensuales para los 4 años que preceden a este trabajo (Figura 23). Estos datos se utilizaron para sacar las temperaturas máximas y mínimas anuales promedio y a su vez estas cifras sirven para sacar la temperatura anual promedio que, en teoría, es un valor cercano a la temperatura que se espera encontrara en el subsuelo a los 2 metros de profundidad, lo cual podrá ser validado con el arreglo de las sondas de temperatura que se enterraron junto al intercambiador.

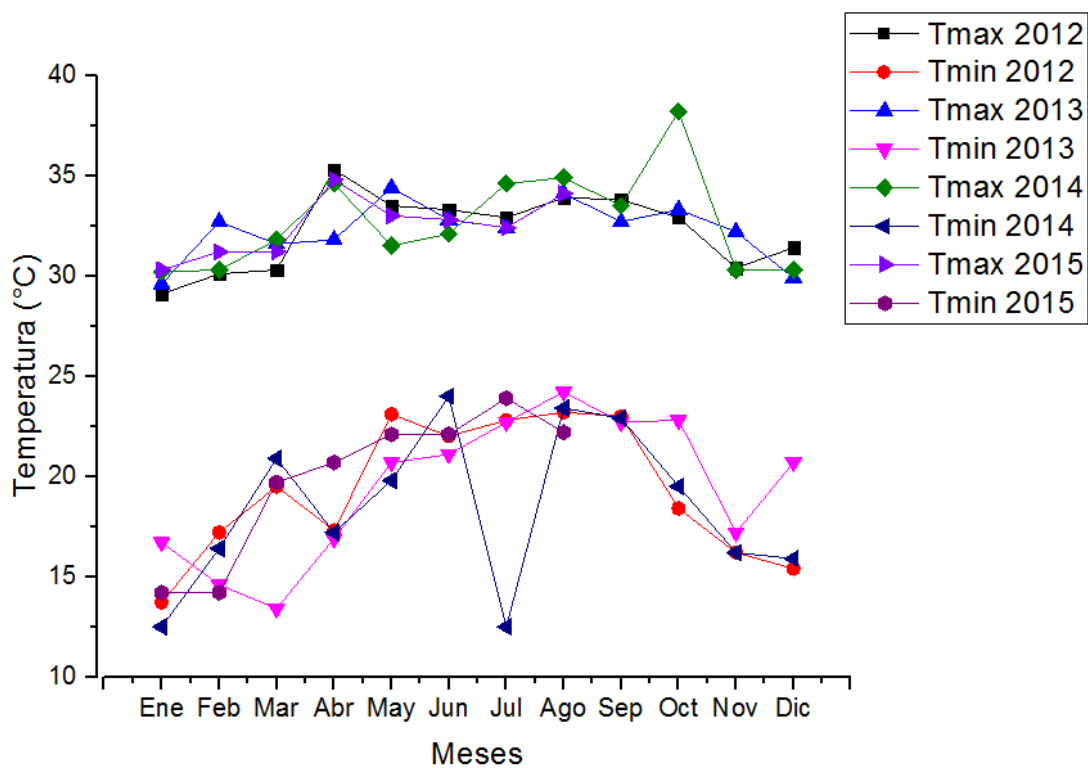


Figura 23. Temperaturas máximas y mínimas de los días representativos de cada mes de los años 2012, 2013, 2014 y 2015 para la región de Chetumal, Quintana Roo, México.

Como se puede apreciar en la Figura 24 el promedio de la temperatura anual máxima para la región de Chetumal es de 33.4 °C y el promedio de la temperatura mínima anual para la misma región es de 16.8 °C, esto nos da una temperatura anual media de 25.1 °C que es un valor aproximado a la temperatura que se espera en el subsuelo a los 2 metros de profundidad (Salah El-Din, 1999). Este valor puede variar por diversos factores como son la humedad de la

tierra, el tipo de sedimento que conforma el subsuelo, la conductividad térmica del sedimento, si existe pasto o vegetación en el terreno o si la tierra está al descubierto, por mencionar los factores que pueden mejorar o empeorar las condiciones para que el sistema tenga resultados óptimos o negativos.

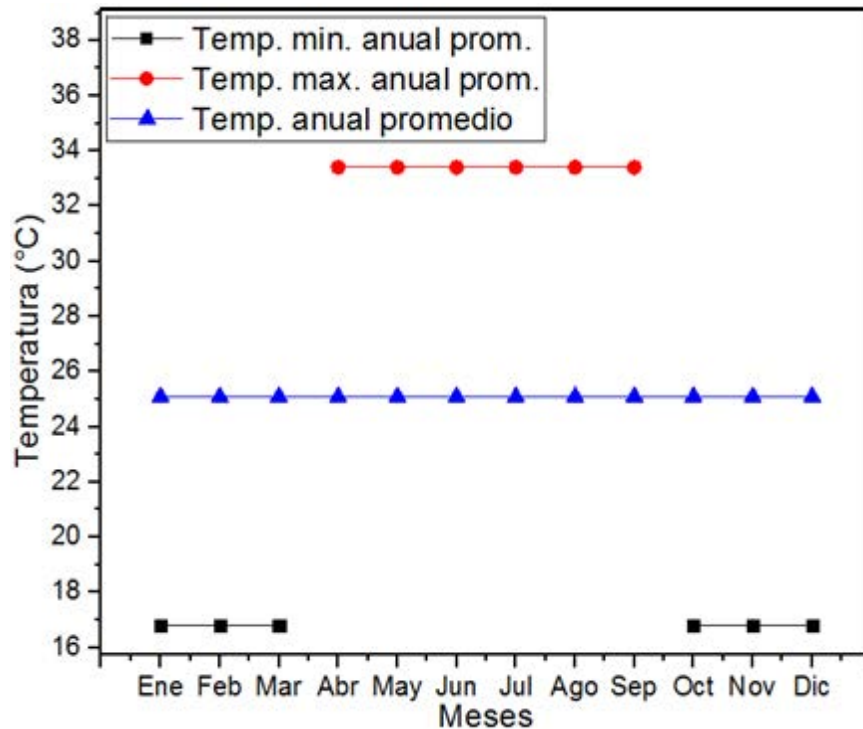


Figura 24. Temperatura anual promedio para la región de Chetumal, Quintana Roo, México, temperaturas anuales máximas y mínimas promedio en el periodo primavera-verano y otoño-invierno respectivamente.

Continuando con el proceso para la instalación del sistema se procedió a delimitar el área (Figura 26 A) en donde se realizó la excavación para enterrar el EAHE, en este proceso se considera tanto la orientación del EAHE, la cual está dada por la mayor incidencia de los vientos en la región, la arquitectura adyacente al terreno como pueden ser bardas, casas, o cualquier construcción que limite o impida el flujo de aire hacia la entrada del EAHE. Estas dos consideraciones son esenciales para que las corrientes de aire lleguen lo más directamente posible a la tubería de entrada para que el intercambiador funcione de manera pasiva. Una vez definido y delimitado el lugar y el área, se procedió a realizar la excavación de la zanja (Figura 26 B). Para este trabajo se hizo uso de una retroexcavadora ya que el terreno está conformado

por un sedimento duro y compacto que dificulta hacer el agujero de manera manual, además de que el volumen de material a remover es demasiado para que lo realice una persona.

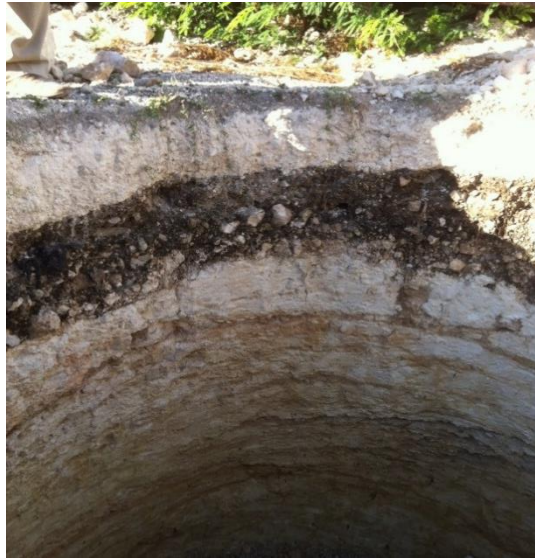


Figura 25. Conformación del subsuelo en la región de Chetumal, Quintana Roo.

Al realizar la excavación se observa la conformación del subsuelo de la región que en un 85 % está compuesta por un sedimento rocoso de color claro (Figura 25). Se tomaron muestras del subsuelo y se consultó con un especialista para determinar con exactitud el tipo de material. Estos datos serán de utilidad para trabajos futuros que simulen numéricamente el comportamiento de un EAHE bajo estas condiciones.

Se observa que el subsuelo está compuesto por roca caliza la cual constituye la mayor parte del sedimento a los 2 metros de profundidad (Figura 25), en la imagen también se puede apreciar una capa de tierra negra de aproximadamente 30 centímetros de grosor, formada en gran medida por materia orgánica (descomposición de vegetación), para posteriormente ser cubierta nuevamente por más caliza de consistencia blanda.

Para determinar el tipo de suelo que se tiene en el lugar de instalación del EAHE, las muestras del terreno tomadas durante la excavación se enviaron al laboratorio de geoquímica de la Facultad de Ciencias de la Tierra de la Universidad Autónoma de Nuevo León. El informe que proporcionaron indica que el suelo es travertino, el documento menciona que en

las muestras del suelo se aprecian 3 momentos de precipitación de carbonato, también se observa (Figura 27) como las distintas generaciones de calcita se están introduciendo en otro tipo. Al estarse generando una calcita se quedaban huecos vacíos que después fueron rellenados por otra generación de calcitas. Además, se observan algunos puntos negros que podrían ser materia orgánica y también hay presencia de óxido ferroso.



Figura 26. A) Delimitación del área para la zanja en terreno adyacente al conjunto habitacional. B) Retroexcavadora haciendo zanja para instalación del intercambiador.

El término travertino es asignado a los depósitos de carbonato de calcio hidrotermal, frecuentemente finamente laminados y con crecimientos bacterianos de forma arborescente, producidos por precipitación fisicoquímica y microbiana a partir de fuentes de agua dulce y, sobre la base de la temperatura de formación, hacen una distinción entre travertinos termógenos y meteógenos (thermogene y meteogene). Los primeros corresponden a los depósitos donde el carbonato de calcio es precipitado a partir de aguas calientes rápidamente desgasificadas, con tasas de crecimiento relativamente altas, comunes en regiones tectónicamente activas y asociados con actividad volcánica, en tanto que los travertinos meteógenos son producidos por la precipitación de carbonato de calcio a partir de aguas a temperatura ambiente en equilibrio con los suelos y con bajas tasas de crecimiento.

Comúnmente al travertino se le conoce como piedra caliza, la cual puede ser más o menos porosa de un color claro entre amarillento y café claro (Figura 27). (Velasco Tapia, 2016)

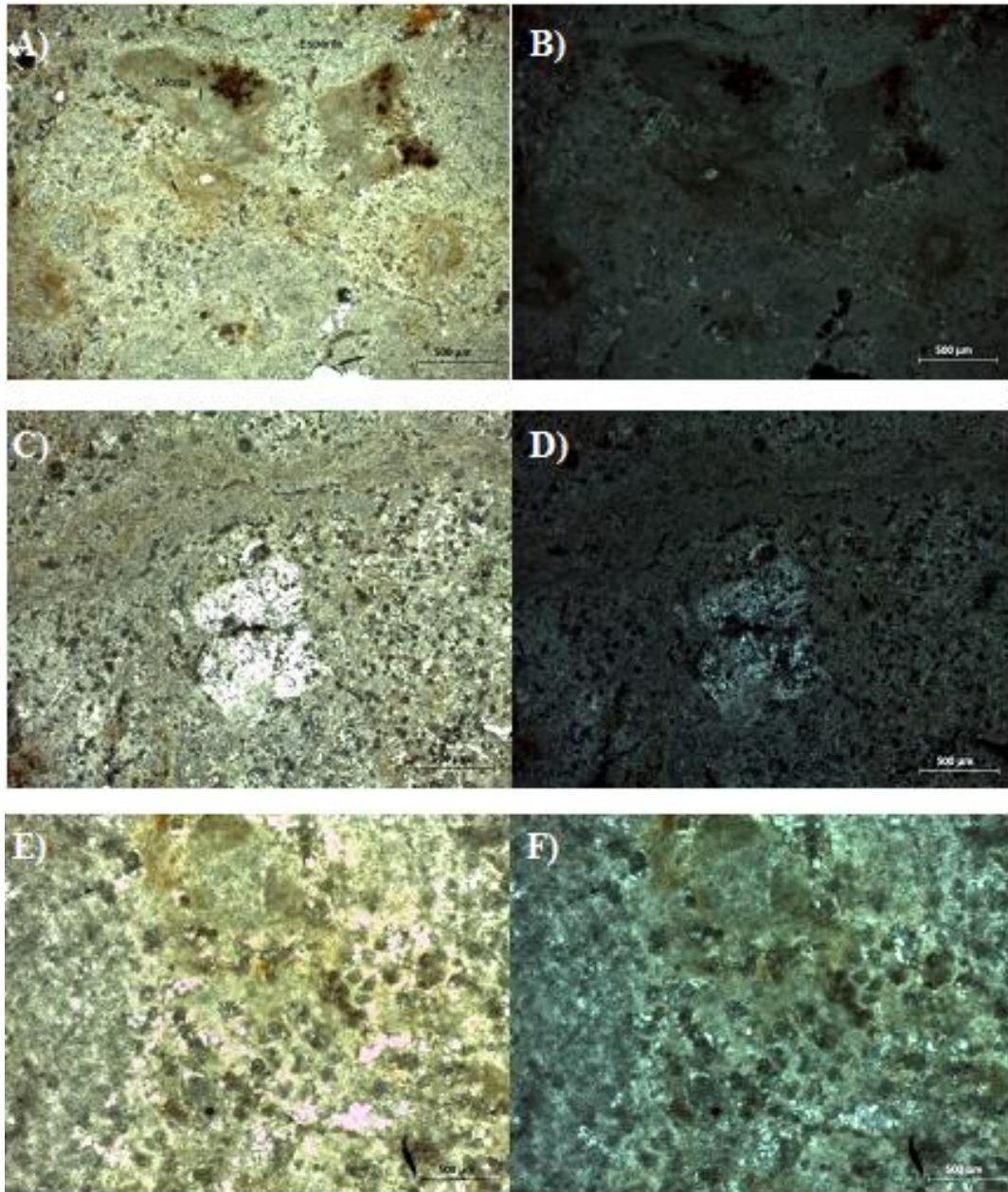


Figura 27. A/B) Muestras del suelo travertino con un objetivo de 2.5 X. C/D) Muestras del suelo travertino con un objetivo de 4.0 X. E/F) Muestras del suelo travertino con un objetivo de 10 X

Para determinar con exactitud la conductividad térmica del suelo es posible realizar un estudio de transferencia de calor para caracterizar cada capa de sedimento que conforman el suelo con sus propiedades específicas del material, pero por su complejidad y elevado costo,

se considera el suelo como un medio continuo, de esta manera, por practicidad se pueden considerar valores ya medidos de conductividad térmica los cuales se encuentran disponibles. Dependiendo de la consistencia del material se puede calificar a la roca caliza o travertino en cinco categorías, cada una con diferentes propiedades de densidad, conductividad térmica, calor específico y factor de resistencia a la difusión del vapor (Tabla 4) (Softeca, 2015).

Tabla 4. Propiedades termofísicas de tipos de suelos.

Rocas o suelos sedimentarios				
Material	ρ (Kg/m ³)	λ (W/m·K)	C_p (J/Kg·K)	μ (Adimensional)
Arcilla o limo	1200-1800	1.5	1670 - 2500	50
Arena o grava	1700 - 2200	2.0	910 - 1180	50
Arenisca	2200 - 2600	3.0	–	–
Asperón	1300 - 1900	0.9	1000	20
Caliza, muy dura	2200 - 2590	2.3	1000	200
Caliza, dura	2000 - 2190	1.7	1000	150
Caliza, Dureza media	1800 - 1990	1.4	1000	40
Caliza, Blanda	1600 - 1790	1.1	1000	25
Caliza, muy blanda	< 1590	.085	1000	20
Silex	2600 - 2800	2.6	1000	10000

ρ Densidad (Kg/m³). λ Conductividad Térmica (W/m · °K). C_p Calor específico (J/Kg · °K). μ Factor de resistencia a la difusión del vapor de agua (adimensional)

Para realizar cálculos de transferencia de calor en el suelo se puede tomar el valor de la roca caliza con dureza media, esto debido a que al realizar la excavación para la instalación del intercambiador se revolviaron los diferentes tipos de calcitas que estaban estratificados a diferentes niveles y un valor promedio se encuentra en el valor medio.

Una vez concluido el trabajo de excavación se procedió a llevar el EAHE hasta el sitio y colocar el intercambiador dentro de la zanja. Este proceso se hizo con mucho cuidado procurando evitar dañar las tuberías de ½” en donde se canalizaron los termopares que censarán las temperaturas a lo largo del sistema y que son vitales para las mediciones y registro de la variación de la temperatura del aire en los distintos puntos del sistema. También es importante tomar en cuenta no dañar el aislante térmico, ya que si hay filtración de líquidos

la presencia de humedad provocaría que la salida del EAHE volviese a calentar el fluido (Figura 28).



Figura 28. Colocación del intercambiador en la zanja para su instalación.

En este experimento se instalaron dos intercambiadores, los cuales están separados entre sí a un metro de distancia, el intercambiador principal de este estudio está situado a una profundidad de 2 metros, esto debido al diseño que se hizo basado en la literatura (Figura 29). El segundo intercambiador fue instalado a una profundidad de 1 metro, con esto se pretende estudiar el efecto de la profundidad en el desempeño térmico del intercambiador y cuantificar el impacto que se tiene en la eficacia del sistema (Figura 30).

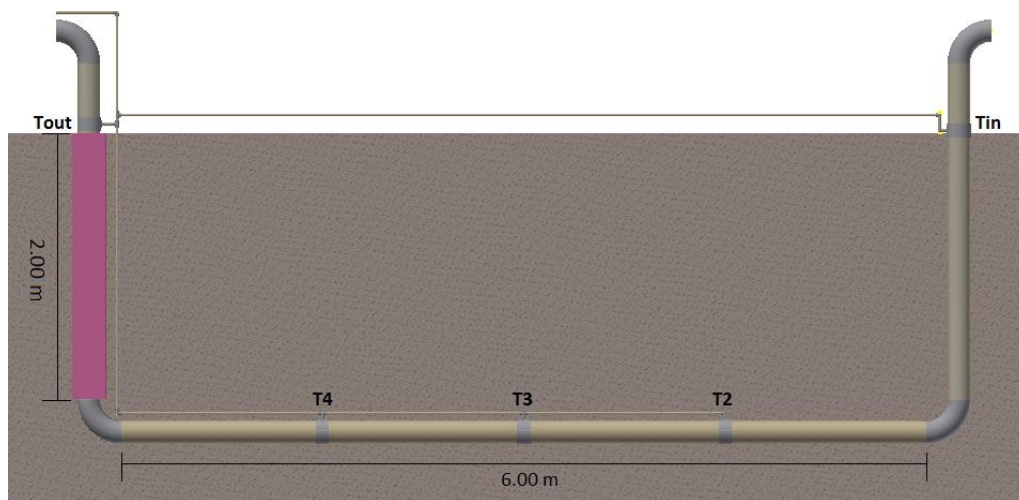


Figura 29. Vista ilustrativa del EAHE instalado a dos metros de profundidad.

