



UNIVERSIDAD JUÁREZ AUTÓNOMA DE TABASCO

DIVISIÓN ACADÉMICA DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA



**Análisis experimental de un
intercambiador de calor tierra-aire para
su uso como un sistema pasivo para el
confort térmico en clima cálido-húmedo**

TESIS

para obtener el grado de

Maestro en Ciencias en Ingeniería

Presenta:

Ing. Heidi Paola Díaz Hernández

Director:

Dra. Karla María Aguilar Castro

Cunduacán, Tabasco, México.

Julio de 2018



UNIVERSIDAD JUÁREZ
AUTÓNOMA DE TABASCO

"ESTUDIO EN LA DUDA. ACCIÓN EN LA FE"



División
Académica
de Ingeniería
y Arquitectura



DIRECCIÓN

OFICIO DIR/DAIA/708/2018
FECHA: 23 de Abril 2018
ASUNTO: Autorización de Impresión
Definitiva

C. ING. HEIDI PAOLA DÍAZ HERNÁNDEZ
PASANTE DE LA MAESTRIA EN CIENCIAS EN INGENIERÍA
PRESENTE.

En virtud de haber elaborado su trabajo de Tesis denominado:

**"ANÁLISIS EXPERIMENTAL DE UN INTERCAMBIADOR DE CALOR TIERRA-AIRE
PARA SU USO COMO UN SISTEMA PASIVO PARA EL CONFORT TÉRMICO EN CLIMA
CÁLIDO-HÚMEDO"**

Para obtener el grado de Maestro en Ciencias en Ingeniería y en el cual la Dra. Karla María Aguilar Castro ha sido la Directora de Tesis.

Tengo a bien autorizarle la **IMPRESIÓN DEFINITIVA** de dicho trabajo, continuando con los trámites correspondientes para su examen de obtención de grado.

Sin otro particular, le envío un afectuoso saludo.

ATENTAMENTE

UNIVERSIDAD JUÁREZ
AUTÓNOMA DE TABASCO
DIVISIÓN ACADÉMICA DE
DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA


DR. CANDELARIO BOLAINA TORRES
DIRECTOR



C.c.p. Archivo

Dr.CBT/Dr. JBF/apl.



**UNIVERSIDAD JUÁREZ
AUTÓNOMA DE TABASCO**

"ESTUDIO EN LA DUDA. ACCIÓN EN LA FE"



**División
Académica
de Ingeniería
y Arquitectura**

COORDINACIÓN DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

Cunduacán, Tabasco, a 16 de Abril de 2018

MEM/MCI/003/2018

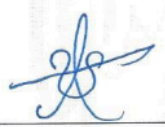
PARA: DR. CANDELARIO BOLAINA TORRES
DIRECTOR DE LA DAIA
DE: COMISIÓN SINODAL
ASUNTO: APROBACIÓN DE IMPRESIÓN TESIS DE MAESTRIA

Una vez hecha la revisión detallada del Trabajo de Tesis denominado:

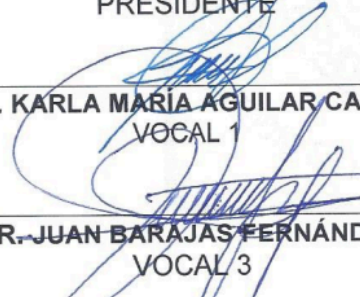
"ANÁLISIS EXPERIMENTAL DE UN INTERCAMBIADOR DE CALOR TIERRA-AIRE PARA SU USO COMO UN SISTEMA PASIVO PARA EL CONFORT TÉRMICO EN CLIMA CÁLIDO-HÚMEDO"

Desarrollado por la C. **ING. HEIDI PAOLA DÍAZ HERNÁNDEZ** de la **Maestría en Ciencias en Ingeniería**, le comunicamos que aceptamos la impresión del trabajo, ya que el mismo ha cumplido con los requisitos necesarios.

COMISIÓN SINODAL


DR. EDGAR VICENTE MACÍAS MELO
PRESIDENTE


DRA. LIZETH ROJAS BLANCO
SECRETARIO


DRA. KARLA MARÍA AGUILAR CASTRO
VOCAL 1


DRA. EBELIA DEL ÁNGEL MERAZ
VOCAL 2


DR. JUAN BARAJAS FERNÁNDEZ
VOCAL 3

c.c.p. Archivo

CARTA DE AUTORIZACION

La que suscribe, autoriza por medio del presente escrito a la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco para que utilice tanto física como digitalmente la tesis de grado denominada "Análisis experimental de un intercambiador de calor tierra-aire para su uso como un sistema pasivo para el confort térmico en clima cálido-húmedo", de la cual soy autora y titular de los Derechos de Autor.

La finalidad del uso por parte de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco de la tesis antes mencionada, será única y exclusivamente para difusión, educación y sin fines de lucro; autorización que se hace de manera enunciativa más no limitativa para subirla a la Red Abierta de Bibliotecas Digitales (RABID) y a cualquier otra red académica con las que la universidad tenga relación institucional.

Por lo antes manifestado, libero a la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco de cualquier reclamación legal que pudiera ejercer respecto al uso y manipulación de la tesis mencionada y para los fines estipulados en este documento.

Se firma la presente autorización en la ciudad de Cunduacán, Tabasco a los 10 días del mes de Junio del año 2018.

Autorizo



Ing. Heidi Paola Díaz Hernández

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por el apoyo recibido para el desarrollo de este trabajo de Tesis.

A la División Académica de Ingeniería y Arquitectura Unidad Chontalpa de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco por la oportunidad de realizar mis estudios de formación profesional, por las facilidades y apoyos brindados para el desarrollo de este trabajo de Tesis.

Al gobierno del Estado de Tabasco por el apoyo para realizar estancia en el Extranjero y por fomentar el desarrollo profesional en estas áreas.

A todos los miembros de mi comité revisor, a la Dra. Karla María Aguilar Castro, al Dr. Edgar Vicente Macías Melo, a la Dra. Lizeth Rojas Blanco, al Dr. Juan Barajas Fernández, a la Dra. Ebelia del Ángel Meraz, por el tiempo dedicado para este trabajo de tesis, todas las aportaciones, comentarios, correcciones y sugerencias que ayudaron a enriquecerlo. Por confiar en mi persona, en el proyecto, por su devoción académica y sus muchas enseñanzas.

A la Dra. María José Jiménez Taboada por su apoyo y recibimiento en la Plataforma Solar de Almería, por todas sus enseñanzas, atenciones y tiempo dedicado a mi aprendizaje durante mi Estancia Académica en Almería.

A mi familia, por su apoyo incondicional, confianza, que me han permitido poder seguir desarrollándome académicamente.

A mis amigos, Salvador, May, Zeus, Elias y todos los que colaboraron en este proyecto de forma técnica o emocional.

¡Muchas gracias!

DEDICATORIAS

A los doctores Karla María Aguilar Castro, Edgar Vicente Macías Melo e Iván Hernández Pérez, por sus enseñanzas, por el tiempo dedicado, por todas las aportaciones a mi crecimiento académico, por todas las atenciones, ánimos, chistes, por generar un ambiente de trabajo agradable.

Para mis padres Marisela Hernández Muñoz y Javier Díaz Fermán, su apoyo incondicional, confianza, por todo el amor y los valores enseñados, por hacer de mí siempre una mejor persona, por enorgullecerlos será siempre una motivación para mí.

Para mi hermana Karla Ariadna Díaz Hernández, por ser mi amiga incondicional durante toda mi vida, por creer en mí y por todas las aventuras vividas.

A Samuel Antonio Moreno Montero, por todo el amor, cariño y motivación necesaria para cumplir este objetivo.

¡Gracias infinitas!

RESUMEN

En este trabajo se presenta el diseño, construcción, instrumentación y evaluación de un Intercambiador de Calor Tierra-Aire (ICTA) ubicado en Cunduacán, Tabasco bajo condiciones de clima cálido húmedo. El diseño del ICTA fue de 2.5 m de profundidad, 6 m de largo y fue construido con tubería de PVC. En la simulación del comportamiento del fluido (aire) del tubo, se observó que entre menor velocidad de entrada, mayor fue la diferencia de temperatura entre la entrada y la salida del ICTA. El ICTA fue instrumentado para monitorear la temperatura en la entrada y salida del tubo, así como, las temperaturas a diferentes profundidades del suelo y el nivel de agua del suelo. La velocidad del aire dentro del ICTA fue de 0.9812 m s^{-1} . Las pruebas experimentales se realizaron durante un periodo de seis meses (agosto 2017- enero 2018) y se obtuvo que el promedio de la temperatura del suelo a 2.5 m de profundidad fue de $26\text{-}28^{\circ}\text{C}$, siendo menor en temporada de invierno. Se observó que el ICTA se comportó como enfriador durante el día y como calentador en la noche, excepto en la temporada de invierno, que funcionó la mayor parte del tiempo como calentador. Debido a que la región es cálido-húmedo con temperaturas altas, el análisis del ICTA se enfocó en su funcionamiento como enfriador, con el cual se obtuvo una ΔT máxima de 5.5°C y el máximo ΔT promedio de 2.8°C . Se realizó un análisis energético, ambiental y económico y se encontró que la aportación térmica del ICTA como único sistema para alcanzar el confort térmico en una habitación, no es suficiente. Por lo que, se analizó su potencial como un sistema híbrido acoplado a un sistema de Aire Acondicionado (AC), tomando en cuenta cuatro tipos diferentes de AC. Como resultado de este análisis se estimó un ahorro máximo de 20.76% de ahorro energético, una reducción de CO_2 de 129.13 kg y un ahorro económico de \$796.97 MNX con respecto al uso de un AC como único sistema de confort térmico. Los resultados obtenidos nos muestran que con el ICTA es posible enfriar un flujo de aire, y que su potencial podría aprovecharse obteniendo mayores beneficios energéticos, ambientales y económicos, cuando se acopla a un sistema de AC.

ABSTRACT

This paper presents the design, construction, instrumentation and evaluation of an Earth-Air Heat Exchanger (EAHE) located in Cunduacán, Tabasco under conditions of hot and humid climate conditions. The EAHE was designed and built of 2.5 m deep, 6 m long and using PVC pipe. In the simulation of the fluid (air) was observed that the lower the input speed, the greater the temperature difference between the input and the output of the EAHE. The EAHE was instrumented to monitor the inlet and outlet, as well as the temperatures at different depths of the soil and the water level of the soil. The air velocity of the EAHE was 0.9812 m s^{-1} . The experimental tests were carried out during a period of six months (August 2017 - January 2018) and it was found that the average temperature of the soil at 2.5 m depth was $26\text{-}28^{\circ}\text{C}$, being lower in the winter season. It was observed that the EAHE behaved as a cooler during the day and as a heater at night, except in the winter season that worked most of the time as a heater. Because of the hot and humid climate with high temperatures, the EAHE analysis focused on its operation as a cooler, a maximum ΔT of 5.5°C and an average maximum ΔT of 2.8°C were obtained. An energy, environmental and economic analysis was carried out and it was found that the thermal contribution of EAHE as the only system to achieve thermal comfort in a room is not enough. Therefore, its potential as a hybrid system coupled to an Air Conditioning (AC) system was analyzed, taking into account four different types of AC. As a result of this analysis, a maximum saving of 20.76% of energy, a CO_2 reduction of 129.13 kg and an economic saving of \$796.97 MNX were estimated in comparison with the use of AC as the only comfort system. The results shows that the EAHE cool an air flow and its potential increase when is coupled with an AC system, obtaining greater energetic, environmental and economic benefits.

Índice	Pág.
Lista de Figuras	V
Lista de Tablas	VII
Nomenclatura	VIII
 CAPÍTULO I. Introducción	
1.1 Generalidades.....	2
1.2 Revisión bibliográfica.....	4
1.2.1 Eficiencia de los ICTA.....	4
1.2.1 Sistemas híbridos.....	8
1.2.2 Estudios de intercambiadores en México.....	9
1.3 Objetivo general.....	10
1.3.1 Objetivos particulares.....	10
1.4 Alcances del proyecto.....	11
1.5 Estructura de la tesis.....	11
 CAPÍTULO II. Fundamento Teórico	
2.1 Fundamentos de transferencia de calor.....	13
2.1.1 Conducción.....	13
2.1.2 Convección.....	14
2.2 Evaluación de ICTA.....	15
2.3 Características climáticas en Tabasco.....	18
2.4 Estimación de incertidumbre.....	23

CAPÍTULO III. Desarrollo del ICTA

3.1 Selección del lugar de implementación del ICTA	26
3.2 Diseño, construcción e instrumentación	27
3.2.1 Simulación en CFD.....	30
3.2.2 Construcción del ICTA.....	37
3.2.3 Instrumentación.....	43
3.3 Procedimiento experimental	53

CAPÍTULO IV. Resultados y Discusión

4.1 Comportamiento de la temperatura.....	55
4.2 Humedad del suelo.....	63
4.3 Análisis energético ICTA.....	64
4.3.1 Carga Térmica	65
4.3 Análisis energético híbrido	72

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	78
--	-----------

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	81
--	-----------

ANEXO A. Selección de material del tubo y sensores.....	86
--	-----------

ANEXO B. Obtención del Cp de la Tierra.....	90
--	-----------

ANEXO C. Costo del ICTA.....	93
-------------------------------------	-----------

ANEXO D. Actividades Académicas.....	95
---	-----------

Lista de Figuras

Figura	Descripción	Pág.
2.1	Clasificación de los factores que afectan la eficiencia térmica y energética.	17
3.1	Mapa de ubicación de las tres zonas.	26
3.2	Resultados de las mediciones de Temperatura del suelo.	27
3.3	Diseño del ICTA.	29
3.4	Metodología de simulación.	31
3.5	Dibujo y mallado del ICTA en GAMBIT.	32
3.6	Residuales y contorno de temperatura del Caso I (a) Residuales (b) Contorno de temperatura.	34
3.7	Residuales y contorno de temperatura del Caso II (a) Residuales (b) Contorno de temperatura.	35
3.8	Residuales y contorno de temperatura del Caso III (a) Residuales (b) Contorno de temperatura.	36
3.9	Tubo de traslado del ICTA.	38
3.10	Reductor de 190.5 mm (8") a 101.6 mm (4") de diámetro.	38
3.11	Construcción de tubo vertical de salida (aislado). (a) Acoplamiento de tubos (b) Foamular cortado (c) vista interior de tubo (d) Sellado de tubo aislado	39
3.12	Características de pieza de entrada y salida de aire.	40
3.13	Proceso de excavación en zona de implementación. (a) Inicio de excavación en la zona de implementación (b) Excavación a 0.75 m (c) Bombeo de exceso de agua (d) Fin de excavación.	41
3.14	Acoplamientos de tramos y enterramiento de ICTA (a) Acoplamiento de tubo aislado con tramo horizontal (b) colocación del tubo en la zona de implementación (c) Colocación de tubería del ICTA.	42
3.15	ICTA implementado.	42
3.16	Multímetro y Tarjeta multiplexora.	44

3.17	Soldadura y aislamiento de los sensores.	44
3.18	Equipo usado para calibración de sensores de temperatura.	45
3.19	Proceso de construcción de sonda de temperatura.	48
3.20	Instalación de la sonda.	49
3.21	Colocación de los sensores de temperatura entrada y salida.	49
3.22	Proceso de instalación de tubería de instrumentación.	50
3.23	Instalación de equipo de recolección y análisis de datos.	50
3.24	Construcción de indicador de nivel.	51
3.25	Indicador de nivel y su funcionamiento.	52
3.26	Modelo experimental del ICTA.	52
3.27	Diagrama de flujo de procedimiento experimental.	53
4.1	Mediciones de Temperatura (Agosto 2017).	57
4.2	Mediciones de Temperatura (Septiembre 2017).	58
4.3	Mediciones de Temperatura (Octubre 2017).	59
4.4	Mediciones de Temperatura (Noviembre 2017).	60
4.5	Mediciones de Temperatura (Diciembre 2017).	61
4.6	Mediciones de Temperatura (Enero 2018).	62
4.7	Mallado de habitación en Gambit.	68
4.8	Residuales y contorno de temperatura del Caso I. (a) Residuales (b) Contorno de temperatura.	69
4.9	Residuales y contorno de temperatura del Caso II. (a) Residuales (b) Contorno de temperatura.	70
4.10	Vectores de velocidad Caso I.	71
4.11	Vectores de velocidad Caso II.	72

Lista de Tablas

Tabla	Descripción	Pág.
2.1	Tarifas CFE.	18
2.2	Características de los municipios de Tabasco.	20
3.1	Resumen de dimensiones de trabajos previos de ICTA.	28
3.2	Características y propiedades del fluido y paredes del ICTA.	32
3.3	Resumen de los resultados obtenidos de simulación del ICTA.	33
3.4	Promedio y desviación estándar de los valores obtenidos de las temperaturas de cada termopar.	46
3.5	Ecuaciones de ajuste y error estándar de estimación (EEE) de cada sensor.	47
3.6	Profundidad a la que se ubica cada sensor.	50
4.1	Resumen de ΔT por mes.	56
4.2	Nivel de Agua.	63
4.3	Valores de C_p obtenidos a profundidades del suelo.	64
4.4	Resumen de datos de capacidad de enfriamiento.	66
4.5	Resumen de métricas del ICTA.	67
4.6	Características y propiedades del fluido y paredes.	67
4.7	Descripción de variables calculadas.	73
4.8	Métricas de sistema Híbrido de ICTA acoplado con AC (Primer trimestre).	74
4.9	Métricas de sistema Híbrido de ICTA acoplado con AC (Segundo trimestre).	75
4.10	Métricas de sistema Híbrido de ICTA acoplado con AC (Semestre completo).	76
4.11	Porcentaje de ahorro de Sistema Híbrido.	77

NOMENCLATURA

Variables	Descripción	Unidades
A	Área	m^2
C_P	Calor específico	$J\ g^{-1}\ K^{-1}$
D	Diámetro	m
E	Energía Eléctrica	kW h
h	Coefficiente convectivo	$W\ m^{-2}\ ^\circ C^{-1}$
L	Distancia	m
$\dot{m}$	Flujo másico	$g\ s^{-1}$
m	Masa	g
n	Número de mediciones independientes	Adimensional
q''	Flujo de calor	$W\ m^{-2}$
Q	Calor	J
T	Temperatura	$^\circ C$
V	Velocidad del fluido	$m\ s^{-1}$
$\dot{V}$	Flujo volumétrico	$m^3\ s^{-1}$
Letras griegas		
λ	Conductividad térmica	$W\ m^{-1}\ K^{-1}$
μ	Viscosidad dinámica	$kg\ m^{-1}\ s^{-1}$
ρ	Densidad	$kg\ m^{-3}$
Subíndices		
AC	Consumida por el Aire Acondicionado	
AI	Ahorrada por el ICTA	
amb	Promedio del ambiente	
C	Combinada	
cond	Por conducción	
conv	Por convección	
E	Enfriamiento	

<i>F</i>	Fluido
<i>H</i>	Ahorrada por el sistema hibrido
<i>In</i>	Entrada del ICTA
<i>out</i>	Salida del ICTA
<i>S</i>	Promedio del suelo
<i>sup</i>	Superficie
<i>ven</i>	Consumida por el ventilador
<i>X</i>	Dirección en el eje x

Capítulo 1

Introducción

En este Capítulo se muestran las generalidades respecto al trabajo presentado. Se abarcan las generalidades del tema de investigación, la revisión bibliográfica realizada para sustentar esta tesis, los objetivos generales y específicos, así como los alcances y la estructura general del proyecto.

1.1 Generalidades

Actualmente debido al incremento de tecnologías y necesidades sociales se ha aumentado exponencialmente el consumo energético. Uno de los principales objetivos de estos sistemas y tecnologías es proveer condiciones de confort deseados por sus usuarios. Desde el descubrimiento de la energía eléctrica, el ser humano se ha preocupado por crear sistemas activos, tales como los aires acondicionados y calefactores principalmente, para alcanzar una temperatura de confort en edificaciones. Sin embargo, paradójicamente estos sistemas tienen como consecuencia un gran impacto ambiental, provocando un gran daño a nuestro ambiente, como el cambio climático y el daño a la capa de ozono. Como evidencia de esto basta con decir que en febrero del 2016, se registró un aumento de 1.35 °C de la temperatura a nivel mundial [1] alarmando a muchas instituciones, organizaciones y gobierno; generando una tendencia a la concientización sociedad para el uso de energías sustentables y sistemas pasivos, la cual nos permiten aprovechar las energías renovables para tener un menor impacto ambiental.

Las tendencias del uso de energías sustentables apuntan a sistemas, que minimicen su consumo eléctrico para lograr las condiciones deseadas para viviendas y edificaciones. Dentro de los principales sistemas pasivos estudiados se encuentran:

- Muros y techos verdes: los cuales se consideran ¹⁴ una técnica constructiva que incorpora vegetación sobre superficies horizontales, verticales o inclinadas de las edificaciones, lo cual provoca un efecto de aislamiento térmico, regula la temperatura y mejora calidad de aire [2].
- ⁵ Chimenea solar: se define como una cavidad ventilada alargada, pintada de negro para favorecer la absorción del calor del Sol, ubicada mayormente sobre la parte más calurosa del recinto, la cual se encarga de extraer aire, lo que

⁵ provoca que entre aire al interior del recinto a través de puertas y ventanas y, de esa forma, proporciona ventilación a la edificación [3].

- Arquitectura bioclimática: es la arquitectura que se encarga de diseñar edificios teniendo en cuenta las condiciones climáticas y los recursos disponibles (sol, vegetación, lluvia, viento) para disminuir los impactos ambientales y reducir consumos energéticos [4].

- Intercambiadores de calor tierra-aire (ICTA): es ¹¹ un sistema conocido en el mundo como “geotermia superficial o de baja entalpía”, que consiste en la instalación de tubos colocados en excavaciones de escasa profundidad, para que funcionen como intercambiadores de calor. El sistema consta de un pequeño ventilador eléctrico, se hace ingresar por el conducto el aire proveniente del exterior de la vivienda que, al circular por debajo de la tierra, absorbe la temperatura existente a esa profundidad, y la devuelve nuevamente al hogar, acondicionando así el recinto [5].

De los sistemas mencionados el intercambiador tierra-aire (ICTA) ha sido uno de los sistemas más eficientes para mantener confort térmico en las edificaciones, ya que como se mencionó aprovechan la inercia y temperatura de la tierra para alcanzar el confort térmico deseado, además es importante mencionar que un ICTA puede tener ser usado como enfriador o como calentador dependiendo el clima de la región.

Los Intercambiadores Tierra-Aire (ICTA) consisten en un circuito de aire al interior de la tierra que ¹ conecta el interior de una edificación con el ambiente exterior y viceversa. Los ¹ ICTA permiten el ahorro de energía mediante el calentamiento del aire para la calefacción o el enfriamiento del aire para la refrigeración de edificios. Este fenómeno es posible debido a que la temperatura de la tierra permanece relativamente constante durante todo el año, debido a que las fluctuaciones de temperatura en la superficie de la tierra se ven

disminuidas como la profundidad debido a la alta inercia térmica del suelo. Por lo tanto, a una profundidad suficiente, la temperatura del suelo es siempre mayor que la del aire exterior en invierno y es menor en verano [6].

Los ICTA han demostrado tener un muy bajo consumo de energía y debido a la inercia de la tierra es aplicable con enfriador y como calefacción dependiendo de la temperatura, suelo y clima de la región. Es por eso que diversos investigadores han estudiado y analizado el funcionamiento de los ICTA, para lograr una mejor eficiencia térmica y energética de estos. Las principales investigaciones respecto a los ICTA se han desarrollado por investigadores de la India, en México se han reportado algunos trabajos teóricos [7], sin embargo, a la fecha no se han reportado trabajos de tipo experimental. Por lo anterior, se considera pertinente la realización de pruebas experimentales con el fin de establecer la factibilidad del uso de ICTA, en este caso en condiciones climáticas de Cunduacán, Tabasco, México.

1.2 Revisión bibliográfica

Los ICTA han demostrado tener un muy bajo consumo de energía y debido a la inercia de la tierra es aplicable con enfriador y como calefacción dependiendo de la temperatura, suelo y clima de la región. Es por eso que diversos investigadores han estudiado y analizado el funcionamiento de los ICTA, para lograr una mejor eficiencia térmica y energética de estos.

1.2.1 Eficiencia los ICTA

Existen diversas investigaciones respecto a los ICTA, investigadores de la India han hecho aportaciones importantes en los últimos años, realizando trabajos experimentales tal es el caso de los investigadores Patel y Ramana *et al.* [8], el cual se destaca por comparar un ICTA vertical vs uno horizontal, en el cual resulta más eficiente el ICTA horizontal, además en el estudio se mencionó que

el material del tubo del ICTA tiene una diferencia insignificante en la eficiencia de este.

Entre otras aportaciones de investigadores de la india, se encuentre Trilok Singh Bisoniya *et al.* [9], quienes realizaron un estudio donde se evaluó el rendimiento térmico anual de un ICTA para las condiciones climáticas cálidas y secas de Bhopal. Se desarrolló un modelo tridimensionales basado en la Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) para evaluar el potencial de calentamiento / enfriamiento del ICTA. Los resultados de la simulación fueron comparados y validados con observaciones experimentales. En sus resultados destaca que se describen nuevas métricas para poder evaluar el ICTA, las cuales son producción total de energía anual, un retorno de inversión, reducción de CO₂ y se define que la vida útil del ICTA de aproximadamente 50 años.

Otro importante estudio es el de Mongkon *et al.* [10] quienes implementaron un ICTA para su uso en un invernadero en Tailandia. Durante el estudio se observaron que los periodos más eficientes del ICTA, como enfriador, se obtenían aproximadamente entre las 11 am y las 6 pm. Por otra parte, el Coeficiente de Rendimiento (COP) de enfriamiento fue mayor en días de verano, es decir días donde la temperatura es más alta. Por otro lado, el COP de calentamiento fue variable durante todas las estaciones y fue más alto durante el transcurso de la mañana.

Se pudo observar que la mayoría de los ICTA son usados en regiones con climas extremos (el clima varía por horas del día o por estaciones del año), ya que las ecuaciones y simulaciones indican que se puede obtener mayor rendimiento por la inercia de la tierra. En el caso de las regiones con calor extremo, no muchos investigadores apuestan en el tema ya que el sobrecalentamiento de la tierra puede no favorecer sus casos de estudios. Entre los pocos estudios de esta regiones se encuentran los investigadores de Bangladesh, Uddin Chowdhury, *et al.* [11], los cuales hicieron un análisis

experimental de un ICTA horizontal en condiciones de climas cálidos. El COP máximo obtenido fue de 2.15 cuando se observa el mayor flujo másico de aire. Se concluyó que para aumentar la capacidad de enfriamiento del ICTA es necesario tener el mayor flujo másico posible de aire. Sin embargo en su diseño tuvieron limitaciones del sistema, recomiendan para futuros experimentos, incrementar la longitud, el diámetro y la profundidad del tubo del ICTA.

Otra de las investigaciones importantes es la de Sayeh Menhoudj *et al.* [12]. En este artículo se presentó un estudio sobre el rendimiento energético de un intercambiador de calor de aire tierra (ICTA) para edificios en Argelia. Para determinar la influencia del material, se compararon 2 tubos de diferente material, uno de zinc y otro de PVC. Los tubos tienen las mismas condiciones geométricas (una longitud de conducto de 20 m, un diámetro de 120 mm y enterrados a una profundidad de 2 m). También se realizaron simulaciones numéricas en el cual se variaron los diferentes parámetros: clima, profundidad, longitud y diámetro del tubo. Como conclusión se obtuvo que la energía suministrada por el ICTA es más significativa en el sur del país (Adrar y Bechar) que en el norte (Orán). También, se concluye que el material del tubo es poco significativo en la eficiencia del ICTA y que después de los 3 m de profundidad la diferencia en la eficiencia es poco significativa al igual que diferencia después de los 20 m de largo.

En otra investigación Paolo Maria Congedo *et al.* [13] también estudia el efecto de la profundidad en el ICTA así como la influencia del flujo másico en la eficiencia de los ICTA en condiciones climáticas de Italia. Para realizarlo realizó una simulación en CFD (Fluent) en el cual simuló los sistemas utilizando características de la tierra a 2.5 m y a 3.5 m. y utilizó flujo másico de 150, 250, 350 y 450 $\text{m}^3 \text{h}^{-1}$. En el análisis se pudo observar que las diferentes profundidades no afectan significativamente la eficiencia del ICTA, sin embargo, puede afectar el costo. En cuanto flujo se pudo observar que para invierno el

flujo no representa cambio significativo, sin embargo en verano si, entre menor sea el flujo másico mayor su eficiencia.

En cuanto la influencia de la humedad en la eficiencia del ICTA existen muy pocos estudios, uno de ellos es Mathias Cuny *et al.* [14]. En este trabajo, se realiza un estudio para cuantificar el impacto de los tipos de tierra en el rendimiento energético ICTA. Para realizarlo se propuso un modelo numérico basado en el método de elementos finitos y tomando las propiedades térmicas de la tierra como entradas. En la parte experimental se recubrió un tubo con tres diferentes tipos de tierra a lo largo de toda la longitud de la tubería (30 m). Los resultados obtenidos muestran que para este estudio, tanto el contenido de humedad como el tipo de suelo tienen una influencia no despreciable en el rendimiento térmico de ICTA. En casos extremos, la diferencia del rendimiento energético entre una arena con una humedad mínima y una mezcla con humedad máxima, alcanzó el 17.4% durante el mismo periodo. Sin embargo, cuando se utilizan porcentajes de humedad altos, el tipo de tierra no tiene influencia significativa en el rendimiento energético del ICTA.

