



**CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN MATERIALES
AVANZADOS, S.C.
DEPARTAMENTO DE MEDIO AMBIENTE Y ENERGÍA**

**TRANSFERENCIA DE CALOR DE UN SISTEMA
DE CLIMATIZACIÓN GEOTÉRMICO
DE BAJA ENTALPÍA**

**Tesis que como requisito para obtener el grado de
Maestría en Ciencia y Tecnología Ambiental presenta:**

MARÍA DEL CARMEN ESPARZA DELGADO

Director de Tesis:

DR. EDUARDO FLORENCIO HERRERA PERAZA

Comité evaluador:

DRA. CLAUDIA LÓPEZ MELÉNDEZ

DR. GUILLERMO GONZÁLEZ SÁNCHEZ

DR. ANTONINO PÉREZ HERNÁNDEZ

Chihuahua, Chih., Diciembre de 2017

**Dedico este trabajo a Dios, a mis hijos, a mis nietos
y a mis padres.**

Agradecimientos

A Dios por haberme permitido vivir hasta este día, por darme la fuerza para seguir adelante, por ser la luz en mi camino y por ser la guía a lo largo de la vida.

A mis hijos, José Rogelio, Carmen y Fernando Israel y a mis nietos, Maron, Carmelita y Caleb, que además de ser el motor de mi vida, son parte importante de lo que hoy puedo presentar como tesis, gracias a ellos por cada palabra de apoyo, gracias por cada momento en familia sacrificado para ser invertido en el desarrollo de este trabajo, gracias por entender que el éxito demanda algunos sacrificios y que el compartir tiempo de ellos, hacía parte de estos sacrificios.

A mis padres José y Georgina, por darme la vida, porque con su ejemplo forjaron en mi lo que ahora soy.

A mis hermanos porque forman parte importante de mi vida, siempre pendientes unos de otros, siendo partícipes de la unión familiar, gracias por su comprensión y apoyo.

A mi director de tesis, Dr. Eduardo Herrera Peraza, por su tiempo, apoyo y disponibilidad durante este año de arduo trabajo.

A los Dres. Antonino Pérez Hernández y Guillermo González Sánchez, por aceptar ser revisores de mi trabajo de tesis, por sus aportes y comentarios que guiaron acertadamente el desarrollo de este trabajo.

A la Dra. Claudia López Meléndez por aceptar ser parte de mi comité evaluador.

A mis maestros, por su tiempo, amistad y conocimientos compartidos.

A mis compañeros de estudio, por todos esos momentos que compartimos, muchas gracias amigos.

Agradezco a CIMAV, por ser la institución donde recibí mi formación, así como al personal de diversas áreas, quienes de alguna forma u otra contribuyeron a la realización de este trabajo.

Agradezco el soporte financiero proporcionado por CONACYT.

A todos, muchas gracias.

Tabla de contenido

Agradecimientos.....	iii
Tabla de contenido.....	v
Lista de Gráficos	vii
Lista de Ilustraciones	viii
Lista de Tablas	x
Nomenclatura.....	xii
RESUMEN	1
CAPÍTULO UNO	3
1. Introducción	3
1.1 Antecedentes.....	5
1.2 Justificación	7
1.3 Hipótesis	9
1.4 Objetivo General	9
CAPÍTULO DOS.....	10
2. Marco Teórico.....	10
2.1 Geotermia.....	10
2.1.1 Gradiente Geotérmico	11
2.1.2 Recursos Geotérmicos.....	13
2.1.3 Manifestaciones superficiales visibles del calor de la Tierra.	14
2.2 Transferencia de calor y propiedades térmicas.	22
2.2.1 Calor.....	22
2.2.2 Temperatura	22
2.2.3 Entalpía	23
2.2.4 Transferencia de calor	23
2.2.5 Propiedades Térmicas del suelo	26
2.3 Factores Geológicos.....	29
2.3.1 Tipo de suelo	31
2.3.2 Clasificación de los suelos en el estado de Chihuahua.....	33
2.4 Factores Geográficos	34
2.5 Radón	35
2.6 Confort Térmico.....	36

CAPÍTULO TRES	38
3 Metodología	38
3.1 Diseño del sistema	43
3.1.1 Cálculos de la simulación.....	43
3.1.2 Diseño geométrico del modelo.....	47
CAPÍTULO CUATRO	51
4 Resultados	51
CAPÍTULO CINCO	78
5. Conclusiones	78
ANEXOS	80
Anexo 1 Productos del trabajo de investigación	80
BIBLIOGRAFÍA	81