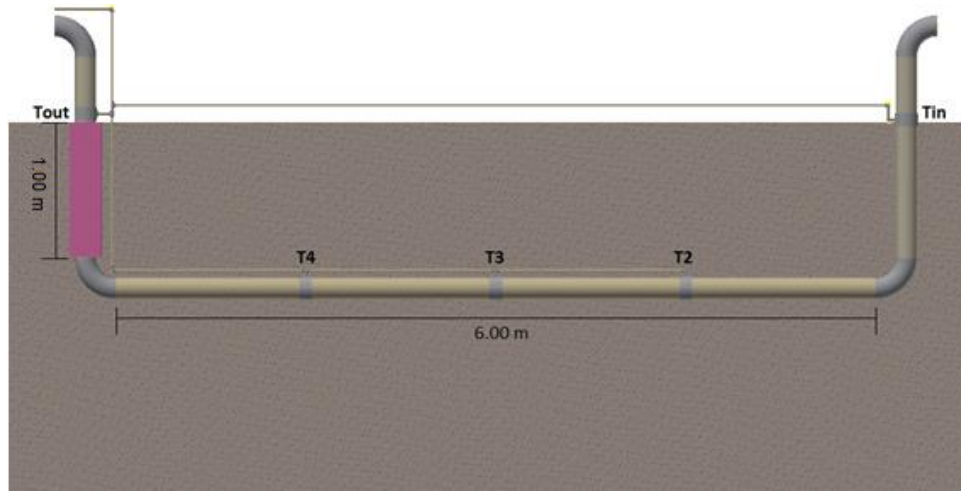


Figura 30. Vista ilustrativa del EAHE instalado a un metro de profundidad.

En la parte central de la zanja se colocó el arreglo de termopares (Figura 31) que permitieron medir la variación de la temperatura del subsuelo a distintas profundidades. Se tomaron mediciones de las temperaturas de la tierra a ras de piso, a 0.5, 1.0, 1.5 y 2.0 metros de profundidad, esto servirá para visualizar el comportamiento del amortiguamiento térmico que tiene el suelo para lograr el efecto del enfriamiento del aire que pasa a través del sistema y que tiene un intercambio convectivo con el EAHE.



Figura 31. Arreglo de termopares para medir la temperatura del subsuelo a distintas profundidades.

Una vez que se tienen instaladas las tuberías y sensores, se procede enterrar el intercambiador procurando cubrir los tubos únicamente con tierra, si se ponen piedras encima del EAHE se corre el riesgo de que las rocas dañen la integridad de la pared del tubo, lo que desencadenaría en filtraciones de agua dejando inservible el sistema.

Durante el proceso para enterrar el intercambiador se debe de compactar la tierra, para este proceso se roció agua sobre la tierra para que se fuera apisonando. El utilizar maquinaria como un compactador de suelo podría dañar las tuberías. En la Figura 32 y 33 se puede apreciar una vista nivel de piso y aérea del EAHE ya enterrado.



Figura 32. Vista a nivel de piso de EAHE enterrado.



Figura 33. Vista aérea de villas universitarias y EAHE enterrado.

Por último, para terminar la instalación del sistema a evaluar y poder iniciar con las mediciones, se hizo un arreglo acoplando un extractor de aire de 6" de diámetro a la salida de cada intercambiador. Esto se hizo con la finalidad de tener un flujo de aire similar y constante a través de los dos intercambiadores. Se moduló la velocidad de los extractores variando el voltaje de alimentación con un controlador de velocidad. La velocidad con la que trabajó en el experimento fue de 0.5 m/s, la cual se midió con un anemómetro digital.



Figura 34. Acoplamiento de extractor de aire a la tubería de salida del intercambiador.

Finalmente se conectaron al adquisidor de datos los 15 canales que componen los dos sistemas de medición de los intercambiadores y los termopares para caracterizar la temperatura del suelo a distintas profundidades, de este modo se monitoreó las condiciones de temperatura del aire en el interior de los intercambiadores, así como la temperatura del suelo en el periodo en que se realizaron las mediciones. Así, finalmente, se tiene todo preparada para realizar la evaluación del intercambiador de calor tierra-aire bajo las condiciones climatológicas de la entidad.

Capítulo 3. Pruebas experimentales del intercambiador de calor tierra-aire.

En este capítulo se hace mención de la metodología que se siguió para llevar a cabo el experimento, así como las condiciones bajo las cuales se realizaron las mediciones, de igual manera se detalla las variables que se midieron. Con los datos obtenidos del experimento se hizo un estudio detallado de las mediciones y se analiza el comportamiento del sistema para el clima cálido-húmedo presente en la zona, se graficaron las mediciones y se exponen los resultados obtenidos.

3.1 Condiciones del experimento y variables a medir.

El experimento se realizó al aire libre, se tomaron mediciones continuamente, pero solamente se analizaron los días en donde la irradiancia solar fue constante y no hubo perturbaciones climatológicas como precipitaciones pluviales. El propósito de que el estudio se realizara bajo este criterio es evaluar el desempeño que tiene un intercambiador para enfriar el aire en condiciones reales, con las variables climatológicas de temperatura, humedad relativa y el tipo de suelo presente en la ciudad de Chetumal, Quintana Roo. Se realizó el experimento en las estaciones de primavera-verano que es la temporada de mayor calor, comprendiendo los meses de abril hasta septiembre.

Teniendo un margen amplio en cuestión de las temporadas estacionales, se realizaron las mediciones del sistema en los meses de julio y agosto ya que se observó en los datos presentados en las Tablas 4-7, que estos meses presentan unas de las temperaturas más elevadas durante todo el año. Las pruebas experimentales se realizaron del 25 de julio al 13 de agosto del presente año. Se evaluó el sistema funcionando las 24 horas por un periodo de dos semanas, las mediciones se tomaron de manera continua cada segundo y se promediaron cada

10 minutos. La información se almacenó en la computadora para su posterior procesamiento y análisis.

Las condiciones climatológicas presentes en Chetumal son un factor importante para el análisis de los resultados, el clima de la entidad está considerado como cálido subhúmedo con lluvias en verano, su temperatura media anual varía entre los 24 y 28 °C, la precipitación anual total se encuentra en un intervalo de entre 700 a más de 1500 mm (INEGI, 2011). Los días que se hicieron las mediciones del EAHE se estuvieron monitoreando las variables meteorológicas de temperatura ambiente, humedad relativa, la velocidad del viento y la irradiancia solar, estos factores analizaron junto con las mediciones de las temperaturas del aire que fluye en el intercambiador para determinar la influencia que tienen en el funcionamiento (o rendimiento) térmico del EAHE y su impacto en el ahorro de energía.

Como se mencionó en el apartado (2.4), las mediciones se realizaron en cinco puntos de la tubería de cada intercambiador de calor, ver Figura 29 y 30. En el caso de los dos EAHE el primer termopar (T_{in}) se instaló a la entrada del intercambiador a nivel del suelo, el segundo punto a medir (T_2) se localiza a 1.5 metros del termopar de entrada, la tercera medición (T_3) se hizo en la parte central de tubo horizontal a 3.0 metros de distancia de la entrada, el cuarto sensor (T_4) se colocó en el tubo horizontal a 4.5 metros de la entrada y finalmente la última medición (T_{out}) se hizo a ras de piso en la tubería de salida del EAHE, justo después de que el fluido saliera del suelo. Los puntos medidos se visualizan en la Figura 29 y 30.

Otro aspecto importante a medir es la temperatura de suelo a distintas profundidades con el uso de las sondas que se ensamblaron y se enterraron junto con el EAHE para medir la temperatura del suelo a 2.0, 1.5, 1.0, 0.5 y 0.0 metros de profundidad, esto ayudará a visualizar cual es el amortiguamiento térmico del subsuelo con respecto a la temperatura presente tanto superficialmente como la temperatura ambiente. Se espera que la temperatura que se mida a dos metros de profundidad tenga un valor cercano a la temperatura media anual presente en la región.

Para medir la velocidad del viento a la entrada y salida, se utilizó un anemómetro digital marca PROVA, modelo AVM-03, estos datos son de utilidad para hacer los cálculos de la transferencia de calor que se presentó entre el subsuelo y el intercambiador y dará la pauta para obtener la eficiencia del sistema.

Para calcular la eficiencia del sistema se utilizaron tablas termodinámicas en donde se especifican valores como la densidad del aire (ρ) y el coeficiente de calor específico a presión constante (C_p) que son necesarios para el cálculo del calor que el sistema está cediendo o ganando y de esta manera determinar si el intercambiador es eficiente y eficaz para propósitos de climatización.

3.2 Pruebas experimentales del intercambiador de calor tierra-aire.

3.2.1 Distribución de temperaturas del aire en el EAHE.

Los modelos numéricos que estudian la eficiencia de los EAHE's obtienen sus resultados al procesar datos de mediciones meteorológicas bajo ciertos criterios y condiciones que pueden ser manipuladas y controladas. Además, en muchas ocasiones las propiedades termofísicas de los materiales a utilizar no se conocen. Por lo anterior, estos modelos pocas veces se asemejan a las condiciones de un entorno real y a criterios de construcción que están dentro de las posibilidades tanto económicas como de edificación. Sin embargo, los resultados que se obtienen proporcionan información valiosa que permite ahorrar tiempo y dinero, cuando dichos resultados se validan con un experimento.

Las pruebas experimentales de los dos intercambiadores de calor tierra aire dieron inicio el día 25 de julio y se concluyó con las mediciones el día 13 de agosto de 2016. Durante este periodo las mediciones se tomaron de manera continua para obtener el mayor número de datos posibles y tener datos confiables y reales del comportamiento térmico que ocurre cuando

el intercambiador está en operación bajo condiciones normales de operación. Las mediciones se tomaron cada segundo, por lo tanto todos los datos fueron promediados en lapsos de 10 minutos y de 1 hora.

Los días que presentaron las condiciones anteriormente mencionadas fueron los días 30 de julio y el 9 de agosto de 2016, se seleccionaron estos días debido a que el objetivo del estudio es el análisis del comportamiento de los EAHE's para su uso en la climatización de casas o edificios localizados en zonas que presenten un clima extremo.

Con los datos obtenidos se graficó el comportamiento de los dos intercambiadores para analizar las mediciones en ambos sistemas y estudiar en qué punto se está teniendo el efecto más significativo de enfriamiento.

Se presentan en las Figuras 35 y 36 las temperaturas del aire en el interior del EAHE a dos metros de profundidad para los días anteriormente mencionados. La gráfica muestra la variación de la temperatura del aire en cada punto del sistema conforme circula por el sistema.

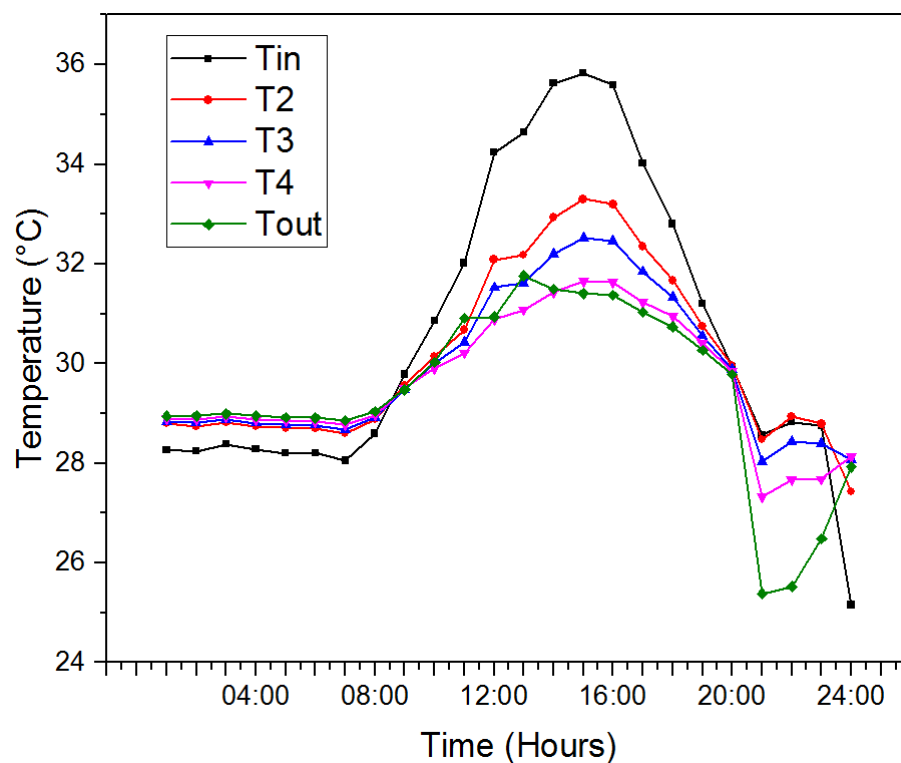


Figura 35. Grafica de las temperaturas del EAHE a 2 metros de profundidad medidas el día 30 de julio de 2016.

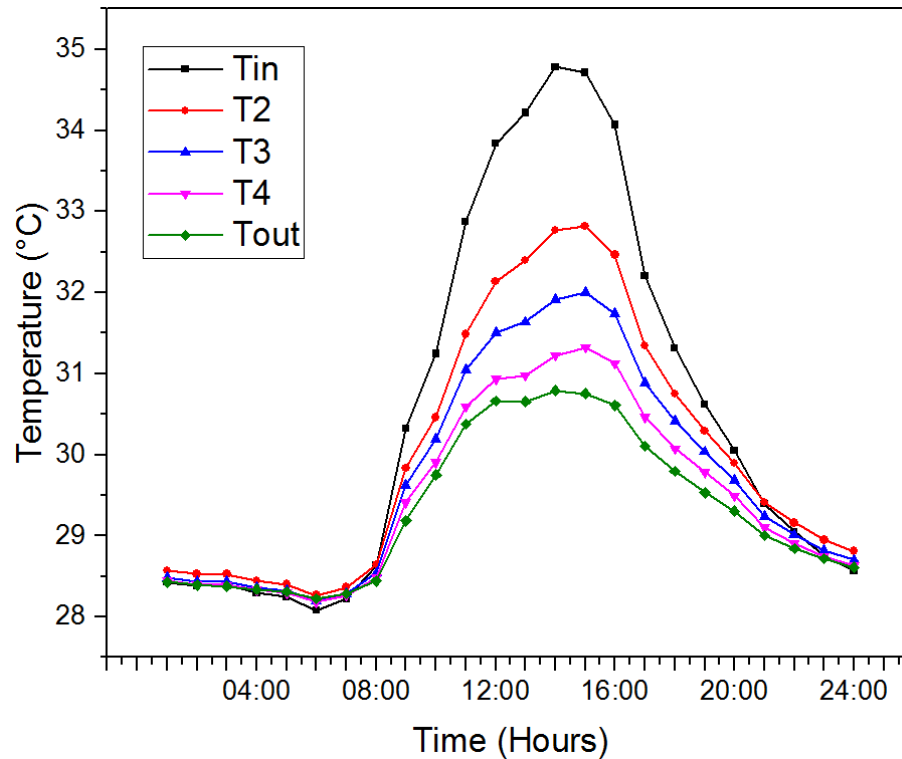


Figura 36. Grafica de las temperaturas del EAHE a 2 metros de profundidad medidas el día 9 de agosto de 2016.

Analizando a detalle los datos de la temperatura del fluido en el EAHE de 2m de profundidad, resalta que la transferencia de calor más importante se da en la primera sección del intercambiador, es decir, del punto T_{in} al punto T_2 , el calor cedido por el aire al intercambiador en promedio es de $\Delta T=2.35$ °C, lo que equivale a un 53.81% de la temperatura total cedida. Posteriormente del punto T_2 al punto T_3 el aire cede al sistema 0.79 °C, equivalentes a un 19.59% del calor que pierde. Continuando el análisis del sistema se observó que del punto T_3 al T_4 el aire pierde 0.73 °C, equivalente a un 18.24 % del calor total que pierde durante el proceso. Finalmente en la última sección del sistema que comprende del punto T_4 al punto T_{out} se visualizó que es la sección donde existió la menor pérdida de temperatura la cual fue de 0.19 °C que representa un 8.36%. Se especula que la baja transferencia de calor que existe en esta sección es causada por el aislamiento térmico que recubre la tubería, este resultado es positivo ya que el aire no volvió a ganar parte del calor cedido en las secciones posteriores al subir del subsuelo, si no que siguió perdiendo calor, como se mencionó en (Xamán, y otros, 2014)

De forma análoga, se realizó un análisis para el EAHE enterrado a 1 metro de profundidad, en las Figuras 37 y 38 se aprecia el comportamiento de la temperatura del aire en cada punto del sistema al circular por la tubería para los dos días presentados en esta sección.

Al llevar a cabo el estudio se logra apreciar que para este sistema el diferencial de temperatura en la sección inicial comprendida de $T_{in} - T_2$ fue de 1.34 °C, equivalente a un 54.7%, en la segunda sección $T_2 - T_3$, la temperatura descendió en promedio 0.38 °C, lo que representa una pérdida del 15%. Posteriormente en la sección $T_3 - T_4$, el calor cedido por el aire al sistema fue de 0.52 °C, este valor representa el 23% del diferencial total de temperatura. Finalmente es la sección T_4 a- T_{out} , la cual es la parte del intercambiador que se encuentra aislada térmicamente, la pérdida promedio de temperatura fue de 0.23 °C, o lo que es igual a un 9.09%.