En otro estudio Kamal Kumar Agrawal *et al.* [15], en el estudio, se aumenta el contenido de humedad del suelo para mejorar sus propiedades térmicas y su efecto sobre el rendimiento térmico ICTA, se estudia una la longitud para obtener una caída de temperatura para enfriamiento durante el verano en climas cálidos y áridos. En el estudio, se desarrollaron dos configuraciones experimentales idénticas en la ciudad de Ajmer (India). Se introdujo un sistema de impregnación de agua para mantener diferentes contenidos de humedad del suelo en las proximidades de la tubería del ICTA. Los porcentajes de humedad en la tierra fueron de 5%, 10%, 15% y 20%. Al comparar el rendimiento térmico entre la muestra de tierra seca y la muestra de tierra con un 20% de humedad, se observó que el COP incremento un 24%. El efecto de la humedad indica que con una humedad alta se puede reducir hasta cierto punto la longitud del tubo, sin embargo, para este tipo de suelo no es económico.

1.2.2 Sistemas híbridos

En diversos estudios se ha tratado de acoplar dos o más sistema con el ICTA, pueden ser sistemas activos o pasivos, esto con el fin de obtener mejores resultados. En sistemas híbridos que acoplan al ICTA con sistemas pasivos, destaca el investigador como Haorong Li *et al.* [16], el cual conecta un ICTA con un colector solar mejorado conectado a una chimenea. Al utilizar simultáneamente la energía Geotérmica y solar, se observó que el sistema logró grandes ahorros de energía principalmente durante verano. Los resultados muestran, que el sistema acoplado puede mantener las condiciones de confort térmico que cumple con la norma ASHRAE [17] para el confort térmico.

Sanjeev Jakhar *et al.* [18] presentó un modelo que permite estimar el potencial de calentamiento para sistemas utilizando ICTA, ya sea solo o acoplado con ducto de calentamiento solar de aire. El experimento se realizó para condiciones climáticas de invierno en la India, en el cual se evaluó el sistema para diferentes flujos de entrada velocidades, longitud y profundidad de la tubería enterrada. A partir de la experimentación, se concluyó que 3.7 m de profundidad es suficiente para enterrar la tubería y 34 m de longitud es suficiente para obtener una salida óptima de temperatura. Se observó que a medida que disminuye la velocidad de flujo, la capacidad de calentamiento aumenta. El COP del sistema aumentó de 2.8 hasta 6.3 cuando se acopló con el ducto de calentamiento solar de aire.

En ambientes con climas cálidos se han utilizado sistemas híbridos acoplados con sistemas activos, tal es el caso del estudio de Vikas Bansala *et al.* [19]. El cual basan su estudio en un sistema híbrido utilizando ICTA acoplado con un sistema activo de enfriamiento (AC), para este caso fue un clima de ventana. El motivo principal de esta investigación fue reducir el consumo energético de los sistemas activos. Para ello, se compararon diversas configuraciones del sistema y como resultado se obtuvo que la forma más eficiente es conectar el ICTA

directamente al condensador logrando reducir el consumo energético y manteniendo la temperatura de confort térmico de 25°C.

Otro investigador que realiza un estudio sobre un sistema híbrido con un AC es Suresh Kumar *et al.* [20]. El estudio se realizó en una región cálido húmeda en la India donde la temperatura llega a exceder los 46°C. En este estudio al igual que anterior se comparan varias configuraciones de un sistema híbrido de un ICTA con un aire acondicionado, y con este estudio se confirma que la mejor configuración de este tipo de sistema es conectar el ICTA al condensador. También, analizaron las velocidades y se obtuvo que utilizando velocidades de entre 5 y 11 m s⁻¹ se obtuvo la menor temperatura alcanzada. Sin embargo, al analizar la reducción de consumo energético y el retorno de inversión, observaron que los valores óptimos de las velocidades están dentro de 5 a 7 m s⁻¹. En este estudio se consideró el análisis del retorno de la inversión y la reducción de CO₂.

1.2.3 Estudios de ICTA en México

En México no se han encontrado muchos trabajos sobre ICTA, el único trabajo encontrado hasta ahora es el de Ramírez-Dávila, *et al.*, [7] el cual presentan los resultados de un estudio numérico para la predicción del comportamiento térmico de un ICTA para tres ciudades con climas diferentes en México: Cd. Juárez, Chihuahua, Ciudad de México y Mérida, Yucatán. Los resultados del estudio mostraron que para este caso de estudio, el intercambiador para propósitos de calefacción se comporta mejor con altos números de Reynolds, sin embargo, a altas velocidades del fluido se reduce el intercambio de energía del ICTA con la tierra. La simulación mostró que el ICTA en Cd. Juárez y en Cd. de México, fue mejor para enfriar que para calentar. Mientras que, para el caso de Mérida el modelo cambió en la salida de las tuberías, y fue necesario colocarle un aislante, debido a que la humedad es mayor que en las otras ciudades analizadas. Los cambios que se presentaron para Mérida no son tan

significativos como los de la ciudad de México y Cd. Juárez, por lo que los autores concluye que el ICTA de su simulación es apropiado solo para climas extremos y moderados, sin embargo, para clima cálido-húmedo es necesario validar con datos experimentales.

Como ya se ha mencionado, no se han reportado suficientes estudios experimentales apropiados en clima-cálido-húmedo. Lo anterior, debido a que la humedad es una variable que es difícil controlar y se considera que influye en la sensación térmica. Además, se reporta que cuando se tienen temperaturas extremas de más de 36°C es recomendable utilizar el ICTA acoplado con sistemas pasivos o activos para alcanzar una temperatura de confort, aproximada de 25°C. Esto debido a que en las regiones de clima cálido-húmedo es donde se cuenta tiene altos consumos de energía por el uso de sistemas activos, como el aire acondicionado. Por todo lo anterior, se considera pertinente la realización de pruebas experimentales con el fin de establecer la factibilidad del uso de ICTA, en este caso en condiciones climáticas de Cunduacán, Tabasco-México.

1.3 Objetivo general

Diseñar y evaluar un ICTA en un clima cálido-húmedo, en una muestra de suelo constituida con diferentes composiciones, con el fin de determinar la viabilidad del uso de este como un sistema pasivo para la obtención del confort térmico en edificaciones.

1.3.1 Objetivos particulares

- Determinar el calor específico del suelo a diferentes profundidades.
- Diseñar un ICTA mediante el uso de una metodología de diseño estructurado y la herramienta de CFD para el análisis del comportamiento del fluido.

- Obtener el comportamiento del perfil de temperatura a diferentes profundidades del suelo, así como, el comportamiento de la temperatura de entrada y salida del ICTA.
- Determinar la factibilidad energética, económica y ambiental del uso de un ICTA como elemento pasivo para la obtención del confort térmico en un clima cálido-húmedo.

1.4 Alcances del proyecto

- El ICTA es de tipo horizontal con una profundidad máxima de 2.5 m, una longitud de 6 m y un diámetro de 0.1016 m (4").
- El estudio del ICTA se realizó durante los meses de agosto 2017 a enero 2018 (seis meses).
- La velocidad de flujo de aire es de 0.9218 m s^{-1} .

1.5 Estructura de la Tesis

El documento de Tesis está constituido por cuatro capítulos, a continuación se describen brevemente:

- En el "Capítulo II" denominado "Fundamento teórico" se muestra la base teórica que sirve para entender y sustentar la parte matemática y experimental del trabajo de investigación.
- En el "Capítulo III" denominado "Desarrollo del ICTA" presenta el diseño, construcción e instrumentación del ICTA, así como, el procedimiento experimental.
- En el "Capítulo IV" denominado "Resultados y Discusión" se presentan y analizan los resultados obtenidos del trabajo de investigación.
- Finalmente, se presenta la sección de "Conclusiones y Recomendaciones" donde se presentan las principales conclusiones y se establecen recomendaciones para trabajos futuros.

Capítulo II

Fundamento teórico

En este Capítulo se describen de manera general los conceptos y fundamentos de transferencia de calor. Así como, se presentan los tipos de intercambiadores de calor, los tipos de clima y suelos de la región. Lo anterior, con el objetivo de tener un fundamento teórico y matemático para los capítulos posteriores.

2.1 Fundamentos de transferencia de calor

El calor es energía en tránsito debido a una diferencia de temperatura [21]. La transferencia de calor es un fenómeno que ocurre siempre que existe una diferencia de temperatura en un cuerpo o entre cuerpos. Existen principalmente tres maneras en las que puede transferirse el calor: conducción, convección y radiación.

2.1.1 Conducción

La conducción es un tipo de transferencia de calor y se considera como la transferencia de energía de las partículas más energéticas a las menos energéticas de una sustancia debido a las interacciones entre las mismas. La Ecuación (2.1) que describe el fenómeno de transferencia de calor por conducción, es La ley de Fourier.

$$q''_{cond} = -\lambda \frac{dT}{dx} \quad (2.1)$$

Donde, q''_{cond} es el flujo de calor por conducción, λ es la conductividad térmica del material, dT/dx es la variación de temperatura en la dirección x , y el signo negativo se agrega debido a que la transferencia de calor se da en sentido opuesto al gradiente de temperatura. Si se considera una distribución de temperatura lineal, la Ecuación (2.1) se puede expresar mediante,

$$q''_{cond} = -\lambda \frac{T_2 - T_1}{L} \quad (2.2)$$

Donde, $T_2 - T_1$ representa el diferencial de temperatura entre dos puntos y L es la distancia perpendicular al área de transferencia.

2.1.2 Convección

La transferencia de calor por convección se compone de dos mecanismos. Que consiste en la transferencia de energía debido al movimiento molecular aleatorio (difusión) y la transferencia mediante el movimiento global o macroscópico del fluido. Este tipo de transferencia de calor se puede manifestar de manera natural o de manera forzada.

La convección natural es aquella en donde las moléculas del fluido se mueven debido a diferencias de densidad, que resultan del calentamiento o enfriamiento del fluido. Mientras que la convección forzada el fluido se mueve por la acción de una fuerza externa. Para determinar la transferencia de calor por convección de cualquier tipo, se utiliza la *ley de enfriamiento de Newton*, Ecuación (2.3).

$$q''_{conv} = h(T_{sup} - T_f) \quad (2.3)$$

Donde q''_{conv} es el flujo de calor por convección, $(T_{sup} - T_f)$ representa la diferencia de temperatura entre la superficie y el fluido circundante y h es el coeficiente de transferencia de calor por convección, también llamado coeficiente convectivo. El signo resultante se considera positivo cuando el calor proviene desde la superficie y se considera negativo cuando el calor se dirige hacia la superficie.

Existen dos tipos de fluidos de acuerdo a su movimiento, los cuales pueden ser flujo laminar y flujo turbulento. Se le llama *Flujo laminar* cuando el movimiento de un fluido está perfectamente ordenado, estratificado, suave, de manera que el fluido se mueve en láminas paralelas sin entremezclarse; y se llama *flujo turbulento* cuando se hace más irregular, caótico e impredecible, las partículas se mueven desordenadamente y las trayectorias de las partículas se encuentran

formando pequeños remolinos aperiódicos. Aparece a velocidades altas o cuando aparecen obstáculos abruptos en el movimiento del fluido [22].

Para aplicaciones prácticas se calcula el número de Reynolds, Re (Ecuación 2.4) para determinar si el flujo es laminar o turbulento. Si Re es menor que 2000 el flujo es laminar, si es mayor que 4000 el flujo es turbulento. Para el intervalo entre 2000 y 4000 es imposible determinar qué tipo de flujo existe [23].

$$Re = \frac{\rho V D}{\mu} \quad (2.4)$$

Donde ρ es la densidad del fluido, V es la velocidad del fluido, D es el diámetro del tubo y μ es la viscosidad dinámica.

2.2 Evaluación de ICTA

Un intercambiador de calor es un dispositivo que permite la transferencia de calor de un fluido más caliente a otro menos caliente. La transmisión de calor en estos aparatos es básicamente por conducción y por convección [24].

A partir de la bibliografía leída se realizó un mapa conceptual (Figura 2.1), en el cual se observan las variables a considerar en el diseño de los ICTA. La forma de instalación se refiere a si el tubo va enterrado de manera horizontal o vertical, o bien si el sistema es cerrado o abierto, refiriéndose a la dirección en que circula el aire. Existen muchas variables de diseño que afectan, las principales o que tienen mayor efecto en los estudios hasta ahora son: el tipo de material, la profundidad a la que se entierra el tubo, la longitud del tubo, el diámetro y el tipo del tubo, y la cantidad de flujo de aire que circula dentro de él. Muchos estudios también han realizado experimentos con los ICTA acoplados con otros sistemas, pueden ser pasivos como chimeneas, ventanas, techos verdes, colectores de calor, etc. o bien con sistemas activos como los aires acondicionados y

calefactores. Otros factores importantes pero no controlables son el clima y suelo de la región donde se desea aplicar un sistema ICTA, estos depende de la humedad, el tipo de suelo, y el clima que puede ser frío, cálido o extremo (este último se refiere a que la temperatura varia por horas del día o por estación del año).

Para medir la eficiencia de los ICTA en general se consideraron tres análisis: el aporte energético, el costo y la reducción de CO₂.

Para en análisis energético del ICTA se puede utilizar la ecuación de continuidad (Ecuación 2.5) considerando un flujo incompresible, para calcular el flujo volumétrico.

$$\dot{V} = VA \quad (1) \quad (2.5)$$

En donde V es la velocidad del flujo y A es el área de la sección transversal del tubo. La capacidad de enfriamiento y calentamiento se determinar de acuerdo a la Ecuación (2.6). Donde el flujo másico se puede calcular con la Ecuación (2.7).

$$Q = \dot{m}C_p\Delta T \quad (2.6)$$

$$\dot{m} = \dot{V}\rho \quad (2.7)$$

Donde, $\dot{m}$ es el flujo másico, C_p es el calor específico del fluido, ΔT es la diferencia de temperatura y ρ es la densidad del fluido.

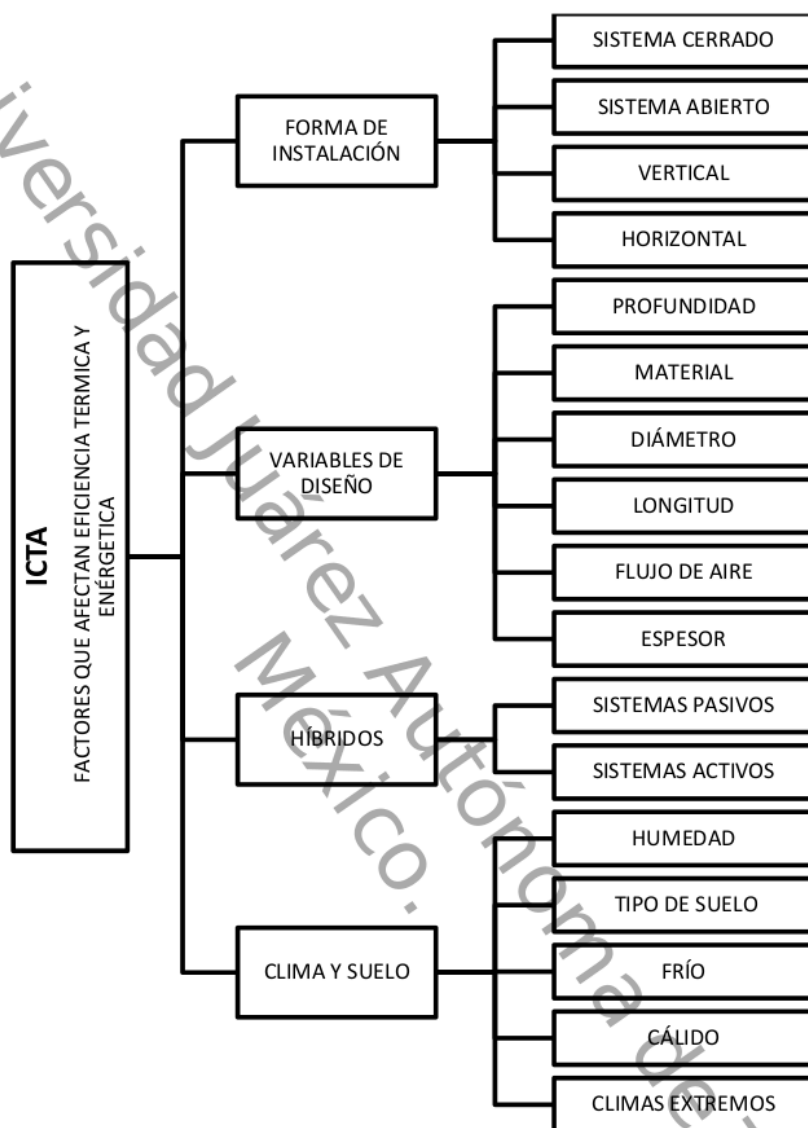


Figura 2.1. Clasificación de los factores que afectan la eficiencia térmica y energética.

Para determinar si un ICTA es viable es necesario conocer el costo del proyecto, incluyendo materiales usados y mano de obra, se deberá conocer el tiempo de vida útil del ICTA (esto dependerá del tipo de material seleccionado) y la

eficiencia. Para conocer si el ICTA es viable económicamente el ahorro que represente el ICTA debe ser mayor que el costo de la implementación. También, para conocer el ahorro económico generado por el ICTA es necesario conocer las Tarifas de la Comisión Federal de Electricidad (CFE) [25], las cuales se presentan en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1. Tarifas CFE

Tarifa CFE		
10		
Consumo básico	\$ 0.793	Cada uno de los primeros 75 kW h
Consumo medio	\$ 0.956	Cada uno de los siguientes 65 kW h
Consumo excedente	\$ 2.802	Cada kW h excedente

Existen otros parámetros aparte del energético y el económico, para medir la eficiencia del ICTA, la cual es la reducción de CO₂, esto es importante debido a que es una forma de medir el impacto ambiental. La Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) [26] indica que la tasa de cambio entre kW h a CO₂ es: 1kW h = 0.454 kg de CO₂.

2.3 Características climáticas en Tabasco

El estado de Tabasco cuenta con 17 municipios y está ubicado en la región sureste del país, limitando al norte con el Golfo de México (océano Atlántico), el este con Campeche, al sureste con Guatemala, al sur con Chiapas y al oeste con Veracruz.

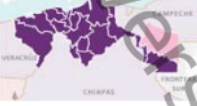
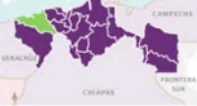
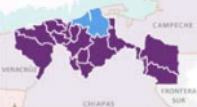
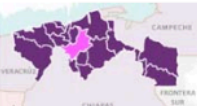
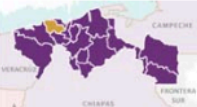
El 95.5% de la superficie del estado presenta clima cálido húmedo, el restante 4.5% es clima cálido subhúmedo hacia la parte este del estado. La temperatura promedio anual en la entidad es de 27°C, la temperatura máxima promedio es de 36°C y se presenta en el mes de mayo, la temperatura mínima promedio es de 18.5°C durante el mes de enero [27].

Existen diferentes tipos de suelos en el estado de Tabasco, los principales son:

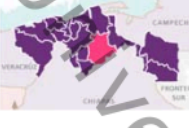
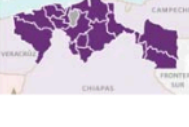
- **Acrisoles:** son suelos ácidos, ricos en materia orgánica, deficientes en fósforo y bases intercambiables.
- **Andasoles:** son suelos de origen volcánico.
- **Cambisoles:** son suelos muy arcillosos, presentan agrietamientos en las épocas de secas y problemas de drenaje.
- **Feozem:** son suelos ricos en materia orgánica.
- **Fluvisoles:** son suelos asociados generalmente a las márgenes de los ríos.
- **Gleysoles:** son suelos generalmente de texturas arcillosas o francas, que presentan problemas de exceso de humedad por deficiente drenaje.
- **Litosoles:** son suelos que presentan poca profundidad, limitados por estratos duros y coherentes (rocas) dentro de los primeros diez centímetros.
- **Regosoles:** son suelos arenosos rojos, ácidos, deficientes en fósforo y de mediana fertilidad.
- **Rendzina:** son suelos ricos en materia orgánica y materiales calcáreos, generalmente asociados a pendientes abruptas.
- **Solonchak:** son suelos salinos.
- **Vertisoles:** son suelos muy arcillosos, presentan fuertes agrietamientos en la época de sequía.

En la Tabla 2.2 se puede observar los tipos de suelo y clima clasificados por municipio [28].

Tabla 2.2. Características de los municipios de Tabasco [28].

Municipio	Localización	Clima	Tipo de suelos
BALANCÁN 	Se localiza en la región Usumacinta, entre los paralelos 17°48' latitud norte y 91°32' longitud oeste.	El clima es cálido-húmedo y cálido-subhúmedo (región noreste). Tiene una temperatura promedio anual de 32°C y la mínima absoluta alcanza los 20°C. La humedad relativa se estima en un máximo de 90% en los meses de septiembre y octubre, un mínimo de 74% en abril y mayo.	En el noroeste, se presentan suelos <i>gleysoles</i> . En la zona centro-sur, suelos <i>vertisoles</i> . En el centro-norte se tienen suelos <i>cambisoles</i> . Al oeste se tienen <i>rendzinas</i> . En los límites con los municipios de Emiliano Zapata y Tenosique se tienen <i>regosoles</i> . En menor proporción cuenta con suelos <i>feozem</i> , así como <i>fluvisoles</i> .
CÁRDENAS 	Se localiza en la región de la Chontalpa la que se ubica en los paralelos 17°59' latitud norte y 91°32' de longitud oeste.	Su clima es cálido-húmedo con abundantes lluvias en verano; se tiene una temperatura promedio anual de 26°C, siendo la máxima promedio mensual en mayo con 30.3°C y la mínima promedio en diciembre y enero de 20°C.	La mayoría de la superficie son <i>gleysoles</i> . En la región norte existen suelos <i>regosoles</i> . Alrededor de las principales lagunas se tienen suelos <i>solonchak</i> . También tienen suelos <i>cambisol</i> y <i>fluvisol</i> ,
CENTLA 	Se localiza al norte del estado, entre los paralelos 18°40' de latitud, al sur 18°02' de latitud norte, al este 92°16', y 93°05' de longitud oeste.	El clima es cálido húmedo con abundantes lluvias en verano, con una temperatura máxima promedio de 30.8°C, la mínima promedio de 20.5°C, registrándose la más alta en el mes de mayo y la mínima en los meses de diciembre-enero.	La mayoría de la superficie del municipio son <i>gleysoles</i> . Al norte del municipio se tienen suelos <i>regosoles</i> . Limitando con estos suelos y cerca de la costa existen suelos <i>solonchak</i> .
CENTRO 	Se localiza en la región de entre los paralelos 18°20' de latitud norte y 93°15' de longitud oeste.	El clima cálido-húmedo con abundantes lluvias en verano, tiene una temperatura promedio anual de 33.6°C, siendo la máxima promedio mensual en mayo con 29.8°C y la mínima promedio mensual en diciembre-enero con 22.8°C.	La mayor parte de la superficie de su territorio está clasificada como <i>gleysoles</i> . En la región central del municipio están los suelos de la clase <i>fluvisol</i> . En la región sureste, limitando con los municipios de Macuspana y Jalapa se tienen suelos <i>cambisoles</i> y <i>vertisoles</i> .
COMALCALCO 	Se localiza en la región noroeste del estado, de entre los paralelos 18° 16' de latitud norte y 93°12' de longitud oeste.	El clima es cálido húmedo con abundantes lluvias en verano, tiene una temperatura promedio anual de 26.4°C, siendo la máxima promedio mensual en mayo con 30.5°C y la mínima promedio en diciembre y enero con 22°C.	La mayor parte de la superficie es <i>gleysoles</i> . En la parte norte del municipio y limitando con los municipios de Paraíso y Cárdenas se tienen suelos <i>Solonchak</i> .

CUNDUACÁN 	Se localiza en la región de la Chontalpa, ubicada entre los paralelos 18°03' de latitud norte y 93°10' de longitud oeste.	El clima es cálido-húmedo con abundantes lluvias en verano, régimen normal de calor con cambios térmicos en los meses de diciembre y enero; se aprecia una temperatura promedio anual de 26.2°C, siendo la máxima promedio mensual en mayo con 30.5°C y la mínima promedio mensual en diciembre y enero con 22.5°C.	La mayoría de la superficie está clasificada como gleysoles. También encontramos suelos clasificados como fluvisoles, asociados a las márgenes del río Samaria, el cual atraviesa al municipio de oeste a este.
EMILIANO ZAPATA 	Se localiza en la región de Usumacinta y se encuentra ubicada al sur del estado, entre los paralelos 17°44' de latitud norte y 91°46' de longitud oeste.	El clima es cálido-húmedo, con abundantes lluvias en verano. Tiene una temperatura promedio anual de 26.55°C, siendo la máxima promedio mensual en mayo de 30.9°C y la mínima promedio de 22.7°C en enero.	La mayor parte de la superficie son gleysoles. En la región central, principalmente en los límites con los municipios de Balancán y Tenosique, se tienen regosoles. En la parte central hay un área clasificada como cambisol.
HUIMANGUILLO 	Se localiza en la región de la Chontalpa y se ubica al este del estado, entre los paralelos 17°19' de latitud norte y 93°23' de longitud oeste.	Se aprecian dos tipos de clima: el cálido húmedo con abundantes lluvias en verano; su temperatura promedio anual es de 26.2°C, siendo la máxima promedio mensual en mayo con 30.6°C.	En la parte norte del municipio se tienen suelos gleysoles, En la vasta región este y sur existen suelos acrisoles. En la parte central se tienen suelos cambisoles y andasoles. Al sur se tienen suelos rendzina. Finalmente en las márgenes de los ríos se tienen suelos fluvisoles.
JALAPA 	Se localiza en la región de la Sierra y se ubica del estado, entre los paralelos 17°38' de latitud norte; al este 92°40'; al oeste 92°56' longitud	El clima es cálido húmedo, con lluvias todo el año y cambios térmicos en se aprecia una temperatura promedio de 25.7°C, teniendo la máxima de 42°C y la mínima de 10°C.	En la parte norte del municipio tienen suelos vertisoles y acrisoles. En la parte central del municipio existen suelos fluvisoles. En la región sur se tienen suelos gleysoles.
JALPA DE MÉNDEZ 	Se localiza en la región de la Chontalpa y está ubicada al Norte 18°25', al Sur 18°04' de latitud Norte, al Este 90°00', al Oeste 93°13' de longitud.	El Clima es cálido húmedo, se aprecia una temperatura promedio anual de 26.42°C , siendo la máxima promedio mensual en junio de 30.5°C y la min. promedio mensual en diciembre-enero con 22.5°C.	La mayor parte de la superficie son suelo gleysoles. En la parte Norte áreas de suelos solonchak.
JONUTA 	Se localiza en la región de los Ríos y se ubica al sur del estado, entre las coordenadas norte 18°28'; sur 17°48' de latitud norte; al este 91°46' y 92°21' de longitud oeste.	El clima es cálido húmedo con abundantes lluvias en verano tiene una temperatura promedio anual de 26.5°C, siendo la máxima promedio mensual en mayo con 30.8°C y la mínima promedio en los meses de diciembre-enero con 22.9°C.	La mayor parte de la superficie está clasificada como gleysoles. En la parte central del municipio se tienen suelos vertisoles. Asociados a las márgenes del río Usumacinta se tienen suelos fluvisoles.

MACUSPANA 	Se localiza en la región de la sierra y se ubica al sur del estado, entre los paralelos 17°45' y 92°32' de latitud oeste.	El clima es cálido húmedo con abundantes lluvias en verano; tiene una temperatura promedio anual de 23.6°C, siendo la máxima promedio mensual en abril con 30.1°C y la mínima promedio en mayo con 29.8°C.	En la parte sur, norte y este del municipio, se tienen suelos gleysoles. Al este se tienen suelos vertisoles. En la parte central del municipio encontramos suelos fluvisoles y acrisoles, así como rendzinas. Finalmente se encuentran pequeñas áreas de fluvisoles.
NACAJUCA 	Se localiza en la región de la Chontalpa y ubicada al Norte del estado, entre los paralelos 18°09' de latitud Norte y 93°01' de longitud Oeste.	El clima es cálido húmedo con abundantes lluvias en verano; tiene una temperatura promedio anual de 26.4°C siendo la máxima promedio mensual en mayo de 30.8°C y la mínima promedio en enero con 22.4°C.	En la región Noroeste y Suroeste se encuentran suelos gleysoles. En la parte central y Sur del municipio se tienen suelos fluvisoles. Al Norte limitando con el municipio de Centla, existen suelos solonchak.
PARAISO 	Se localiza en la región de la Chontalpa ubicada entre los paralelos 18°27', de latitud norte y 93°32' de longitud oeste.	El clima es cálido-húmedo, Mayo es el mes más caluroso y la temperatura máxima promedio es de 30.5°C, la mínima se registra en el mes de enero y es de 22°C; la temperatura promedio anual es de 26°C.	La mayoría de la superficie municipal está clasificada como gleysoles. En el norte del municipio, se tienen suelos rogosoles; alrededor de las principales lagunas y cerca de la costa se tienen suelos solonchak.
TACOTALPA 	Se localiza en la región de la sierra, ubicada al sur del estado, entre los paralelos 17°35'05" de latitud norte y 92°49'06" de longitud oeste.	El clima es cálido húmedo con abundantes lluvias todo el año. Se aprecia una temperatura promedio anual de 25.6°C, siendo la máxima promedio mensual de 29.2°C en el mes de mayo, la mínima promedio mensual de 22°C en los meses de diciembre y enero.	La mayoría de la superficie son suelos gleysoles. En los límites con el estado de Chiapas, se tienen suelos rendzinas, En la región centro sur se tienen suelos crisoles y luvisoles.
TEAPA 	Se localiza en la región de la sierra y se ubica al sur del estado entre los paralelos 17°32' de latitud norte y los 92°57' de longitud oeste.	El clima es cálido húmedo con lluvias todo el año; tiene una temperatura promedio anual de 27.8°C, siendo la máxima promedio mensual en junio con 31.7°C y la mínima promedio en diciembre con 23.8°C.	La mayor parte de la superficie está clasificada como suelos gleysoles. En la región central y en las márgenes de los ríos se tienen fluvisoles. Al sur se presentan los acrisoles.
TENOSIQUE 	Se localiza en la región de los ríos, y se ubica al sur del estado, entre los paralelos 17°28.5' de latitud norte y los 91°25.6' de longitud oeste.	El clima es cálido húmedo con abundantes lluvias en verano, tiene una temperatura promedio anual de 30.5°C y la mínima absoluta se mueve entre los 28.4°C y 26.9°C.	El municipio cuenta con diversidad de suelos. Al este, limitando con el municipio se tienen suelos vertisoles. En la parte central del municipio se tienen suelos cambisoles y gleysoles. También se encuentran suelos fluvisoles. En la parte noroeste encontramos suelos rogosoles. Al sur se tienen suelos litosoles.