Lista de Gráficos

Gráfico 1 Gráfico que muestra las temperaturas máxima, mínima y media de la Cd. de Chihuahua en el periodo 1990-2016.	41
Gráfico 2 Temperatura máxima, media y mínima mensual en la Cd. de Chihuahua, 2015....	42
Gráfico 3 Comparativo de temperaturas de entrada y salida del sistema TC0420, con diámetro de 0.1 m y longitud 20m.	53
Gráfico 4 Muestra el comportamiento de la temperatura del aire en el interior del sistema de tubos enterrados TC0420-10.	54
Gráfico 5 Comparativo de la temperatura máxima en el exterior con temperatura a la salida del sistema TC0420.	56
Gráfico 6 Comparativo de la temperatura mínima del exterior con la temperatura a la salida del sistema TC0420.	58
Gráfico 7 Comparativo de temperaturas máximas y mínimas contra temperaturas de salida del sistema TC0420 y temperatura de confort de acuerdo a la carta psicométrica.	59
Gráfico 8 Comparativo de las temperaturas de salida de los sistemas TC04XX-10.....	62
Gráfico 9 Comportamiento de la temperatura a largo del sistema.....	63
Gráfico 10 Comparativo de las temperaturas de salida de los sistemas TC04XX40.....	64
Gráfico 11 Comportamiento de la temperatura a largo del sistema.....	65
Gráfico 12 Comparativo de las temperaturas de salida de los sistemas TC14XX-10.....	66
Gráfico 13 Comportamiento de la temperatura a largo del sistema.....	67
Gráfico 14 Comparativo de las temperaturas de salida de los sistemas TC14XX40.....	68
Gráfico 15 Comportamiento de la temperatura a largo del sistema.....	69
Gráfico 16 Muestra la variación porcentual de la transferencia de calor en relación a la separación de tubos paralelos a una temperatura exterior de -10°C, en un sistema de 10m de longitud con variación en el diámetro de la tubería.	77
Gráfico 17 Muestra la variación porcentual de la transferencia de calor en relación a la separación de tubos paralelos a una temperatura exterior de 30°C, en un sistema de 10m de longitud con variación en el diámetro de la tubería.	77

Lista de Ilustraciones

Ilustración 1 Variación de profundidad y temperatura de la Tierra	12
Ilustración 2 Evolución de la temperatura del suelo. Curva embudo.	13
Ilustración 3 Esquema conceptual de del funcionamiento del intercambiador de calor también denominado pozo provenzal o canadiense.	18
Ilustración 4 Colector vertical.....	19
Ilustración 5 Algunos sistemas de disposición para colectores horizontales	19
Ilustración 6 Principales elementos del intercambiador de calor	20
Ilustración 7 Carta psicométrica	37
Ilustración 8 Propuesta para el diseño de intercambiador lineal con tubos de PVC	47
Ilustración 9 Área de dominio del sistema.....	48
Ilustración 10 Geometría de aislamiento térmico.	48
Ilustración 11 Geometría capa exterior y tubería.....	49
Ilustración 12 Ejemplo del modelo del sistema de climatización, propuesto.	51
Ilustración 13 Contornos Isotérmicos para el sistema TC0420-10, con respuesta de 4°C a una temperatura de entrada de -10°C.	54
Ilustración 14 Contornos isotérmicos del sistema TC0440-10	63
Ilustración 15 Distribución de la temperatura del sistema TC0440-10.....	63
Ilustración 16 Contornos isotérmicos del sistema TC044040.....	65
Ilustración 17 Distribución de la temperatura del sistema TC044040	65
Ilustración 18 Distribución de la temperatura del sistema TC1430-10.....	67
Ilustración 19 Contornos isotérmicos del sistema TC1430-10	67
Ilustración 20 Contornos isotérmicos del sistema TC143040.....	69
Ilustración 21 Distribución de la temperatura del sistema TC143040.....	69

Ilustración 22 Geometría del modelo: a) Sistema de tubo único, b) Sistema de tubo doble.....	72
Ilustración 23 Muestra la distribución del flujo de calor conductivo para un sistema de 10m de longitud, diámetro de 6” y temperatura inicial del fluido -10°C, con las siguientes variaciones en la separación entre tubos: a) Sistema de tubo único. b) Separación 0.5m. c) 1m. y d) 2m.	73
Ilustración 24 Muestra la distribución del flujo de calor conductivo para un sistema de 10m de longitud, diámetro de 6” y temperatura inicial del fluido 30°C, con las siguientes variaciones en la separación entre tubos: e) Sistema de tubo único. f) Separación 0.5m. g) 1m. y h) 2m.	74
Ilustración 25 Muestra la evolución de las isoterms alrededor de los tubos para un sistema de 10m de longitud, diámetro de tubo 6” y temperatura inicial del fluido a -10°C, con las siguientes variaciones en la separación de tubos: a) Sistema de tubo único. b) Separación 0.5m. c) 1m. y d) 2m.	75
Ilustración 26 Muestra la evolución de las isoterms alrededor de los tubos para un sistema de 10m de longitud, diámetro de tubo 6” y temperatura inicial del fluido a 30°C, con las siguientes variaciones en la separación de tubos: a) Sistema de tubo único. b) Separación 0.5m. c) 1m. y d) 2m.	76