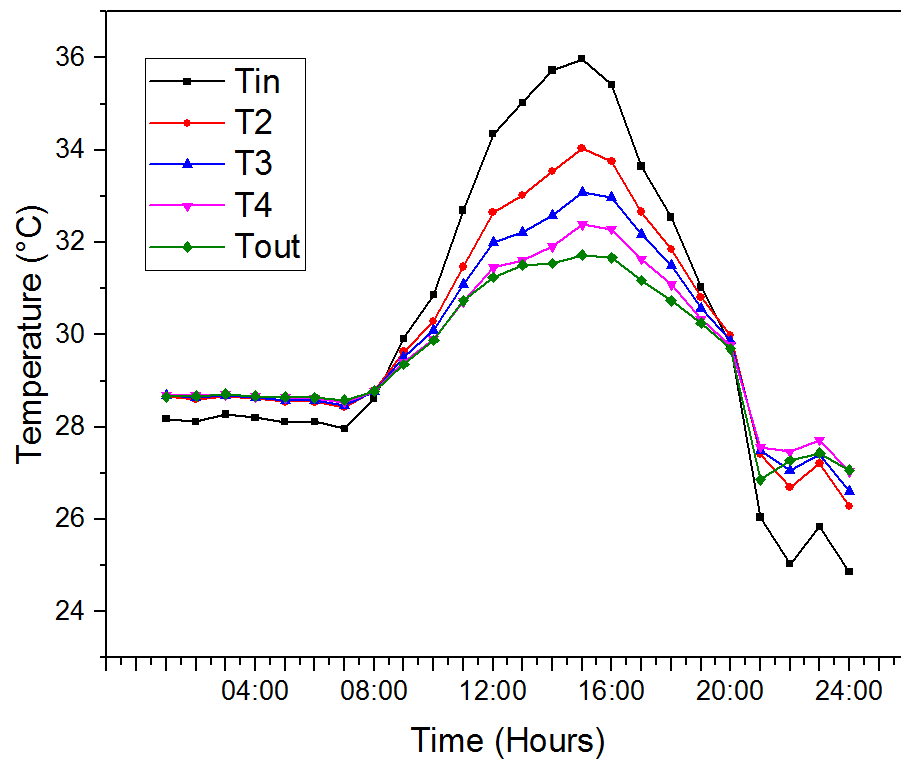


Figura 37 Temperaturas medidas en el EAHE a 1 metro de profundidad el día 30 de julio de 2016

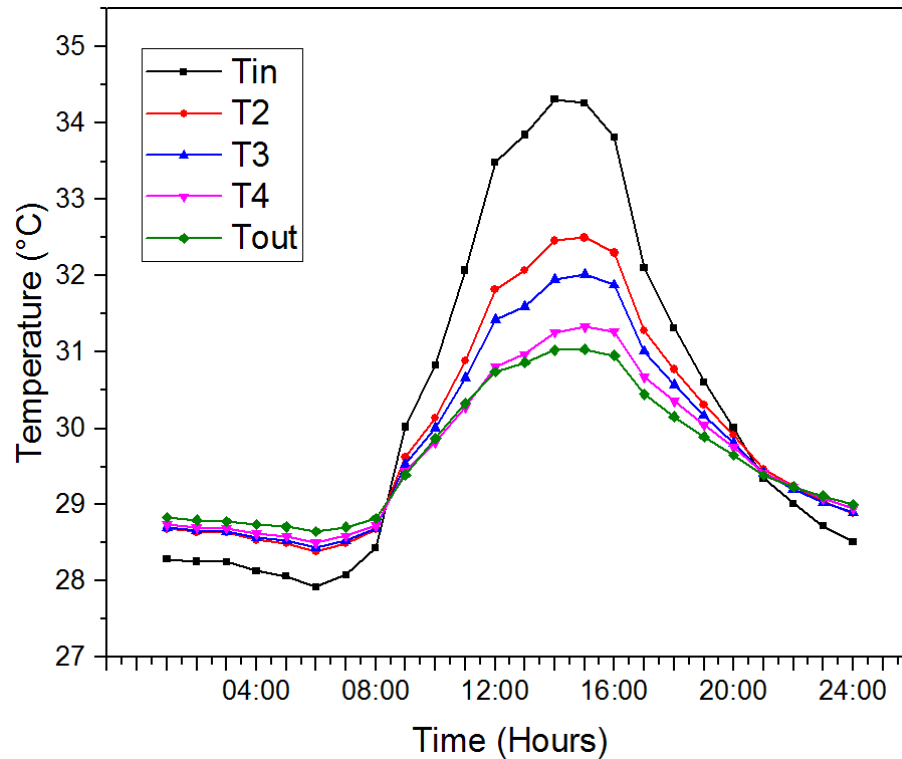


Figura 38. Temperaturas medidas en el EAHE a 1 metro de profundidad el día 9 de agosto de 2016.

Como se puede apreciar en los gráficos de los dos intercambiadores se observa un comportamiento similar a lo largo del día. Durante el periodo que comprende de las 00:00 a las 08:00 horas se visualiza que en ambos casos la temperatura de entrada del aire al EAHE es menor que la temperatura a la que sale, por lo que durante este lapso el sistema está funcionando como calefacción, el EAHE enterrado a 2 metros aumentó la temperatura del aire en un promedio de 0.7 °C mientras que el EAHE enterrado a 1 metro calentó el fluido en un promedio de 0.5 °C durante el mismo periodo de tiempo. Es recomendable en este lapso no hacer uso del sistema y aprovechar este periodo para dejar que el subsuelo se recupere del desgaste diurno que es donde se está teniendo el mayor beneficio. Después de las 09:00 horas el intercambiador comienza a enfriar el fluido, alcanzando el diferencial más alto entre las temperaturas de entrada con respecto a la salida a las 15:00 horas. En este punto el ΔT del EAHE a dos metros es de 4.45 °C mientras que el otro sistema tiene un ΔT de 4.25 °C, después de este punto el diferencial de temperatura comienza a decrecer paulatinamente. Después de las 20:00 horas los EAHE's empiezan nuevamente a calentar el aire que circula a través de ellos y el ciclo se repite.

3.2.2 Influencia de la profundidad de instalación del EAHE.

Para evaluar la diferencia en la profundidad de instalación de los EAHE's, se analizaron las mediciones de entrada y salida en ambos intercambiadores, así como de la temperatura ambiente. A continuación, se presenta el comportamiento térmico del aire al circular por los EAHE's, así como la temperatura ambiente medida. Se muestran 4 de los días más representativos de todo el periodo de evaluación en donde las mediciones no fueron perturbadas por precipitaciones pluviales y presentaron una temperatura del aire elevadas a la entrada del sistema (Figura 39 A, B, C y D)

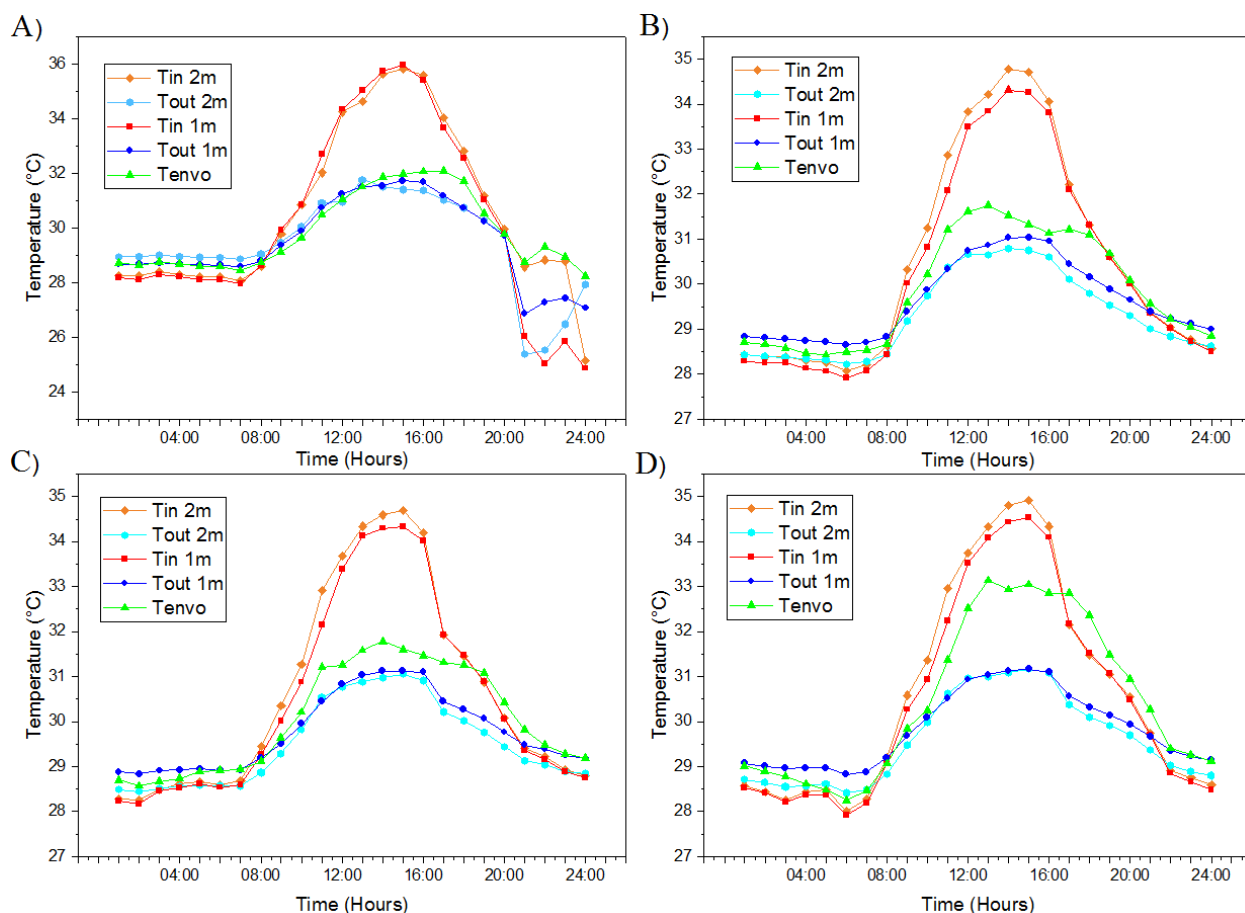


Figura 39. Temperaturas del aire a la entrada y salida de los EAHE's A) 30 de Julio de 2016. B) 09 de Agosto de 2016. C) 10 de Agosto de 2016. D) 11 de Agosto de 2016.

Analizando los gráficos presentados se observa que el diferencial de temperaturas entre ambos sistemas, tanto a la entrada como a la salida es similar ($\sim 0.40^{\circ}\text{C}$). La diferencia entre la temperatura ambiente (T_{envo}) y las temperatura de salida (T_{out}) varia de 0.03 a 2.37°C , presentándose el diferencial más notorio el día 11 de agosto de los cuatro días analizados. Esto se debe principalmente a que la irradiancia para ese día fue mayor que para los días anteriores.

Otro fenómeno importante que se observa de la Figura 39 es que la T_{in} es mayor que la T_{envo} de las 8:00 horas a las 21:00 horas, lo cual se atribuye a la irradiancia solar. La absorción de calor en la tubería de entrada y en el suelo, ocasionan un incremento de temperatura de hasta 3°C . Lo anterior ocasiona un bajo rendimiento del EAHE. Es recomendable aislar térmicamente la entrada del intercambiador hasta 0.3 m de profundidad. Dado que en la sección de entrada y el primer punto de medición se tiene la mayor caída de temperatura, no es recomendable aislar más de 0.3 m bajo el suelo.

En el apartado 3.2.4 se presenta con más detalle, la influencia de las variables climáticas con el comportamiento del intercambiador de calor.

Considerando que el costo de instalación de un intercambiador a 2 m de profundidad es mayor, no se justifica su uso. Por tanto, de aquí en adelante, solo se presentarán resultados del EAHE instalado a 1 m de profundidad.

En las Figura 40 se visualiza el comportamiento térmico del suelo a las distintas profundidades monitoreadas, de igual manera se presenta el comportamiento de la temperatura ambiente a lo largo del día. En las gráficas se observa que el suelo mantiene una estabilidad térmica durante todo el día en sus distintas profundidades, teniendo variaciones menores al 1% entre éstas. También se observa que la temperatura del subsuelo varía muy poco en los primeros 1.5 metros de profundidad, llegando a un promedio de 25.8°C a 2 m de profundidad.

Revisando a detalle las variaciones del suelo se observa que a 0.5 metros de profundidad la temperatura desciende un promedio de 12.86%, a 1.0 metro de profundidad 24.3% y a 1.5m 39.59%, todas con respecto a la temperatura superficial. El cambio de

temperatura más representativo se da a los 2.0 metros de profundidad, a esa distancia la temperatura desciende un 60.4% del ΔT total con respecto a la temperatura superficial. Sin embargo, como se mencionó anteriormente, la diferencia de las temperaturas de salida en ambos intercambiadores (1 y 2 m) no tuvo cambios significativos. Lo anterior se puede atribuir a la baja conductividad térmica del tubo de PVC utilizado.

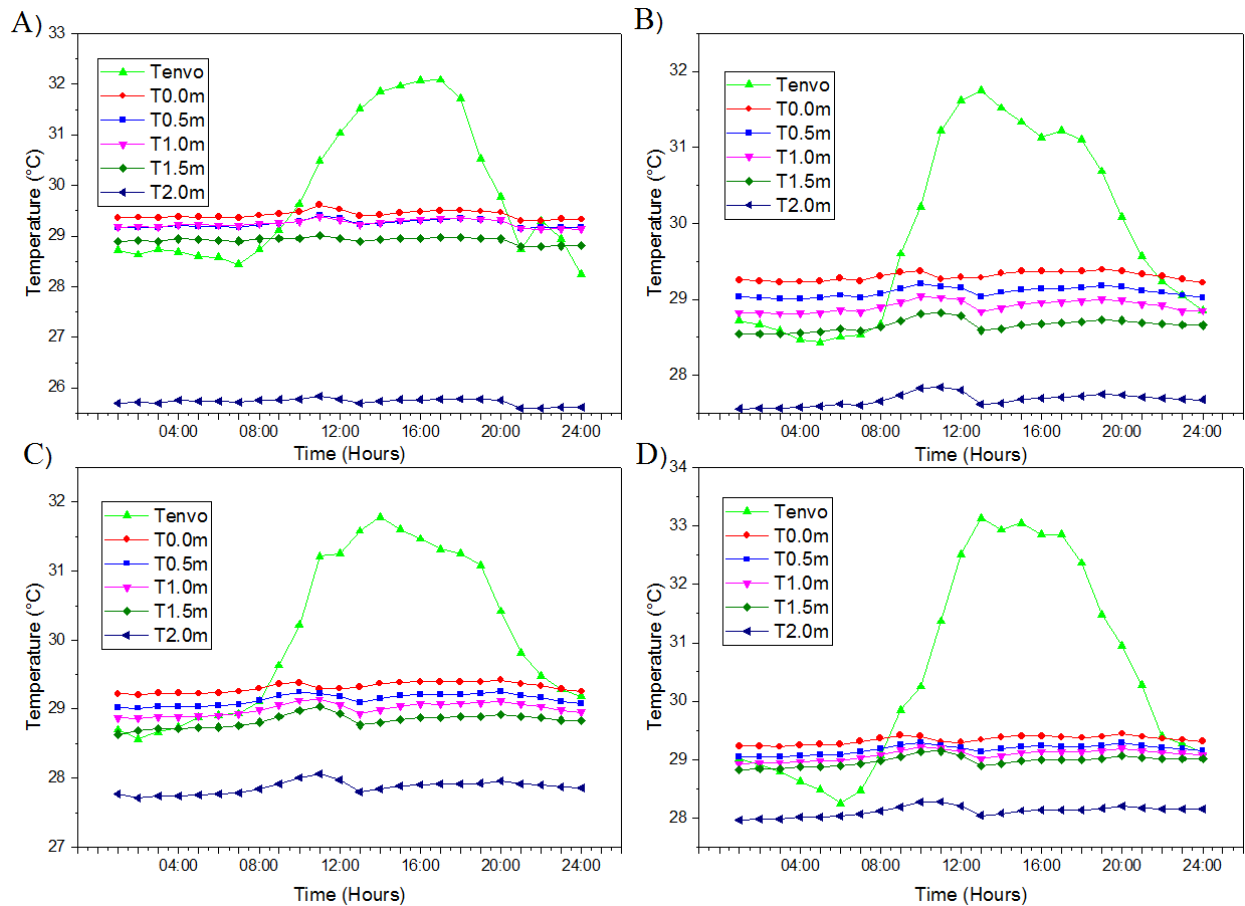


Figura 40. Grafica del perfil de temperatura del suelo A) 30 de Julio de 2016. B) 9 de Agosto de 2016. C) 10 de Agosto de 2016. D) 11 de Agosto de 2016

También es notorio el comportamiento de la temperatura ambiente a lo largo del día, la cual presenta cambios muy abruptos durante todo el periodo de mediciones. Esto denota la inestabilidad térmica característica de la atmosfera en comparación con el suelo en donde la estabilidad de su temperatura es evidente.

3.2.3 Relación de temperatura del subsuelo con el funcionamiento térmico de EAHE.

Dado que el diferencial de temperatura que presentan los sistemas es mínimo como consta en los resultados observados de los apartados anteriores, se trabajó únicamente con el EAHE de 1 metro de profundidad para estudiar la relación que existe entre el funcionamiento del EAHE con la temperatura del subsuelo.

Lo primero que se observa en la Figura 41 es que durante el proceso en que el intercambiador está calentando el fluido, la temperatura que alcanza el aire a la salida del sistema es un valor cercano a la temperatura del subsuelo a 1 m de profundidad, dicha diferencia no rebasa los 0.5 °C. Esto es visible tanto durante las primeras 8 horas del día, como después de las 22 horas que son los lapsos en donde el aire de entrada tiene una temperatura menor que la temperatura ambiente y que la temperatura del subsuelo a 1.0 metro de profundidad.

En el periodo que comprende de las 9 a las 21 horas el EAHE está enfriando el aire que circula a través de él, se hizo un análisis de las temperaturas del aire a la entrada y a la salida del sistema comparándola con la temperatura del subsuelo a la profundidad de 1 metro. Se observa que la temperatura del aire que sale del intercambiador tiene un valor cercano a la temperatura media entre la temperatura del aire que entra al sistema y la temperatura del subsuelo, es decir, el valor de T_{out} es la media entre el valor de T_{in} y el valor de $T_{1.0m}$ teniendo una desviación típica de 0.31 °C.

También podemos observar que la temperatura ambiente y la temperatura de entrada al intercambiador de calor, durante las primeras horas del día (00:00 a las 8:00 horas) son menores a la temperatura del suelo a diferentes profundidades. Este comportamiento afecta a la temperatura de salida, que incrementa su valor (0.5°C) respecto a la T_{in} , teniendo un efecto de calentamiento en lugar de enfriamiento, que no es lo que se busca. A partir de las 8:00 horas y hasta las 21:00 horas, se presenta un efecto de enfriamiento, observándose reducciones de temperatura de 0.98 °C para el día 30 de julio (18:00 horas), 0.94 °C para el día 9 de agosto

(18:00 horas), el día 10 de agosto presento una diferencia de 1.02 °C (19:00 horas) y el día 11 de agosto la diferencia entre T_{out} y T_{envo} fue de 2.28 °C (17:00 horas)

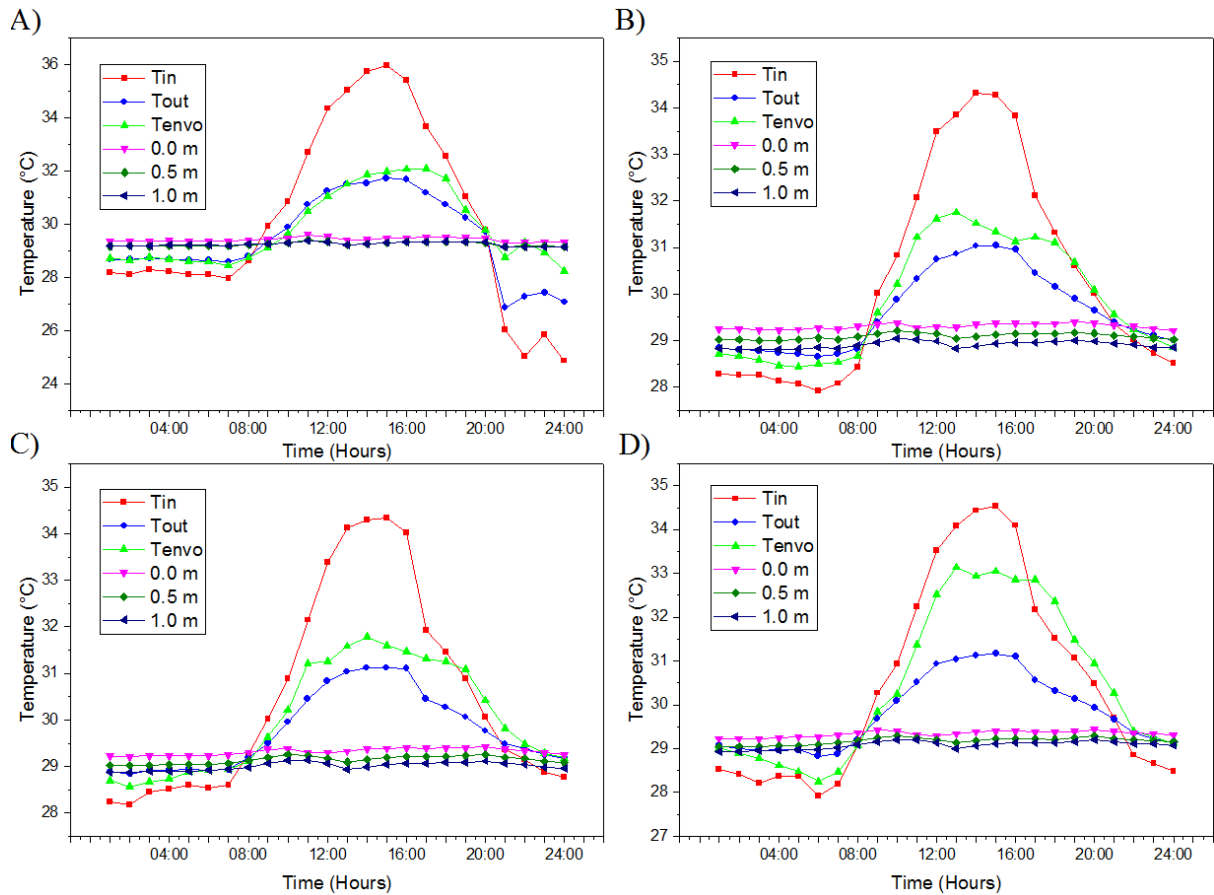


Figura 41. Grafica de la relación entre temperatura de subsuelo y funcionamiento del EAHE A) 30 de Julio de 2016. B) 9 de Agosto de 2016. C) 10 de Agosto de 2016. D) 11 de Agosto de 2016.