2.4 Estimación de incertidumbre

Para calcular la incertidumbre de medición en esta investigación se contempla el uso del *método de propagación de incertidumbre* de acuerdo con los lineamientos del Centro Nacional de Metrología (CENAM) [29]. La incertidumbre se puede obtener para diferentes casos, existen dos tipos de evaluaciones, tipo A y tipo B, y una combinación de ambas.

Evaluación tipo A: el cálculo de esta incertidumbre, está basada en un análisis estadístico de una serie de mediciones. Este tipo de evaluación requiere condiciones de repetitividad, ya que se estima con base a la dispersión de los resultados individuales.

Para esta evaluación se determina que el mejor estimado x_i para el valor de X_i (magnitud de entrada) es la promedio de los resultados individuales $q_1, q_2, \dots, q_n$. Siendo n el número de mediciones independientes. La incertidumbre estándar $u(x_i)$ de X_i se obtiene finalmente mediante el cálculo de la desviación estándar experimental de los datos, Ecuación (2.8).

$$u(x_i) = \frac{1}{\sqrt{n}} \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{k=1}^n (q_k - \bar{q})^2} \quad (2.8)$$

Evaluación tipo B: en esta evaluación es necesario usar información externa u obtenida por experiencia. Las fuentes de información pueden ser:

- Certificados de calibración.
- Manuales del instrumento de medición, especificaciones del instrumento.
- Normas o literatura.
- Valores de mediciones anteriores.
- Conocimiento sobre las características o el comportamiento del sistema de medición.

Combinación de incertidumbre

La incertidumbre estándar combinada $u_c(y)$ es el resultado de la combinación de las contribuciones de todas las fuentes de incertidumbre. La Ecuación (2.9) es conocida como la *ley de propagación de incertidumbre*.

$$u_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^n (C_i * u(x_i))^2} = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} * u(x_i)\right)^2} \quad (2.9)$$

Donde, C_i es el coeficiente de sensibilidad.

Capítulo III

Desarrollo del ICTA

En este Capítulo se presentan consideraciones y especificaciones para el desarrollo, diseño, construcción e instrumentación del ICTA, así como, el procedimiento experimental.

3.1 Selección del lugar de implementación del ICTA

Para la selección del lugar donde se ubicó el ICTA se realizaron mediciones de temperatura del suelo a diferentes profundidades, con una sonda con sensores de temperatura, en tres áreas de la DAIA en Cunduacán, las cuales se pueden observar en la Figura 3.1. La temperatura se midió con una sonda con sensores RTD la cual fue diseñada para medir la temperatura cada 0.20 m, y se conecta a un sistema de adquisición de datos Keysight 34972a.



Figura 3.1. Mapa de ubicación de las tres zonas.

En cada zona, se obtuvieron mediciones de temperatura durante aproximadamente 6 horas, en la Figura 3.2 se observa el comportamiento de la temperatura para la zona 1. Se puede observar que a partir de 2 m la temperatura permanece sin cambios significativos, y que el promedio de temperatura a esa profundidad fue de aproximadamente 27°C.

El comportamiento de temperatura de suelo, para las tres zonas seleccionadas presentó diferencias poco significativas. Por lo cual, la selección de la zona se basó en el lugar que presentó mayores ventajas para la instalación, instrumentación y monitoreo del sistema. Se seleccionó la zona 3 debido al espacio con menor tránsito de personas, además de ser la zona que cuenta con un taller cerca donde se puede instalar y resguardar el sistema de adquisición de datos con mayor facilidad.

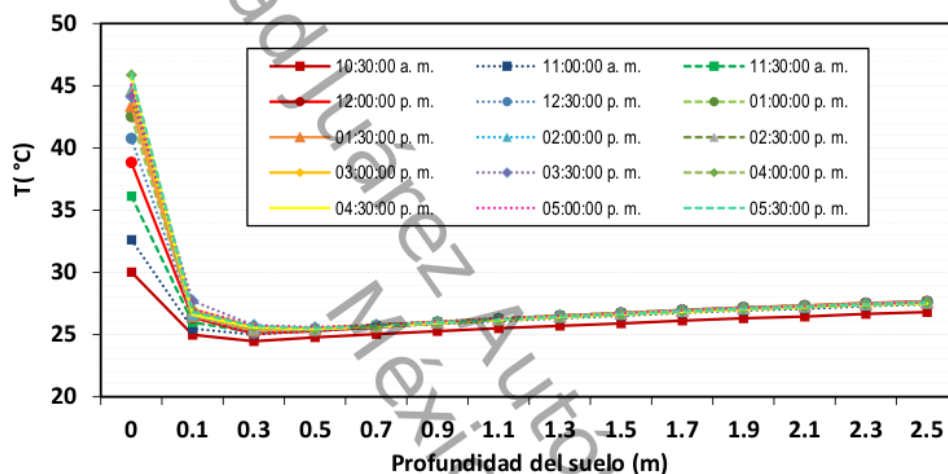


Figura 3.2. Resultados de las mediciones de Temperatura del suelo.

3.2 Diseño, construcción e instrumentación

Para el diseño del ICTA se estudiaron trabajos previos del ICTA, en la Tabla 3.1 se muestra un resumen de los principales trabajos revisados. Como puntos importantes cabe destacar que en la mayoría de los trabajos revisados consideran que el ICTA horizontal es más eficiente que el vertical, así como también, considera que la temperatura del suelo presenta diferencias de temperatura poco significativas después de los 2 m de profundidad. Por lo cual, se considera que si existen dificultades técnicas o de costo para lograr una mayor profundidad, por lo que no es necesario rebasar los 2 m de profundidad ya que la diferencia de temperatura es poco significativa. Respecto a los datos,

reportados de las dimensiones del ICTA se pudo observar que el diámetro usado más frecuentemente en tubería de PVC es de aproximadamente 101.6 mm (4"), y el largo ha variado de 3.8 a los 643 m (este último en un diseño de ICTA para abastecer un edificio). Kamal Kumar Agrawa *et al.* [15] indica que cuando el suelo tiene una humedad alta la temperatura de salida del ICTA se alcanza en un menor trayecto del tubo.

Tabla 3.1. Resumen de dimensiones de trabajos previos de ICTA.

No.	Autor	Año	Tipo	Profundidad	Largo	Diámetro	Material	Espesor
1	Rohit Misraa <i>et al.</i> [19]	2012	H	3.7	60m	110mm	PVC	-
2	R. D. Patel <i>et al.</i> [8]	2016	H	3 m	25 m	110mm	RCC	3mm
			V	8m	3.8m	610 mm	PVC	-
3	H. Li <i>et al.</i> [16]	2013	H	3m	57m	450 mm	Acero	-
4	D. Belatrache <i>et al.</i> [30]	2016	H	5m	45 m	80 mm	PVC	4mm
5	O. A. Meneses. [31]	2007	H	4.5 m	643m	250 mm	PVC	-
6	C. A. Arias Henao. [32]	2015	H	2m real ideal 7m	6.843 m	25.4 mm	PVC	-
			H	2m real ideal 7m	41.93 m	50.8 mm	PVC	-
			H	2m real ideal 7m	23.877 m	101.6 mm	PVC	-
7	S. Jakhar <i>et al.</i> [33]	2016	H	3.7m	60m	100 mm	PVC	-
8	L. Ramírez-dávila <i>et al.</i> [7]	2014	V	10m	5m	150 mm	-	-
9	J. Vaz <i>et al.</i> [34]	2013	H	.6m	42m	110 mm	PVC (brown)	-
			H	1.6 m	42m	110 mm	PVC (brown)	-
			H	.5m	42m	100 mm	PVC (white)	-
10	M. Jia <i>et al.</i> [11]	2015	H	1.2 m	7.7 m	36mm	Acero	3mm
11	A. A. Serageldin <i>et al.</i> [35]	2016	H	2 m	5.5 m	508 mm	PVC	-
12	T. Singh Bisoniya <i>et al.</i> [9]	2014	H	2m	19.23 m	.1016m	PVC	-
13	S. Kumar Soni <i>et al.</i> [20]	2016	H	3m	9m	50 mm	Acero	-

Continuación Tabla 3.1...

14	S. Menhoudj <i>et al.</i> [12]	2017	H	Real 2 m	20m	120 mm	PVC/ZI NC	4mm /2mm
15	P.M. Congedo <i>et al.</i> [13]	2014	H	2.5/3.5 m	5m	200 mm	PE	-
16	A.Pateriya <i>et al.</i> [36]	2017	H	1.5 m	6m	180 mm	PVC	3mm
17	M. Cuny <i>et al.</i> [14]	2017	H	.75m	30 m	-	PVC	-
18	K. Kumar Agrawal <i>et al.</i> [15]	2017	H	3.7	60m	100 mm	PVC	3mm

Considerando la información obtenida de la revisión bibliográfica, se propuso el diseño del ICTA con las siguientes dimensiones, profundidad de 2.5 m, 6 metros de largo y 101.6 mm (4") de diámetro. En la Figura 3.3 se observa el diseño propuesto del ICTA. Se puede observar que el tubo vertical de salida presenta un mayor diámetro, debido a que esta sección del tubo se aisló con poliestireno extruido. Sin embargo, en el interior se cuenta con un tubo de PVC de 101.6 mm (4").

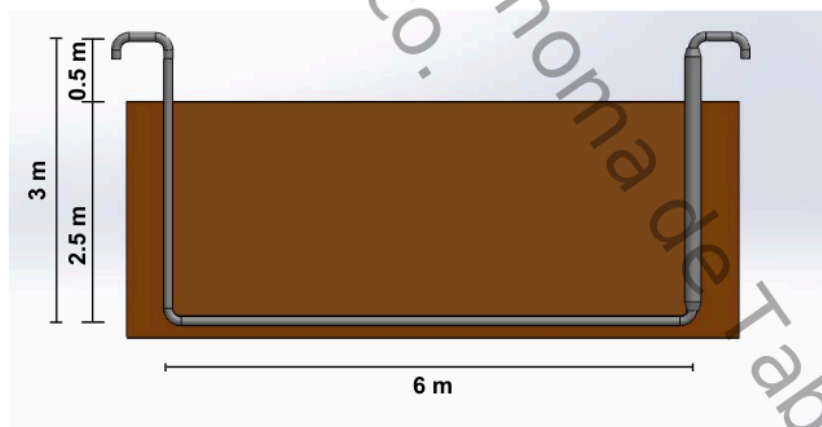


Figura 3.3. Diseño del ICTA.

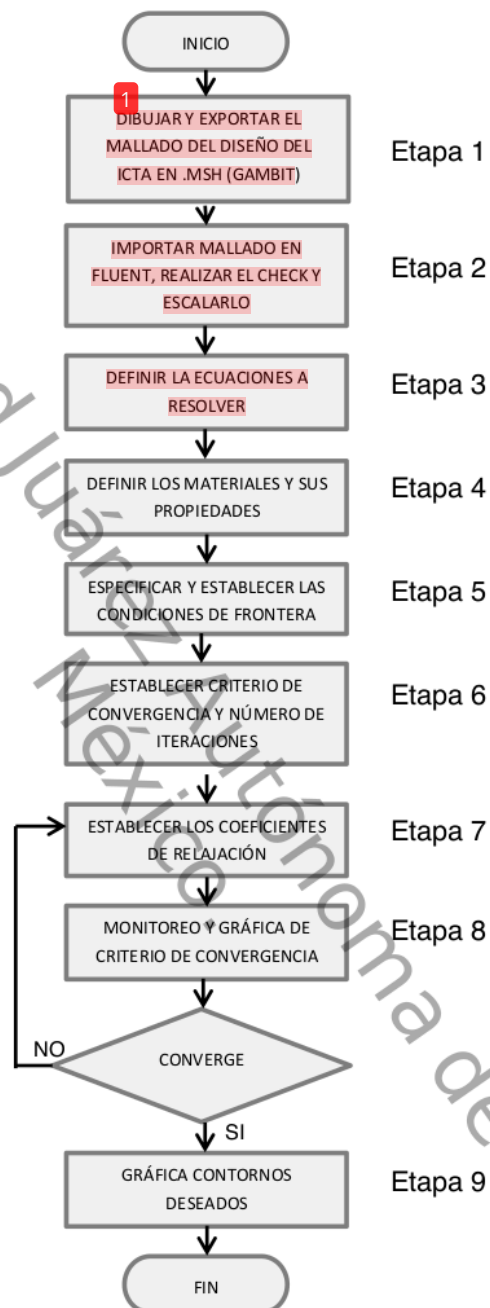
3.2.1 Simulación en CFD

Con el fin de analizar el comportamiento del fluido que se podría alcanzar en el ICTA propuesto, se realizó un análisis computacional del ICTA utilizando las herramientas computacionales GAMBIT y FLUENT, con este último, se obtuvo el comportamiento de los perfiles de velocidad y temperatura.

GAMBIT (pre-procesador) es una herramienta en el cual se realizó el modelo y discretización (mallado) del ducto y FLUENT (procesador) es una herramienta en la se realiza la simulación para obtener el comportamiento de velocidad y temperatura. En la Figura 3.4 se muestra un diagrama de flujo del procedimiento por etapas, que se llevó a cabo para realizar el proceso de simulación.

En la Etapa 1 del procedimiento se consideró el modelo del ICTA de la Figura 3.3. Para la discretización del modelo se utilizó un mallado con elementos "hex" del tipo "map" con una razón de aspecto entre 0 y 1. Durante el mallado se obtuvo un total de nodos de 104, 643.

En la Figura 3.5 se muestra el dibujo mallado, donde se establecieron las condiciones de frontera para cada cara. Estas fueron, fue considerada como una pared, con propiedades específicas como se muestra en la Tabla 3.2.

**Figura 3.4.** Metodología de simulación.

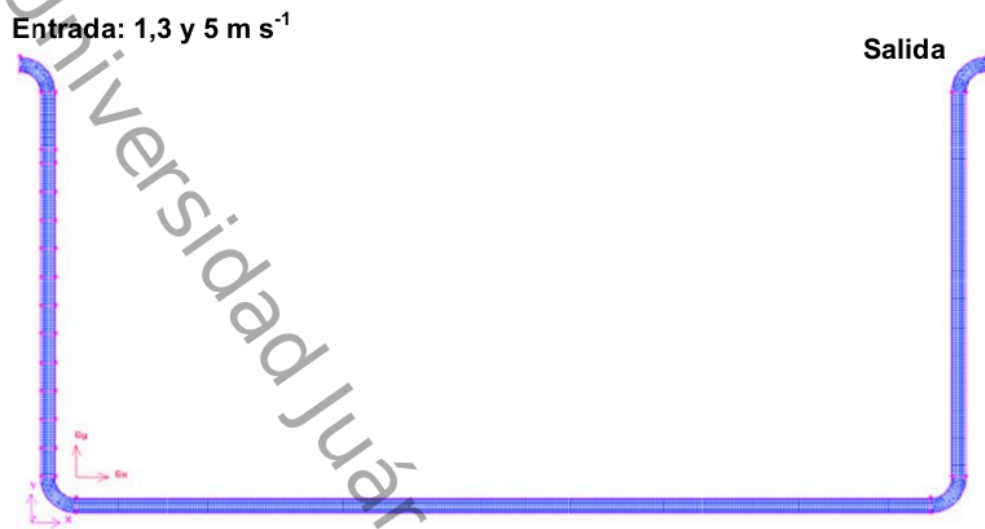


Figura 3.5. Dibujo y mallado del ICTA en GAMBIT.

El archivo del mallado, *.msh, fue importado a FLUENT y se escaló en cm. Se definieron las ecuaciones a resolver, así como, los materiales y propiedades del fluido. Como fluido se consideró aire y como material sólido de las paredes se seleccionó el policloruro de vinilo (PVC). Se definieron las características y se establecieron las condiciones de frontera para cada cara. El tubo vertical de salida se estableció como aislado. Las propiedades de los materiales considerados se muestran en la Tabla 3.2.

Tabla 3.2. Características y propiedades del fluido y paredes del ICTA.

Propiedades	Fluido (Aire)	Pared del ducto (PVC)	Aislante
λ (W m ⁻¹ K ⁻¹)	0.0242	0.25	Se especificó como pared aislada (q= 0)
ρ (g m ⁻³)	1225	370	
C _P (J g ⁻¹ K ⁻¹)	1.006	80	
T _{amb} (°C)	36		
T _s (°C)	27		

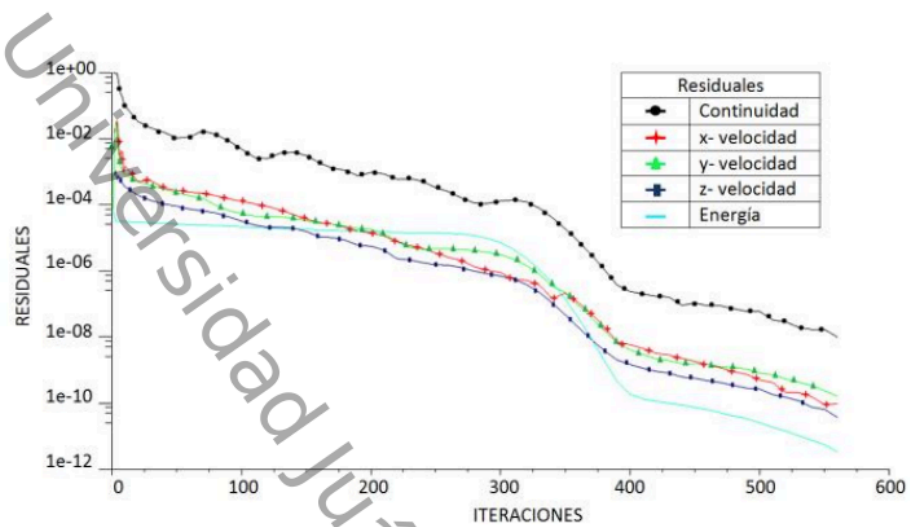
Para realizar las simulaciones se establecieron tres casos; para el caso I: la velocidad de entrada fue de 1 m s^{-1} , para el caso II de 3 m s^{-1} y para el caso III de 5 m s^{-1} . El criterio de convergencia de las ecuaciones gobernantes del sistema se estableció en 1×10^{-8} como residual para todos los casos. En las Figuras 3.6, 3.7 y 3.8 se muestran los residuales y contorno de temperatura obtenidos para el Caso I, Caso II y Caso III respectivamente. Para el Caso I, la solución del modelo convergió aproximadamente a las 600 iteraciones, para el Caso II se obtuvo antes de las 450 iteraciones y finalmente, para el Caso III, cerca de las 400 iteraciones.

En el comportamiento de los contornos de temperatura obtenidos, se observa que para el caso I, la temperatura máxima de salida fue de 31°C (304 K). Para el Caso II, se obtuvo una temperatura de aproximadamente 33°C (306 K) y por último, para el caso III se obtiene una temperatura de salida de aproximadamente 34°C (307 K).

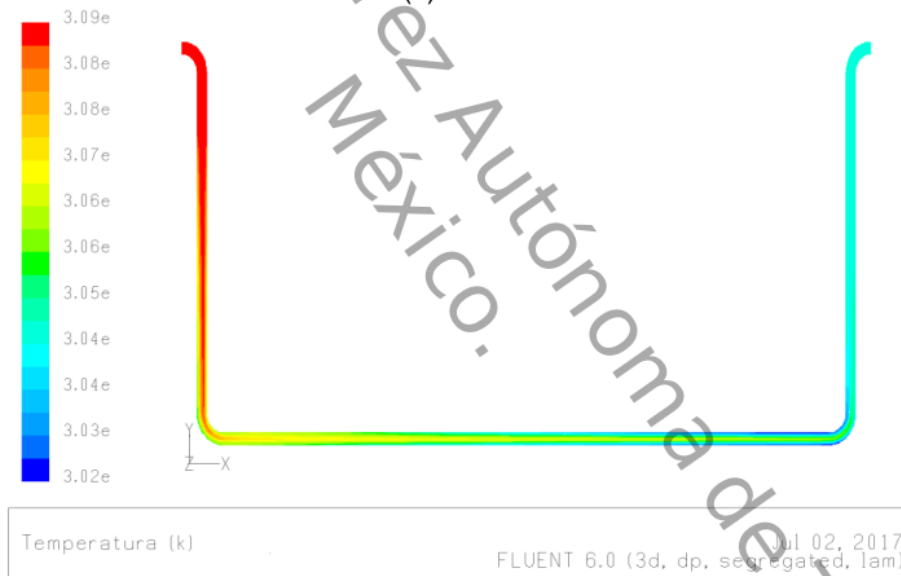
En la Tabla 3.3 se presenta un concentrado de los resultados obtenidos para los tres casos de estudio. Como se observa en los resultados obtenidos, la diferencia entre la temperatura de salida del Caso II y III fue de tan solo 1.0°C . Mientras que, el Caso I obtuvo la máxima diferencia, 5°C . Puede observarse que a medida que se incrementa la velocidad la ΔT disminuye.

Tabla 3.3. Resumen de los resultados obtenidos de simulación del ICTA.

Caso	V (m s^{-1})	T _{in} ($^\circ\text{C}$)	T _{out} ($^\circ\text{C}$)	ΔT ($^\circ\text{C}$)
I	1	36	31	5
II	3	36	33	3
III	5	36	34	2

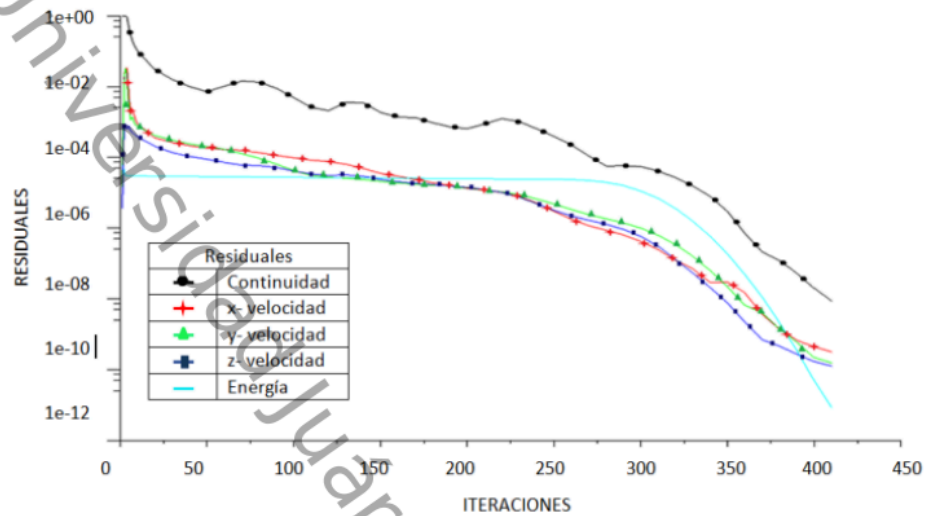


(a) Residuales

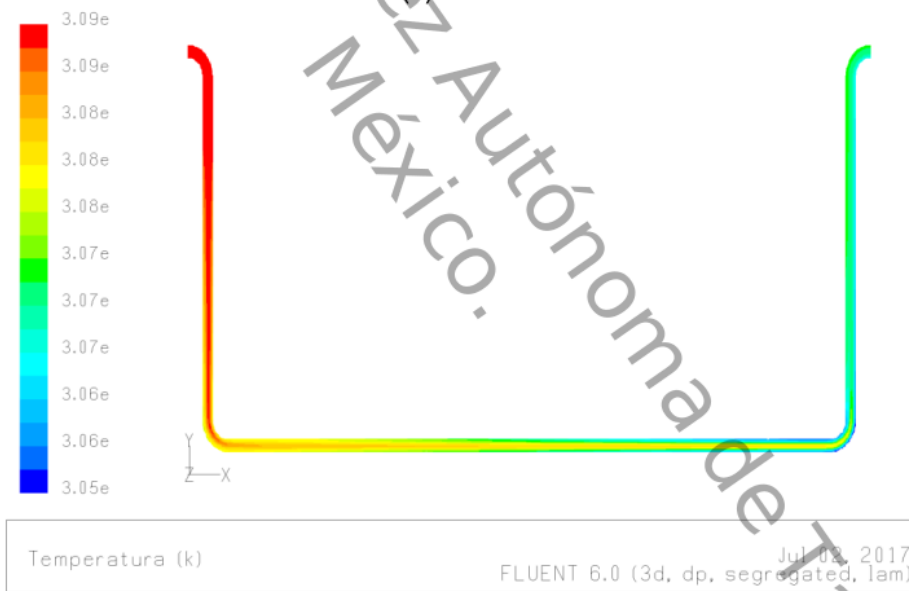


(b) Contorno de Temperatura

Figura 3.6. Residuales y contorno de temperatura del Caso I.

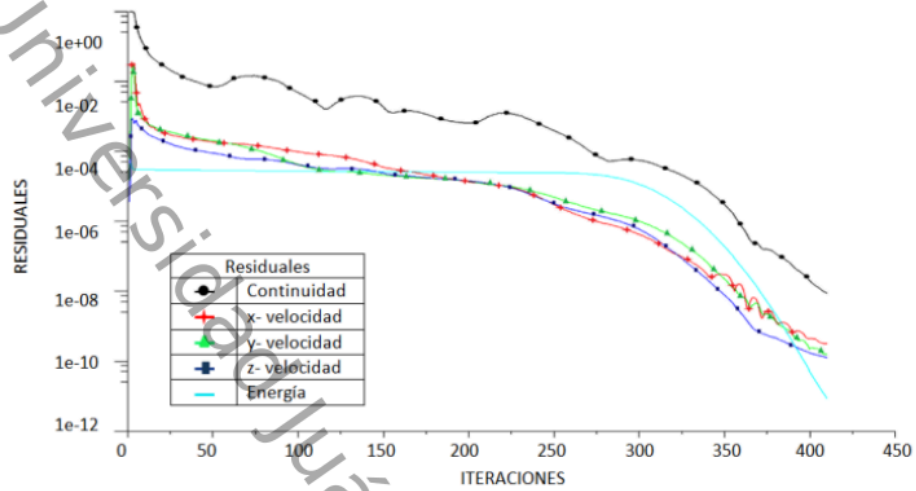


(a) Residuales

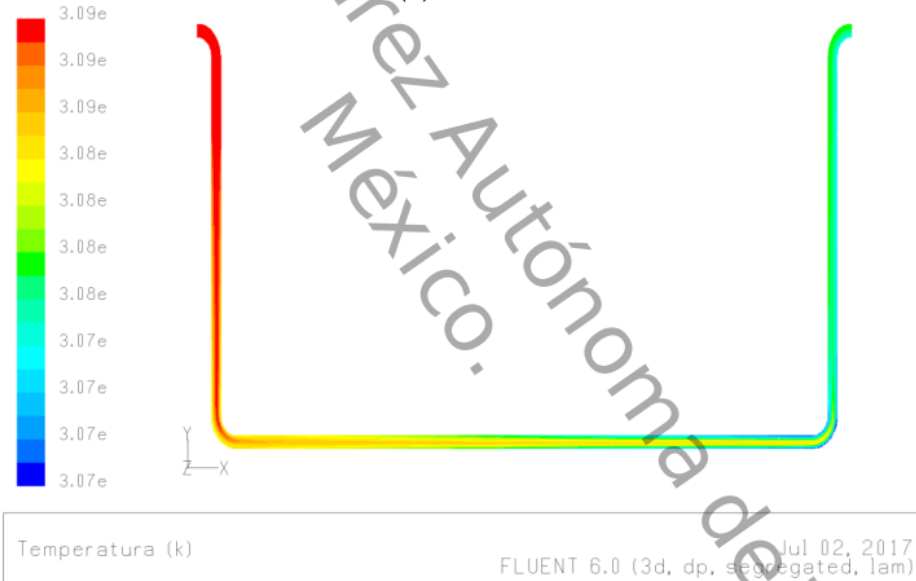


(b) Contorno de Temperatura

Figura 3.7. Residuales y contorno de temperatura del Caso II.