De igual manera se confirma que entre mayor sea la temperatura del aire a la entrada del sistema, mayor será el diferencial entre la temperatura del suelo a la que está instalado el intercambiador y la temperatura del aire a la entrada del EAHE. Este postulado se comprueba al observar que el mayor ΔT se obtuvo cuando la temperatura del aire alcanzó su valor máximo en cada uno de los días evaluados, esto es posible ya que como el subsuelo mantiene una estabilidad térmica casi constante, el diferencial irá en aumento hasta su máximo valor.

3.2.4 Influencia de las variables meteorológicas sobre el EAHE.

Las variables meteorológicas afectan el funcionamiento de los intercambiadores. Debido a que la atmósfera presenta una gran inestabilidad térmica, cualquier acontecimiento genera una perturbación significativa en ella. A continuación, se presenta el comportamiento de la temperatura del aire en el momento en que se presenta una precipitación pluvial.

Como se observa en la figura 42 el intercambiador se encontraba funcionando de manera habitual, tal cual se ha expuesto anteriormente, hasta que a las 12 horas se presentó una lluvia en el lugar del experimento. Se observa que las temperaturas de T_{in} , T_{out} y T_{emvo} , decaen cuando se presenta la precipitación pluvial, igualándose el valor de T_{out} con T_{emvo} , eliminando el efecto térmico del intercambiador de calor. Una vez pasada la lluvia, el sistema regresa a operar en condiciones normales.

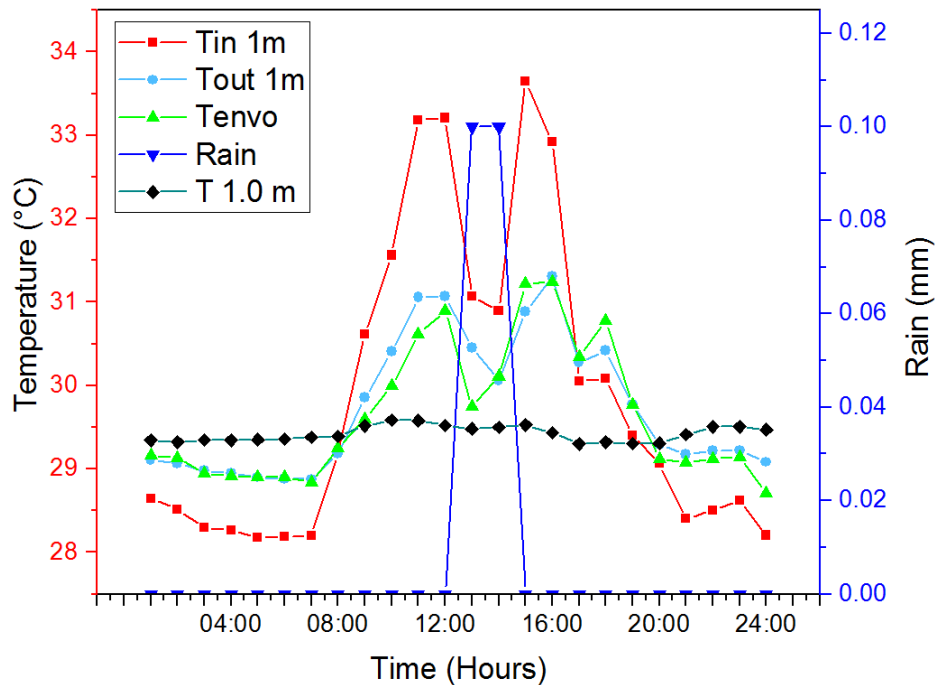


Figura 42. Grafica que muestra la influencia de las precipitaciones pluviales en el funcionamiento del EAHE el día 28 de Julio de 2016

De igual manera se analizó la influencia que tiene la irradiancia solar sobre el funcionamiento del EAHE. Como se parecía en la Figura 43 la irradiancia solar afecta directamente la temperatura de entrada del aire, teniendo un comportamiento paralelo con T_{out} , esto se debe a que la irradiancia al ser una onda de energía electromagnética tiene cierta intensidad energética, la cual al incidir sobre la tubería de entrada expuesta a la intemperie y sobre el suelo que rodea dicha tubería, incrementan su temperatura. Este incremento de la temperatura es transmitida directamente al aire que entra al sistema, afectando así el rendimiento del EAHE.

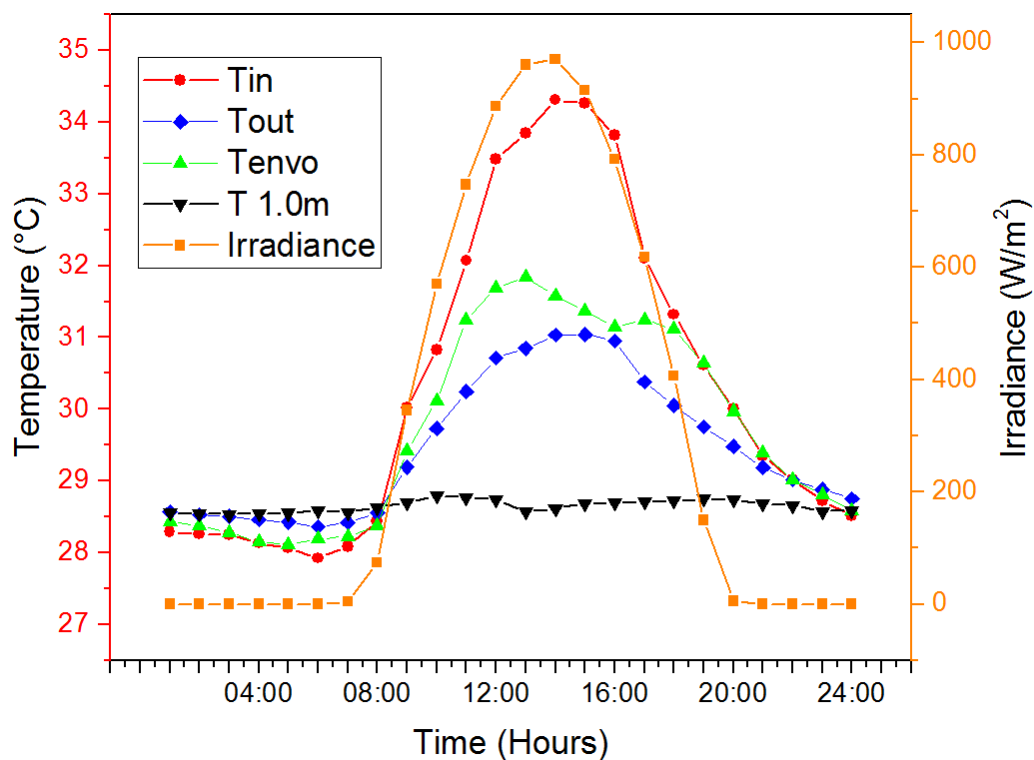


Figura 43. Grafica de la influencia de la irradiancia solar sobre la temperatura de entrada del intercambiador.

Como se pudo observar en las Figuras 42 y 43, las variables meteorológicas tienen un papel importante en el funcionamiento de un intercambiador de calor tierra aire, ya que afectan directamente la temperatura del fluido, lo que conlleva a un óptimo funcionamiento del sistema o a la inoperatividad del mismo, de ahí la importancia de un estudio adecuado de las variables meteorológicas específicas del lugar de instalación del EAHE.

3.4 Evaluación térmica del EAHE.

La ganancia de energía de EAHE está asociado con la demanda de energía requerida por el extractor de aire. La eficiencia energética de un intercambiador es la relación entre su ganancia de energía y la demanda de electricidad del extractor. Una manera de medir el rendimiento del EAHE es calculando el coeficiente de operación (COP) el cual se puede obtener con la ganancia total de energía suministrada por el EAHE y la disipación de la energía mecánica durante el tiempo de operación (Pfafferott, 2003).

En consecuencia, se dice que el coeficiente de operación (*COP*) es la razón de la diferencia entre el calor útil del intercambiador (Q_U) y la potencia eléctrica demandada por del extractor de aire (P) lo cual se expresa en la Ec. 1.

$$COP = \frac{Q_U}{P} \quad (1)$$

Como el propósito del experimento es evaluar el EAHE para que este suministre aire frío para refrescar las casas, la evaluación solo se realizara para el horario diurno que es el lapso en donde el intercambiador está cumpliendo con este propósito y que comprende de las 09:00 a las 20:00 horas.

El calor útil (Q_U) está dado por la Ec. 2, en la cual están implícitas el flujo másico, el coeficiente de calor específico a presión constante (C_p) y el diferencial de temperatura (ΔT) que se midió entre la temperatura T_{in} y T_{out} .

$$Q_U = \dot{m} C_p \cdot \Delta T \quad (2)$$

Donde el flujo másico se obtiene de la Ec 3 y es el producto de la densidad del aire (ρ), la velocidad del viento en el interior del tubo (v) el de la sección transversas de la tubería (A). La densidad se encuentra en tablas y tiene un valor de 1.3 Kg/m³. La velocidad del viento en el

interior del tubo medida es de 0.5 m/s. el área de la sección transversal, se obtiene con el diámetro del tubo el cual es de 0.1524 m (6”).

$$\dot{m} = \rho v A \quad (3)$$

Sustituyendo los valores en Ec.3 obtenemos el flujo másico.

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

$$\dot{m} = 1.18 \times 10^{-2} \text{ Kg/s}$$

El coeficiente de calor específico a presión constante (C_p) para el aire se obtiene de tablas (Çengel & Ghajar, 2011) y tiene un valor de $1005 \text{ J/Kg } ^\circ\text{K}$.

El diferencial de temperatura (ΔT) se obtiene de la diferencia que existe entre el valor T_{out} menos el valor T_{in} en la escala de grados Kelvin (K) durante el periodo diurno para los días 30 de julio y 9 de agosto.

Sustituyendo los datos en la Ec.2 con los valores del diferencial de temperatura calculado en cada hora del periodo de tiempo a analizar, se obtiene el calor útil del sistema para cada hora.

$$Q_U = ((1.18 \times 10^{-2} \text{ Kg/s})(1005 \text{ J/Kg } ^\circ\text{K})(^\circ\text{C}) + 277.4 \text{ } ^\circ\text{K})$$

Tabla 5. Calor útil (Q_U) para los días analizados

Hora	Q_U del día 30 de julio (Watts)	Q_U del día 9 de agosto (Watts)
09:00	3293.25	3295.19
10:00	3298.38	3298.08
11:00	3309.95	3307.40
12:00	3323.54	3319.29
13:00	3328.45	3322.07
14:00	3336.31	3325.68
15:00	3337.07	3325.00
16:00	3331.18	3320.67
17:00	3316.05	3306.41
18:00	3308.17	3300.48
19:00	3295.86	3295.18
20:00	3287.81	3290.93
	Q_U promedio = 3313.84	Q_U promedio = 3308.87

Para calcular la energía demandada por el extractor de aire es necesario el cálculo de la potencia la cual se obtiene de la Ec.4

$$P = V \cdot I \quad (4)$$

Como se observa, la potencia es la razón de la tensión multiplicado por la corriente. Para obtener estos datos se hizo uso de un multímetro para obtener dichos valores, la tensión suministrada al extractor de aire fue de 62 Volts y la corriente demandada por el equipo es de 0.100 Amperes, sustituyendo los datos en Ec. 4 tenemos:

$$P = (62 V)(0.100 A) = 6.2 \text{ Watts}$$

Teniendo la potencia requerida por el extractor de aire calculado y con los valores del calor útil promedio para cada hora de los dos días analizados, se puede obtener el COP en cada hora de los dos días,

Tabla 6. Coeficiente de operación (COP) para los días analizados.

Hora	<i>COP</i> del día 30 de julio	<i>COP</i> del día 9 de agosto
09:00	531.17	531.32
10:00	532.00	531.95
11:00	533.86	533.45
12:00	536.05	535.37
13:00	536.85	535.82
14:00	538.11	536.40
15:00	538.24	536.29
16:00	537.29	535.59
17:00	534.85	533.29
18:00	533.58	532.34
19:00	531.59	531.48
20:00	530.29	530.80
	<i>COP</i> _{promedio} = 5883.15	<i>COP</i> _{promedio} = 5873.04

Pfafferott (2003) realizó estudios para evaluar la eficiencia energética de los EAHE's durante un año para tres intercambiadores construidos en Alemania los cuales tiene flujos que van de los 500 a 12000 m³/h. Al calcular el COP para estos casos de estudio particulares se obtuvieron valores que están en el intervalo de 29 a 380. La diferencia que se tiene al comparar estos resultados con los calculados para este trabajo se debe principalmente a que Pfafferitt en su evaluación considero la operación del sistema durante un año en horario diurno y nocturno, mientras que en este trabajo se considera únicamente el funcionamiento del sistema en horario diurno que es donde se obtiene el beneficio deseado.

Capítulo 4. Conclusiones y trabajos futuros

4.1 Conclusiones.

Se diseñó, construyó y evaluó térmicamente un EAHE para las condiciones meteorológicas de la ciudad de Chetumal, Q. Roo. Los resultados mostraron una reducción de 4.25 °C para el EAHE a 1m de profundidad y 4.42°C para el EAHE a 2 m de profundidad. El COP para el EAHE a un metro de profundidad estuvo en un intervalo de 533.99 a 541.99. en el horario de 09:00 a 21:00 horas

Los resultados obtenidos mostraron una diferencia no significativa de la temperatura de salida (T_{out}) entre ambos EAHE's analizados los cuales estaban fabricados con tubería de PVC. Por tanto, por cuestión presupuestal se recomienda (para Chetumal) la instalación de un EAHE a 1 m.

Se encontró que para las condiciones climáticas de Chetumal, en época de verano no se recomienda el uso del EAHE de las 22:00 a las 08:00 horas, debido a que se tiene un efecto de calentamiento del aire, lo cual no es deseable. Se recomienda el tapar las tuberías para evitar que el EAHE ingrese aire caliente a las viviendas ya que el uso del sistema es inevitable debido a que se encuentra instalado.

La temperatura de entrada (T_{in}), de las 8:00 a las 21:00 aumenta hasta en 4°C respecto a la temperatura ambiente (T_{envo}), afectando el funcionamiento térmico del intercambiador de calor. Lo anterior debido a la absorción de calor del suelo y la tubería del EAHE.

Se pudo constatar la estabilidad térmica que presenta el suelo a distintas profundidades, se observó que la mayor diferencia de temperatura en comparación con la temperatura superficial se da a los 2 metros de profundidad, aunque esta diferencia de temperaturas no se vio reflejada en el desempeño del intercambiador enterrado a esa profundidad, se especula que un EAHE construido con tubería de un material con mayor conductividad térmica, por

ejemplo, tubería de acero, tendría un mejor desempeño a esa profundidad y con ese diferencial de temperatura, esto es solo una conjetura, se requeriría de un experimento que dé certidumbre a este postulado.

De igual manera se demostró la influencia que tiene las condiciones meteorológicas en la operatividad del intercambiador. La lluvia provoca el abrupto descenso de la temperatura del medio ambiente, lo que conlleva a que el aire que sale del intercambiador tenga la misma temperatura que la del medio ambiente, lo cual provoca que el EAHE no contribuya a mejorar las condiciones de confort térmico en las casas. La humedad relativa en el ambiente y la alta irradiancia tienen un efecto contrario a la lluvia, es decir, estos factores favorecen el desempeño del EAHE debido a que aumenta la temperatura del aire a la entrada del sistema y como se observó en el trabajo, a mayor temperatura del aire, el intercambiador provocará un descenso de la temperatura del aire más alto.

El experimento demostró que el intercambiador de calor tierra aire tiene un gran potencial para generalizar su uso en las regiones cálidas del sureste mexicano, con dimensionamiento adecuado de la cantidad de aire necesario para una casa se puede dimensionar un sistema adecuado a las necesidades para que suministre el aire necesario para un óptimo rendimiento, otro uso que se le puede dar a los EAHE's es el acoplarlos a sistemas de climatización convencionales (mini Split), reduciendo así el funcionamiento del equipo lo que repercute directamente en un ahorro de energía.

Otra contribución de este trabajo fue el refutar la teoría que se tenía acerca de que la profundidad a la que se debe de instalar un intercambiador de calor tierra-aire, desechando así el argumento de que la distancia para la instalación de este tipo de sistemas debe de ser de 2 metros de profundidad como mínimo, quedando demostrado que el EAHE enterrado a 1 metro de profundidad tiene un rendimiento similar, lo que implica un menor costo por el mismo beneficio. Este postulado solo es válido para las condiciones presentadas en este experimento, es decir, cuando el suelo este compuesto en su mayoría por travertino y el material con el que está fabricado el intercambiador sea tubería de PVC hidráulico. Sería deseable realizar un

estudio similar en distintos tipos de suelos para ver si existe concordancia con los resultados presentados en este trabajo o si es un caso aislado solo para la roca caliza.

Se observó la evolución de la transferencia de calor del aire con el sistema, destacando que la mayor parte de este intercambio se da en la primera sección del intercambiador, posteriormente la temperatura del fluido va descendiendo gradualmente pero a menor escala. Se conjetura que a mayor distancia la temperatura del fluido podría alcanzar valores cercanos a la del subsuelo, lo que implicaría distancias que no son económicamente viables para su construcción.

4.2 Recomendaciones y trabajos futuros.

Se propone aislar térmicamente la tubería de entrada hasta 0.3 m debajo de la superficie del suelo para evitar el aumento de la T_{in} durante las horas de mayor irradiancia. Se deben de realizar mediciones para ver el efecto que se tiene en el sistema en las diferentes temporadas del año, por lo que se postula la posibilidad de hacer mediciones por un año completo. Se propone el uso de diferentes materiales aislantes (lana de vidrio, Foamular o material con cambio de fase. Los materiales anteriores también se pueden aplicar a la tubería de salida.