(a) Residuales



(b) Contorno de Temperatura

Figura 3.8. Residuales y contorno de temperatura del Caso III.

1 Los resultados obtenidos sugieren que para incrementar la ΔT , la velocidad del fluido más adecuada, de acuerdo a este estudio es de 1 m s^{-1} (Caso I), es decir, cuando la velocidad de entrada es más baja. Esto es, debido a que el

tiempo de residencia del fluido en el ducto es mayor que para el Caso II y III.

Estos resultados indican que a medida que se incrementa la velocidad, la ΔT disminuye. Por lo cual, en nuestro diseño de ICTA se considerará una velocidad cercana a 1 m s^{-1} .

3.2.2 Construcción del ICTA

En los trabajos revisados de la literatura sobre ICTA, Tabla 3.1, se pudo observar que el PVC es el material más usado, esto se debe a que investigadores como Rakesh D. Patel *et al.* [8] indican que la influencia del material del tubo en la eficiencia del ICTA, es poco significativa, por lo cual muchos autores optan por el material más económico. La selección del material de nuestro ICTA se basó en la tabla de decisión del ANEXO A, en el cual se obtuvo PVC como el material que nos representa más ventajas.

Las dimensiones del tubo se consideraron en el diseño previo utilizado para la simulación. Para construir el ICTA se necesitaron 2 tramos de tubo PVC de 101.6 mm (4") de diámetro y 6 m de largo, un tramo de tubo PVC de 203.2 mm (8") de 2.5 m de largo, poliestireno extruido o Foamular (aislante), 6 codos y coples de PVC de 101.6 mm (4"), dos reductores de PVC y pegamento para PVC.

En un inicio se cortaron los tramos de tubo PVC de 101.6 mm (4") en tres tramos: tramo vertical de entrada, tramo vertical de salida, y tramo de traslado. Los tramos verticales fueron de 3 m cada uno y el tramo de traslado fue de 6 m. Para el tramo de traslado se pegaron codos en los extremos, dando como resultado una pieza como se muestra en la Figura 3.9.



Figura 3.9. Tubo de traslado del ICTA.

En el caso del tubo vertical de salida (tubo aislado) tuvo un proceso distinto, ya que su construcción consiste en un tubo de PVC de 101.6 mm (4") dentro de un tubo del mismo material pero de 203.2 mm (8") de diámetro. Para realizar esto primero se realizaron 2 reductores de 203.2 mm (8") a 101.6 mm (4") como se muestra en la Figura 3.10.



Figura 3.10. Reductor de 203.2 mm (8") a 101.6 mm (4") de diámetro.

Para continuar el proceso del tubo aislado, se introdujo el tubo de menor diámetro se usó un reductor en un extremo para acoplarlos. En el espacio entre los dos tubos se colocó poliestireno extruido (foamular), se cortó en forma circular con las dimensiones del diámetro de los tubos. Además, se cortó en pequeños trozos para aprovechar el material, así como también asegurar de llenar todos los espacios de entre los tubos. Por último, se selló el otro extremo del tubo con un reductor. En la Figura 3.11 se pueden observar imágenes del proceso de aislamiento del tubo.



(a) Acoplamiento de tubos



(b) Foamular cortado



(c) vista interior de tubo



(d) Sellado de tubo aislado

Figura 3.11. Construcción de tubo vertical de salida (aislado).

Otras piezas que se tuvieron que construir fueron los tramos de entrada y salida de PVC de 101.6 mm (4"), los cuales fueron acoplados con codos del mismo diámetro, para reducir la entrada de polvo, basura y proteger el ICTA de animales. Esta pieza consta de dos codos y un tramo de tubo PVC de 101.6 mm (4") de 0.2 m de largo. En la Figura 3.12 se observan las características de la pieza. Es importante mencionar que en un extremo de cada pieza se colocó una malla para evitar la entrada de insectos, así como se hicieron dos orificios en donde posteriormente se colocaron los sensores de temperatura para monitorear la temperatura a la entrada y salida. En la pieza de entrada se

colocó un ventilador de corriente alterna (AC) de 101.6 mm (4") modelo VNA-117M.



Figura 3.12. Características de pieza de entrada y salida de aire.

Una vez que se obtuvieron todas las piezas necesarias para la construcción del ICTA, se comenzó la excavación de la zanja en la zona de implementación, este proceso duró dos días. La excavación se llevó acabo con ayuda de estudiantes y practicantes del Taller de Forja y Soldadura de la DAIA.

Durante el proceso se tuvieron algunas inconveniencias, a tan solo 0.5 m de profundidad, se encontró exceso de agua, lo cual hizo más complicado la excavación. El exceso de agua fue removido de forma manual y con apoyo de un bomba de agua de $\frac{1}{2}$ hp. En la Figura 3.13 se puede observar el proceso de excavación de la zona.

Durante el proceso de excavación se tomaron cinco muestras de tierra en los siguientes intervalos: 0.2-0.4 m, 0.6-0.8 m, 1.2-1.4 m, 1.6-1.8 m y 2.0-2.2 m las cuales fueron analizadas en un laboratorio externo para obtener el valor de la capacidad calorífica (Cp). El equipo utilizado para obtener el Cp fue un equipo de termogravimetria Evo Labsys de la marca Setaram en el intervalo de 30 a 70°C con una rampa de 2°/min y argón a 20 psi. La selección y tratamiento de estas muestras se encuentran en el ANEXO B.



(a) Inicio de excavación en la zona de implementación



(b) Excavación a 0.75 m



(c) Bombeo de exceso de agua



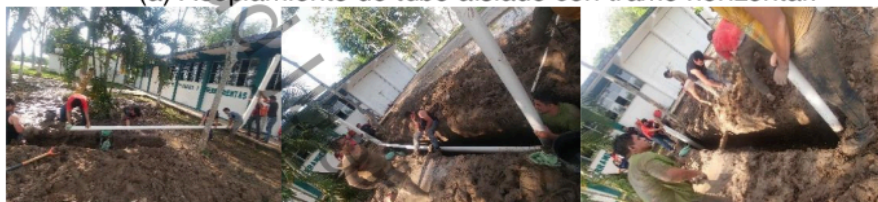
(d) Fin de excavación

Figura 3.13. Proceso de excavación en zona de implementación.

Las secciones descritas en la Figura 3.11 se acoplaron e introdujeron en la zanja previamente obtenida. Debido al exceso de agua, los extremos del ICTA se cubrieron con plástico para evitar la entrada de agua al interior. Para evitar que el tubo flotara debido al exceso de agua, se aplicó fuerza en los extremos del ICTA, se procedió con el entierro del tubo hasta llegar a los 2 m de profundidad y la zanja fue cubierta con tierra, hasta que estuviera 100% llena de tierra. En la Figura 3.14 se pueden observar ambos procesos.



(a) Acoplamiento de tubo aislado con tramo horizontal.



(b) Colocación del tubo en la zona de implementación.



(c) Colocación de tubería en el suelo.

Figura 3.14. Acoplamientos de tramos y enterramiento de ICTA

Una vez enterrados los 3 tramos acoplados del ICTA, se colocaron las secciones de entrada y salida en los extremos del ICTA y se continuó con el proceso de instrumentación del ICTA. En la Figura 3.13 se muestra el ICTA completamente instalado y delimitado.



Figura 3.15. ICTA implementado.

3.2.3 Instrumentación

Para la instrumentación se utilizaron 13 sensores RTD (PT1000 clase B) con incertidumbre de $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$. Se asignaron 11 sensores RTD para medir el perfil de temperatura de la tierra, uno para medir la temperatura en la entrada de ICTA y otro más para medir la temperatura a la salida de este. Para la lectura y recolección de datos, se utilizó el multímetro digital Keysight 34972A como sistema de adquisición de datos conectado a la computadora utilizando el software benchlink data logger.

Para el movimiento del fluido se utilizó un ventilador AC modelo VNA-117M de 15 W de potencia. Para medir la humedad del suelo se implementó una sonda para medir el nivel de agua en la tierra.

Para el cálculo de la velocidad del aire, se midieron velocidades a lo largo del diámetro del tubo con un anemómetro OMEGA FMA 1005R, y se obtuvo un promedio integral de estos valores, obteniendo como resultado una velocidad de $0.9218 \text{ m s}^{-1} \pm 0.014 \text{ m s}^{-1}$.

Calibración de los sensores RTD PT 1000

La calibración de los sensores RTD PT 1000 se realizó en el intervalo de temperaturas de 10°C , 20°C , 30°C y 40°C . Para la calibración se introdujeron los sensores en un baño térmico bajo condiciones preestablecidas y conectadas a un multímetro digital. En Figura 3.14. se muestran el multímetro y la tarjeta multiplexora utilizadas para el monitoreo de las mediciones de temperatura.



Figura 3.16. Multímetro y Tarjeta multiplexora.

Previo a la calibración de los 13 sensores, estos fueron soldados a cables UTP y para evitar corto circuito entre los extremos de cada sensor se utilizó un aislante especial (thermofit) para separarlos, así como también otra capa de thermofit para reforzarlo y evitar el corto circuito entre sensores. En la Figura 3.17 se observa este proceso.

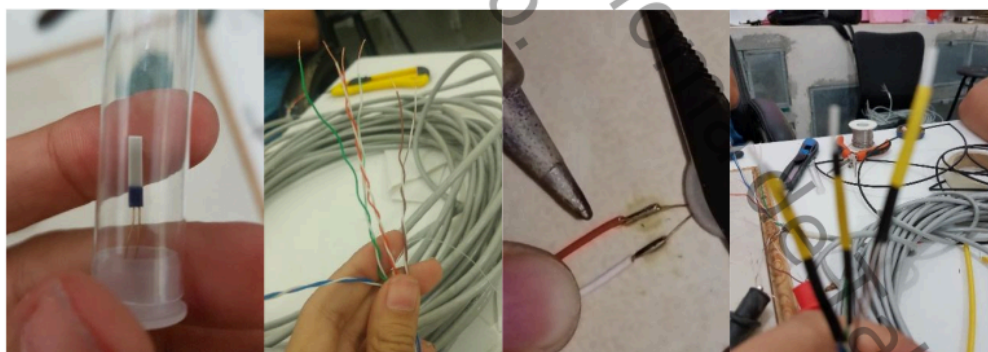


Figura 3.17. Soldadura y aislamiento de los sensores.

Los extremos de los cables UTP fueron conectados a la tarjeta, mientras que los extremos con los sensores fueron introducidos al baño térmico, para iniciar las pruebas de calibración.

Se realizaron 8 pruebas de calibración. Para la primera prueba el baño térmico se fijó a 10°C , se esperó a que se alcanzara y estabilizará la temperatura, para posteriormente iniciar con las mediciones durante 20 minutos. Este proceso se repitió para las temperaturas de baño térmico de 20°C , 30°C y 40°C . Una vez terminadas las primeras 4 pruebas, se volvieron a realizar con un orden descendente de las temperaturas, es decir empezando de 40°C y terminando en 10°C . En la Figura 3.16 se puede observar el equipo usado durante el proceso de calibración.



Figura 3.18. Equipo usado para calibración de sensores de temperatura.

Una vez realizadas las pruebas se extrajeron los datos obtenidos y se obtuvieron los valores que se presentan en la Tabla 3.4, en la cual se presentan los promedios de las temperaturas de cada sensor para las diferentes temperaturas de prueba del baño térmico, así como, la desviación estándar de las mediciones obtenidas respecto a la temperatura del baño térmico. Como se puede observar el máximo de desviación se obtuvo para el sensor 6 con un valor de 2.0748, para la temperatura de 20°C .

Con los resultados obtenidos, se obtuvo un ajuste lineal de los datos medidos por el multímetro y los datos reales que proporciona el sensor del baño térmico. Estos datos fueron graficados para posteriormente con la herramienta Matlab

calcular los coeficientes del polinomio de primer grado y obtener el error estándar de estimación (EEE). En la Tabla 3.5 se presenta un concentrado de las ecuaciones de ajuste y el error estándar de estimación obtenido para cada sensor.

Tabla 3.4. Promedio y desviación estándar de los valores obtenidos de las temperaturas de cada sensor.

Sensor 1			Sensor 2		Sensor 3		Sensor 4	
T° (C)	Promedio	Desv_Est	Promedio	Desv_Est	Promedio	Desv_Est	Promedio	Desv_Est
10.15	1044.77	0.0058	1043.21	0.0038	1054.14	0.0028	1053.13	0.0028
20.01	1083.40	0.0105	1081.68	0.0147	1092.39	0.0244	1091.80	0.0087
29.87	1121.94	0.0078	1120.07	0.0091	1130.52	0.0183	1130.39	0.0065
39.75	1160.40	0.0070	1158.39	0.0061	1168.65	0.0102	1168.86	0.0100
39.76	1160.37	0.0098	1158.36	0.0097	1168.61	0.0117	1168.83	0.0117
29.87	1121.91	0.0033	1120.06	0.0043	1130.56	0.0061	1130.38	0.0043
20.01	1083.36	0.0021	1081.69	0.0034	1092.42	0.0049	1091.83	0.0033
10.16	1044.73	0.0022	1043.25	0.0029	1054.24	0.0053	1053.18	0.0024
Sensor 5			Sensor 6		Sensor 7		Sensor 8	
T° (C)	Promedio	Desv_Est	Promedio	Desv_Est	Promedio	Desv_Est	Promedio	Desv_Est
10.15	1053.78	0.0027	1053.84	0.0027	1053.75	0.0032	1054.36	0.0021
20.01	1092.19	0.0181	1088.22	0.1222	1092.49	0.0069	1092.75	0.0223
29.87	1130.50	0.0132	1130.62	0.0149	1131.14	0.0062	1131.04	0.0133
39.75	1168.77	0.0105	1168.93	0.0104	1169.68	0.0130	1169.31	0.0114
39.76	1168.73	0.0103	1168.88	0.0094	1169.66	0.0096	1169.27	0.0102
29.87	1130.52	0.0052	1130.66	0.0056	1131.13	0.0043	1131.06	0.0051
20.01	1092.22	0.0034	1092.32	0.0042	1092.49	0.0032	1092.77	0.0035
10.16	1053.87	0.0040	1053.92	0.0050	1053.77	0.0029	1054.42	0.0044
Sensor 9			Sensor 10		Sensor 11		Sensor 12	
T° (C)	Promedio	Desv_Est	Promedio	Desv_Est	Promedio	Desv_Est	Promedio	Desv_Est
10.15	1054.45	0.0022	1054.00	0.0026	1054.68	0.0027	1055.27	0.0033
20.01	1092.98	0.0184	1092.68	0.0070	1093.44	0.0070	1093.55	0.0119
29.87	1131.41	0.0110	1131.24	0.0064	1132.11	0.0067	1131.82	0.0106
39.75	1169.79	0.0125	1169.72	0.0128	1170.67	0.0109	1170.03	0.0089
39.76	1169.77	0.0100	1169.69	0.0101	1170.64	0.0106	1170.00	0.0177
29.87	1131.43	0.0047	1131.24	0.0036	1132.11	0.0039	1131.82	0.0054
20.01	1092.99	0.0033	1092.68	0.0027	1093.46	0.0036	1093.59	0.0033
10.16	1054.50	0.0037	1054.03	0.0027	1054.72	0.0036	1055.29	0.0046
Sensor 13								
T° (C)	Promedio	Desv_Est						
10.15	1055.19	0.0027						
20.01	1093.67	0.0116						
29.87	1132.10	0.0084						
39.75	1170.44	0.0105						
39.76	1170.44	0.0131						
29.87	1132.11	0.0045						
20.01	1093.70	0.0028						
10.16	1055.24	0.0037						

Tabla 3.5. Ecuaciones de ajuste y error estándar de estimación (EEE) de cada sensor.

Nombre del sensor	Polinomio de primer orden $Y = ax + b$		EEE
	a	b	
Entrada	0.2560	-257.3081	0.0031
Salida	0.2571	-258.0486	0.0021
1	0.2587	-262.5379	0.0020
2	0.2559	-259.3282	0.0032
3	0.2576	-261.3108	0.0022
4	0.2558	-259.1836	0.0089
5	0.2554	-258.9674	0.0031
6	0.2576	-261.5072	0.0018
7	0.2567	-260.5635	0.0023
8	0.2559	-259.5572	0.0030
9	0.2553	-259.1142	0.0031
10	0.2580	-262.1285	0.0014
11	0.2569	-260.9364	0.0020

Como se puede observar, los valores no son muy diferentes y el EEE es un valor muy pequeño en todos los casos, lo que nos da una excelente confiabilidad sobre los datos obtenidos.

Como ya se mencionó, 11 sensores se colocaron a un lado del ICTA enterrados de forma vertical a lo profundo del sistema. Se determinó que para esto, era necesario elaborar una base o sonda que los protegiera de las condiciones a las que estará sometido, y que permita que los sensores cumplan con su función de una manera eficaz. Para esto, se diseñó una sonda con un tubo de PVC de 12.7 mm ($\frac{1}{2}$ ") con 2.5 m de largo, el cual tiene pequeños agujeros cada 25 cm para colocar cada sensor. Se fijó una separación de 25 cm entre cada sensor, para fijarlos se utilizó cinta industrial cuidando de no tapar los sensores con ella. En la Figura 3.19. Se muestra el proceso de construcción de la sonda.



Figura 3.19. Proceso de construcción de sonda de temperatura.

La sonda se colocó dentro de un tubo galvanizado de 50.8 mm (2") de diámetro y 2.5 m de largo, el cual está enterrado a un lado del ICTA. La Tabla 3.6 muestra a que profundidad fue ubicado cada sensor.

Tabla 3.6. Profundidad a la que se ubica cada sensor.

Sensor	Profundidad (m)
1	0.00
2	0.25
3	0.50
4	0.75
5	1.00
6	1.25
7	1.50
8	1.75
9	2.00
10	2.25
11	2.50

Para proteger la sonda con los sensores, se hizo una instalación usando codos y coples como se muestra en la Figura 3.20, esto con el fin de evitar posibles entradas de agua, además con el fin de que los cables estuvieran protegidos contra cualquier agente exterior que pudiera dañarlos.



Figura 3.20. Instalación de la sonda.

Los sensores de entrada y salida fueron conectados a un cable UTP cada uno, es decir, los 4 pares de cables fueron conectados como uno solo. Cada cable fue introducido en una manguera de plástico para su protección. Los sensores de entrada y salida fueron introducidos en un orificio en la entrada y salida del intercambiador, como se muestra en la Figura 3.21 para posteriormente unirse con los cables UTP de la sonda de temperatura en la tubería de PVC.



Figura 3.21. Colocación de los sensores de temperatura entrada y salida.

Los cables del conjunto de sensores e instrumentos de medición fueron direccionados hacia el punto de monitoreo y registro (Taller de Máquinas y Herramientas) utilizando tubería de PVC. En la Figura 3.22 se muestra el proceso de instalación de la tubería de la instrumentación.



Figura 3.22. Proceso de instalación de tubería de instrumentación.

Una vez instalados los sensores se conectaron al multímetro, el cual cuenta con un UPS que alimenta el multímetro en caso de fallo de luz. El multímetro almacenará los datos en una USB, y cada semana se resguardan y analizan los datos con una computadora portátil. En la Figura 3.23 se muestra la instalación del multímetro y el equipo de análisis de datos.



Figura 3.23. Instalación de equipo de recolección y análisis de datos.

Medidor de nivel de agua

Para medir la humedad se realizó una sonda para medir el nivel de agua en la tierra, esto debido a que al excavar la zanja para el ICTA se observó que la tierra se encontraba saturada de agua. Por lo que, para conocer la profundidad

exacta en la que se iniciaba el exceso de agua se diseñó una sonda flotador con la cual determinaríamos a que profundidad se encontraba agua.

El indicador de nivel de agua fue construido con un material ligero (poliestireno) el cual tiene en un extremo, un corcho de foamular. La sonda permite mide a una profundidad máxima de 1.5 m. Se probó en una cubeta para saber exactamente a que distancia empieza a flotar, y se graduó para poder medir la profundidad del agua. En la Figura 3.24 se muestra el proceso de construcción del indicador de nivel.



Figura 3.24. Construcción de indicador de nivel.

Para realizar las mediciones de nivel de agua, se enterró un tubo galvanizado de 19.05 mm ($\frac{3}{4}$ ") de 3 m de largo a 2.5 m de profundidad, ubicado a lado del ICTA. El proceso de medición se muestra en la Figura 3.25, en el cual consiste en introducir el indicador de nivel en el tubo hasta que encuentra agua, lo que ocasiona que el indicador flote y a esa profundidad se registra la lectura. Las mediciones de nivel se tomaron en días hábiles, dos veces por día, por la mañana y por la tarde. Para evitar acumulación de agua por agentes externos al suelo como la lluvia, el tubo permanece tapado.



Figura 3.25. Indicador de nivel y su funcionamiento.

En la Figura 3.26 podemos observar el modelo experimental, en el cual se observa los componentes de arreglo experimental del ICTA y como estan conectados para su funcionamiento.

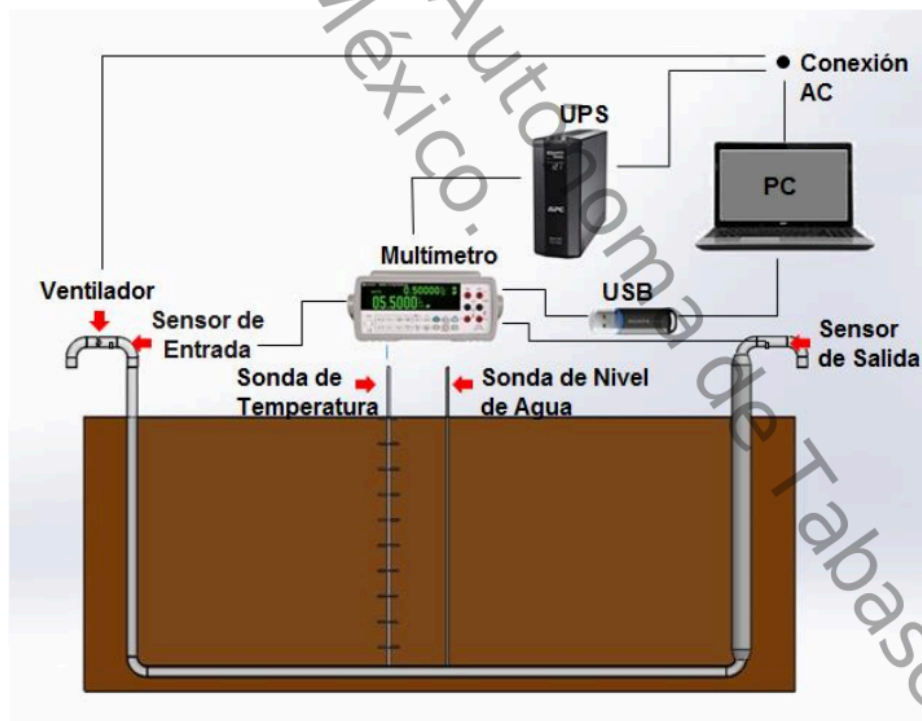


Figura 3.26. Modelo experimental del ICTA

3.3 Procedimiento experimental

En el diagrama de flujo de la Figura 3.25 se puede observar los pasos necesarios para llevar a cabo el procedimiento experimental.

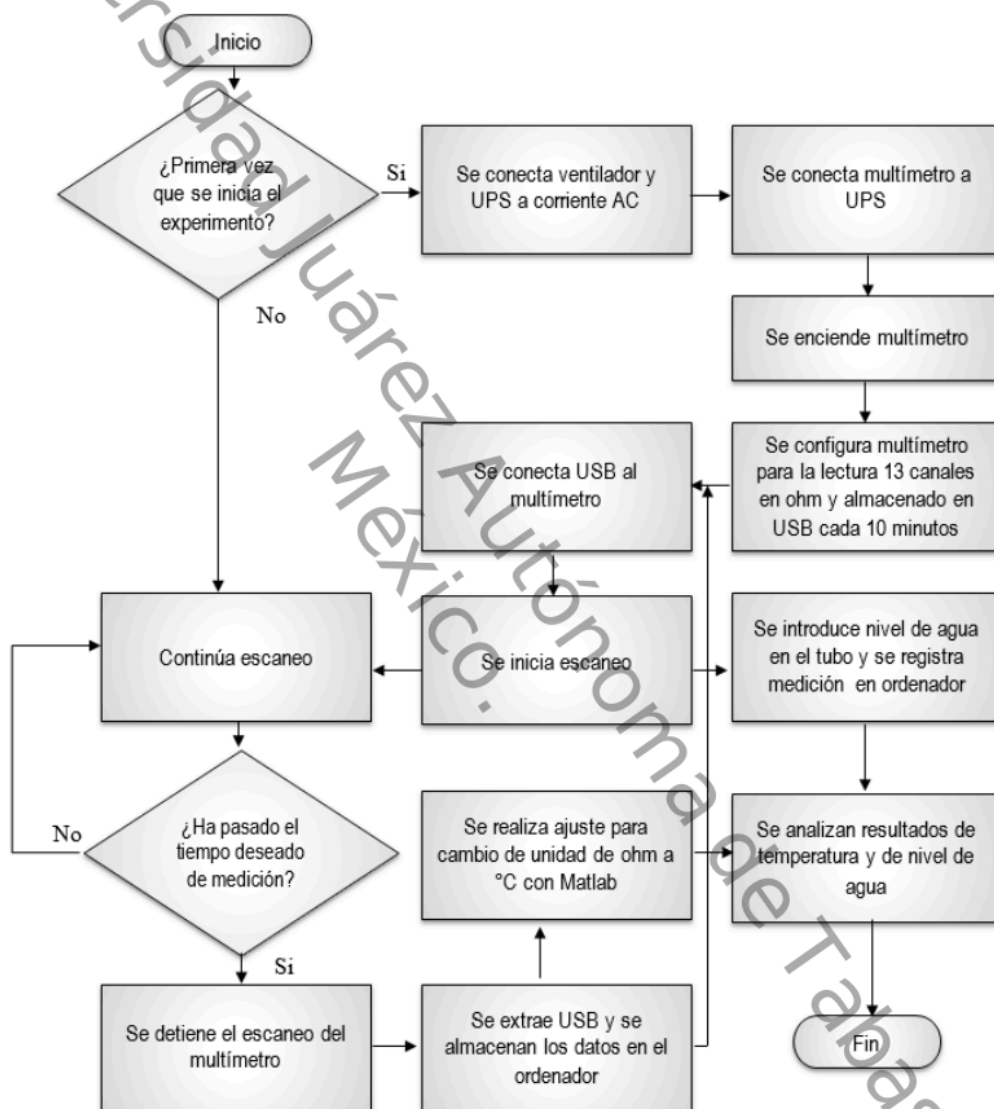


Figura 3.27. Diagrama de flujo de procedimiento experimental.

Capítulo IV

Resultados y Discusión

En este Capítulo se muestran los resultados obtenidos de perfil de temperatura del suelo, nivel de agua, temperatura de entrada y salida. Así como, el análisis energético del ICTA para determinar su eficiencia.

4.1 Comportamiento de la temperatura.

Durante el periodo de agosto 2017 a enero 2018 se realizaron mediciones de temperatura de suelo a diferentes profundidades y mediciones de temperatura del aire en la entrada y salida del ICTA. En las Figuras 4.1, 4.2, 4.3, 4.4, 4.5 y 4.6 se observan las mediciones de temperatura de agosto, septiembre, octubre, noviembre, diciembre y enero respectivamente. En las gráficas de temperatura de suelo se pudo observar que a medida que incrementa la profundidad disminuye la oscilación de la temperatura del suelo, hasta estabilizarse. Es decir, entre más profunda la medición se observan menos variaciones en la temperatura. La diferencia entre la temperatura del suelo a los 2 m y los 2.5 m fue poco significativa. En el mes de agosto se presentaron temperaturas más altas, siendo la temperatura del suelo a 2.5 m cercana a los 28°C, mientras que en enero, se presentaron las temperaturas más bajas con una temperatura promedio de 26.5°C a los 2.5 m.

Respecto a las temperaturas del aire a la entrada y a la salida, podemos observar que el ICTA se comporta como enfriador y calefactor, dependiendo de la temperatura del suelo. Por lo regular el ICTA funciona como enfriador durante las horas de sol, aproximadamente de 10 am- 6 pm, y como calefactor por las noches, en temporada de verano. En el mes de agosto (verano) el ICTA funciono el 52.5% del tiempo como enfriador y el 47.5% como calefactor. Mientras que, en enero (invierno) solo el 19% como enfriador y el 81% como calefactor.

Debido a que nuestro objetivo es reducir el consumo de energía, se hizo un filtrado de datos para utilizar el ICTA únicamente cuando el aporte energético sea mayor al consumido por ventilador en el caso de su uso como enfriador, y en el caso de su funcionamiento como calefactor, se realizó un filtrado de datos para condiciones de temperatura por debajo de los 20°C.

En la Tabla 4.1 se puede observar que la mayor diferencia de temperatura (ΔT) como enfriador y calefactor fue en enero, a pesar de que este es un mes de invierno, presentó cambios de clima extremo; es decir, se presentaron días donde se alcanzó temperaturas máximas de hasta 34°C y temperaturas mínimas de 15°C . También, cabe destacar que la temperatura del suelo a 2.5 m fue la menor temperatura comparando los 6 periodos. La diferencia de temperatura promedio mayor, como enfriador, fue de 2.8°C en agosto donde se presentaron temperaturas de entrada de aire más altas.

Por otra parte, se puede observar que en los tres primeros meses, no fue necesario su uso como calefactor ya que no se observaron temperaturas por debajo de los 20°C . En los meses restantes, se observó que es factible de utilizarse como calefactor debido a las temperaturas alcanzadas. La diferencia de temperatura máxima alcanzada fue de 5.78°C , esto se debe a que en enero se presentaron días donde la temperatura mínima alcanzo los 15°C .

Tabla 4.1. Resumen de ΔT por mes.

Enfriador		
	ΔT Máximo	ΔT promedio
Agosto 2017	4.4	2.8
Septiembre 2017	4.7	2.7
Octubre 2017	4.8	2.6
Noviembre 2017	3.8	2.3
Diciembre 2017	4.8	2.7
Enero 2018	5.5	2.7
Calefactor		
Agosto 2017	-	-
Septiembre 2017	-	-
Octubre 2017	-	-
Noviembre 2017	4.2	3.6
Diciembre 2017	5.0	3.3
Enero 2018	5.8	3.2

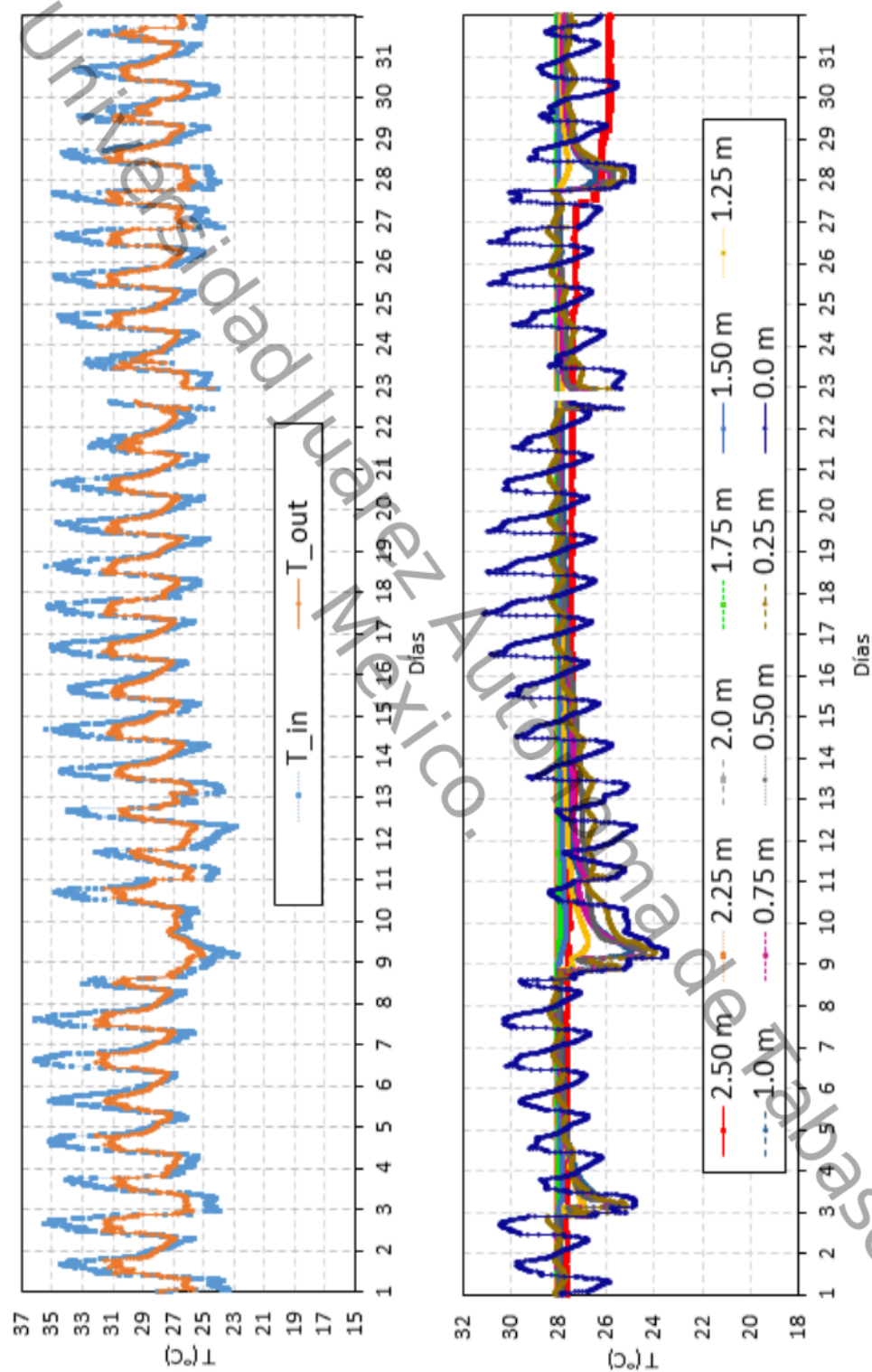


Figura 4.1. Mediciones de Temperatura (Agosto 2017)

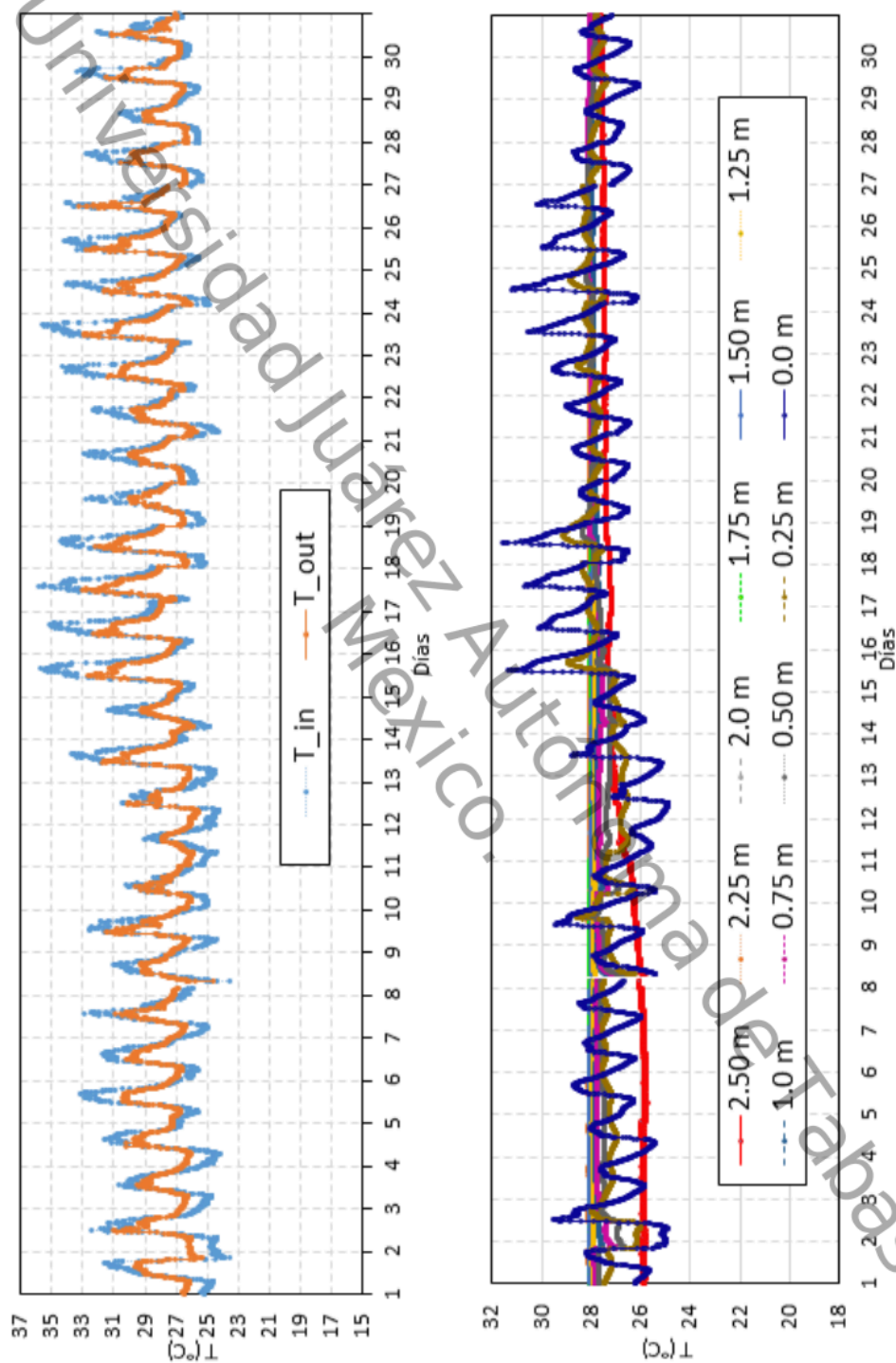


Figura 4.2. Mediciones de Temperatura (Septiembre 2017)

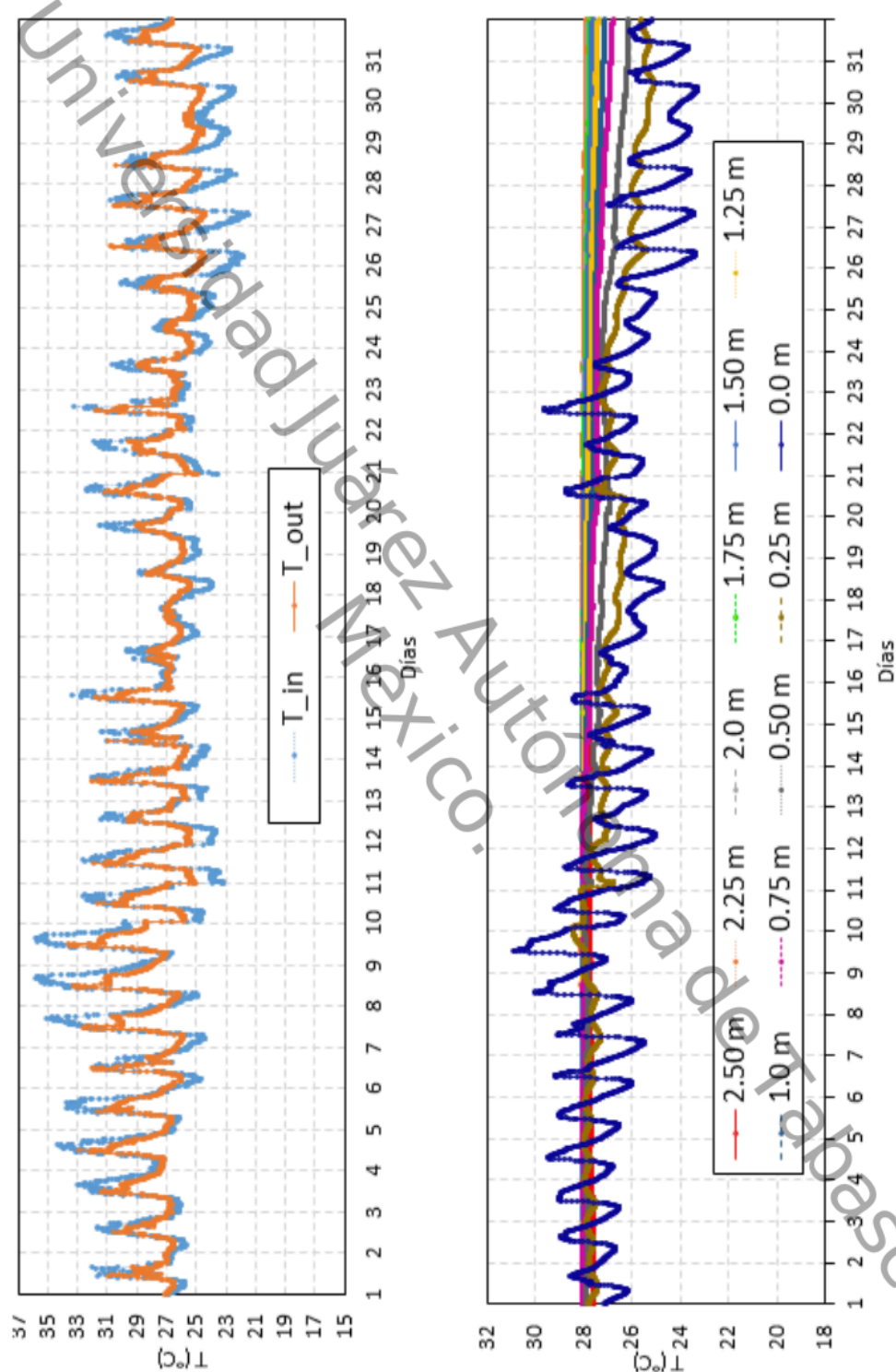


Figura 4.3. Mediciones de Temperatura (Octubre 2017)

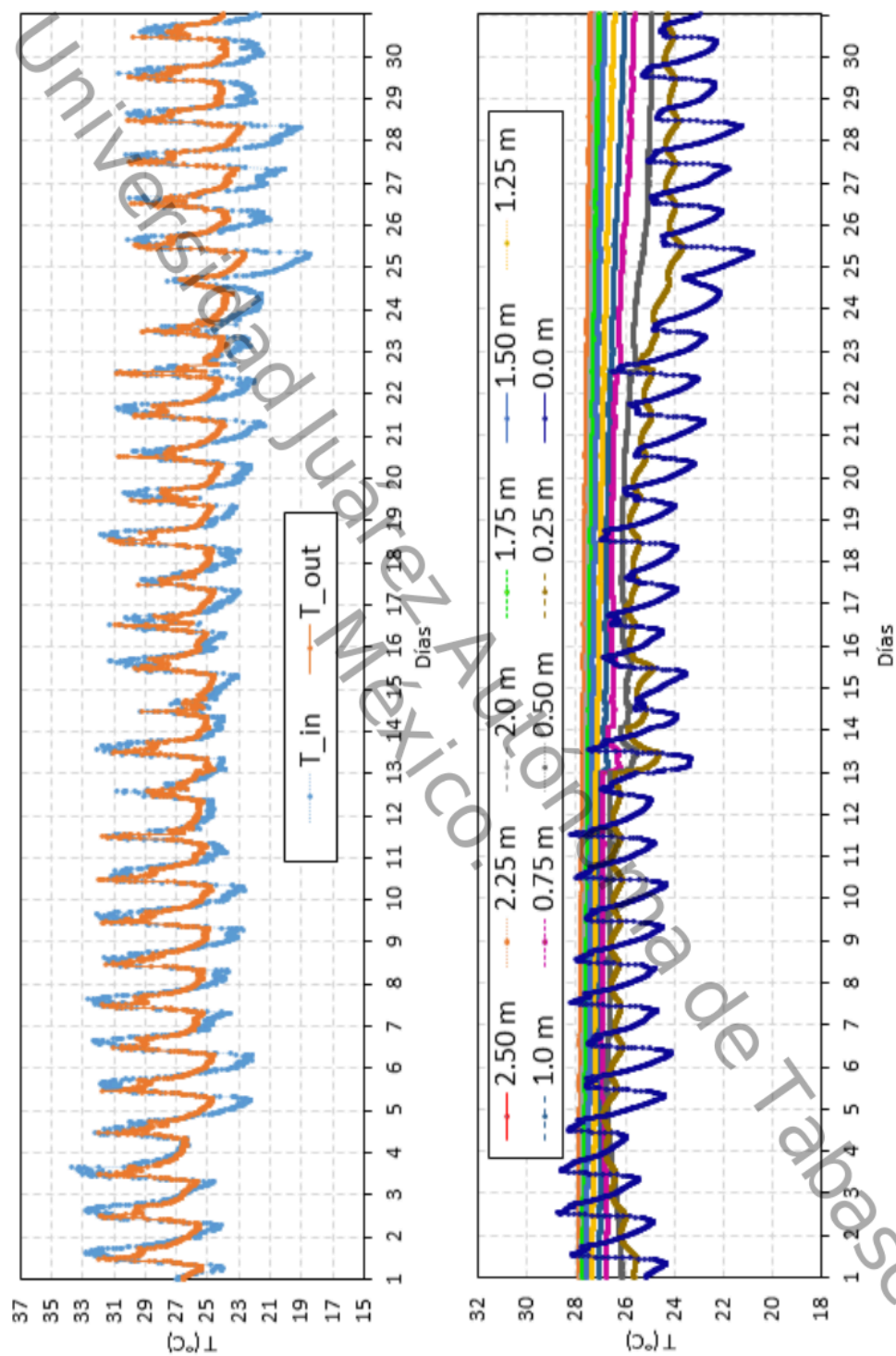


Figura 4.4. Mediciones de Temperatura (Noviembre 2017)

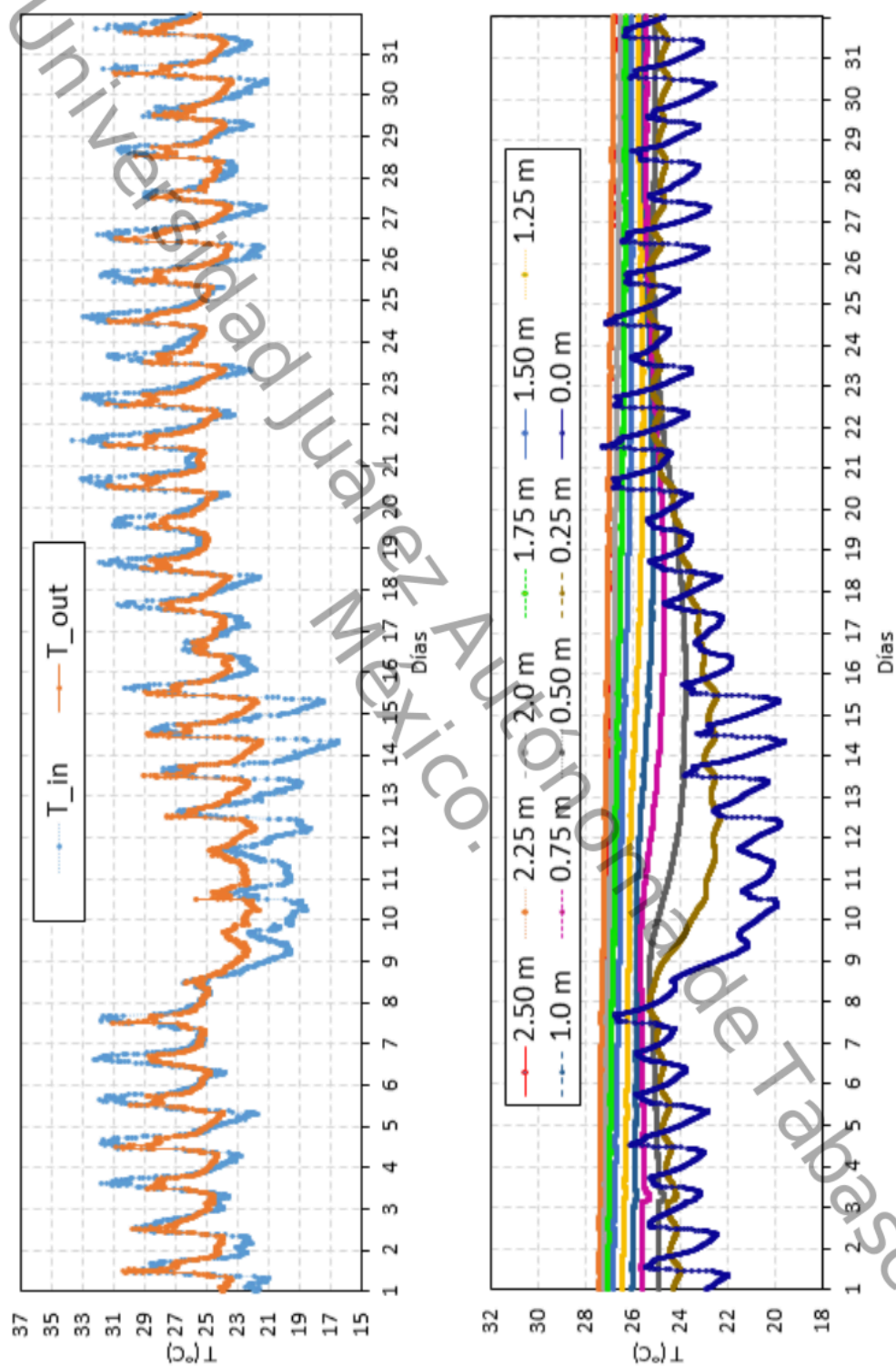


Figura 4.5. Mediciones de Temperatura (Diciembre 2017)

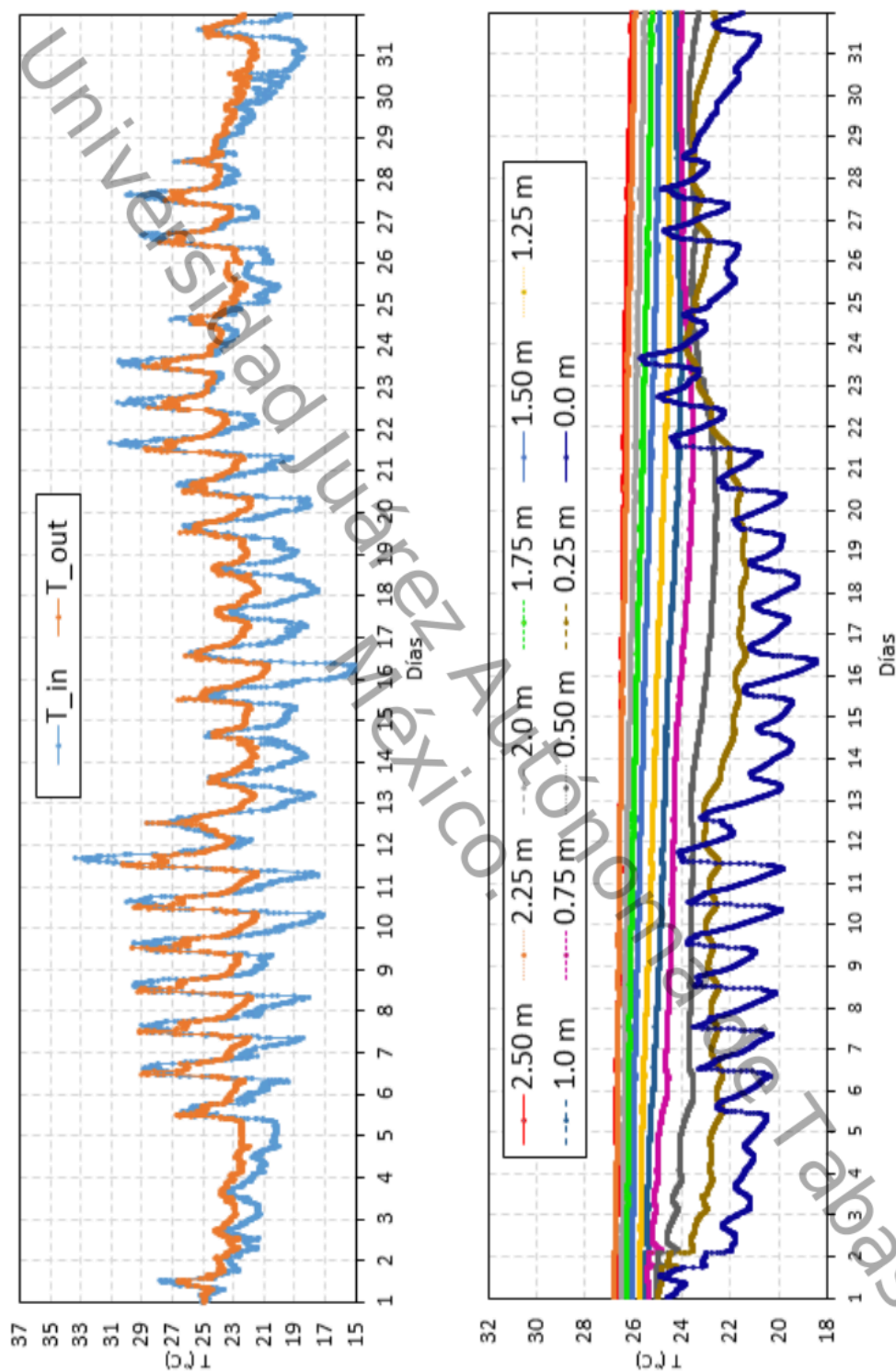


Figura 4.6. Mediciones de Temperatura (Enero 2018)

4.2 Humedad del suelo.

En cuanto a la humedad del suelo, como se mencionó en el Capítulo anterior, durante la excavación se observó que la tierra estaba completamente saturada de agua, obteniendo filtraciones de agua a tan solo 0.5 m de profundidad. Por lo cual, se usó una sonda para monitorear el nivel de agua y determinar la factibilidad de considerar los datos de monitorear los datos de humedad. La construcción de la sonda se describió en la Sección 3.2.3.

En la Tabla 4.2 se observa el nivel de agua promedio por mes. Cabe mencionar que el área se inunda con la lluvia es por eso que en meses como septiembre y octubre el promedio es bajo, debido a que hubo varios días donde la lluvia ocasionó inundación en la zona. Un valor de cero metros en el nivel del agua, implica que la tierra está totalmente saturada de agua e incluso el suelo presenta inundación. Los valores de las mediciones de nivel de agua arriba de cero indican la profundidad a la cual está la tierra saturada de agua respecto a nivel del suelo. En agosto se presentó el nivel de agua más alto. Los resultados obtenidos muestran que a excepción de agosto, en promedio el nivel del agua estuvo en 0.189 m. Lo anterior implica que durante el tiempo de la realización de las pruebas experimentales la tierra estuvo saturada de agua.

Tabla 4.2. Nivel de Agua

Mes	Nivel de Agua (m)
Agosto 2017	0.429
Septiembre 2017	0.086
Octubre 2017	0.107
Noviembre 2017	0.256
Diciembre 2017	0.310
Enero 2018	0.190

Los resultados anteriores coinciden con los resultados obtenidos de la determinación del C_p , los cuales se presentan en la Tabla 4.3. Como se puede observar los valores de C_p oscilan de 0.726 a 0.910 J g⁻¹ K⁻¹. Los resultados

indican que hasta una profundidad de 2.2 m el C_p no varía significativamente, por lo que, se puede deducir a partir de las mediciones de nivel de agua y del C_p que a esa profundidad la muestra de suelo se considera homogénea. La C_p promedio fue de $0.8198 \text{ J g}^{-1} \text{ K}^{-1}$, lo cual se encuentra dentro de lo que se ha reportado para el C_p de suelo arcilloso, $0.88 \text{ kJ kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ [41] de acuerdo al tipo de suelo gleysol que se reporta para la región de estudio, Cunduacán, Tabasco, Tabla 2.2.

Tabla 4.3. Valores de C_p obtenidos a profundidades del suelo.

	Profundidad del Suelo (m)				
	0.2 a 0.4	0.6 a 0.8	1.2 a 1.4	1.6 a 1.8	2.0 a 2.2
m (g)	0.0730	0.0820	0.086	0.085	0.079
$\Delta T(K)$	32.695	30.002	29.998	29.990	30.001
Q (J)	1.741	2.052	2.350	1.983	2.029
C_p ($\text{J g}^{-1} \text{ K}^{-1}$)	0.726	0.834	0.910	0.776	0.856

Por lo anterior, se concluye que para la muestra de suelo de este estudio, la medición de la humedad del suelo y la determinación del C_p a diferentes profundidades no aportaría información significativa al estudio que pudiera modificar el desempeño del ICTA. Lo anterior, considerando que el ICTA está enterrado a 2.5 m, se puede considerar que la tierra a su alrededor está siempre saturada de agua.

4.3 Análisis energético ICTA

El análisis energético del ICTA se realizó considerando la reducción de la carga térmica en kW h y la reducción de las emisiones de CO_2 . Además, se consideró un análisis energético de un sistema híbrido, ICTA acoplado con un sistema de aire acondicionado (AC) convencional. A continuación, se presentan ambos casos.

4.3.1 Carga Térmica

En la Tabla 4.4 se puede observar el resumen de datos de la capacidad de enfriamiento y las horas donde se obtuvo un aprovechamiento del ICTA. En la columna uno se presentan los meses, en la columna dos se presenta la diferencia de temperatura promedio, en la columna tres la reducción de la carga térmica en kW h, en la columna cuatro la reducción de la carga térmica en Joule y la columna cinco el número de horas de operación eficiente como enfriador. El análisis se realizó sólo para las horas de funcionamiento como enfriador, esto debido a que en la región de clima cálido húmedo se usan sistemas activos solo para enfriamiento, que es la necesidad primordial. En los resultados de la tabla podemos observar que en agosto se obtuvo el mayor número de horas (185) de operación eficiente como enfriador con una reducción de la carga térmica de 4.438 kW h, mientras que en enero el ICTA presentó el menor número de horas de operación (24) con una reducción de la carga térmica de 0.561 kW h. Las diferencias de temperatura promedio de durante los 6 meses varió de 2.3 a 2.8°C, es decir, presentó una diferencia de 0.5°C. Mientras que, la reducción de la carga térmica en kW h varió de 0.561 a 4.438, lo que implica una diferencia de 3.877 kW h.

Los resultados obtenidos se puede observar que aunque el promedio de la diferencia de temperatura del aire de entrada y salida es similar en los seis periodos, la reducción de la carga térmica varía. Esto debido a que las horas de operación eficiente del ICTA varió significativamente durante el periodo de prueba.

Tabla 4.4. Resumen de datos de capacidad de enfriamiento.