Tener un sistema automatizado para abrir y cerrar la salida de aire del EAHE, en función de la temperatura ambiente, para evitar efectos no deseados (calentamiento en verano o enfriamiento en invierno).

Materiales de la tubería: realizar intercambiadores con tuberías de diferentes materiales (concreto, acero al carbón) para ver su efecto en el funcionamiento térmico del EAHE.

Evaluación del rendimiento térmico del intercambiador de manera continua durante un año para ver el comportamiento del EAHE durante la temporada de otoño-invierno.

Acoplamiento del EAHE a una casa habitación para realizar mediciones en el interior de la vivienda y hacer una comparación con otra casa de mismas dimensiones que no cuente con intercambiador de calor.

Se recomienda que para trabajos futuros el utilizar un material de cambio de fase para recubrimiento térmico de la tubería de descarga del intercambiador. Un material de cambio de fase (PCM) es una sustancia con un alto calor de fusión y solidificación a una cierta temperatura, siendo capaz de almacenar y liberar grandes cantidades de energía. Los PCM se suelen incorporar como aditivos en materiales de construcción como por ejemplo yesos, yesos proyectables, morteros, placas de yeso, cartón-yeso, etc. El producto permite controlar la temperatura del interior de los edificios, proporcionando un equilibrio térmico tanto en invierno como en verano. Durante los cambios de fase, la temperatura de la habitación se mantiene constante, reduciendo o eliminando la necesidad de sistemas de aire acondicionado o calefacción.

Por cuestiones de costo sería deseable se realizará un intercambiador con tubería de acero, en algunos trabajos experimentales demostró tener un rendimiento del 55% mayor en comparación con la tubería de PVC para la transferencia de calor, aunque no se descarte que en otros estudios se denota que no es una buena opción, por lo que se tendría que evaluar el desempeño de los dos materiales bajo las condiciones climáticas de la región.

En cuestión de la instrumentación es necesario contar con más sensores para medir la temperatura en la superficie inferior y superior de la tubería para apreciar la transferencia de calor que ocurre hacia la superficie y el subsuelo, de igual manera se recomienda hacer una malla de termopares para ver el comportamiento de la temperatura en el diámetro total de la tubería. Otro punto a sugerir es que se requiere de un anemómetro lo suficientemente pequeño en la entrada del EAHE que no obstruya el flujo de aire hacia el interior del intercambiador.

Referencias

- Allard, F. (1998). *Natural Ventilation in Buildings*. James & James.
- Álvarez , G., & Dorantes-Rodríguez, R. (2010). Energía Sustentable en Edificios y Casa. *Revista de la Academia Mexicana de Ciencias*, 5.
- American Society of Heating, Refrigeration and Air Conditioning Engineer. (2005). *ASHRAE "Handbook of Fundamentals"*. New York, EE. UU.
- Ascione , F., Bellia, L., & Minichiello, F. (2011). Earth to air heat exchangers for Italian climates. *Renewable Energy*, 2177-2188.
- ASHRAE Standar 62. (2004). Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality. In *AASHRAE, "Handbook of Fundamentals"*.
- Awbi , H. (2003). *Ventilation of Building*. E & FN Spon.
- Badescu , V. (2007). Simple and accurate model for the ground heat exchanger of a passive house. *Renewable Energy*, 845–855.
- Beltrán Rodríguez, L., Alexandri Rionda, R., Herrera Romero, J., & Ojeda Galicia, O. (2015). *Balance Nacional de energía 2014*. . México.
- Benhammou, M., Draoui, B., Zerrouki, M., & Marif, Y. (2015). Performance analysis of an earth-to-air heat exchanger assisted by a wind tower for passive cooling of buildings in arid and hot climate. *Energy Conversion and Management*, 1-11.
- Bojić, M., Papadakis, G., & Kyritsis, S. (1999). Energy from a two-pipe, earth-to-air heat exchanger. *Energy*, 519-523.
- Bojić, M., Trifunovic, N., Papadakis, G., & Kyritsis, S. (1997). Numerical Simulation, Technical and Economic Evaluation of Air-to-Earth Heat Exchanger Coupled to a Building. *Energy*, 1151-1158.
- Çengel, Y. A., & Ghajar, A. A. (2011). *Transferencia de calor y masa. Fundamentos y aplicaciones*. México: Mc Graw Hill.

- Comisión Federal de Electricidad (CFE). (2015). *Comisión Federal de Electricidad, Informe Anual 2014*. Retrieved 2015, from <http://www.cfe.gob.mx/inversionistas/Style%20Library/assets/pdf/InformeAnual.pdf>
- Comisión Reguladora de Energía. (2011, 5). *Evaluación de la Energía Geotérmica en México*. Retrieved from <http://www.cre.gob.mx/documento/2026.pdf>
- Gan , G. (2015). Simulation of dynamic interactions of the earth–air heat exchanger. *Applied Energy*, 118-132.
- Geoconsultores. Técnicos y Ambientales. S. L. (2008, 7 11). Retrieved 2016, from <http://www.geoconsultores.org/ficheros/b16cc7769427df3836167c798745d9cc.pdf>
- INEGI. (2011, Diciembre). Retrieved from <http://www.inegi.org.mx/est/contenidos/espanol/sistemas/perspectivas/perspectiva-qr.pdf>
- INEGI. (2015). *El sector energético en México 2014. Serie estadística seccional 2015*.
- Ingelmo, F., Cuadrado, S., & Hernández, J. (1986). Estudio de la conductancia térmica del suelo. Correlaciones de su temperatura con la del aire en dos observatorios. *Ediciones Universidad de Salamanca*, 595-608.
- Instituto Nacional de Electrificación-INDE. (2007). *División de Desarrollo Geotérmico-DDG, Empresa Generadora de Energía Eléctrica-EGEE*.
- Kepes Rodriguez, M., da Silva Brum, R., Vaz, J., Oliveira Rocha, L., Domingues dos Santos, E., & André Isoldi, L. (2015). Numerical investigation about the improvement of the thermal potential of an Earth-Air Heat Exchanger (EAHE) employing the Constructal Design method. *Renewable Energy*, 538-551.
- Maky Abubakr, F., & Ramadan, M. (2010). Thermal Conductivity, Radiogenic Heat Production and Heat Flow of Some Upper Cretaceous Rock Units, North Western Desert, Egypt. *Journal of Applied Sciences Research*, 483-510.
- Mihalakakou , G., Santamouris, M., & Asimakopoulos, D. (1994). Modelling the thermal performance of earth-to-air heat exchangers. *Solar Energy*, 301-305.

- Mihalakakou, G., Santamouris, M., Lewis, J., & Asimakopoulos, D. (1997). On the application of the energy balance equation to predict ground temperature profiles. *Solar Energy*, 181-190.
- National Renewable Energy Laboratory. (2000, 12 8). *México - Campeche, Quintana Roo and Yucatán Wind Resource Map*, 1.2. Retrieved 2016, from <http://www.nrel.gov/wind/images/mexico-yucatan-windmap.gif>
- Niu, F., Yu, Y., Yu, D., & Li, H. (2015). Heat and mass transfer performance analysis and cooling capacity prediction of earth to air heat exchanger. *Applied Energy*, 211–221.
- Pfafferott, J. (2003). Evaluation of earth-to-air heat exchangers with a standardised method to calculate energy efficiency. *Energy and Buildings*, 971-983.
- Ramírez-Dávila, L., Xamán Villaseñor, J., Arce, J., Álvarez, G., & Hernández-Pérez, I. (2014). Numerical study of earth-to-air heat exchanger for three different climates. *Energy and Building*, 238-248.
- Salah El-Din, M. (1999). On the heat flow into the ground. *Renewable Energy*, 473-490.
- Santamouris, M., Mihalakakou, G., Argiriou, A., & Asimakopoulo, D. (1995). On the performance of buildings coupled with earth to air heat exchanger. *Solar Energy*, 375-380.
- Secretaría de Energía. (2015). *Balance Nacional de Energía 2014*. Retrieved 2015, from https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/44353/Balance_Nacional_de_Energ_a_2014.pdf
- Serageldin, A., Abdelrahman, A., & Ookawara, S. (2016). Earth-Air Heat Exchanger thermal performance in Egyptian conditions: Experimental results, mathematical model, and Computational Fluid Dynamics simulation. *Energy Conversion and Management*, 25-38.
- Serrano Arellano , J. (2012). *Análisis de la transferencia de calor y masa de flujo y contaminantes del aire de una cavidad ventilada. Tesis Doctoral. Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico - CENIDET. Cuernavaca, Morelos, México.*

- Singh Bisoniya, T., Kumar, A., & Baredar, P. (2014). Heating potential evaluation of earth-air heat exchanger system for winter season. *Journal of Building Physics*, 1-19.
- Softeca, S. I. (2015, Septiembre 28). *Código Técnico de la Edificación WEB*. Retrieved from <http://cte-web.iccl.es/materiales.php?a=1>
- Su, H., Liu, X.-B., Ji, L., & Mu, J.-Y. (2012). A numerical model of a deeply buried air-earth-tunnel heat exchanger. *Energy and Buildings*, 233–239.
- van Manen , S., & Wallin, E. (2012). Ground temperature profiles and thermal rock properties at Wairakei, New Zealand. *Renewable Energy*, 313-321.
- Vaz, J., Sattler, M., dos Santos, E., & Isoldi, L. (2011). Experimental and numerical analysis of an earth–air heat exchanger. *Energy and Buildings*, 2476–2482.
- Velasco Tapia, F. (2016). *Informa del análisis del suelo de villas universitarias de la Universidad de Quintana Roo*. Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Ciencias de la Tierra, Nuevo Leon.
- windyty. (2014, 11 28). *windyty*. Retrieved 2016, from <https://www.windyty.com/?18.917,-99.250,3>
- Xamán, J., Hernández-López, I., Alvarado-Juárez, R., Hernández-Pérez, I., Álvarez, G., & Chávez, Y. (2015). Pseudo transient numerical study of an earth-to-air heat exchanger for different climates of México. *Energy and Buildings*, 273–283.
- Xamán, J., Hernández-Pérez, I., Arce, J., Álvarez, G., Ramírez-Dávila, L., & Noh-Pat, F. (2014). Numerical study of earth-to-air heat exchanger: The effect of thermal insulation. *Energy and Buildings*, 356–361.
- Yassine, B., Ghali, K., Ghaddar, N., Chehab, G., & Srour, I. (2014). 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*, 567–586.
- Yoon , S., Lee, S.-R., & Go, G.-H. (2015). Evaluation of thermal efficiency in different types of horizontal ground heat exchangers. *Energy and Buildings*, 100–105.

Yoon , S., Lee, S.-R., & Go, G.-H. (2015). Evaluation of thermal efficiency in different types of horizontal ground heat exchangers. *Energy and Buildings*, 100–105.

Anexo A

Planos del intercambiador de calor tierra-aire.

En este apartado se presentan los planos del proyecto. En el documento que lleva por nombre EAHE-VU-UQROO-01 se encuentran detalladas las especificaciones técnicas y dimensiones del material de 15.24 cm (6") utilizado en la construcción del intercambiador de calor tierra aire.

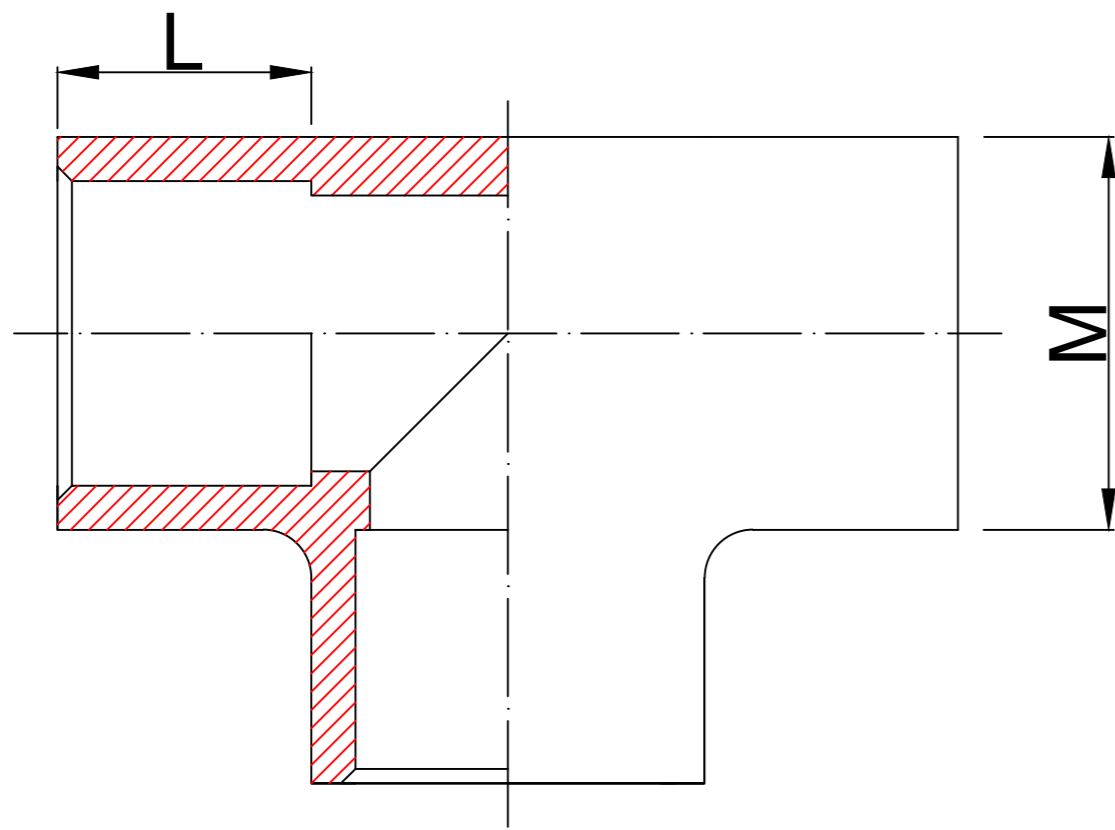
En el plano EAHE-VU-UQROO-02 se encuentran detalladas las dimensiones y especificaciones del material de 1.27 cm (1/2") utilizado para la canalización del sistema de adquisición de datos.

Los planos EAHE-VU-UQROO-03 y EAHE-VU-UQROO-04 muestran la vista de perfil de los intercambiadores de calor tierra-aire enterrado a 2 y 1 metros de profundidad respectivamente. En dicho documento se encuentran especificadas las dimensiones de las tuberías principales que conforman el sistema, así como los conectores que unen dichas tuberías. También se visualiza la sección del intercambiador que se debe de aislar.

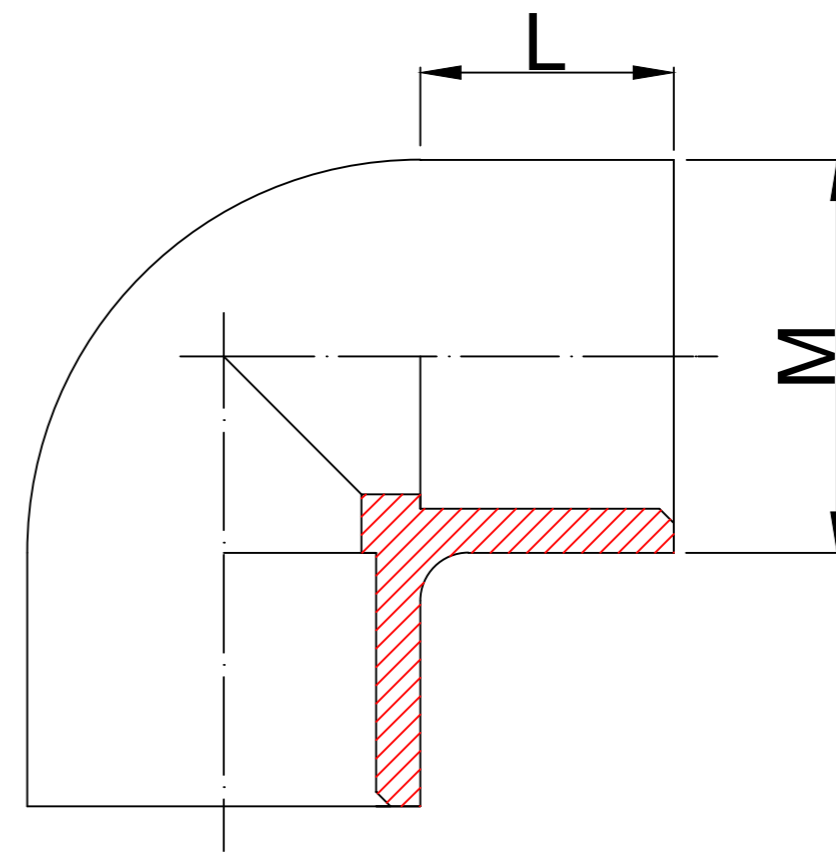
Finalmente en los planos EAHE-VU-UQROO-05 y EAHE-VU-UQROO-06 se encuentra ilustrado el ensamblaje de la tubería de 1.27 cm (1/2") para canalizar los termopares del sistema de adquisición de datos en los puntos a medir la temperatura del EAHE.