Mes	ΔT promedio (± 0.2)	Q_E (J) (± 1.762)	E_E (kW h) (± 0.0004)	Tiempo (horas)
Agosto 2017	2.8	15,978,022.248	4.438	185
Septiembre 2017	2.7	775,0881.248	2.153	93
Octubre 2017	2.6	6,770,661.228	1.881	82
Noviembre 2017	2.3	5,293,657.948	1.470	73
Diciembre 2017	2.7	8,662,019.419	2.406	102
Enero 2018	2.7	2,018,038.564	0.561	24

Como se mencionó en el Capítulo 2, existen otros parámetros aparte del energético, para medir la eficiencia del ICTA los cuales son costos y reducción de CO_2 . También, debe considerarse la tasa de cambio entre kW h a CO_2 (Ec. 2.8) y los costos de CFE de la zona sur (Tabla 2.1), para este caso de estudio.

En la Tabla 4.5 se puede observar el análisis de los kW h producto de la reducción de la carga térmica con el ICTA considerando el factor de conversión de la SEMARNAT y la Tabla 2.1 (sección 2.2.2). En la columna uno se presentan los meses, en la columna dos se presenta la diferencia entre la reducción de la carga térmica del ICTA y la energía consumida por el ventilador en Joule, en la columna tres se presenta la diferencia entre la reducción de la carga térmica del ICTA y la energía consumida por el ventilador en kW h, en la columna cuatro la reducción de CO_2 en kg y en la columna cinco el ahorro en pesos mexicanos de la diferencia entre la reducción de la carga térmica del ICTA y la energía consumida por el ventilador.

Se observó que, la máxima reducción de la carga térmica fue en el mes de agosto con 1.663 kW h, lo que equivale a \$4.661 pesos MNX y a una reducción de 0.755 kg de CO_2 . Estos valores, pese a ser los más altos, indican que el utilizar el ICTA como una fuente única para proporcionar confort térmico en edificaciones podría no ser económicamente viable. Lo anterior, considerando

además de la reducción de la carga térmica, el costo de implementación del ICTA que fue estimado en 2,581.90 pesos MNX (ANEXO C).

Tabla 4.5. Resumen de métricas del ICTA.

Mes	$Q_E - Q_{Ven}$ (± 1.762)	$E_E - E_{Ven}$ (± 0.0004)	CO ₂ (kg)	Costo (MNX)
Agosto 2017	5,988,022.239	1.663	0.755	\$4.661
Septiembre 2017	2,728,881.248	0.758	0.344	\$2.124
Octubre 2017	2,333,661.228	0.648	0.294	\$1.816
Noviembre 2017	1,360,657.948	0.378	0.172	\$1.059
Diciembre 2017	3,163,019.419	0.879	0.399	\$2.462
Enero 2018	704,038.564	0.196	0.089	\$0.548
Total	16,278,280.650	4.520	2.05	\$12.670

Considerando los resultados anteriores y con fin de determinar si el ICTA es suficiente para poder sustituir a un sistema activo, como son los sistemas de AC, se realizó una simulación del comportamiento del fluido con ayuda del software Fluent. La metodología utilizada para la simulación fue la descrita en la Figura 3.4. El modelo considerado para este estudio fue un ICTA conectado a una habitación con pared de ladrillo, que es uno de los materiales de uso común en la construcción. En el estudio se analizaron dos casos: 1) CASO I, una habitación cerrada que se abastece de aire con un solo ICTA y 2) CASO II, una habitación cerrada que se abastece de aire con tres ICTA.

Para los dos casos de estudio, la entrada de aire a la habitación corresponde al flujo de aire de salida del ICTA con una velocidad de 0.9218 m s^{-1} . También se consideraron las propiedades del fluido y paredes, las cuales se muestra en la Tabla 4.6.

Tabla 4.6. Características y propiedades del fluido y paredes.

Propiedades	Entrada (Aire)	Pared (ladrillo)	Techo (ladrillo)	Suelo (Aislado)
$\lambda \text{ (Wm}^{-1}\text{K}^{-1}\text{)}$	0.0242	0.42	0.42	Se especificó como pared aislada ($q=0$)
$\rho \text{ (Kg m}^{-3}\text{)}$	1225	1800	1800	
$C_p \text{ (J g}^{-1}\text{K}^{-1}\text{)}$	1.006	840	840	
$T \text{ (}^\circ\text{C)}$	30	32	35	

Para la Etapa 1 del procedimiento de la Figura 3.4, se consideró una habitación con dimensiones de 4x3 m con una altura de 2.5 m, donde las entradas de aire son de 101.6 mm (4") de diámetro, ubicadas a 0.5 m debajo del techo de la habitación equidistantemente distribuidos. Mientras que, en la pared opuesta se ubicó una infiltración para favorecer el flujo del aire. Para la discretización del modelo se utilizó un mallado con elementos "Tet/hybrid" del tipo "TGrid", con una razón de aspecto entre 0 y 1. En la Figura 4.7 se pudo observar el mallado para ambos casos. Para el Caso I se obtuvo un total de nodos de 102, 736 y para el Caso II un total de 109,942 nodos.

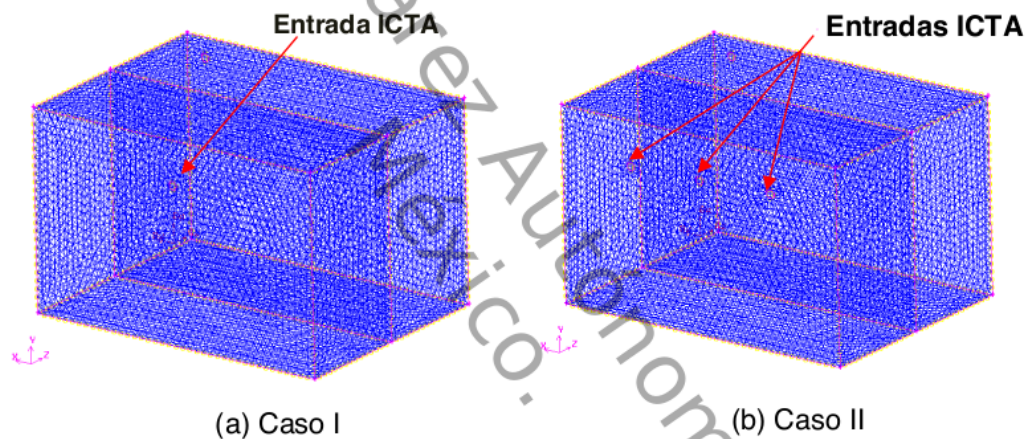
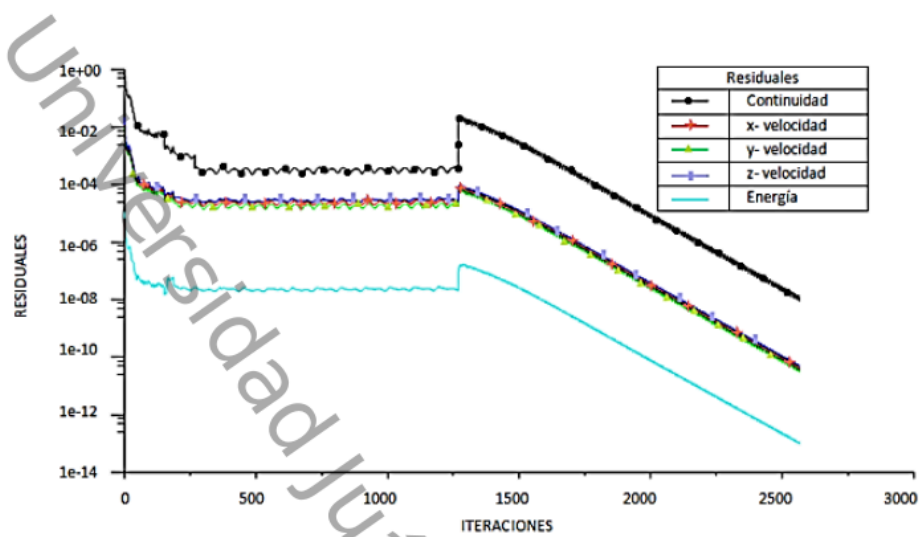
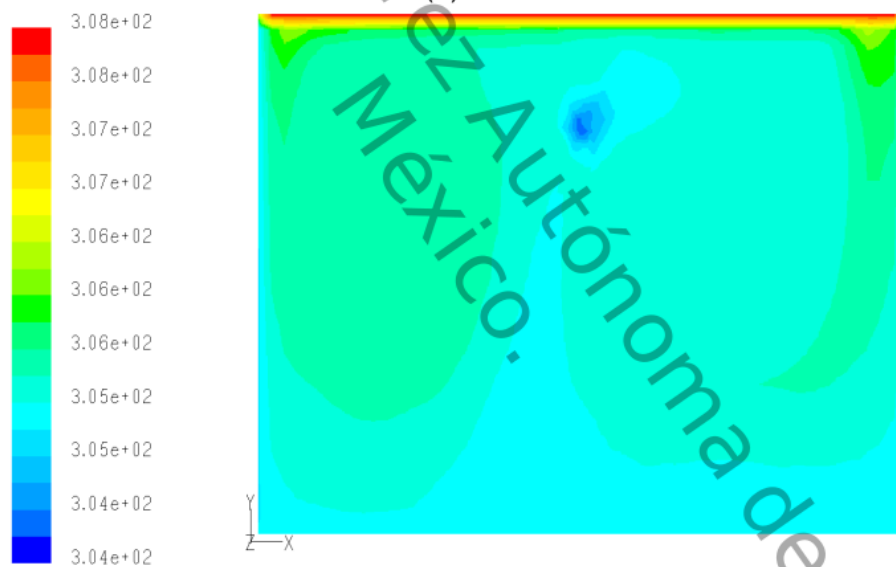


Figura 4.7. Mallado de habitación en Gambit.

En la Figura 4.8. (a) y (b) se observan residuales y contorno de temperatura en medio de la habitación para el Caso I, y en la Figura 4.8 (c) y (d) se presentan los residuales y contorno para el Caso II. Para el Caso I la solución de la simulación se obtuvo a las 2600 iteraciones y para el Caso II se obtuvo a las 3050 iteraciones. En el Caso I se puede observar que la temperatura alcanzó los 32.5 y 33°C, y en el Caso II, se alcanzó temperaturas de 31 y 32°C.



(a) Residuales

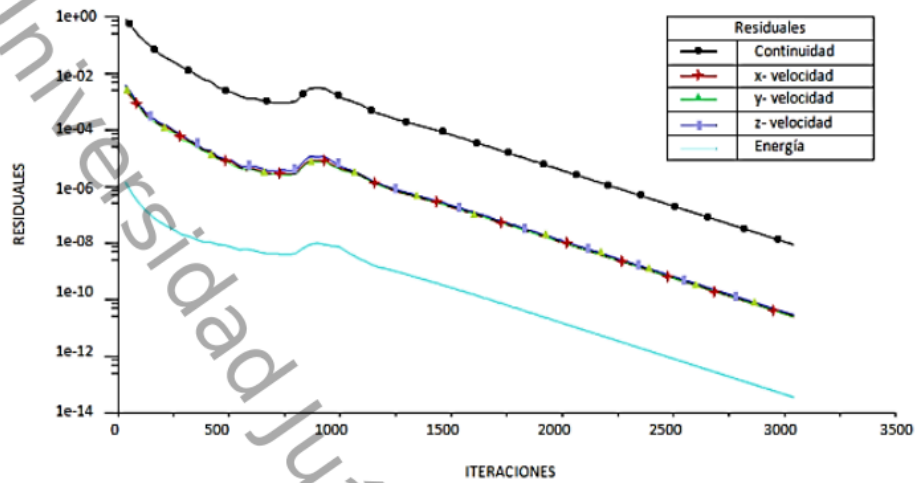


Temperatura (k)

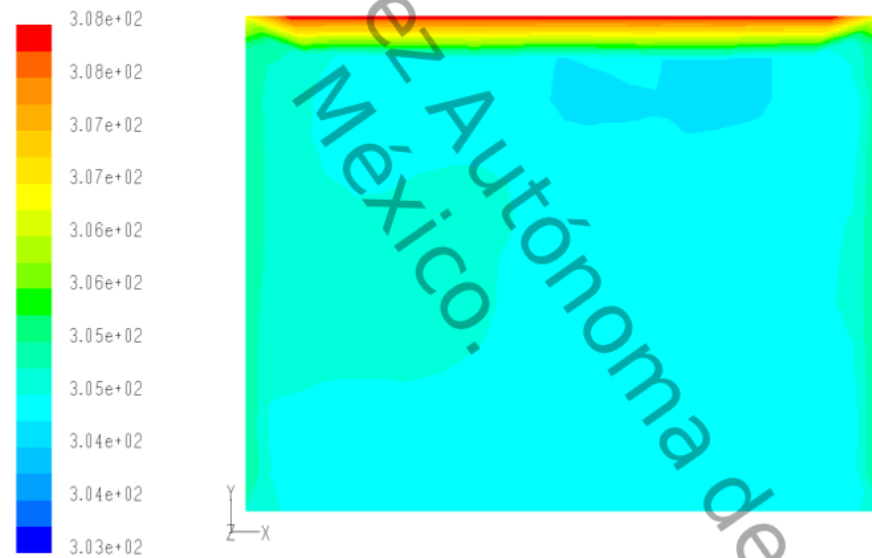
Feb 05, 2018
FLUENT 6.0 (3d, dp, segregated, lam)

(b) Contorno de temperatura

Figura 4.8. Residuales y contorno de temperatura del Caso I.



(a) Residuales



Temperatura (k)

Feb 05, 2018
FLUENT 6.0 (3d, dp, segregated, lam)

(a) Contorno de temperatura

Figura 4.9. Residuales y contorno de temperatura del Caso II.

Los vectores de velocidad se presentan en la Figura 4.10 y 4.11 para el Caso I y Caso II respectivamente. Se observó una velocidad promedio entre los 0.091

y 0.0005 m s^{-1} para el Caso I, y entre los 0.197 y 0.0003 m s^{-1} para el Caso II. Estos resultados nos muestran que existe una distribución homogénea del aire en el interior, lo que concuerda con el comportamiento de la temperatura.

En ambos casos se observó que el ICTA conectado con una habitación, aun con tres entradas de aire, no presenta aporte significativo para el confort térmico. Es decir con este sistema no podría sustituir un sistema activo, como lo es un AC. Sin embargo, podría analizarse su acoplamiento con un Sistema activo, como se ha reportado en la literatura [18,19].

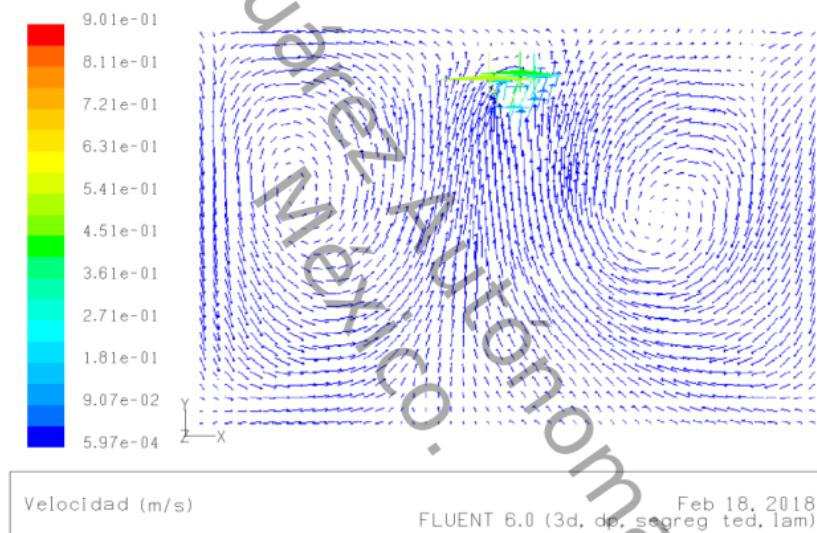


Figura 4.10. Vectores de velocidad Caso I.

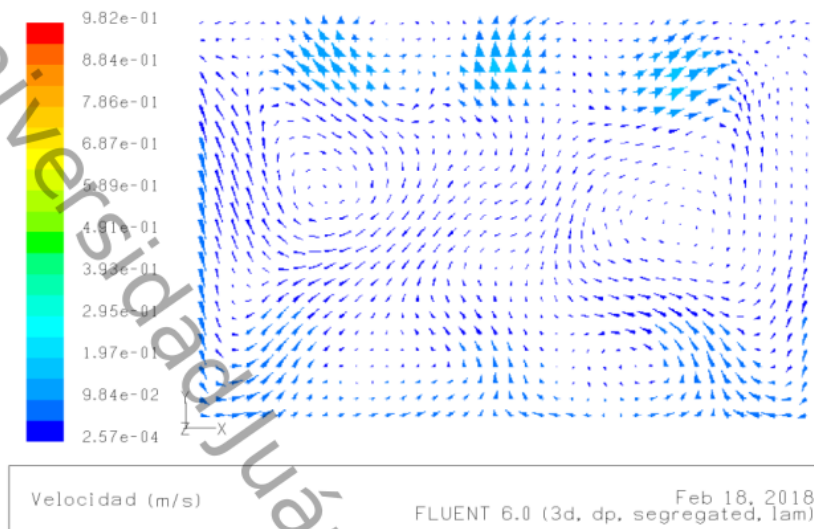


Figura 4.11. Vectores de velocidad Caso II.

4.3.2 Análisis energético híbrido

Vikas Bansal *et al.* [19] y Suresh Kumar *et al.* [20] reportaron investigaciones sobre sistemas híbridos, donde lograron incrementar el ahorro de energía al acoplar el ICTA al condensador de un sistema de aire acondicionado (AC). Por lo que, para con los resultados obtenidos del ICTA de nuestro estudio, se buscó analizar el ICTA como un sistema híbrido. Para ello, se consideró lo reportado por la ABC de economía [41] la cual reporta que por cada °C que se ahorre en el AC se puede ahorrar aproximadamente el 8% de la energía consumida por el AC.

Para el sistema híbrido se evaluó el ICTA considerando cuatro tipos de AC, dos de ventana y dos mini-Split. Los AC de ventana fueron: AC-Ventana 1 (LG W081CE) y AC-Ventana 2 (MIRAGE MACC2421L). Mientras que, los AC de mini Split fueron: AC-mini Split 1 (MIDEA M-12CRLA) y AC-mini Split 2 (PRIME CMPRC242-W). Para el análisis energético, se consideró el costo en pesos del kW-hr de CFE, la emisión de CO₂ reportado por la SEMARNAT, los datos

reportados de consumo energético por °C y las consideraciones mostradas en la Tabla 4.7.

Tabla 4.7. Descripción de variables calculadas.

Variable	Consideraciones
Q_{AC}	Se obtuvo considerando P_{AC} y el número de horas de operación, de acuerdo a Tabla 4.3. Incertidumbre: ± 1.762
Q_{AI}	Se obtuvo considerando un ahorro de 8% por cada °C que enfrió el ICTA [41]. Incertidumbre: ± 1.762
Q_H	Se obtuvo de la resta del Q_{AI} menos el Q_V . Incertidumbre: ± 1.762
P_H	Se obtuvo convirtiendo Q_H a kWh. Incertidumbre: ± 0.004
Reducción de CO_2 (kg)	Se obtuvo considerando P_H y utilizando el factor de conversión de la SEMARNAT
Ahorro (\$ MNX)	Se obtuvo considerando P_H y los datos de la Tabla 2.1, utilizando la tarifa de consumo excedente.
Ahorro (%)	Se consideró para el sistema híbrido y se obtuvo de la división del Q_{AC} entre el Q_H .

En las Tablas 4.8 y 4.9 se presenta un desglose del ahorro de energía que representaría acoplar el ICTA al condensador de un AC, cuando se usa como enfriador en los meses estudiados. En la Tabla 4.8 se presentan los datos del primer trimestre (agosto, septiembre y octubre) y en la Tabla 4.9 se presentan los datos del segundo trimestre (noviembre, diciembre y enero). Se puede observar que para el periodo del primer trimestre de estudio se obtuvo un mayor ahorro de energía y menor emisión de CO_2 para los cuatro AC en el mes de agosto, con un ahorro máximo de \$ 274.31 y una reducción de 44.45 kg de CO_2 para el AC-Ventana 2. Para el segundo trimestre, diciembre fue el mes que represento mayor ahorro considerando los cuatro AC, con un ahorro máximo de \$148.65 y una reducción de 24.08 kg de CO_2 para el AC-Ventana 2.

En la Tabla 4.10 se presenta el concentrado del análisis económico, energético, y de emisiones de CO_2 de los seis meses de prueba, con el fin de establecer su factibilidad como un sistema híbrido para el ahorro de energía. Se puede observar que para el periodo de estudio se obtuvo un mayor ahorro de energía

y menor emisión de CO₂ con el AC-Ventana 2 y AC-mini Split 2. Con el AC-Ventana 2 se obtendría el mayor ahorro, \$ 796.97 y 129.13 kg de CO₂ en seis meses de operación, y en menor ahorro se obtendría con el AC-mini Split 1 con \$ 395.11 y 64.02 kg de CO₂. Lo anterior, considerando que en este estudio solo se analizó un mes (agosto) de la estación de verano, debido a los tiempos del proyecto. Por lo cual, se podría estimar que considerando los meses más cálidos del año (la primera mitad del año) se incremente el ahorro de energía y como consecuencia se recupere la inversión inicial del ICTA en menor tiempo al estimado.

Tabla 4.8. Métricas de sistema Híbrido de ICTA acoplado con AC (Primer trimestre)

	AC-Ventana 1 1 Tonelada	AC-Ventana 2 2 Toneladas	AC-mini Split 1 1 Tonelada	AC-mini Split 2 2 Toneladas
Capacidad de enfriamiento	12,000 BTU/H	24,000 BTU/H	12,000 BTU/H	24,000 BTU/H
Ahorro (\$MNX)	1,288.00	2,450.00	1,250.00	2,071.19
Agosto 2017				
Q _{AC}	857,808,000.00	1,631,700,000.00	832,500,000.00	1,379,412,540.00
Q _{AI}	190,531,969.70	362,424,942.36	184,910,684.88	306,388,129.13
Q _H	180,541,969.70	352,434,942.36	174,920,684.88	296,398,129.13
P _H	50.15	97.90	48.59	82.33
Reducción de CO ₂ (kg)	22.77	44.45	22.06	37.38
Ahorro (\$MNX)	140.52	274.31	136.15	230.70
Septiembre 2017				
Q _{AC}	431,222,400.00	820,260,000.00	418,500,000.00	693,434,412.00
Q _{AI}	92,426,374.74	175,811,038.90	89,699,509.64	148,627,781.90
Q _H	87,404,374.74	170,789,038.90	84,677,509.64	143,605,781.90
P _H	24.28	47.44	23.52	39.89
Reducción de CO ₂ (kg)	11.02	21.54	10.68	18.11
Ahorro (\$MNX)	68.03	132.93	65.91	111.77
Octubre 2017				
Q _{AC}	380,990,400.00	724,710,000.00	369,750,000.00	612,658,002.00
Q _{AI}	80,737,615.74	153,576,986.47	78,355,605.34	129,831,476.98
Q _H	76,300,615.74	149,139,986.47	73,918,605.34	125,394,476.98
P _H	21.19	41.43	20.53	34.83
Reducción de CO ₂ (kg)	9.62	18.81	9.32	15.81
Ahorro (\$MNX)	59.39	116.08	57.53	97.60

Tabla 4.9. Métricas de sistema Híbrido de ICTA acoplado con AC
(Segundo trimestre)

	AC-Ventana 1 1 Tonelada	AC-Ventana 2 2 Toneladas	AC-mini Split 1 1 Tonelada	AC-mini Split 2 2 Toneladas
Capacidad de enfriamiento	12,000 BTU/H	24,000 BTU/H	12,000 BTU/H	24,000 BTU/H
Potencia AC (W)	1,288.00	2,450.00	1,250.00	2,071.19
Noviembre 2017				
Q_{AC}	337,713,600.00	642,390,000.00	327,750,000.00	543,066,018.00
Q_{AI}	63,124,901.24	120,074,540.40	61,262,520.61	101,509,056.05
Q_H	59,191,901.24	116,141,540.40	57,329,520.61	97,576,056.05
P_H	16.44	32.26	15.92	27.10
Reducción de CO_2 (kg)	7.46	14.65	7.23	12.31
Ahorro (\$MNX)	46.07	90.40	44.62	75.95
Diciembre 2017				
Q_{AC}	472,180,800.00	898,170,000.00	458,250,000.00	759,298,254.00
Q_{AI}	103,291,358.39	196,478,127.38	100,243,942.54	166,099,401.08
Q_H	97,792,358.39	190,979,127.38	94,744,942.54	160,600,401.08
P_H	27.16	53.05	26.32	44.61
Reducción de CO_2 (kg)	12.33	24.08	11.95	20.25
Ahorro (\$MNX)	76.12	148.65	73.74	125.00
Enero 2018				
Q_{AC}	112,828,800.00	214,620,000.00	109,500,000.00	181,436,244.00
Q_{AI}	24,064,358.95	45,774,595.83	23,354,385.63	38,697,095.98
Q_H	22,750,358.95	44,460,595.83	22,040,385.63	37,383,095.98
P_H	6.32	12.35	6.12	10.38
Reducción de CO_2 (kg)	2.87	5.61	2.78	4.71
Ahorro (\$MNX)	17.71	34.61	17.15	29.10

Tabla 4.10. Métricas de sistema Híbrido de ICTA acoplado con AC
(Semestre completo)

	AC-Ventana 1 1 Tonelada	AC-Ventana 2 2 Toneladas	AC-mini Split 1 1 Tonelada	AC-mini Split 2 2 Toneladas
Capacidad de enfriamiento	12,000 BTU/H	24,000 BTU/H	12,000 BTU/H	24,000 BTU/H
Potencia AC (W)	1,288.00	2,450.00	1,250.00	2,071.19
Total (seis meses)				
Q_{AC}	2,592,744,000.00	4,931,850,000.00	2,516,250,000.00	4,169,305,470.00
Q_{AI}	554,176,578.76	1,054,140,231.35	537,826,648.65	891,152,941.13
Q_H	523,981,578.76	1,023,945,231.35	507,631,648.65	860,957,941.13
P_H	145.55	284.43	141.01	239.15
Reducción de CO_2 (kg))	66.08	129.13	64.02	108.58
Ahorro (\$MNX)	407.83	796.97	395.11	670.11

El análisis anterior muestra las estimaciones energéticas, económicas y de reducción de CO_2 , sin embargo, estas consideraciones están relacionadas con las horas de uso de la Tabla 4.3. Como se observa en los resultados entre más horas de funcionamiento como enfriador tiene el ICTA, el ahorro energético, económico y la reducción de CO_2 fueron mayores.

Para estimar el porcentaje de ahorro del ICTA por mes y el porcentaje de ahorro total (seis meses), se calculó la razón de Q_{AC} entre Q_H . Esto para obtener el porcentaje de ahorro que tiene el sistema híbrido. En Tabla 4.11 se observan los porcentajes obtenidos, se puede observar que en cada mes la diferencia porcentual entre los cuatro tipo de AC es menor que el 1%. En promedio durante los seis meses el porcentaje de ahorro se encontró entre el 20 y 21%, excepto en el mes de noviembre donde fluctúa de 17.49 a 18.08%. Con estos resultados observamos que el porcentaje de ahorro está relacionado más con el ΔT que con las horas de uso. Debido a que en la Tabla 4.3 se observa que noviembre es el mes con el menor ΔT a pesar que sus horas de uso son mayores que en diciembre. En general se pudo encontrar que un sistema

híbrido AC nos proporcionaría un ahorro promedio de 20.5% para cualquier tipo de AC.

Tabla 4.11. Porcentaje de ahorro en kW h del Sistema Híbrido.

Meses	AC-Ventana 1 1 Tonelada	AC-Ventana 2 2 Toneladas	AC-mini Split 1 1 Tonelada	AC-mini Split 2 2 Toneladas
Agosto-17	21.05%	21.60%	21.01%	21.49%
Septiembre-17	20.27%	20.82%	20.23%	20.71%
Octubre-17	20.03%	20.58%	19.99%	20.47%
Noviembre-17	17.53%	18.08%	17.49%	17.97%
Diciembre-17	20.71%	21.26%	20.68%	21.15%
Enero-18	20.16%	20.72%	20.13%	20.60%
Total	20.21%	20.76%	20.17%	20.65%

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

En este trabajo se diseñó y evaluó térmicamente un ICTA en un clima cálido-húmedo, como un sistema pasivo para la obtención del confort térmico en edificaciones. Del análisis de los resultados obtenidos se obtuvo:

- Del estudio de la temperaturas, humedad del suelo y C_p , se encontró que: 1) la temperatura de la tierra varía entre los 26 y 28°C durante los meses analizados, siendo agosto y septiembre los meses que presentan las temperaturas más altas; 2) En cuanto a la humedad en el suelo se observó que para el conjunto de meses analizados, a una profundidad mayor que 0.5 m la tierra se encuentra completamente saturada de agua; y 3) los valores de C_p obtenidos indican que hasta una profundidad de 2.2 m el C_p no varía significativamente. Por lo anterior, se puede deducir que la muestra de suelo tiene un comportamiento homogéneo hasta los 2.5 m de este estudio.
- El ICTA funciona como enfriador en el horario de 9 am a 6 pm, con un máximo de ΔT de 5.5°C en el mes de enero y un máximo promedio de 2.8°C para el mes de agosto. Estos resultados sugieren las características del clima y suelo donde se implementó el ICTA permiten disminuir la temperatura de un flujo de aire. Este sistema podría ser utilizado como enfriador en lugares donde se tenga actividad en ese horario, como por ejemplo oficina u otros recintos.
- Considerando los datos experimentales y el análisis del comportamiento del fluido con CFD en una habitación, se encontró que la aportación

térmica del ICTA como único sistema para alcanzar el confort térmico en una habitación, no es suficiente. Lo anterior, debido a que las temperaturas del suelo (26 a 28°C) están por arriba de la temperatura de confort (20 a 25°C).