INTERCAMBIADOR DE CALOR TIERRA - AIRE


FICHA DE DATOS DE LOS ACCESORIOS DE PVC DE 1/2"



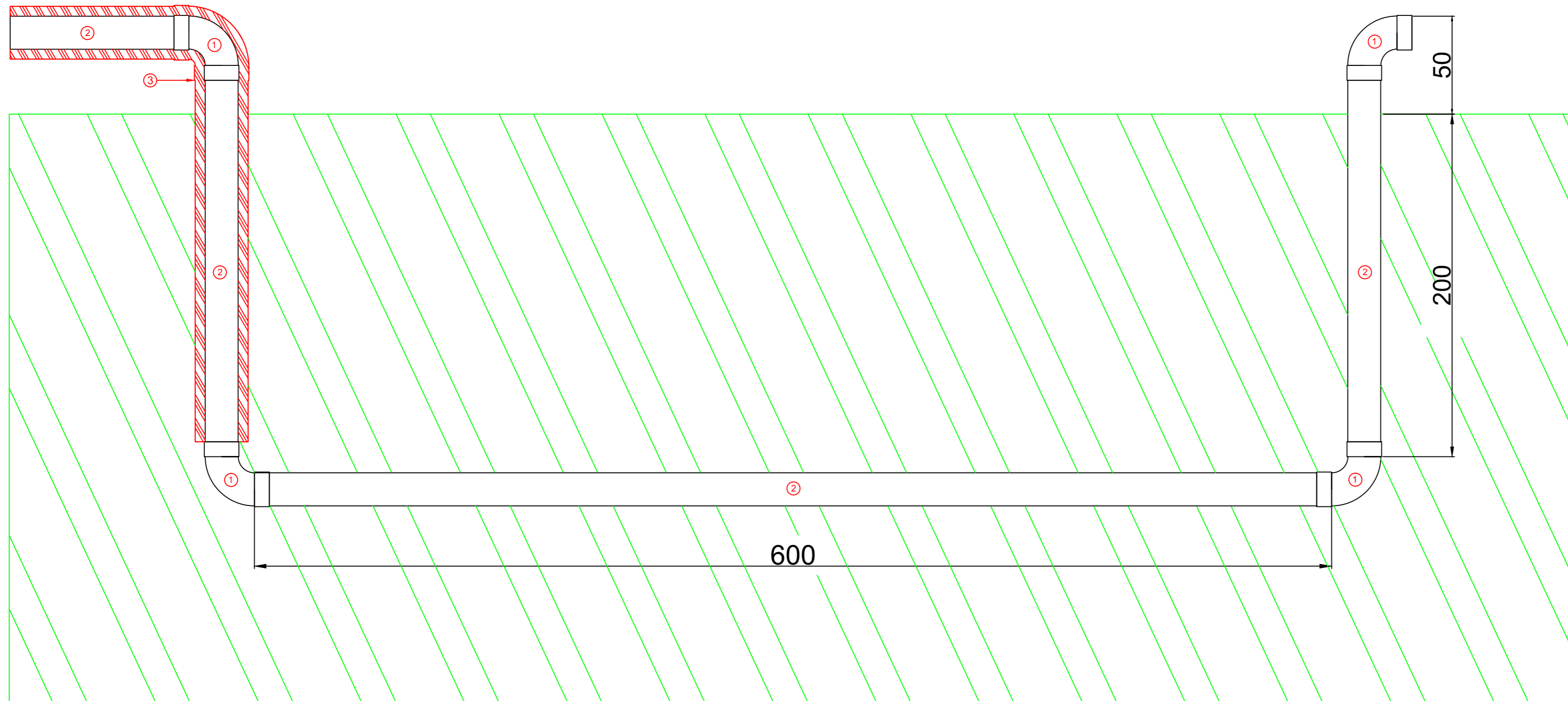
DIAMETRO NOMINAL		M	L
Pulg.	mm	mm	mm
1/2	21	27.08	17.48
3/4	26	32.61	18.26
1	33	40.42	22.23
1 1/4	42	49.54	23.83
1 1/2	48	55.92	27.79
2	60	68.45	29.36




DIAMETRO NOMINAL		M	L
Pulg.	mm	mm	mm
1/2	21	27.08	17.48
3/4	26	32.61	18.26
1	33	40.42	22.23
1 1/4	42	49.54	23.83
1 1/2	48	55.92	27.79
2	60	68.45	29.36

CP	FECHA	REVISIONES				NUM.	DIBUJOS DE REFERENCIA	APROBADO POR		APROBADO POR			PROY.	ING V. M. A. F.	ESTUDIO EXPERIMENTAL DE UN INTERCAMBIADOR DE CALOR TIERRA-AIRE PARA EL ESTADO DE QUINTANA ROO.	
		DESCRIPCION	FECHA	POR	Vo.Bo.			SINODALES DE TESIS	DIRECTOR DE TESIS	REVISO	DR. I. B. B.					APROBO
		MCA														FICHA TÉCNICA Y DATOS DE PIEZAS DE PVC PARA CONSTRUCCIÓN DE INTERCAMBIADOR DE CALOR TIERRA. AIRE.
															No. PROY. 4121918B01	EAHE-VU-UQROO-02
															LUGAR: VILLAS UNIVERSITARIAS	REV. A
															CHETUMAL, QUINTANA ROO. SEP 2015	ESC. S/E ACOT. S/E

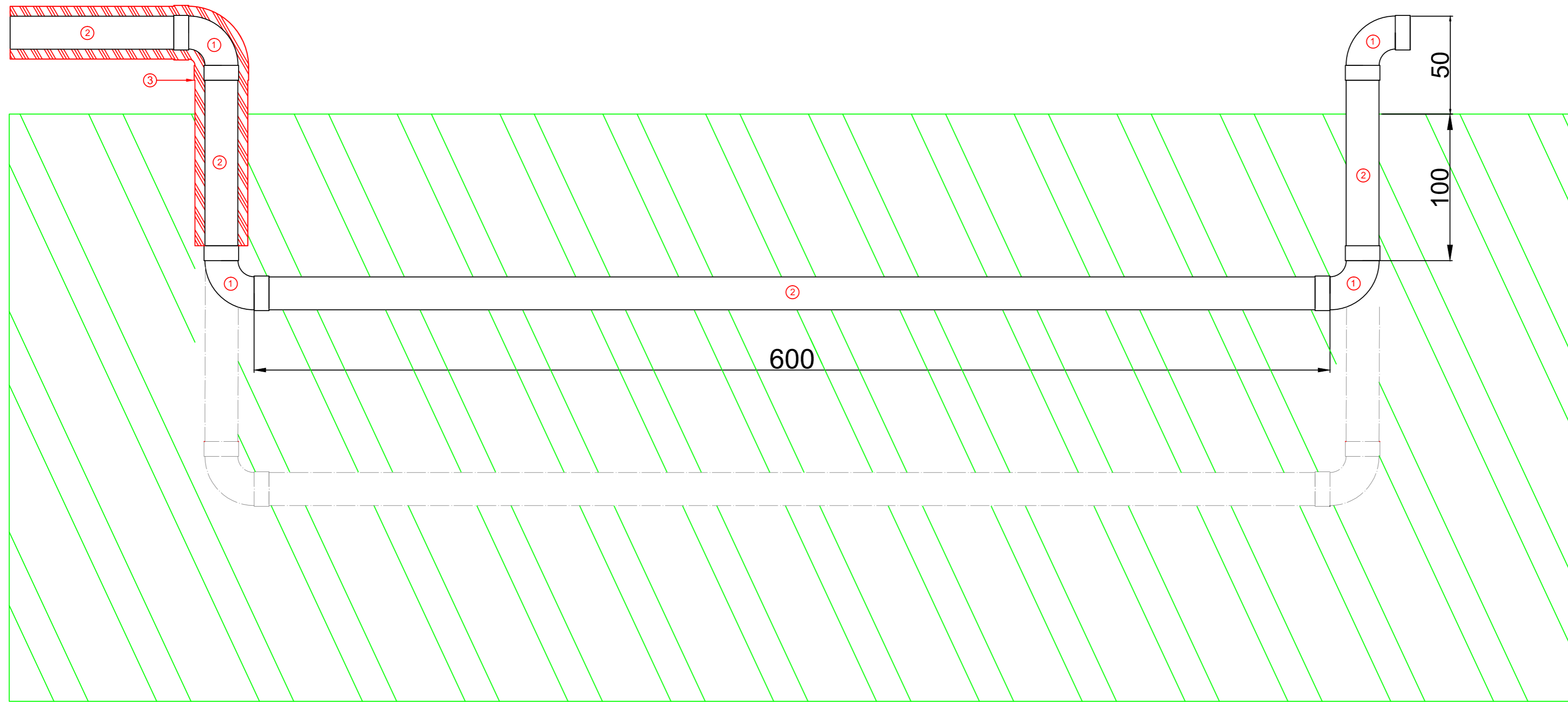
INTERCAMBIADOR DE CALOR TIERRA - AIRE A DOS METROS DE PROFUNDIDAD



DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	UNIDAD
1.- CODO 90° DE PVC, 6" □	4	PZA
2.- TUBERÍA DE PVC, 6" □	12	MTS
3.- AISLAMIENTO TÉRMICO DE 1" DE ESPESOR.	3	MTS * 2

CP	FECHA	R E V I S I O N E S				NUM.	DIBUJOS DE REFERENCIA	A P R O B A D O P O R		A P R O B A D O P O R			PROY.	ING. V. M. A. F.	ESTUDIO EXPERIMENTAL DE UN INTERCAMBIADOR DE CALOR TIERRA-AIRE PARA EL ESTADO DE QUINTANA ROO.				
		DESCRIPCION	FECHA	POR	Vo.Bo.			SINODALES DE TESIS	DIRECTOR DE TESIS	REVISO	DR. I. B. B.					APROBO	DR. J. O. A. A.		
		MCA																	
												CHETUMAL, QUINTANA ROO.	SEP 2015	ESC. S/E	ACOT. S/E	LUGAR: VILLAS UNIVERSITARIAS	No. PROY. 4121918B01	EAHE-VU-UQROO-03	REV. A

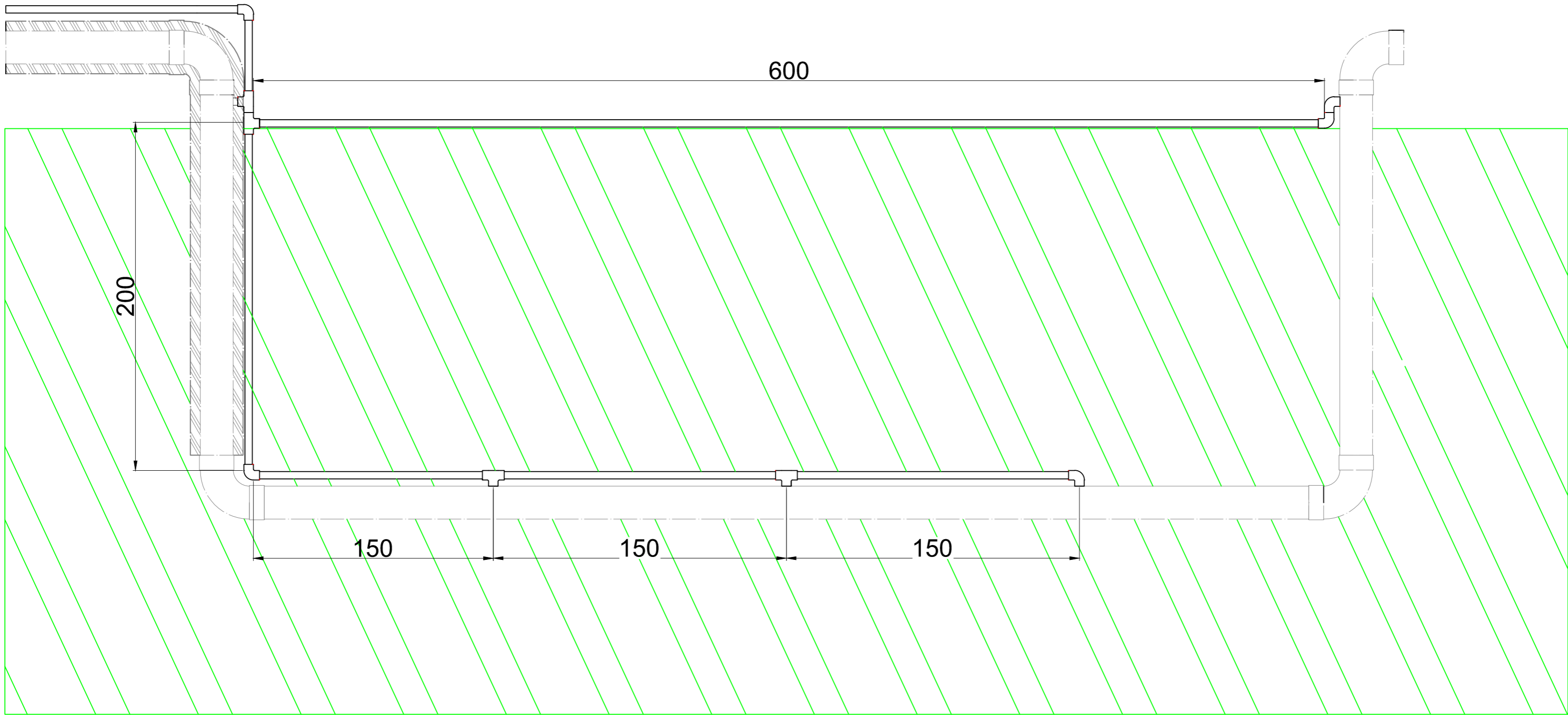
INTERCAMBIADOR DE CALOR TIERRA - AIRE A UN METROS DE PROFUNDIDAD



DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	UNIDAD
1.- CODO 90° DE PVC, 6" □	4	PZA
2.- TUBERÍA DE PVC, 6" □	10	MTS
3.- AISLAMIENTO TÉRMICO DE 1" DE ESPESOR.	2	MTS * 2

CP	FECHA	REVISIONES				NUM.	DIBUJOS DE REFERENCIA	APROBADO POR		APROBADO POR			PROY.	ING V. M. A. F.	ESTUDIO EXPERIMENTAL DE UN INTERCAMBIADOR DE CALOR TIERRA-AIRE PARA EL ESTADO DE QUINTANA ROO.				
		DESCRIPCION	FECHA	POR	Vo.Bo.			SINODALES DE TESIS	DIRECTOR DE TESIS	REVISO	DR. I. B. B.					APROBO	DR. J. O. A. A.		
		MCA																	
												CHETUMAL, QUINTANA ROO.	SEP 2015	ESC. S/E	ACOT. S/E	LUGAR: VILLAS UNIVERSITARIAS	No. PROY. 4121918B01	EAHE-VU-UQROO-04	REV. A

DIAGRAMA DE TUBERÍA PARA EL SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS

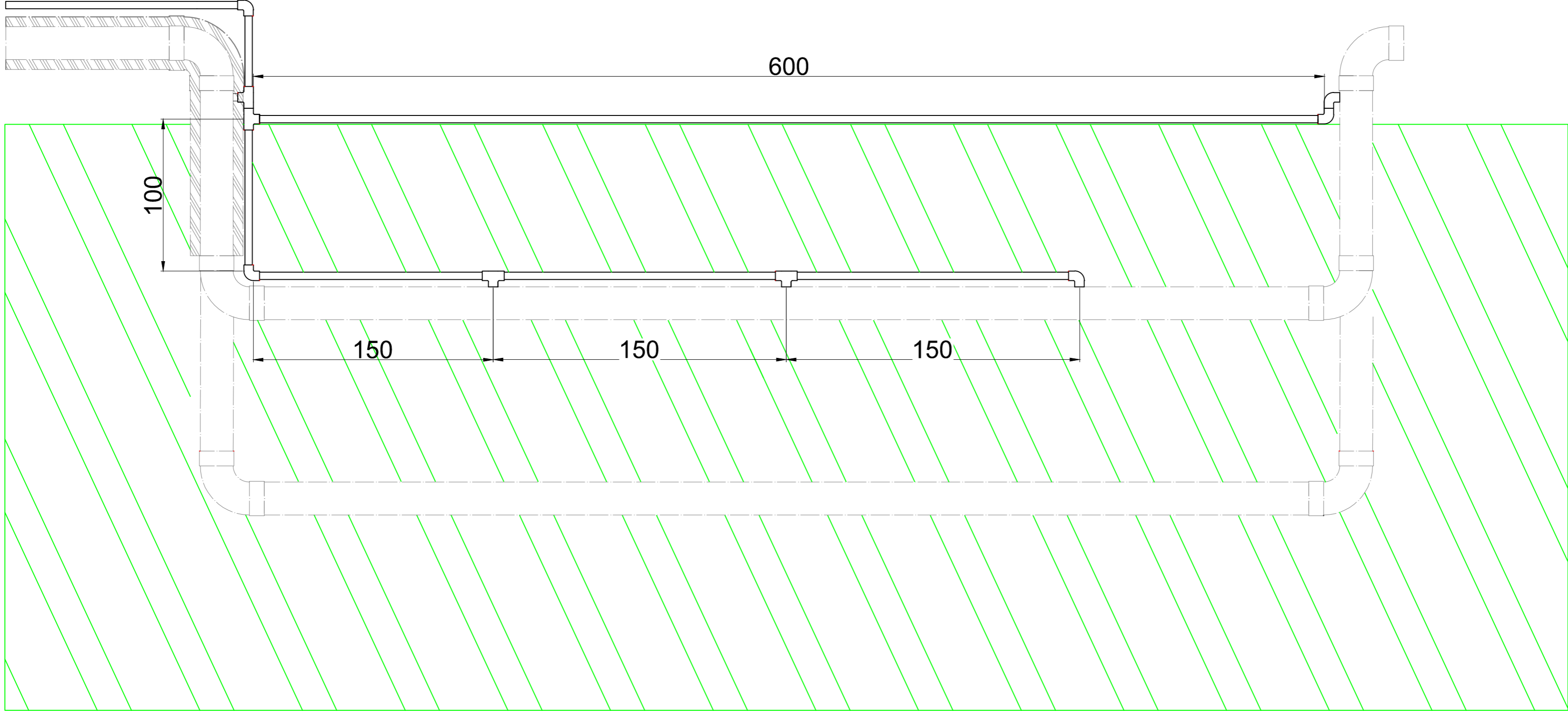


DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	UNIDAD
1.- CODO 90° DE PVC, 1/2" □	6	PZA
2.- TUBERÍA DE PVC, 1/2" □	14	MTS
3.- CONECTOR TIPO "T" DE PVC DE 1/2" □	3	PZA
4.- TERMOPAR TIPO "T" DE COBRE- CONSTANTAN	37	MTS

CP	FECHA	R E V I S I O N E S				NUM.	DIBUJOS DE REFERENCIA	A P R O B A D O P O R		A P R O B A D O P O R				PROY. ING V. M. A. F.	ESTUDIO EXPERIMENTAL DE UN INTERCAMBIADO DE CALOR TIERRA-AIRE PARA EL ESTADO DE QUINTANA ROO. DIAGRAMA DE TUBERÍA DE 1/2" PARA CANALIZACIÓN DEL TERMOPAR TIPO "T" DEL SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS AGILENT A DOS METROS DE PROFUNDIDAD	REV.			
	MCA	DESCRIPCION	FECHA	POR	Vo.Bo.			SINODALES DE TESIS		DIRECTOR DE TESIS						REVISO DR. I. B. B.	No. PROY. 4121918B01	EAHE-VU-UQROO-05	A
																APROBO DR J. O. A. A.	ESC. S/E	ACOT. S/E	LUGAR: VILLAS UNIVERSITARIAS

CHETUMAL, QUINTANA ROO. SEP 2015

DIAGRAMA DE TUBERÍA PARA EL SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS



DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	UNIDAD
1.- CODO 90° DE PVC, 1/2" □	6	PZA
2.- TUBERÍA DE PVC, 1/2" □	13	MTS
3.- CONECTOR TIPO "T" DE PVC DE 1/2" □	3	PZA
4.- TERMOPAR TIPO "T" DE COBRE- CONSTANTAN	33	MTS

CP	FECHA	R E V I S I O N E S				NUM.	DIBUJOS DE REFERENCIA	A P R O B A D O P O R		A P R O B A D O P O R										
		DESCRIPCION	FECHA	POR	Vo.Bo.			SINODALES DE TESIS	DIRECTOR DE TESIS											

Anexo B

Datos meteorológicos de Chetumal, Q. Roo de 2012 a 2015.

En este apartado se encuentran los datos meteorológicos recopilados los últimos 4 años previos al trabajo de experimentación realizado, en ellos se indican las temperaturas máximas, mínimas y promedio de cada mes desde el año 2012 hasta el año 2015. También se encuentran las mediciones de velocidad del viento y la irradiancia solar para el mismo periodo de tiempo.

Anexo B1. Condiciones meteorológicas de Chetumal, Q Roo, México 2012.

Anexo B2. Condiciones meteorológicas de Chetumal, Q Roo, México 2013.

Anexo B3. Condiciones meteorológicas de Chetumal, Q Roo, México 2014.

Anexo B4. Condiciones meteorológicas de Chetumal, Q Roo, México 2015.

B1. Condiciones meteorológicas de Chetumal, Q. Roo, México 2012.

Condiciones meteorológicas de Chetumal, Quintana Roo, México para el año 2012

Mes	Datos del día representativo de cada mes				Promedio mensual de variables climatológicas		
	Día representativo	Temperatura Máxima (°F)	Día representativo	Temperatura Máxima (°F)	Temperatura promedio (°F)	Velocidad del viento (m/s)	Irradiancia solar (W/m ²)
Ene.	29-ene	29.1	04-ene	13.7	24.72	2.76	192.35
Feb.	10-feb	30.1	13-feb	17.2	25.42	2.88	230.67
Mar.	05-mar	30.3	16-mar	19.5	26.32	3.85	256.68
Abr.	21-abr	35.3	24-abr	17.3	27.16	3.58	303.04
May.	22-may	33.5	31-may	23.1	27.93	14.10	128.05
Jun.	25-jun	33.3	18-jun	22.0	28.16	3.11	222.40
Jul	25-jul	32.9	22-jul	22.8	28.44	3.02	264.94
Ago.	06-ago	33.9	17-ago	23.2	28.55	3.23	277.80
Sep.	20-sep	33.8	14-sep	23.0	28.78	2.87	284.52
Oct.	10-oct	32.9	31-oct	18.4	26.48	1.96	238.93
Nov.	12-nov	30.4	25-nov	16.2	24.34	2.06	221.12
Dic.	18-dic	31.4	23-dic	15.4	24.98	2.18	210.15

B2. Condiciones meteorológicas de Chetumal, Q. Roo, México 2013.

Condiciones meteorológicas de Chetumal, Quintana Roo, México para el año 2013

Mes	Datos del día representativo de cada mes				Promedio mensual de variables climatológicas		
	Día representativo	Temperatura Máxima (°F)	Día representativo	Temperatura Máxima (°F)	Temperatura promedio (°F)	Velocidad del viento (m/s)	Irradiancia solar (W/m ²)
Ene.	07-ene	29.6	19-ene	16.7	24.64	2.58	170.01
Feb.	26-feb	32.7	17-feb	14.6	25.77	3.20	246.45
Mar.	24-mar	31.6	04-mar	13.4	24.53	3.07	245.00
Abr.	12-abr	31.8	06-abr	16.9	27.54	4.39	279.07
May.	03-may	34.4	04-may	20.7	28.09	4.00	264.22
Jun.	08-jun	32.8	04-jun	21.1	27.52	2.82	217.93
Jul	24-jul	32.4	28-jul	22.7	28.44	3.33	272.94
Ago.	27-ago	34.1	24-ago	24.2	28.34	2.55	241.78
Sep.	23-sep	32.7	19-sep	22.7	28.29	2.37	193.05
Oct.	01-oct	33.3	27-oct	22.8	28.03	2.11	213.20
Nov.	18-nov	32.2	29-nov	17.2	25.40	1.57	157.54
Dic.	10-dic	29.9	27-dic	20.7	25.53	1.75	179.97

B3. Condiciones meteorológicas de Chetumal, Q. Roo, México 2014.

Condiciones meteorológicas de Chetumal, Quintana Roo, México para el año 2014

Mes	Datos del día representativo de cada mes				Promedio mensual de variables climatológicas		
	Día representativo	Temperatura Máxima (°F)	Día representativo	Temperatura Máxima (°F)	Temperatura promedio (°F)	Velocidad del viento (m/s)	Irradiancia solar (W/m ²)
Ene.	29-ene	30.2	17-ene	12.5	22.87	1.72	189.74
Feb.	08-feb	30.3	14-feb	16.4	25.77	2.82	262.36
Mar.	25-mar	31.8	18-mar	20.9	26.59	3.37	290.74
Abr.	08-abr	34.6	10-abr	17.2	27.23	4.12	278.29
May.	15-may	31.5	17-may	19.8	27.39	3.69	263.72
Jun.	17-jun	32.1	01-jun	24.0	28.11	4.03	238.15
Jul	08-jul	34.6	17-jul	12.5	26.92	3.23	252.55
Ago.	27-ago	34.9	24-ago	23.4	28.93	2.88	264.82
Sep.	09-sep	33.5	07-sep	22.9	27.59	2.66	202.91
Oct.	12-oct	38.2	27-oct	19.5	27.09	2.30	200.36
Nov.	08-nov	30.3	29-nov	16.2	24.17	1.95	182.40
Dic.	30-dic	30.3	14-dic	15.9	24.00	1.54	171.63

B4. Condiciones meteorológicas de Chetumal, Q. Roo, México 2015.

Condiciones meteorológicas de Chetumal, Quintana Roo, México para el año 2015

Mes	Datos del día representativo de cada mes				Promedio mensual de variables climatológicas		
	Día representativo	Temperatura Máxima (°F)	Día representativo	Temperatura Máxima (°F)	Temperatura promedio (°F)	Velocidad del viento (m/s)	Irradiancia solar (W/m ²)
Ene.	15-ene	30.3	28-ene	14.2	23.52	1.81	186.28
Feb.	26-feb	31.2	28-feb	14.2	24.00	1.70	236.69
Mar.	27-mar	31.2	29-mar	19.7	26.66	3.19	258.12
Abr.	29-abr	34.8	30-abr	20.7	28.02	4.09	289.91
May.	28-may	33	01-may	22.1	28.36	3.62	283.45
Jun.	04-jun	32.8	26-jun	22.1	28.00	2.94	207.98
Jul	11-jul	32.4	13-jul	23.9	29.04	3.13	276.83
Ago.	29-ago	34.1	26-ago	22.2	29.34	2.29	288.09
Sep.	18-sep	33.2	22-sep	23.3	28.78	1.99	226.74
Oct.	01-oct	34.4	04-oct	20.4	27.91	1.53	211.09
Nov.	03-nov	33.3	30-nov	19.0	26.80	1.62	191.54
Dic.	18-dic	31.1	09-dic	20.8	25.83	1.54	170.61

Anexo C

Datos de las mediciones de los días reportados.

Del anexo C1 al C8 se encuentran los valores promedios medidos de la temperatura del aire en los cinco puntos monitoreados dentro de los intercambiadores (1 y 2 metros de profundidad), adjunto a cada conjunto de datos se encuentran los valores promedio de las variables meteorológicas que se presentaron durante la evaluación, a decir, la temperatura ambiente (°C), la humedad relativa (%), la velocidad del viento (m/s) y la irradiancia solar (W/m²).

A partir del Anexo C9 al C12 se encuentran los valores de las temperaturas del suelo medidas a diferentes profundidades, mismos que fueron utilizados para visualizar el perfil de temperatura de suelo presentado en este trabajo.

Anexo C1. Datos de temperatura del EAHE a 2 metros de profundidad y datos meteorológicos del día 30 de julio de 2016.

Anexo C2. Datos de temperatura del EAHE a 1 metro de profundidad y datos meteorológicos del día 30 de julio de 2016.

Anexo C3. Datos de temperatura del EAHE a 2 metros de profundidad y datos meteorológicos del día 9 de agosto de 2016.

Anexo C4. Datos de temperatura del EAHE a 1 metro de profundidad y datos meteorológicos del día 9 de agosto de 2016.

Anexo C5. Datos de temperatura del EAHE a 2 metros de profundidad y datos meteorológicos del día 10 de agosto de 2016.

Anexo C6. Datos de temperatura del EAHE a 1 metro de profundidad y datos meteorológicos del día 10 de agosto de 2016.

Anexo C7. Datos de temperatura del EAHE a 2 metros de profundidad y datos meteorológicos del día 11 de agosto de 2016.

Anexo C8. Datos de temperatura del EAHE a 1 metro de profundidad y datos meteorológicos del día 11 de agosto de 2016.

Anexo C9. Datos de temperatura del suelo a diferentes profundidades del día 30 de julio de 2016.

Anexo C10. Datos de temperatura del suelo a diferentes profundidades del día 9 de agosto de 2016.

Anexo C11. Datos de temperatura del suelo a diferentes profundidades del día 10 de agosto de 2016.

Anexo C12. Datos de temperatura del suelo a diferentes profundidades del día 11 de agosto de 2016.

C1. Datos de temperaturas del EAHE a 2 m de profundidad y datos meteorológicos del día 30 de julio de 2016.

Time (Hours)	T_{in} (°C)	T_2 (°C)	T_3 (°C)	T_4 (°C)	T_{out} (°C)	<i>Enviromental Temp. (°C)</i>	<i>Humidity (%)</i>	<i>Wind (m/s)</i>	<i>Irradiance (W/m²)</i>
01:00	28.27	28.80	28.84	28.90	28.95	28.72	84.17	4.02	0.00
02:00	28.24	28.74	28.81	28.88	28.95	28.63	83.83	3.65	0.00
03:00	28.38	28.83	28.88	28.94	28.99	28.73	82.83	3.27	0.00
04:00	28.29	28.74	28.81	28.87	28.95	28.68	82.50	3.52	0.00
05:00	28.21	28.71	28.78	28.85	28.92	28.60	84.00	3.27	0.00
06:00	28.21	28.70	28.77	28.84	28.91	28.58	83.50	3.60	0.00
07:00	28.05	28.60	28.68	28.77	28.86	28.43	83.83	3.35	4.67
08:00	28.60	28.88	28.92	28.97	29.04	28.73	83.33	3.27	105.83
09:00	29.78	29.57	29.47	29.50	29.47	29.12	81.50	3.27	319.17
10:00	30.86	30.15	30.01	29.90	30.03	29.63	80.00	2.53	544.67
11:00	32.01	30.68	30.43	30.22	30.91	30.48	75.83	1.83	790.50
12:00	34.24	32.08	31.53	30.89	30.94	31.03	72.67	2.53	910.33
13:00	34.64	32.17	31.61	31.08	31.76	31.52	69.33	2.30	952.33
14:00	35.63	32.93	32.20	31.43	31.50	31.85	65.17	2.83	972.00
15:00	35.82	33.30	32.52	31.66	31.41	31.97	65.83	2.75	916.67
16:00	35.59	33.20	32.46	31.64	31.37	32.07	65.83	2.68	797.00
17:00	34.02	32.35	31.85	31.24	31.03	32.08	64.33	2.70	626.50
18:00	32.80	31.67	31.34	30.94	30.74	31.72	67.33	3.27	427.17
19:00	31.20	30.74	30.56	30.41	30.27	30.52	73.67	4.10	195.17
20:00	29.94	29.97	29.89	29.84	29.79	29.77	78.00	2.97	13.83
21:00	28.57	28.47	28.03	27.32	25.39	28.74	91.25	2.20	0.00
22:00	28.83	28.94	28.44	27.67	25.53	29.30	93.59	2.72	0.00
23:00	28.76	28.79	28.40	27.68	26.48	28.94	93.56	3.10	0.00
24:00	25.16	27.44	28.08	28.13	27.93	28.24	93.50	2.69	0.00

C2. Datos de temperaturas del EAHE a 1 m de profundidad y datos meteorológicos del día 30 de julio de 2016.

Time (Hours)	T_{in} (°C)	T_2 (°C)	T_3 (°C)	T_4 (°C)	T_{out} (°C)	Enviromental Temp. (°C)	Humidity (%)	Wind (m/s)	Irradiance (W/m^2)
01:00	28.18	28.66	28.70	28.70	28.66	28.72	84.17	4.02	0.00
02:00	28.12	28.60	28.64	28.68	28.68	28.63	83.83	3.65	0.00
03:00	28.28	28.67	28.68	28.72	28.72	28.73	82.83	3.27	0.00
04:00	28.20	28.62	28.64	28.67	28.68	28.68	82.50	3.52	0.00
05:00	28.11	28.55	28.59	28.64	28.65	28.60	84.00	3.27	0.00
06:00	28.12	28.55	28.58	28.63	28.64	28.58	83.50	3.60	0.00
07:00	27.97	28.43	28.47	28.55	28.58	28.43	83.83	3.35	4.67
08:00	28.63	28.79	28.78	28.78	28.78	28.73	83.33	3.27	105.83
09:00	29.91	29.63	29.51	29.41	29.36	29.12	81.50	3.27	319.17
10:00	30.86	30.28	30.09	29.90	29.88	29.63	80.00	2.53	544.67
11:00	32.69	31.47	31.09	30.73	30.74	30.48	75.83	1.83	790.50
12:00	34.35	32.66	32.01	31.46	31.25	31.03	72.67	2.53	910.33
13:00	35.03	33.02	32.22	31.61	31.51	31.52	69.33	2.30	952.33
14:00	35.73	33.54	32.58	31.91	31.55	31.85	65.17	2.83	972.00
15:00	35.97	34.04	33.10	32.39	31.73	31.97	65.83	2.75	916.67
16:00	35.42	33.76	32.98	32.29	31.67	32.07	65.83	2.68	797.00
17:00	33.65	32.66	32.18	31.64	31.18	32.08	64.33	2.70	626.50
18:00	32.55	31.85	31.50	31.09	30.74	31.72	67.33	3.27	427.17
19:00	31.03	30.81	30.57	30.34	30.25	30.52	73.67	4.10	195.17
20:00	29.79	29.98	29.87	29.78	29.70	29.77	78.00	2.97	13.83
21:00	26.05	27.41	27.49	27.57	26.86	28.74	91.25	2.20	0.00
22:00	25.03	26.69	27.06	27.46	27.28	29.30	93.59	2.72	0.00
23:00	25.84	27.22	27.42	27.72	27.44	28.94	93.56	3.10	0.00
24:00	24.86	26.28	26.61	27.03	27.07	28.24	93.50	2.69	0.00

C3. Datos de temperaturas del EAHE a 2 m de profundidad y datos meteorológicos del día 9 de agosto de 2016.

Time (Hours)	T_{in} (°C)	T_2 (°C)	T_3 (°C)	T_4 (°C)	T_{out} (°C)	Enviromental Temp. (°C)	Humidity (%)	Wind (m/s)	Irradiance (W/m ²)
01:00	28.43	28.57	28.49	28.45	28.43	28.72	87.17	2.62	0.00
02:00	28.38	28.53	28.44	28.40	28.40	28.67	87.83	2.77	0.00
03:00	28.40	28.53	28.44	28.39	28.38	28.58	88.33	3.10	0.00
04:00	28.30	28.45	28.36	28.33	28.34	28.47	88.50	2.62	0.00
05:00	28.25	28.40	28.32	28.30	28.31	28.43	88.50	1.70	0.00
06:00	28.08	28.26	28.20	28.19	28.22	28.50	89.00	1.03	0.00
07:00	28.22	28.37	28.29	28.27	28.28	28.53	88.83	1.92	3.67
08:00	28.64	28.65	28.54	28.48	28.44	28.67	88.17	2.77	74.33
09:00	30.32	29.84	29.63	29.41	29.18	29.60	84.67	2.53	345.33
10:00	31.25	30.46	30.19	29.91	29.75	30.22	82.33	2.75	570.17
11:00	32.88	31.49	31.04	30.59	30.38	31.22	76.67	3.15	747.33
12:00	33.84	32.14	31.51	30.93	30.66	31.62	75.83	2.83	886.67
13:00	34.22	32.40	31.64	30.98	30.65	31.75	78.00	2.23	960.50
14:00	34.78	32.77	31.91	31.23	30.79	31.52	77.67	3.20	970.83
15:00	34.72	32.82	32.00	31.33	30.75	31.33	78.83	3.43	915.17
16:00	34.07	32.46	31.74	31.13	30.61	31.13	81.33	3.18	793.17
17:00	32.21	31.34	30.89	30.46	30.11	31.22	80.67	3.43	617.33
18:00	31.32	30.75	30.41	30.08	29.80	31.10	80.50	3.03	406.33
19:00	30.62	30.29	30.04	29.79	29.53	30.68	81.83	2.53	149.33
20:00	30.05	29.89	29.69	29.49	29.30	30.08	83.17	3.20	5.33
21:00	29.39	29.41	29.24	29.11	29.00	29.57	85.67	3.58	0.00
22:00	29.05	29.16	29.01	28.91	28.84	29.23	87.00	3.27	0.00
23:00	28.76	28.95	28.82	28.75	28.72	29.05	87.33	4.17	0.00
24:00	28.57	28.81	28.70	28.64	28.61	28.85	88.17	3.87	0.00

C4. Datos de temperaturas del EAHE a 1 m de profundidad y datos meteorológicos del día 9 de agosto de 2016.

Time (Hours)	T_{in} (°C)	T_2 (°C)	T_3 (°C)	T_4 (°C)	T_{out} (°C)	Enviromental Temp. (°C)	Humidity (%)	Wind (m/s)	Irradiance (W/m ²)
01:00	28.29	28.69	28.71	28.74	28.83	28.72	87.17	2.62	0.00
02:00	28.26	28.64	28.66	28.71	28.80	28.67	87.83	2.77	0.00
03:00	28.25	28.64	28.65	28.70	28.78	28.58	88.33	3.10	0.00
04:00	28.13	28.54	28.57	28.63	28.74	28.47	88.50	2.62	0.00
05:00	28.07	28.49	28.53	28.59	28.71	28.43	88.50	1.70	0.00
06:00	27.92	28.39	28.43	28.51	28.65	28.50	89.00	1.03	0.00
07:00	28.08	28.50	28.53	28.59	28.71	28.53	88.83	1.92	3.67
08:00	28.44	28.68	28.69	28.72	28.82	28.67	88.17	2.77	74.33
09:00	30.02	29.63	29.53	29.44	29.39	29.60	84.67	2.53	345.33
10:00	30.83	30.14	30.01	29.83	29.87	30.22	82.33	2.75	570.17
11:00	32.07	30.89	30.67	30.29	30.33	31.22	76.67	3.15	747.33
12:00	33.49	31.82	31.43	30.81	30.74	31.62	75.83	2.83	886.67
13:00	33.85	32.07	31.60	30.97	30.87	31.75	78.00	2.23	960.50
14:00	34.31	32.46	31.96	31.26	31.03	31.52	77.67	3.20	970.83
15:00	34.26	32.50	32.02	31.33	31.04	31.33	78.83	3.43	915.17
16:00	33.82	32.30	31.88	31.27	30.96	31.13	81.33	3.18	793.17
17:00	32.11	31.28	31.01	30.68	30.45	31.22	80.67	3.43	617.33
18:00	31.32	30.77	30.58	30.36	30.16	31.10	80.50	3.03	406.33
19:00	30.61	30.31	30.17	30.04	29.89	30.68	81.83	2.53	149.33
20:00	30.01	29.91	29.81	29.76	29.65	30.08	83.17	3.20	5.33
21:00	29.35	29.47	29.41	29.42	29.39	29.57	85.67	3.58	0.00
22:00	29.01	29.24	29.20	29.24	29.24	29.23	87.00	3.27	0.00
23:00	28.72	29.05	29.03	29.08	29.12	29.05	87.33	4.17	0.00
24:00	28.51	28.89	28.89	28.95	29.00	28.85	88.17	3.87	0.00

C5. Datos de temperaturas del EAHE a 2 m de profundidad y datos meteorológicos del día 10 de agosto de 2016.