- Se pudo observar que el ahorro energético, económico, y la reducción de CO₂ del ICTA aumentó cuando se considera su acoplamiento a un sistema de AC. Con el acoplamiento del ICTA-AC se estimó un ahorro máximo de 20.76%, que equivale a \$ 796.97 MNX y 129.13 kg de CO₂, considerando un solo ICTA. Estos resultados coinciden con lo reportado para condiciones de clima cálido por Vikas Bansal *et al.*, [19] quienes lograron aproximadamente un 18% de ahorro energético al acoplar un ICTA con un AC en horario de operación de 9 am a 8 pm; mientras que, Suresh Kumar *et al.*, [20] obtuvieron un ahorro máximo 10.97% en el consumo energético en horario de operación de 8 am a 8 pm.
- Los resultados obtenidos nos muestran que con el ICTA es posible enfriar un flujo de aire, y que su potencial podría aprovecharse obteniendo mayores beneficios energéticos, ambientales y económicos, cuando se acopla a un sistema de AC. Por lo que, con este trabajo se determinó que es factible la implementación de un ICTA para contribuir al confort térmico bajo condiciones de clima cálido húmedo, y que su acoplamiento con otros sistemas pasivos o activos podrían incrementar su rendimiento.

5.2 Recomendaciones para trabajos futuros

- Continuar con el estudio experimental durante los siguientes seis meses (febrero-julio), debido a que en la región de estudio, estos son los meses donde se presentan las temperaturas más altas del año, por lo que se

espera más horas de uso del ICTA como enfriador. Lo anterior podría representar mayor ahorro energético, económico, y de reducción de emisiones de CO₂.

- Se recomienda cambiar el ventilador por uno de menor consumo energético e implementar un sistema de control ON/OFF para optimizar las horas de uso e incrementar el beneficio del uso de ICTA.
- Se recomienda continuar con el estudio experimental inicialmente acoplando el ICTA a una habitación y posteriormente, incluyendo sistemas pasivos o activos para analizar su potencial como sistema híbrido en un clima cálido-húmedo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. C. Fresneda. Febrero fulmina el récord de aumento de la temperatura global con 1,35 grados. *España: El Mundo* (2016). DOI: <http://www.elmundo.es/ciencia/2016/03/14/56e694f9ca47411a128b4631.html>
2. M. Rhodes Valbuena. Implementación de un modelo de techo verde y su beneficio térmico en un hogar de honda. *Tolima: Universidad javeriana facultad de estudios ambientales y rurales carrera de ecología* (2012), 1-67.
3. M. Merelles. Chimeneas solares, ventilación natural. *MUNDOHVACR* (2014). DOI: <https://www.mundohvacr.com.mx/mundo/2013/08/chimeneas-solares-ventilacion-natural>
4. M. Mérida Yeste. Bioconstrucción: diseño del hábitat y su relación con el territorio. *V Seminario internacional: la sostenibilidad un punto de encuentro* (2013)1-80.
5. C. Ahumada. Usan la tierra como fuente de calor. *unciencia* (2016). DOI: <http://www.unciencia.unc.edu.ar/2016/agosto/geotermia/usan-la-tierra-como-fuente-de-calor>
6. G. Florides, S. Kalogirou. Ground heat exchangers—A review of systems, models and applications. *Renewable energy* (2007) 32, 1- 15.
7. L. Ramírez Dávila, J. Xamán, J. Arce, G. Álvarez, I. Hernández Pérez, Numerical study of earth-to-air heat exchanger for three different climates, *Energy and Buildings* (2014) 76, 1-11.
8. R. D. Patel, P.V. Ramana, Experimental Analysis of Horizontal and VerticalBuried.Tube Heat Exchanger Air Conditioning System, *Indian Journal of Science and Technology* (2016), 1-23.
9. T. Singh Bisoniya, A. Kumar, P. Baredar. Energy metrics of earth–air heat exchanger system for hot and dryclimatic conditions of India. *Energy and Buildings* (2015), 214-221.
10. S. Mongkon, S. Thepa, P. Namprakai, N. Pratinthong. Cooling performance and condensation evaluation of horizontal earthtube system for the tropical greenhouse. *Energy and Buildings*(2013), 104–111.

11. M. J. Uddin Chowdhury, B. Salam and Md. Akefur Rahman. An experimental analysis of a horizontal earth to air heat Exchanger (etahe) system for hot climatic condition of Bangladesh, *International Conference on Mechanical Engineering and Renewable Energy* (2015), 1-5.
12. S. Menhoudj, A. M. Mokhtari, M. H. Benzaama, C. Maalouf, M. Lachi, M. Makhoulouf. Study of the energy performance of an earth - air heat exchanger for refreshing buildings in algeria. *Energy and Buildings* (2017) 158, 1602-1612. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.11.056>
13. P. M. Congedo, L. Bonfantini, S. Occhilupo. Sensitivity Analysis of Horizontal Air-Ground Heat Exchangers. *First Internacional Conference on computational Methods for thermal Problems* (2009), 1-5.
14. M. Cuny, J. Lin, M. Siroux, V. Magnenet, C. Fond. Influence of coating soil types on the energy of earth-airheat exchanger. *Energy and Buildings* (2017) 158, 1000-1012. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.10.048>
15. K. Kumar Agrawal, R. Misra , T. Yadav, G. Das Agrawal, D. Kamal Jamuw. Experimental study to investigate the effect of water impregnation on thermal performance of earth air tunnel heat exchanger for summer cooling in hot and arid climate. *Renewable Energy* (2017) 120, 255-265
16. H. Li, Y. Yu, F. Niu, M. Shafik, B. Chen. Performance of a coupled cooling system with earth-to-air heat exchanger and solar chimney. *Renewable Energy* (2014) 468-477.
17. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. ASHRAE: Standard 55 (2013). DOI: <https://www.ashrae.org/technical-resources/bookstore/standard-55-thermal-environmental-conditions-for-human-occupancy>
18. S. Jakhar, R. Misra, M.S. Soni, N. Gakkhar. Parametric simulation and experimental analysis of earth air heat exchanger with solar air heating duct. *Engineering Science and Technology* (2016) 2, 1059-1066. DOI: <https://dx.doi.org/10.1016/j.jestch.2016.01.009>.
19. R. Misra, V. Bansal, G. Das Agarwal, J. Mathura, T. Aseri. Thermal performance investigation of hybrid earth air tunnel heat exchanger, *Energy and Buildings*,(2012) 40,1-5.

20. S. Kumar Soni, M. Pandey, V. Nath Bartaria. Energy metrics of a hybrid earth air heat exchanger system for summer cooling requirements. *Energy and Buildings* (2016) 129, 1-8, DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.07.063>
21. F.D. Incropera, D.P. DeWitt. Transferencia de calor. En Fundamentos de transferencia de calor. *Edo. de México: Prentice Hall* (1999), 1-892.
22. J. J. Torres Agudo. Dinamica de fluidos. *Universidad de Granada* (2014). DOI: <http://www.ugr.es/~jtorres/t7.pdf>
23. R. L. Mott . Número de Reynolds, flujo laminar, flujo turbulento y pérdidas de energía debido a la fricción. *Mecánica de Fluidos Aplicada. Dayton: prentice Hall* (1996)1-580.
24. Universidad Politécnica de Cataluña. Intercambiadores de calor. *UPC* (2017).DOI:[Http://epsem.upc.edu/intercanviadorsdec calor/castella/intercanviadors_calor.html](http://epsem.upc.edu/intercanviadorsdec calor/castella/intercanviadors_calor.html)
25. Comisión Federal de Electricidad. *CFE: conoce tu Tarifa* (2018). DOI: <http://www.cfe.gob.mx/casa/Conocetutarifa>
26. Subsecretaría de Planeación y Política Ambiental Dirección General de Políticas para el Cambio Climático. *SEMARNAT* (2015) DOI: http://www.geimexico.org/image/2015/aviso_factor_de_emision_electrico%202014%20Semarnat.pdf
27. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Información por entidad, Tabasco. *INEGI* (2018). DOI: <http://www.cuentame.inegi.org.mx/monografias/informacion/tab/territorio/clima.aspx?tema=me&e=27>
28. Instituto Nacional para el Federalismo y el Desarrollo Municipal. Enciclopedia de los Municipios de México, Tabasco. *INAFED* (2018). DOI: <http://www.inafed.gob.mx/work/enciclopedia/EMM27tabasco/>
29. W. A. Schmid y R. J. Lazos Martínez . Guía para estimar la incertidumbre de la medición. *México: Centro Nacional de Metrología* (2004), 1-27.
30. D. Belatrache, S. Bentouba, M. Bourouis. Numerical analysis of earth air heat exchangers atoperating conditions in arid climates. *International journal of hydrogen energy* (2016) 42, 8898-8904. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.08.221>

31. O. A. Meneses Pérez. Diseño de un intercambiador de calor aire-tierra para generar calefacción y climatización de edificios en Santiago. Chile: Universidad de Chile Facultad de ciencias físicas y matemáticas, *Departamento de ingeniería mecánica* (2007), 1-128.
32. C. A. Arias Henao. Potencial de los intercambiadores de calor tierra-aire para acondicionamiento de aire en diferentes zonas climáticas. Escuela superior de ingenieros, *Universidad de Sevilla* (2015), 1-289.
33. S. Jakhar, R. Misra, M.S. Soni, N. Gakkhar. Parametric simulation and experimental analysis of earth air heat exchanger with solar air heating duct. *Engineering Science and Technology* (2016) 42, 1059-1066. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jestch.2016.01.009>
34. J. Vaz, M. A. Sattler, R. S. Brum, E. D. dos Santos, L. A. Isoldi. An experimental study on the use of Earth-Air Heat Exchangers (EAHE). *Energy and buildings* (2013) 72, 122-131. DOI: <http://dx.doi.org/doi:10.1016/j.enbuild.2013.12.009>
35. A. A. Serageldin, A. K. Abdelrahman, S. Ookawara (2016) Earth-Air Heat Exchanger thermal performance in Egyptian conditions: Experimental results, mathematical model, and Computational Fluid Dynamics simulation. *Energy Conversion and Management* (2016) 122, 25-38. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2016.05.053>
36. A. Pateriya, D. Verma. Fabrication and testing of earth air heat exchanger. *International Journal of Research In Science & Engineering* (2017) 148-153.
37. J. Darkwa, G. Kokogiannakis, C.L. Magadzire, K. Yuan. Theoretical and practical evaluation of an earth-tube (E-tube) ventilation system. *Energy and Buildings* (2010) 43, 1-8.
38. F. Niu, Y. Yu, D. Yu, H. Li. Investigation on Soil Thermal Saturation and Recovery of an Earth to Air Heat Exchanger under Different Operation Strategies. *Architectural Engineering* (2015) 77, 90-100.
39. M. Benhammou , B. Draoui, M. Zerrouki, Y. Marif. 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* (2014) 91, 1-11.

- 40 ABC Economía, Consejos para gastar menos dinero al utilizar el aire acondicionado. ABC (2014). DOI: <http://www.abc.es/economia/20140725/abci-ahorrar-aire-acondicionado-201407241246.html>
- 41 N. Zhang, Z. Wang. Review of soil thermal conductivity and predictive models. *International Journal of Thermal Sciences* (2017) 117, 172-183.

Anexo A

Selección de material del
tubo y sensores

A.1 Selección del Material del ICTA

Para seleccionar el material del tubo del ICTA se utilizó una metodología de diseño estructurado donde se evaluó el material considerando diferentes criterios de funcionalidad, los cuales se pueden ver como ejemplo en la Tabla A.1. El PVC fue el material que más ventajas presento, además de ser el que se ha reportado ampliamente en la literatura para estas aplicaciones, por lo cual se seleccionó como material del ICTA. En la Tabla A.2 y A.3 se pueden observar los valores de calificación asignados en la matriz de evaluación, así como, la descripción de los criterios evaluados.

Tabla A.1. Matriz de decisión del material del ITCA.

MATERIAL DEL TUBO											
Ponderación	5	3	5	5	5	5	4	4	5	5	
Criterios de Evaluación	Facilidad de instalación	Peso del material	Mantenimiento	Corrosión	No contaminan	Conductividad térmica	Temperatura de trabajo continuo	Presión de trabajo continuo	Costo	Disponibilidad	TOTAL
ACERO GALVANIZADO	4	3	1	1	2	4	5	5	4	5	154
ACERO INOXIDABLE	3	3	4	4	2	4	5	5	3	5	174
COBRE	3	3	4	3	2	5	5	5	2	3	159
PVC	5	5	5	5	4	2	5	5	5	5	210
CONCRETO	5	4	5	5	5	2	5	5	5	2	197

Tabla A.2. Descripción de valor de calificación.

Calificación	Descripción
1	Pésimo
2	Regular
3	Adecuado
4	Muy adecuado
5	Excelente

Tabla A.3. Descripción de criterios de evaluación de tabla de materia del tubo.

Criterios de evaluación	Descripción
Facilidad de instalación	Se refiere a si el material es maleable, soldable para realizar uniones en el diseño del tubo.
Peso del material	Se refiere a que tan pesado es el material (peso específico).
Mantenimiento	Se refiere a que tan costoso y que tan seguido es necesario darle mantenimiento a tuberías de ese material.
Temperatura de trabajo continuo	Se refiere a la temperatura máxima de trabajo continuo del material.
Corrosión	Se refiere a que tan resistente es el material a la corrosión.
No contaminan	Se refiere a que tan amigable es con el ambiente en referencia a que tantos residuos tóxicos pueden liberar el material.
Conductividad térmica	Se refiere a la conductividad térmica del material.
Presión de trabajo continuo	Se refiere a la presión máxima de trabajo continuo del material.
Costo	Se refiere al costo de cada material.
Disponibilidad	Se refiere a que tan disponible y que tan comercial es el material con dimensiones deseadas.

A.2 Selección de sensor de Temperatura

Para seleccionar los sensores de temperatura, como parte de la instrumentación del ICTA se evaluaron diferentes propuestas de sensores mediante una matriz de evaluación, en la Tabla A.4 se pueden observar los criterios de evaluación considerados. El termo-resistencia (RTD) fue el dispositivo que más ventajas presento, por lo cual, se seleccionó como sensor de temperatura. El valor de la calificación es la misma de la Tabla A.2 y A.5 podemos observar la descripción de los criterios evaluados.

Tabla A.4. Matriz de decisión de sensores de Temperatura

SENSORES DE TEMPERATURA												
Ponderación	5	4	4	4	3	5	5	4	3	3	5	
Criterios de Evaluación	Rango de Temperatura	Precisión	Facilidad de instalación	Estabilidad	Velocidad de respuesta	Uso para exterior	Fragilidad	Sensibilidad	Linealidad	Costo	Disponibilidad	TOTAL
Termopar	5	4	5	4	3	5	5	3	4	4	5	188
Termo-resistencia (RTD)	5	5	4	5	5	5	4	5	5	3	4	190
Termistor	5	3	4	3	5	4	4	5	1	4	5	165
LM35	5	4	3	4	5	3	4	4	5	4	5	172

Tabla A.5. Descripción de criterios de evaluación de sensores de Temperatura

Criterios de evaluación	Descripción
Rango de temperatura	Se refiere si funciona y mide los rangos de temperaturas estimados.
Precisión	Se refiere a qué tan confiable y preciso da la lectura de temperatura.
Facilidad de instalación	Se refiere a la facilidad que podría acoplarse, instalarse y aplicarse a los requerimientos del proyecto.
Estabilidad	Se refiere a estabilidad de la variable de respuesta al no haber cambios significativos de temperatura.
Velocidad de respuesta	Se refiere a que tan rápido nos da la variable de respuesta al ponerse al contacto con el material de medición.
Uso para exterior	Se refiere a tan resistente es a condiciones externas de instalación, tierra, agua, etc.
Fragilidad	Se refiere a que tan frágil es el dispositivo a la hora de manipularlo y/o instalarlo.
Sensibilidad	Se refiere a que tan sensible es el dispositivo, es decir que tan significativa es la variación en la variable de respuesta.
Linealidad	Se refiere si el comportamiento de la variable de respuesta es lineal.
Costo	Se refiera al costo de cada dispositivo.
Disponibilidad	Se refiere a que tan disponible y que tan comercial es el dispositivo.

Anexo B

Obtención del C_p de la
Tierra

Para determinar el C_p de la tierra, se muestreo el suelo mientras cavaba la zanja. Se tomaron muestras cada 0.20 m de profundidad y se colocaron en bolsas de plástico etiquetadas. Una vez que se clasificaron se pusieron en una placa para separarlas y ponerlas a secar al sol durante aproximadamente 6 horas. Una vez seca, cada muestra fue pulverizada. En la Figura B.1 se observan las muestras clasificadas y pulverizadas.

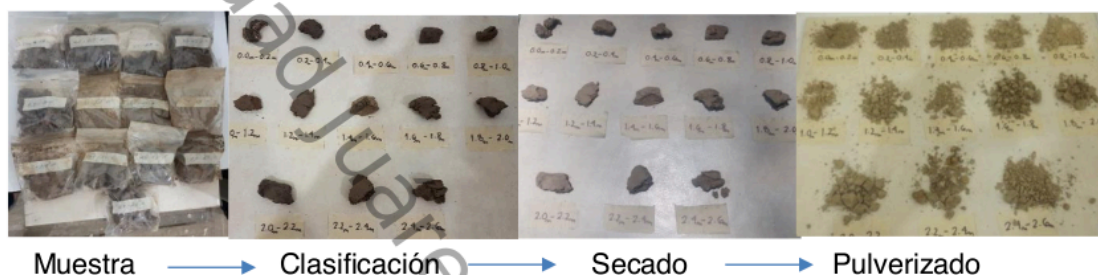


Figura B.1. El proceso de secado y pulverizado.

Una vez secada y pulverizada la muestra se colocó una pequeña porción en tubos porta muestras, Figura B.2. Las muestras fueron sometidas en un microondas durante 5 minutos para eliminar su exceso de humedad. Con ayuda de una balanza analítica ADAM PW254 se pesó la cantidad de muestra para su análisis, aproximadamente 1 gramo por cada muestra para contar con excedente para el análisis.



(a) Almacenado y secado de las muestras



(b) Pesaje de muestras

Figura B.2. Secado y pesaje de muestras.

Por último, las muestras se seleccionaron, etiquetaron y entregaron al laboratorio de termogravimetría para obtener el valor de la capacidad calorífica (C_p). El equipo utilizado fue un equipo de termogravimetría Evo Labsys de la marca Setaram, y las mediciones se realizaron en el intervalo de 30 a 70°C con una rampa de 2°C/min y argón con un flujo de 10 mL/s y 20 psi. Las muestras y el equipo se presentan en la Figura B.3.



Figura B.3. Muestras y equipo del laboratorio de química.

En la Tabla B.1 se presentan los valores obtenidos para las muestras de tierra a las siguientes profundidades: 0.2-0.4 m, 0.6-0.8 m, 1.2-1.4 m, 1.6-1.8 m y 2.0-2.2 m. Los resultados indican que hasta una profundidad de 2.2 m el C_p no varía significativamente, el C_p promedio fue de 0.8198 J g⁻¹K⁻¹.

Tabla B.1 Valores de C_p obtenidos a profundidades del suelo.

	PROFUNDIDAD DEL SUELO (m)				
	0.2 a 0.4	0.6 a 0.8	1.2 a 1.4	1.6 a 1.8	2.0 a 2.2
m (g)	0.0730	0.0820	0.086	0.085	0.079
$\Delta T(K)$	32.695	30.002	29.998	29.990	30.001
Q (J)	1.741	2.052	2.350	1.983	2.029
C_p (J g⁻¹K⁻¹)	0.726	0.834	0.910	0.776	0.856

Anexo C

Costo del ICTA

La estimación de los costos de construcción del ICTA se presenta en la Tabla C.1. Los costos fueron obtenidos con fecha de 08 de febrero de 2018, considerando datos de proveedores locales como Home depot, Santandreu, Steren y constructoras.

Tabla C.1 Costos de implementación del ICTA.

	Costo (\$)	Cantidad	Total (\$)
Tubo 4" (6 m) PVC	62.00	2	124.00
Tubo 8" (6 m)PVC	109.00	1	109.00
Aislante(1"x48"x96")	369.00	1	369.00
Codos 90° PVC	12.00	6	72.00
Pegamento para PVC	69.00	1	69.00
Reductores de PVC	23.50	2	47.00
Tapas PVC	3.45	2	6.90
Ventilador	295.00	1	295.00
Extensión eléctrica (30 m)	290.00	1	290.00
Renta de equipo excavación 4 horas	1,200.00	1	1200.00
TOTAL			\$ 2,581.90

Anexo D

Actividades académicas.

- 1) Artículo enviado a revista indizada al JCR.
- 2) Artículo de revista arbitrada.
- 3) Estancia en la Plataforma Solar de Almería, España.
- 4) Ponencias Nacionales
- 5) Cursos de actualización continua.

1) Artículo enviado a revista indizada al JCR.

21/5/2018

Your co-authored submission - Ing. Heidi Díaz

Your co-authored submission

Energy and Buildings <EviseSupport@elsevier.com>

mié 02/05/2018 10:54 p.m.

From: heididiaz@hotmail.com <heididiaz@hotmail.com>;

Dear Ms. Díaz Hernández,

You have been listed as a Co-Author of the following submission:

Journal: Energy and Buildings

Title: Experimental study of an earth to air heat exchanger (EAHE) for warm humid climatic conditions of Tabasco, Mexico

Corresponding Author: KARLA MARIA Aguilar Castro

Co-Authors: Heidi Paola Díaz Hernández, Edgar Vicente Macías Melo, Iván Hernández Pérez, Jesús Xamán, Juan Serrano Arellano

KARLA MARIA Aguilar Castro submitted this manuscript via Elsevier's online submission system, EVISE®. If you are not already registered in EVISE®, please take a moment to set up an author account by navigating to http://www.evise.com/evise/faces/pages/navigation/NewCoauthor.jspx?_afBNI_ACB_PNR.

If you already have an ORCID, we invite you to link it to this submission. If the submission is accepted, your ORCID will be transferred to ScienceDirect and CrossRef and published with the manuscript.

To link an existing ORCID to this submission, or sign up for an ORCID if you do not already have one, please click the following link: [Link ORCID](#)

What is ORCID?

ORCID is an open, non-profit, community-based effort to create and maintain a registry of unique researcher identifiers and a transparent method of linking research activities and outputs to these identifiers.

More information on ORCID can be found on the ORCID website: <http://www.orcid.org>, or on our ORCID help page: <http://help.elsevier.com/question/answers/detail/614/2730/0/2923>

If you did not co-author this submission, please contact the Corresponding Author directly at karla.aguilar@ujat.mx.

Thank you,
Energy and Buildings

This message was sent automatically. Please do not reply

2) Artículo revista arbitrada

Publicación de artículo en Revista Internacional-Arbitrada

[http://www.ecorfan.org//spain/researchjournals/Desarrollo Tecnológico/vol1num2/Revista del Desarrollo Tecnológico V1 N2 5.pdf](http://www.ecorfan.org//spain/researchjournals/Desarrollo_Tecnologico/vol1num2/Revista del Desarrollo Tecnológico V1 N2 5.pdf)





Certificate of Publication - Research Journal

2015-2016

RENIECYT - LATINDEX - Research Gate - DULCINEA - CLASE - Sudoc - HISPANA - SHERPA
UNIVERSIA - E-Revistas - Google Scholar - DOI - REDIB - Mendeley - DIALNET - ROAD - ORCID

CDMX-Mexico, December 30- 2017

DÍAZ-HERNÁNDEZ, Heidi Paola, AGUILAR-CASTRO, Karla María, MACÍAS-MELO, Edgar Vicente y SERRANO-ARRELLANO
Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, Instituto Tecnológico Superior de Huichapan

PRESENT:

Through this letter we state that **DÍAZ-HERNÁNDEZ, Heidi Paola, AGUILAR-CASTRO, Karla María, MACÍAS-MELO, Edgar Vicente y SERRANO-ARRELLANO** has been published in **Revista del Desarrollo Tecnológico**, with an article entitled **"Diseño de un intercambiador de calor tierra-aire en clima cálido-húmedo"**, in Volume 1 Number 2 with 2531-2960, at pages 44-51 segment.

License: Creative Commons Attribution-No commercial 2.5 Mexico and GNU/GPL.

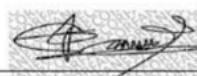
The Research Journal is Arbitrated by peer review is indexed and deposited in Databases:

19302	For indexing in Latin America and the Caribbean
20-281 HB9	For indexing Latin American Doing in Social Sciences and Humanities
671	For indexing in scientific journals Electronic Spanish and Latin American
7045008	For disclosure and publication in the Ministry of Education and Culture-Spain
25409	For repository in the Library University-Madrid
16258	For indexing Dialnet Foundation University of La Rioja
20389	For indexing in journals published in the countries of Latin America and the Caribbean-UNAM
15048	For international registration of Congresses and Symposia-International
2007-1582	For registration to the International Index, in print
2007-3682	For registration to the International Index in electronic format

This research is published in:
http://www.ecorfan.org//spain/researchjournals/Desarrollo_Tecnologico/vol1num2/Revista_dd_Desarrollo_Tecnologico_V1_N2_5.pdf

We issue this certificate for the purposes of science, technology and innovation.

Regards,



María Ramos-Escamilla, PhD.
CEO-ECORFAN-México, S.C.
CONACYT-RENIECYT: 2015-20795

ECORFAN-México, S.C.
244 - 2 Itzopan Street
La Ronda, Escamépez Municipality
Mexico State, 551 30 Zipcode
Phone: +52 1 55 6159 2296
Skype: ecorfan-mexico.s.c.
E-mail: conacyt@ecorfan.org
Facebook: ECOMEX-MEXICO S.C.
Twitter: @EcorfanC

www.ecorfan.org

Holdings

Bolivia	Honduras	Chile	Nicaragua
Cameroon	Guatemala	France	Republic of the Congo
El Salvador	Colombia	Ecuador	Dominica
Peru	Spain	Cuba	Haiti
Argentina	Paraguay	Costa Rica	Venezuela
Czech Republic			

Diseño de un intercambiador de calor tierra-aire en clima cálido-húmedo

DÍAZ-HERNÁNDEZ, Heidi Paola*†, AGUILAR-CASTRO, Karla María, MACÍAS-MELO, Edgar Vicente y SERRANO-ARRELLANO

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco
Instituto Tecnológico Superior de Huichapan

Recibido Abril 27, 2017; Aceptado Junio 21, 2017

Resumen

En este trabajo se analiza la factibilidad de la construcción de un prototipo de un Intercambiador de Calor Tierra-Aire (ICTA), como un sistema pasivo en la obtención del confort térmico. Para ello, se realizó un análisis y diseño de un ICTA en un clima cálido-húmedo. Este análisis, se realizó mediante Dinámica de Fluidos Computacional, se determinó la diferencia de temperatura entre la entrada y salida (ΔT), así como, el efecto de la velocidad de entrada en la obtención de la ΔT . Para este caso, se modeló un ICTA de 6 m de largo, 2.5 m de profundidad y 0.1 m de diámetro. En el estudio se considera 27°C como la temperatura promedio del suelo a 2.5 m y 36°C como el promedio de la temperatura ambiente. Para la simulación se utilizó el procesador FLUENT y se analizó el ICTA para 3 velocidades de entrada del fluido: 1, 3, y 5 m/s. Como resultado, se obtuvo un efecto de enfriamiento de 5, 3 y 2°C, para 1, 3, y 5 m/s, respectivamente. Estos resultados indican que una velocidad de entrada baja mejora el desempeño del ICTA.

Intercambiador de Calor Tierra-Aire, FLUENT, sistema pasivo, perfil de temperatura

Abstract

This work analyzes the feasibility of the construction of a prototype of an Earth-Air Heat Exchanger (EAHE), as a passive system for obtain thermal comfort. For this, an analysis and design of an EAHE was carried out in a warm-humid climate. Computational Fluid Dynamics was used to analyze the thermal performance of an EAHE with 6 m long, 2.5m depth and 0.1 m diameter. The temperature difference between the inlet and the outlet air (ΔT), and the effect of the air inlet velocity on ΔT were determined in this analysis. The average soil temperature and the average ambient temperature were considered as 27°C and 36°C, respectively. For the simulations, the FLUENT software was used. Air inlet velocities of 1, 3, and 5 m/s provided a cooling effect of 5, 3, and 2°C, respectively. This result indicates that a low air inlet velocity improves the performance of the EAHE.

Earth-to-Air Heat Exchanger, FLUENT, passive system, temperature profile

Citación: DÍAZ-HERNÁNDEZ, Heidi Paola, AGUILAR-CASTRO, Karla María, MACÍAS-MELO, Edgar Vicente y SERRANO-ARRELLANO. Diseño de un intercambiador de calor tierra-aire en clima cálido-húmedo. Revista del Desarrollo Tecnológico 2017, 1-2: 34-51

* Correspondencia al Autor (Correo Electrónico: veladavila@gmail.com)

† Investigador contribuyendo como primer autor.

Introducción

En la actualidad, el incremento de tecnologías ha provocado un aumento exponencial del consumo energético. Uno de los objetivos principales de estas tecnologías es proveer condiciones de confort térmico deseados por sus usuarios. Sin embargo, paradójicamente esto ha causado graves problemas al medio ambiente, tales como el agotamiento de los recursos naturales, la degradación de los principales ecosistemas, la contaminación y el calentamiento global (Zheng-Xia, 2016).

Como evidencia del calentamiento global se observó que en febrero del 2016, se registró un aumento de 1.35°C de la temperatura mundial (Fresneda, 2016). Esto ha alarmado a muchas instituciones, organizaciones y diferentes gobiernos. El cambio climático ha generado una tendencia a la concientización de la sociedad para el uso de energías sustentables y sistemas pasivos que minimicen el consumo eléctrico, y que permitan aprovechar energías y recursos renovables para minimizar el impacto ambiental.

México participa en acuerdos internacionales contra el cambio climático, ha ratificado el Protocolo de Kyoto y participa en actividades de la Agenda 21, ONU. También, ha decretado la Ley General de Cambio Climático (2012), en la cual, se crea el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático; así mismo, la Ley de Transición Energética (2015), la cual establece las bases para un cambio hacia las energías renovables. México se ha comprometido a reducir las emisiones de carbono negro en un 51% y reducir las emisiones de gases de efecto invernadero en un 22% al 2030; según lo acordado en la ONU, COP 21 y el Acuerdo de París. Sin embargo, esto aun no es suficiente ya que en comparación con otros países, México, tiene la necesidad de aperturar aun más políticas en cuestiones energéticas, con el fin de implementar el desarrollo sustentable en el país (Bautista Vargas *et al.*, 2016).

En nuestro país es necesaria la innovación tecnológica, ya que es un tema fundamental relacionado con el desarrollo del país y sociedad. Lo anterior, debido a que las necesidades actuales del mundo, son complejas, y debido a esto se necesitan sistemas eficaces que permitan enfrentarlos (Reyes *et al.*, 2017). Es por eso que en este estudio se propone a los Intercambiadores Tierra-Aire (ICTA) como una alternativa de un sistema pasivo de confort térmico. Estos consisten básicamente en un tubo enterrado a cierta profundidad de la tierra, por el cual circula aire. Este tubo conecta el interior de una edificación con el ambiente exterior y viceversa.

Los ICTA permiten el ahorro de energía mediante el calentamiento del aire debido a la temperatura del suelo para la calefacción y viceversa, el enfriamiento del aire para la refrigeración de edificios. Este fenómeno es posible debido a que la temperatura de la tierra permanece relativamente constante durante todo el año, debido a que las fluctuaciones de temperatura en la superficie de la tierra se ven disminuidas debido a la alta inercia térmica del suelo. Por lo tanto, a una profundidad suficiente, la temperatura del suelo es siempre mayor que la del aire exterior en invierno o lugares fríos y es menor en verano o lugares cálidos (Florides y Kalogirou, 2007). Los ICTA han demostrado tener un muy bajo consumo de energía (Jhala y Bansal, 2016) y debido a la inercia de la tierra es aplicable con enfriador y como calefacción de acuerdo a la temperatura, suelo y clima de la región.

En este estudio se realizó un análisis de un diseño de un ICTA mediante Dinámica de Fluidos Computacional con el fin de determinar el ΔT , así como, determinar el efecto de la velocidad de entrada en la obtención de esta.

Este estudio permitirá establecer la viabilidad de la construcción de un prototipo experimental de un ICTA en regiones con características cálido-húmeda.

El estudio se realizó en la ciudad de Cunduacán, Tabasco. Una región con clima cálido-húmedo, donde el promedio de máxima temperatura es de 36°C (INEGI, 2016) y el uso de sistemas de aire acondicionado se ha vuelto un servicio básico en la zona, por lo que, un ICTA podría ser una alternativa para ahorro en el consumo de energía eléctrica.

Modelo del ICTA

El diseño del intercambiador se muestra en la figura 1. El cual consiste en un ICTA horizontal de 6 m de largo, enterrado a 2.5 m de profundidad. El material que se usó para el tubo fue PVC (policloruro de vinilo) de 4" (10.2 cm), el cual tiene: una densidad de 370 kg/m^3 , calor específico de $80 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$ y conductividad térmica de $0.25 \text{ W/m}\cdot\text{K}$. El modelo horizontal y el tipo de material se seleccionó tomando en cuenta los trabajos reportados en la literatura, donde Rakesh *et al.*, (2016) indican que se ha obtenido una mayor eficiencia con el modelo horizontal en comparación con el vertical, así como, también concluyen que el material del tubo ha tenido una diferencia poco significativa en la eficiencia del ICTA, por lo cual, se obtuvo por un material comercial y de bajo costo.

Para las definir las dimensiones del ICTA se tomó en cuenta recomendaciones de un estudio experimental previo realizado en Bangladesh, con condiciones climáticas similares a la de nuestra región de estudio (Mohammad Jia *et al.*, 2015).

En la figura 1 se observa el modelo físico de nuestro ICTA, en donde la sección gris oscuro representa una sección aislada del tubo en la sección de salida. La velocidad de entrada se varió en 1, 3 y 5 m/s que corresponden a los Caso I, Caso II y Caso III, respectivamente.

ISSN-2531-2960
 ECORFAN® Todos los derechos reservados

Esto con el fin de observar que tan significativa es esta variación en la eficiencia del ICTA.

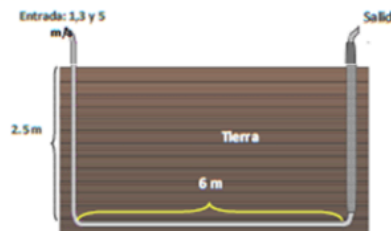


Figura 1 Diseño del ICTA

El Estado de Tabasco tiene suelo muy húmedo y de diferentes composiciones según la región en a que se encuentre (INAFED, 2016), es por eso que para obtener la temperatura de la tierra se realizaron mediciones previas en el área de Cunduacán, en el intervalo de tiempo de las 10:30 a las 17:30 h. Durante estas 7 horas, se realizaron mediciones de temperatura a diferentes profundidades como se muestra en la figura 2. Con estos resultados, se obtuvo que la temperatura del suelo fue en promedio de 27°C a una profundidad de 2.5 m. También se observó que a partir de los 0.5 m de profundidad la temperatura de la tierra permanece con variaciones poco significativas.

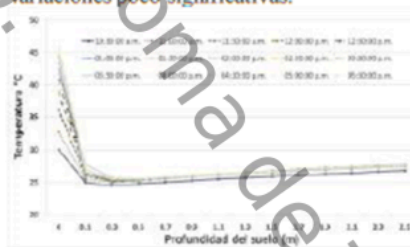


Gráfico 2 Comportamiento de la temperatura del suelo de estudio

Para realizar el análisis computacional del ICTA se utilizaron las herramientas computacionales GAMBIT y FLUENT, con este último, se obtuvo el comportamiento de los perfiles de velocidad y temperatura.

DÍAZ-HERNÁNDEZ, Heidi Paola, AGUILAR-CASTRO, Karla María, MACÍAS-MELO, Edgar Vicente y SERRANO-ARRELLANO. Diseño de un intercambiador de calor tierra-aire en clima cálido-húmedo. Revista del Desarrollo Tecnológico 2017

En FLUENT se resuelven las siguientes ecuaciones (NASA, 2016):

Ecuación de continuidad:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

Donde: ρ es la densidad (kg/m^3); u, v, w son las componentes de la velocidad (m/s); t es el tiempo (s); x, y, z son las componentes de la posición (m).

X-Momentum:

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u^2)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho uv)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho uw)}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{1}{Re_r} \left[\frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} \right] \quad (2)$$

Donde: τ son componentes del tensor de tensiones (N/m^2); Re_r es el número de Reynolds que es la relación entre el escalamiento de la inercia del flujo y las fuerzas viscosas en el flujo (adimensional).

Y-Momentum:

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho uv)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v^2)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho vw)}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{1}{Re_r} \left[\frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} \right] \quad (3)$$

Z-Momentum:

$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho uw)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho vw)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w^2)}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{1}{Re_r} \left[\frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} \right] \quad (4)$$

Energía:

$$\begin{aligned} \frac{\partial(E_T)}{\partial t} + \frac{\partial(uE_T)}{\partial x} + \frac{\partial(vE_T)}{\partial y} + \frac{\partial(wE_T)}{\partial z} = & -\frac{\partial(u p)}{\partial x} - \frac{\partial(v p)}{\partial y} - \frac{\partial(w p)}{\partial z} - \frac{1}{Re_r Pr_r} \left[\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} \right] + \\ & \frac{1}{Re_r} \left[\frac{\partial}{\partial x} (u \tau_{xx} + v \tau_{xy} + w \tau_{xz}) + \frac{\partial}{\partial y} (u \tau_{xy} + v \tau_{yy} + w \tau_{yz}) + \frac{\partial}{\partial z} (u \tau_{xz} + v \tau_{yz} + w \tau_{zz}) \right] \end{aligned} \quad (5)$$

Donde: E_T es la energía total (J); q es el flux de calor (W/m^2); Pr_r es el número de Prandtl que es la relación entre las tensiones viscosas y las tensiones térmicas (adimensional).



Figura 2 Metodología de simulación

DÍAZ-HERNÁNDEZ, Heidi Paola, AGUILAR-CASTRO, Karla María MACÍAS-MELO, Edgar Vicente y SERRANO-ARRELLANO. Diseño de un intercambiador de calor tierra-aire en clima cálido-húmedo. Revista del Desarrollo Tecnológico 2017

Metodología

Para la modelación, se propuso un diseño de un ICTA y se analizó mediante Dinámica de Fluidos Computacional. Para el estudio, se usó GAMBIT (pre-procesador) para el dibujo y mallado, y FLUENT (procesador) para la simulación. En la figura 2 se muestra un diagrama de flujo del procedimiento que se llevó a cabo para realizar la simulación.

En la parte del dibujado se consideró el modelo del ICTA de la figura 1. Para la discretización del modelo se utilizó un mallado con elementos "hex" del tipo "map" con una razón de aspecto entre 0 y 1. Durante el mallado se obtuvo un total de nodos de 164,643 nodos.

En la figura 3 se muestra el dibujo mallado, donde se establecieron las condiciones de frontera para cada cara. Cada cara fue considerada como una pared, con propiedades específicas, ver Tabla 1.



Figura 3 Dibujo y mallado en GAMBIT

El archivo del mallado, *.msh, fue importado a FLUENT y se escaló en cm. Se definieron las ecuaciones a resolver, así como, los materiales y propiedades del fluido.

Como fluido se consideró aire y como material sólido de las paredes se seleccionó PVC. Se definieron las características y establecieron condiciones de frontera para cada cara, en la entrada vertical se definieron temperaturas por cada sección de las señaladas en la Figura 2.

El tubo vertical de salida se estableció como aislado. Las propiedades de los materiales considerados se muestran en la Tabla 1.

Para realizar las simulaciones se establecieron velocidades de entrada 1, 3, 5 m/s y se consideró el modelo de la figura 3 y los datos de la Tabla 1. El criterio de convergencia de las ecuaciones gobernantes del sistema se estableció en 1×10^{-8} como residual para todos los casos.

Propiedades	Fluido (Aire)	Pared del ducto (PVC)	Aislante
Conductividad térmica (W/m K)	0.0342	0.25	Se especificó como pared aislada ($k=0$)
ρ (kg/m ³)	1.225	370	
Calor específico (J/kg K)	1006.43	80	
Temperatura promedio ambiente (°C)	36		
Temperatura promedio del suelo (°C)	27		

Tabla 1 Características y propiedades del fluido y paredes

Resultados

Para el Caso 1, con velocidad 1 m/s, la solución del modelo convergió aproximadamente a las 600 iteraciones como se muestra en la figura 5.

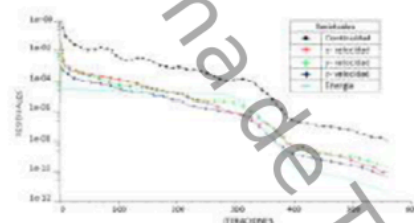


Figura 4 Residuales Caso I

En la figura 4 se presenta el comportamiento del contorno de temperatura obtenido para el Caso I, en el cual se observa que es posible alcanzar una temperatura máxima de salida de 31°C (304 K).

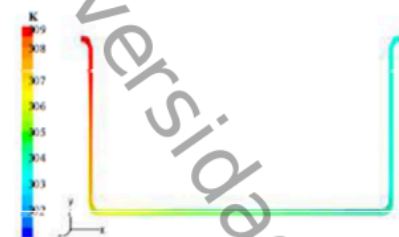


Figura 5 Contorno de temperatura Caso I

Para el Caso II, con velocidad 3 m/s, la solución se obtuvo antes de las 450 iteraciones como se muestra en la figura 7.

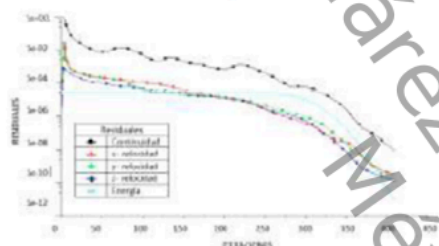


Figura 6 Residuales Caso II

El contorno de temperatura del Caso II, se muestra en la figura 7, se puede observar que para esta velocidad de 3 m/s fue posible alcanzar una temperatura de salida de aproximadamente 33 °C (306 K).

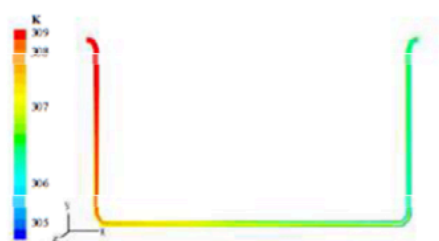


Figura 7 Contorno de temperatura Caso II

Finalmente, el Caso III, con velocidad de 5 m/s, convergió cerca de las 400 iteraciones y los resultados del residual se pueden ver en la figura 9.

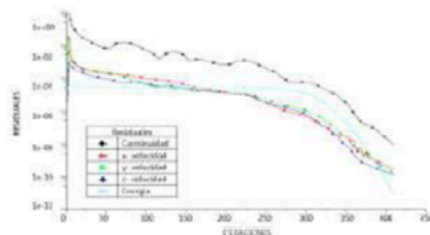


Figura 8 Residuales Caso III

El contorno de temperatura del Caso III se puede ver en la figura 10, en el cual se observa que fue posible alcanzar una temperatura de salida de aproximadamente 34 °C (307 K).



Figura 9 Contorno de temperatura Caso III

En la Tabla 2 se presenta un concentrado de los resultados obtenidos para los tres casos de estudio.

Casos	V (m/s)	Temperatura de entrada (°C)	Temperatura de salida (°C)	ΔT (°C)
I	1	36	31	5
II	3	36	33	3
III	5	36	34	2

Tabla 2 Resumen de los resultados obtenidos

Como se observa en los resultados obtenidos, la diferencia entre la temperatura de salida del Caso II y III fue de tan solo 1.0°C. Mientras que, el Caso I obtuvo la máxima diferencia, 5°C. Puede observarse que a medida que se incrementa la velocidad la ΔT disminuye.

Agradecimientos

Se agradece al Programa para el Desarrollo Profesional Docente (PRODEP) por el apoyo financiero para el desarrollo del proyecto PRODEP UJAT-DTC-246, del cual se deriva este trabajo.

Conclusiones

Los resultados obtenidos sugieren que para incrementar la ΔT , la velocidad del fluido más adecuada de acuerdo a este estudio es de 1 m/s (Caso I), es decir, cuando la velocidad de entrada es más baja. Esto es, debido a que el tiempo de residencia del fluido en el ducto es mayor que para el Caso II y III. Estos resultados indican que a medida que se incrementa la velocidad, la ΔT disminuye.

Es importante señalar que si se considera el estándar de confort térmico entre 20 y 25°C, se puede concluir que este modelo del ICTA no logrará proporcionar el confort térmico deseado. Lo anterior, es evidente debido a que la temperatura del suelo es de 27°C.

Con estos resultados obtenidos, se puede analizar que para mejorar el diseño sería necesario:

1) incrementar la profundidad para el ICTA en esta región;

2) implementar técnicas que ayuden a alcanzar temperaturas en el suelo por debajo de 27°C, tales como un sistema de riego o bien vegetación, ya que se ha demostrado que la vegetación puede mejorar la calidad del aire, así como también reducir los niveles de CO₂. Lo anterior, debido a que estos sistemas funcionan como reguladores de temperatura natural, lo cual ocasiona que las estructuras o capas que se encuentran debajo del suelo alcancen temperaturas frescas en verano y cálidas en invierno (Mata González y Galicia Serrano, 2016); y

3) proponer otras configuraciones para el ICTA donde se incremente el tiempo de residencia del fluido en el ducto.

Referencias

Bautista Vargas, M., Barron Torres, J., García Martínez A., Hernández Flores, J. (2016). Desarrollo sustentable y los diferentes métodos de transporte de energía eléctrica. *Revista de tecnología e innovación*, 3(7), 60-72.

Florides, G., Kalogirou, S. (2007). Ground heat exchangers - A review of systems, models and applications. *Renewable energy*, 32 (15), 2461-2478.

Fresneda, C. (2016). Febrero fulmina el récord de aumento de la temperatura global con 1,35 grados. *El mundo*. Recuperado de: <http://www.elmundo.es/ciencia/2016/03/14/56e694f9ca47411a128b4631.html>

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2016). Recuperado de:

<http://www.cuentame.inegi.org.mx/monografias/informacion/tab/territorio/clima.aspx?tema=me&e=27>

Instituto Nacional para el Federalismo y el Desarrollo Municipal (INAFED). (2016). *Enciclopedia de los municipios y delegaciones de México, Tabasco*.

Jhala R. S., Bansal, V. (2016). A comprehensive review on EATHE. VII International Conference on Recent Innovations in Science, Engineering and Management, RISEM-16, 530-543.

Mata González M., Galicia Serrano, C. (2016). Ahorro energético indirecto mediante techos verdes. *Revista de Investigación y Desarrollo* 2(5), 77-81.

Mohammad Jia Uddin Chowdhury, Bodius Salam, Md. Akefur Rahman. (2015). An experimental analysis of a horizontal earth to air heat Exchanger (ETAHE) system for hot climatic condition of Bangladesh. *International Conference on Mechanical Engineering and Renewable Energy (ICMERE2015)*.

National Aeronautics and Space Administration (NASA). (2015). Navier-Stokes Equations.

ONU, Organización de las Naciones Unidas, Agenda 21, Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente.

ONU, Organización de las Naciones Unidas, Acuerdo de París COP21 de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático.

Rakesh D. Patel, Ramana, P.V. (2016). Experimental Analysis of Horizontal and Vertical Buried Tube Heat Exchanger Air Conditioning System. *Indian Journal of Science and Technology*, 9(35), 1-8.

Reyes R., Soto, L. E., Elizarrarás, R. (2017). La innovación tecnológica a través de proyectos de ingeniería con enfoque sistémico. *Revista de Aplicación Científica y Técnica*, 3(7), 41-50.

Zheng-Xia, H., Shi-Chun X., Wen-Xing S., Ry-Yin L., Hong C. (2016). Factors that influence corporate environmental behavior: empirical analysis based on panel data in China. *Journal of Cleaner Production*, 133,531-543.

3) Estancia en la Plataforma de Almería, España.

 GOBIERNO DE ESPAÑA
MINISTERIO DE ECONOMÍA, INDUSTRIA Y COMPETITIVIDAD

 **Ciemat**
Centro de Investigaciones Energéticas, Piesoambientales y Tecnológicas

Plataforma Solar de Almería

Heidi Paola Díaz Hernandez
División Académica de Ingeniería y Arquitectura
Universidad Juárez Autónoma de Tabasco
México.

Tabernas, Almería, España, 30 de Noviembre de 2017

Asunto: Certificado de Estancia

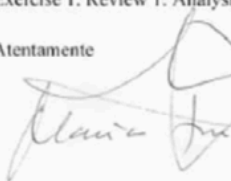
María José Jiménez Taboada, Científico Titular del CIEMAT, certifica que Heidi Paola Díaz Hernandez, ha realizado una Estancia Técnica de Investigación en la Plataforma Solar de Almería. La estancia se ha desarrollado satisfactoriamente del 6 de Septiembre al 30 de Noviembre de 2017. Esta estancia se ha dedicado a lo siguiente:

- Adquirir los conocimientos necesarios para la realización de experimentación donde se involucren renovaciones de aire en un recinto, analizando el efecto de la temperatura y velocidad de viento bajo diferentes condiciones de frontera.
- Adquirir conocimientos para el uso de metodologías y herramientas necesarias para el modelado de sistemas físicos a partir de datos experimentales, para obtener el coeficiente de pérdida de calor y determinar la incertidumbre.

Como resultado de las actividades desarrolladas durante esta estancia se han elaborado los siguientes documentos:

- H.P. Díaz Hernández, P.R. Torres Hernández, K.M. Aguilar Castro, M.J. Jiménez Taboada. Annex 71 EBC IEA. Building energy performance assessment based on in-situ measurements. Subtask 3 – Common Exercise 1. Analysis Report. 3rd expert meeting. October 23-25, 2017, Chambéry, France.
- P.R. Torres Hernández, H.P. Díaz Hernández, K.M. Aguilar Castro, M.J. Jiménez Taboada. Annex 71 EBC IEA. Building energy performance assessment based on in-situ measurements. Subtask 3 – Common Exercise 1. Review 1. Analysis Report. 4th expert meeting. April 9-11, 2018, Brussels, Belgium.

Atentamente

Dra. María José Jiménez Taboada
Jefe de Grupo de Análisis Energético Experimental de Componentes Constructivos y Edificios
Unidad de I+D sobre Eficiencia Energética en la Edificación
Plataforma Solar de Almería-CIEMAT

CORREO ELECTRÓNICO
mjose.jimenez@psa.es

P.O. Box. 22
04200 Tabernas (Almería)
TLF: +34 950387900 ext 922
FAX: +34 950365015

4) Ponencia

Participación en congreso Interdisciplinario de Energías Renovables, Mantenimiento Industrial, Mecatrónica e Informática 2017



Congreso Interdisciplinario de Energías Renovables,
Mantenimiento Industrial, Mecatrónica e Informática
2017

Otorga la presente

CONSTANCIA

A

Heidi Paola Díaz Hernández

Por su participación con la ponencia:

Diseño de un intercambiador de calor tierra-aire en clima cálido-humedo.

Durante el 2do. Congreso Interdisciplinario de Energías Renovables,
Mantenimiento Industrial, Mecatrónica e Informática, llevado a cabo
del 27 al 29 de septiembre del 2017, en San Juan del Río, Qro.



Ángel Marroquín- de Jesús, PhD
COORDINADOR CIERMAI



María Ramos-Escamilla, PhD
CEO ECORFAN MEXICO







Participación en el 4to congreso de Ingeniería Mecánica Eléctrica (2018)


**UNIVERSIDAD JUÁREZ
AUTÓNOMA DE TABASCO**
“SECTOR DE LA CIENCIA, ARQUITECTURA Y LA VE”


División Académica de Ingeniería y Arquitectura

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco
 División Académica de Ingeniería y Arquitectura

Otorgan la presente
CONSTANCIA

A: Heidi Paola Díaz Hernández, Manuel Salvador Madrigal Valenzuela, Karla María Aguilar Castro, Edgar Vicente Macías Melo, Iván Alejandro Hernández Pérez.

Por su destacada participación con la ponencia titulada «EVALUACIÓN TÉRMICA DE UN SISTEMA PASIVO PARA CLIMATIZACIÓN DE EDIFICACIONES» presentada en el **4º CONGRESO NACIONAL DE INGENIERÍA MECÁNICA ELÉCTRICA**, realizado del 23 al 25 de abril del presente, en las instalaciones de esta División Académica.


Dr. Candelario Bolaina Torres
 Director


**UNIVERSIDAD JUÁREZ
AUTÓNOMA DE TABASCO**
DIV. ACADÉMICA DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

Tabasco a 23 de Abril de 2018.








Folio: IME/CDC/2018/006-06

5) Cursos de actualización continua.

 **UNIVERSIDAD JUÁREZ
AUTÓNOMA DE TABASCO**
ESTUDIO EN LA DUDA. ACCIÓN EN LA FE



Otorga la presente

CONSTANCIA

A: Heidi Paola Díaz Hernández

Por su participación en el Curso-Taller *"Dinámica de Fluido Computacional para la simulación térmica de Edificaciones"* realizado en las instalaciones de la División Académica de Ingeniería y Arquitectura de esta casa de estudios, del 08 al 12 de Enero de 2018 con una duración de 25 horas.

Cunduacán, Tabasco; Martes 17 de Enero de 2018



Dr. Candelario Bolaina Torres
DIRECTOR


DIRECCIÓN

DAJA/GI/2018/020

 **UNIVERSIDAD JUÁREZ
AUTÓNOMA DE TABASCO**
ESTUDIO EN LA DUDA. ACCIÓN EN LA FE



Otorga la presente

CONSTANCIA

A : Heidi Paola Díaz Hernández

Por su participación en el Curso-Taller "Simulación térmica de Edificaciones con Energy-Plus" realizado en las instalaciones de la División Académica de Ingeniería y Arquitectura de esta casa de estudios, del 08 al 12 de Enero de 2018 con una duración de 25 horas.

Cunduacán, Tabasco; Martes 17 de Enero de 2018



Dr. Candelario Bolaina Torres
DIRECTOR



DAIA/GI/2018/000

UNIVERSIDAD JUÁREZ
AUTÓNOMA DE TABASCO
"ESTUDIO EN LA DUDA. ACCIÓN EN LA FE"

División Académica de Ingeniería y Arquitectura

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco
División Académica de Ingeniería y Arquitectura

Otorgan la presente
CONSTANCIA

A: Heidi Paola Díaz Hernández

Por su participación como **Asistente** al curso « SOLID WORKS BÁSICO », realizado como actividad previa al **4^{to} CONGRESO NACIONAL DE INGENIERÍA MECÁNICA ELÉCTRICA "Ingeniería para el Desarrollo Sustentable"** del 10 al 17 de Abril del presente, en las instalaciones de esta División Académica, con duración de 30 horas.

Dr. Candelario Bolaina Torres
Director

CONGRESO NACIONAL DE INGENIERÍA MECÁNICA ELÉCTRICA
4

CONSORCIO DE UNIVERSIDADES MEXICANAS
CUATRO UNIVERSIDADES TABASCO

UNIVERSIDAD JUÁREZ AUTÓNOMA DE TABASCO
Ciudad de Tabasco a 04 de Mayo de 2018.
DIRECCIÓN

Folio: DE-CDCE-2018-005-454



Universidad Juárez Autónoma de Tabasco

División Académica de Ingeniería y Arquitectura

Otorgan la presente

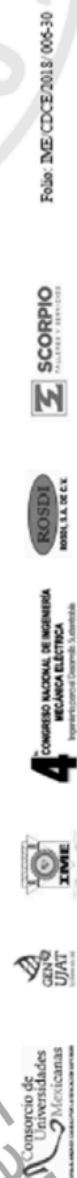
CONSTANCIA

A: Heidi Paola Díaz Hernández

Por su participación como Asistente al curso titulado «OPTIMIZACIÓN NO LINEAL», realizado durante el 4^{to}. CONGRESO NACIONAL DE INGENIERÍA MECÁNICA ELÉCTRICA del 23 al 25 de abril del presente, en las instalaciones de esta División Académica y con duración de 25 horas.


 Dr. Candelario Bolaina Torres
 Director

DIRECCIÓN



Folio: INE-CDCE/2018/006-30

ÁNÁLISIS EXPERIMENTAL DE UN INTERCAMBIADOR DE CALOR TIERRA-AIRE PARA SU USO COMO UN SISTEMA PASIVO PARA EL CONFORT TÉRMICO EN CLIMA CÁLIDO-HÚMEDO

INFORME DE ORIGINALIDAD

5%

ÍNDICE DE SIMILITUD

FUENTES PRIMARIAS

1	www.ecorfan.org Internet	302 palabras — 2%
2	hdl.handle.net Internet	117 palabras — 1%
3	tabasco.gob.mx Internet	52 palabras — < 1%
4	www.slideshare.net Internet	45 palabras — < 1%
5	rmlbioarchitects.wordpress.com Internet	43 palabras — < 1%
6	vdocuments.pub Internet	42 palabras — < 1%
7	fdocuments.es Internet	38 palabras — < 1%
8	es.wikipedia.org Internet	34 palabras — < 1%

9	docplayer.es Internet	33 palabras — < 1 %
10	adostintas.unison.mx Internet	30 palabras — < 1 %
11	www.revistavivienda.com.ar Internet	29 palabras — < 1 %
12	digaohm.semar.gob.mx Internet	19 palabras — < 1 %
13	www.coursehero.com Internet	19 palabras — < 1 %
14	doczz.es Internet	16 palabras — < 1 %

EXCLUIR CITAS

ACTIVADO

EXCLUIR FUENTES

DESACTIVADO

EXCLUIR BIBLIOGRAFÍA

ACTIVADO

EXCLUIR COINCIDENCIAS < 15 PALABRAS