Time (Hours)	T_{in} (°C)	T_2 (°C)	T_3 (°C)	T_4 (°C)	T_{out} (°C)	Enviromental Temp. (°C)	Humidity (%)	Wind (m/s)	Irradiance (W/m ²)
01:00	28.29	28.61	28.53	28.49	28.49	28.70	87.83	4.08	0.00
02:00	28.26	28.57	28.49	28.46	28.45	28.57	88.33	3.87	0.00
03:00	28.49	28.70	28.59	28.54	28.51	28.67	88.17	3.80	0.00
04:00	28.62	28.79	28.67	28.60	28.57	28.73	86.83	3.80	0.00
05:00	28.67	28.79	28.68	28.61	28.58	28.88	85.33	3.93	0.00
06:00	28.60	28.75	28.65	28.59	28.58	28.92	84.50	4.70	0.00
07:00	28.68	28.78	28.67	28.61	28.57	28.93	84.67	3.97	7.00
08:00	29.46	29.25	29.10	28.97	28.86	29.12	83.67	3.80	146.00
09:00	30.35	29.83	29.59	29.38	29.29	29.63	82.50	3.20	314.50
10:00	31.28	30.49	30.22	29.94	29.83	30.22	78.33	3.12	566.33
11:00	32.91	31.65	31.26	30.82	30.53	31.22	74.83	2.62	748.33
12:00	33.69	32.23	31.70	31.13	30.77	31.25	75.00	2.15	892.17
13:00	34.34	32.71	32.05	31.38	30.88	31.58	73.00	2.52	973.33
14:00	34.59	32.93	32.22	31.54	30.97	31.78	72.17	2.45	981.17
15:00	34.69	33.08	32.38	31.70	31.06	31.60	73.17	2.53	917.00
16:00	34.20	32.72	32.05	31.42	30.91	31.47	73.67	3.12	848.33
17:00	31.93	31.32	30.97	30.60	30.21	31.32	74.67	2.92	537.67
18:00	31.46	30.98	30.70	30.39	30.02	31.25	75.00	2.07	322.50
19:00	30.88	30.55	30.31	30.05	29.76	31.08	74.33	3.10	161.33
20:00	30.09	29.99	29.80	29.63	29.44	30.42	77.50	3.20	11.33
21:00	29.40	29.49	29.34	29.22	29.13	29.82	82.33	2.53	0.00
22:00	29.23	29.32	29.18	29.09	29.05	29.48	86.00	2.45	0.00
23:00	28.93	29.12	28.99	28.92	28.90	29.28	87.67	2.70	0.00
24:00	28.81	29.01	28.90	28.84	28.85	29.18	89.00	2.83	0.00

C6. Datos de temperaturas del EAHE a 1 m de profundidad y datos meteorológicos del día 10 de agosto de 2016.

Time (Hours)	T_{in} (°C)	T_2 (°C)	T_3 (°C)	T_4 (°C)	T_{out} (°C)	<i>Enviromental Temp. (°C)</i>	<i>Humidity (%)</i>	<i>Wind (m/s)</i>	<i>Irradiance (W/m²)</i>
01:00	28.24	28.71	28.74	28.81	28.88	28.70	87.83	4.08	0.00
02:00	28.18	28.65	28.67	28.75	28.84	28.57	88.33	3.87	0.00
03:00	28.45	28.79	28.80	28.86	28.91	28.67	88.17	3.80	0.00
04:00	28.52	28.83	28.83	28.88	28.93	28.73	86.83	3.80	0.00
05:00	28.61	28.87	28.86	28.91	28.95	28.88	85.33	3.93	0.00
06:00	28.54	28.81	28.81	28.86	28.92	28.92	84.50	4.70	0.00
07:00	28.60	28.84	28.83	28.88	28.93	28.93	84.67	3.97	7.00
08:00	29.27	29.23	29.18	29.17	29.19	29.12	83.67	3.80	146.00
09:00	30.01	29.67	29.58	29.50	29.50	29.63	82.50	3.20	314.50
10:00	30.88	30.22	30.10	29.93	29.96	30.22	78.33	3.12	566.33
11:00	32.14	31.00	30.80	30.44	30.44	31.22	74.83	2.62	748.33
12:00	33.39	31.83	31.47	30.91	30.83	31.25	75.00	2.15	892.17
13:00	34.13	32.34	31.87	31.22	31.03	31.58	73.00	2.52	973.33
14:00	34.30	32.52	32.04	31.35	31.12	31.78	72.17	2.45	981.17
15:00	34.33	32.60	32.13	31.41	31.12	31.60	73.17	2.53	917.00
16:00	34.02	32.47	32.03	31.35	31.10	31.47	73.67	3.12	848.33
17:00	31.92	31.20	30.97	30.68	30.45	31.32	74.67	2.92	537.67
18:00	31.47	30.90	30.72	30.50	30.27	31.25	75.00	2.07	322.50
19:00	30.89	30.52	30.38	30.24	30.06	31.08	74.33	3.10	161.33
20:00	30.07	29.99	29.91	29.87	29.77	30.42	77.50	3.20	11.33
21:00	29.35	29.53	29.48	29.50	29.48	29.82	82.33	2.53	0.00
22:00	29.16	29.37	29.34	29.37	29.38	29.48	86.00	2.45	0.00
23:00	28.88	29.19	29.18	29.23	29.25	29.28	87.67	2.70	0.00
24:00	28.76	29.10	29.10	29.15	29.18	29.18	89.00	2.83	0.00

C7. Datos de temperaturas del EAHE a 2 m de profundidad y datos meteorológicos del día 11 de agosto de 2016.

Time (Hours)	T_{in} (°C)	T_2 (°C)	T_3 (°C)	T_4 (°C)	T_{out} (°C)	<i>Enviromental Temp. (°C)</i>	<i>Humidity (%)</i>	<i>Wind (m/s)</i>	<i>Irradiance (W/m²)</i>
01:00	28.58	28.86	28.76	28.71	28.71	29.02	89.50	2.68	0.00
02:00	28.44	28.75	28.67	28.64	28.64	28.90	89.00	3.18	0.00
03:00	28.26	28.62	28.54	28.53	28.55	28.78	88.17	2.90	0.00
04:00	28.44	28.69	28.61	28.58	28.57	28.62	90.17	2.08	0.00
05:00	28.49	28.74	28.65	28.62	28.61	28.48	90.83	1.87	0.00
06:00	28.02	28.39	28.34	28.36	28.41	28.25	90.83	0.80	0.00
07:00	28.28	28.55	28.47	28.47	28.49	28.47	88.50	1.33	3.17
08:00	29.20	29.14	29.01	28.92	28.83	29.07	85.50	2.00	112.33
09:00	30.59	30.09	29.88	29.66	29.48	29.85	83.50	2.60	303.17
10:00	31.36	30.64	30.41	30.14	29.99	30.25	82.17	2.62	582.83
11:00	32.95	31.71	31.33	30.89	30.62	31.37	77.17	1.77	762.33
12:00	33.75	32.38	31.92	31.38	30.97	32.52	72.67	1.38	889.33
13:00	34.33	32.76	32.12	31.46	30.99	33.13	70.17	1.38	967.17
14:00	34.80	33.08	32.32	31.63	31.08	32.93	69.67	2.13	974.33
15:00	34.92	33.25	32.50	31.82	31.17	33.05	67.83	2.13	923.17
16:00	34.34	32.98	32.34	31.71	31.09	32.85	67.83	2.13	801.83
17:00	32.16	31.52	31.17	30.78	30.38	32.85	68.50	2.13	626.83
18:00	31.47	31.03	30.74	30.43	30.10	32.37	70.67	2.37	409.33
19:00	31.06	30.72	30.48	30.22	29.92	31.48	73.00	2.53	156.67
20:00	30.54	30.35	30.14	29.93	29.70	30.95	74.00	2.60	4.83
21:00	29.75	29.78	29.61	29.47	29.37	30.27	76.17	2.32	0.00
22:00	28.91	29.20	29.09	29.03	29.03	29.40	80.33	2.13	0.00
23:00	28.75	29.06	28.97	28.92	28.89	29.27	84.17	1.93	0.00
24:00	28.59	28.93	28.85	28.81	28.80	29.12	85.50	1.42	0.00

C8. Datos de temperaturas del EAHE a 1 m de profundidad y datos meteorológicos del día 11 de agosto de 2016.

Time (Hours)	T_{in} (°C)	T_2 (°C)	T_3 (°C)	T_4 (°C)	T_{out} (°C)	<i>Enviromental Temp. (°C)</i>	<i>Humidity (%)</i>	<i>Wind (m/s)</i>	<i>Irradiance (W/m²)</i>
01:00	28.53	28.95	28.97	29.04	29.07	29.02	89.50	2.68	0.00
02:00	28.41	28.86	28.89	28.96	29.01	28.90	89.00	3.18	0.00
03:00	28.22	28.76	28.81	28.89	28.96	28.78	88.17	2.90	0.00
04:00	28.36	28.79	28.83	28.90	28.98	28.62	90.17	2.08	0.00
05:00	28.37	28.77	28.81	28.89	28.97	28.48	90.83	1.87	0.00
06:00	27.93	28.49	28.56	28.67	28.83	28.25	90.83	0.80	0.00
07:00	28.19	28.64	28.68	28.78	28.88	28.47	88.50	1.33	3.17
08:00	29.08	29.15	29.13	29.17	29.19	29.07	85.50	2.00	112.33
09:00	30.27	29.87	29.77	29.71	29.68	29.85	83.50	2.60	303.17
10:00	30.92	30.24	30.13	29.97	30.10	30.25	82.17	2.62	582.83
11:00	32.23	31.02	30.80	30.46	30.52	31.37	77.17	1.77	762.33
12:00	33.52	31.90	31.51	30.98	30.94	32.52	72.67	1.38	889.33
13:00	34.08	32.25	31.75	31.13	31.04	33.13	70.17	1.38	967.17
14:00	34.43	32.51	31.97	31.29	31.13	32.93	69.67	2.13	974.33
15:00	34.53	32.67	32.14	31.45	31.16	33.05	67.83	2.13	923.17
16:00	34.10	32.49	32.01	31.37	31.10	32.85	67.83	2.13	801.83
17:00	32.17	31.35	31.10	30.77	30.57	32.85	68.50	2.13	626.83
18:00	31.53	30.93	30.74	30.52	30.32	32.37	70.67	2.37	409.33
19:00	31.08	30.64	30.49	30.34	30.14	31.48	73.00	2.53	156.67
20:00	30.49	30.27	30.16	30.08	29.94	30.95	74.00	2.60	4.83
21:00	29.70	29.76	29.69	29.69	29.67	30.27	76.17	2.32	0.00
22:00	28.86	29.27	29.27	29.32	29.35	29.40	80.33	2.13	0.00
23:00	28.67	29.12	29.14	29.20	29.23	29.27	84.17	1.93	0.00
24:00	28.49	28.99	29.03	29.09	29.14	29.12	85.50	1.42	0.00

C9. Datos de temperaturas del suelo a diferentes profundidades del día
30 de julio de 2016.

Time (Hours)	<i>Tempe. at 0.0 m deep (°C)</i>	<i>Temp. at 0.5 m deep (°C)</i>	<i>Temp. at 1.0 m deep (°C)</i>	<i>Temp. at 1.5 m deep (°C)</i>	<i>Temp. at 2.0 m deep (°C)</i>
01:00	29.36	29.16	29.18	28.89	25.70
02:00	29.37	29.17	29.19	28.91	25.72
03:00	29.36	29.16	29.18	28.89	25.70
04:00	29.38	29.20	29.23	28.94	25.75
05:00	29.37	29.19	29.22	28.93	25.74
06:00	29.37	29.19	29.21	28.92	25.73
07:00	29.36	29.18	29.20	28.90	25.71
08:00	29.41	29.22	29.24	28.94	25.75
09:00	29.44	29.25	29.26	28.95	25.76
10:00	29.47	29.29	29.28	28.96	25.77
11:00	29.61	29.41	29.38	29.02	25.83
12:00	29.53	29.35	29.32	28.96	25.77
13:00	29.40	29.23	29.23	28.88	25.69
14:00	29.41	29.25	29.26	28.92	25.73
15:00	29.46	29.29	29.31	28.95	25.76
16:00	29.48	29.31	29.32	28.95	25.76
17:00	29.50	29.33	29.34	28.97	25.78
18:00	29.50	29.34	29.35	28.97	25.78
19:00	29.49	29.32	29.33	28.96	25.77
20:00	29.47	29.30	29.31	28.94	25.75
21:00	29.30	29.16	29.15	28.78	25.59
22:00	29.30	29.16	29.14	28.79	25.60
23:00	29.33	29.17	29.15	28.80	25.61
24:00	29.33	29.16	29.14	28.81	25.62

C10. Datos de temperaturas del suelo a diferentes profundidades del día 9 de agosto de 2016.

Time (Hours)	<i>Tempe. at 0.0 m deep (°C)</i>	<i>Temp. at 0.5 m deep (°C)</i>	<i>Temp. at 1.0 m deep (°C)</i>	<i>Temp. at 1.5 m deep (°C)</i>	<i>Temp. at 2.0 m deep (°C)</i>
01:00	29.25	29.03	28.82	28.54	27.56
02:00	29.24	29.02	28.82	28.54	27.56
03:00	29.23	29.01	28.81	28.54	27.56
04:00	29.23	29.01	28.81	28.55	27.57
05:00	29.24	29.02	28.82	28.57	27.59
06:00	29.27	29.05	28.86	28.60	27.62
07:00	29.24	29.02	28.83	28.58	27.60
08:00	29.31	29.08	28.89	28.64	27.66
09:00	29.35	29.14	28.96	28.71	27.73
10:00	29.37	29.21	29.04	28.80	27.82
11:00	29.27	29.17	29.02	28.82	27.84
12:00	29.29	29.15	28.99	28.78	27.80
13:00	29.28	29.04	28.83	28.59	27.61
14:00	29.34	29.09	28.88	28.61	27.63
15:00	29.37	29.13	28.94	28.66	27.68
16:00	29.37	29.14	28.95	28.68	27.70
17:00	29.36	29.14	28.96	28.69	27.71
18:00	29.37	29.15	28.97	28.70	27.72
19:00	29.39	29.17	29.00	28.73	27.75
20:00	29.37	29.16	28.98	28.72	27.74
21:00	29.33	29.11	28.94	28.69	27.71
22:00	29.30	29.09	28.92	28.68	27.70
23:00	29.26	29.05	28.84	28.66	27.68
24:00	29.22	29.02	28.85	28.66	27.68

C11. Datos de temperaturas del suelo a diferentes profundidades del día 10 de agosto de 2016.

Time (Hours)	<i>Tempe. at 0.0 m deep (°C)</i>	<i>Temp. at 0.5 m deep (°C)</i>	<i>Temp. at 1.0 m deep (°C)</i>	<i>Temp. at 1.5 m deep (°C)</i>	<i>Temp. at 2.0 m deep (°C)</i>
01:00	29.22	29.02	28.87	28.14	27.17
02:00	29.21	29.01	28.87	28.68	27.71
03:00	29.23	29.03	28.89	28.71	27.74
04:00	29.23	29.03	28.89	28.71	27.74
05:00	29.22	29.04	28.90	28.72	27.75
06:00	29.23	29.05	28.91	28.74	27.77
07:00	29.25	29.07	28.93	28.75	27.78
08:00	29.30	29.12	28.98	28.81	27.84
09:00	29.37	29.19	29.06	28.89	27.92
10:00	29.38	29.25	29.13	28.98	28.01
11:00	29.30	29.23	29.14	29.03	28.06
12:00	29.30	29.18	29.06	28.94	27.97
13:00	29.32	29.10	28.93	28.77	27.80
14:00	29.37	29.16	28.99	28.81	27.84
15:00	29.39	29.19	29.04	28.85	27.88
16:00	29.40	29.21	29.07	28.88	27.91
17:00	29.39	29.21	29.07	28.88	27.91
18:00	29.40	29.21	29.08	28.89	27.92
19:00	29.40	29.22	29.09	28.89	27.92
20:00	29.42	29.25	29.11	28.92	27.95
21:00	29.37	29.20	29.07	28.89	27.92
22:00	29.34	29.16	29.04	28.88	27.91
23:00	29.29	29.11	28.98	28.84	27.87
24:00	29.26	29.08	28.96	28.83	27.86

C12. Datos de temperaturas del suelo a diferentes profundidades del día 11 de agosto de 2016.

Time (Hours)	<i>Tempe. at 0.0 m deep (°C)</i>	<i>Temp. at 0.5 m deep (°C)</i>	<i>Temp. at 1.0 m deep (°C)</i>	<i>Temp. at 1.5 m deep (°C)</i>	<i>Temp. at 2.0 m deep (°C)</i>
01:00	29.23	29.05	28.93	28.82	27.96
02:00	29.23	29.05	28.94	28.84	27.98
03:00	29.22	29.05	28.95	28.85	27.99
04:00	29.25	29.07	28.97	28.87	28.01
05:00	29.26	29.08	28.97	28.88	28.02
06:00	29.26	29.09	28.98	28.89	28.03
07:00	29.31	29.13	29.02	28.92	28.06
08:00	29.36	29.18	29.08	28.98	28.12
09:00	29.42	29.25	29.16	29.05	28.19
10:00	29.40	29.29	29.21	29.13	28.27
11:00	29.30	29.25	29.19	29.14	28.28
12:00	29.29	29.20	29.13	29.07	28.21
13:00	29.34	29.13	29.01	28.90	28.04
14:00	29.38	29.18	29.06	28.93	28.07
15:00	29.40	29.22	29.12	28.98	28.12
16:00	29.40	29.23	29.14	29.00	28.14
17:00	29.38	29.22	29.13	29.00	28.14
18:00	29.37	29.21	29.13	29.00	28.14
19:00	29.39	29.24	29.15	29.02	28.16
20:00	29.44	29.29	29.19	29.06	28.20
21:00	29.39	29.24	29.15	29.03	28.17
22:00	29.36	29.20	29.12	29.01	28.15
23:00	29.34	29.18	29.10	29.02	28.16
24:00	29.31	29.15	29.08	29.01	28.15

Anexo D

Estancia en el Tecnológico Nacional de México.

Se realizó una estancia académica de investigación en el Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (CENIDET) en la ciudad de Cuernavaca, Morelos bajo la supervisión del Dr. Jesús Perfecto Xamán Villaseñor con el propósito de conocer el Software desarrollado en el CENIDET para simulación numérica del Intercambiador de calor tierra aire, así como para la revisión y escritura de los primeros capítulos la tesis. De igual manera se aprovechó la estadía para asistir a seminarios del área de sistemas térmicos, relacionados con temas de energía en edificaciones. Se anexa Constancia de Actividades de Estancia Académica de Investigación.

CONSTANCIA DE ACTIVIDADES DE ESTANCIA ACADÉMICA DE INVESTIGACIÓN

Cuernavaca, Mor. México 14 de Julio 2016

Ing. Víctor Manuel Arcos Feria
Alumno de la Maestría en Mecatrónica
Universidad de Quintana Roo
PRESENTE

Por medio de la presente agradecemos su tiempo, dedicación y esfuerzo durante su estancia académica en el Departamento de Ingeniería Mecánica de CENIDET durante el periodo del **01 de Mayo al 30 de Junio** del presente año, periodo en el cual llevo a cabo las siguientes actividades académicas bajo la supervisión del profesor Jesús Xamán Villaseñor:

1. Aprendizaje en el uso del software desarrollado en CENIDET para realizar la simulación del intercambiador tierra-aire.
2. Escritura de los tres primeros capítulos de la tesis.
3. Asistencia en los seminarios del área de sistemas térmicos, relacionados con temas de energía en edificaciones.

Sin más por el momento y sabiendo que los resultados de su estancia fueron satisfactorios para el avance y conclusión de su tema de tesis de maestría, me despido con un cordial saludo.

ATENTAMENTE
"CONOCIMIENTO Y TECNOLOGÍA AL SERVICIO DE MÉXICO"



Dr. Arturo Abúndez Pliego
Jefe del Departamento
Departamento de Ingeniería Mecánica
Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico
(CENIDET - TecNM - SEP)