Lista de Tablas

Tabla 1 Clasificación de los recursos geotérmicos por su temperatura (°C).	15
Tabla 2 Coeficiente de transferencia de calor por convección.	25
Tabla 3 Propiedades térmicas de algunos tipos de suelos.....	30
Tabla 4 Conductividad y capacidad térmica volumétrica de algunos tipos de suelo.	30
Tabla 5 Valores típicos de conductividad y difusividad térmica de algunos tipos de suelo. ...	31
Tabla 6 Permeabilidad, conductividad y capacidad térmica para cada tipo de suelo.	39
Tabla 7 Temperaturas de la Cd. de Chihuahua periodo 1990-2016.....	40
Tabla 8 Temperaturas máxima, media, mínima y diferencia de temperaturas máximas y mínimas. Cd. de Chihuahua 2015.	42
Tabla 9 Densidad del aire a diferentes temperaturas, altitud 1500m.	44
Tabla 10 Parámetros de diseño en longitud y diámetro	50
Tabla 11 Parámetros de prueba para el desarrollo del sistema de climatización TC0420.	52
Tabla 12 Temperatura máxima (TMAXI) y temperatura a la salida del sistema (TMAXS). ...	55
Tabla 13 Temperaturas mínimas (TMINI) y temperaturas a la salida del sistema (TMINS).....	57
Tabla 14 Intervalos de temperatura máxima y mínima externa y temperatura acondicionada por el sistema.	58
Tabla 15 Temperatura del aire a la salida de los diferentes sistemas geotérmicos desarrollados.	60
Tabla 16 Temperatura del aire a la salida de los diferentes sistemas geotérmicos desarrollados	61
Tabla 17 Temperaturas de salida de los sistemas TC04XX-10	62
Tabla 18 Temperaturas de salida de los sistemas TC04XX40.....	64
Tabla 19 Temperaturas de salida de los sistemas TC14XX-10	66

Tabla 20 Temperaturas de salida de los sistemas TC14XX40.....	68
Tabla 21 Transferencia de calor para los diferentes sistemas de climatización de baja entalpía.....	70

Nomenclatura

A	: Área de la sección de la tubería disponible para el flujo [m^2]
A_s	: Área superficial, de la transferencia de calor [m^2]
q	: Calor conductivo, vector de flujo de [W/m^2]
Q	: Calor externo [W/m^3]
Q_{wall}	: Calor externo a través de la pared de tubo [W/m^3]
dQ	: Calor necesario para incrementar al temperatura
q_c	: Calor por convección [W/m^2]
$Q_{convección}$: Calor por convección [W/m^3]
q_r	: Calor por radiación emitido por una superficie en la unidad de tiempo
n	: Cantidad de sustancia
C_p	: Capacidad calórica a presión constante del material [$J/kg K$]
C	: Capacidad calorífica o térmica
h	: Coeficiente de transferencia de calor [$W/m^2 K$]
$(hZ)_{eff}$: Coeficiente de transferencia de calor h [W/m^2] veces el perímetro de pared Z [m] de la tubería.
σ	: Constante de Boltzmann 5.67×10^{-8} [$W/m^2 K^4$]
k	: Constante de proporcionalidad conductividad térmica del material [$W/m K$]
R	: Constante universal de los gases ideales
R	: Constante universal de los gases ideales
ρ	: Densidad del material [kg/m^3]
α	: Difusividad [m^2/s]
Z	: Factor de compresibilidad
m	: Masa
M	: Masa molar
p	: Presión [Pa]
S	: strain –rate sensor tensor [$1/s$]
T	: Temperatura [K]
T_s	: Temperatura de la superficie [K]
T_{ext}	: Temperatura externa fuera de la tubería [K]
T_f	: Temperatura final [K]
T_∞	: Temperatura lejos del dominio del modelo [K]

∇T	: Temperatura, Gradiente de [K]
dT	: Temperatura, incremento de
u	: Vector de velocidad [m/s]
n	: Vector normal en la frontera
μ	: Viscosidad dinámica [Pa s]
V	: Volumen [m ³]

RESUMEN

Uno de los problemas que se ha incrementado a nivel mundial en los últimos años es el cambio climático, el dióxido de carbono que se acumula en la atmósfera, producto de actividades humanas, es el causante.

En la era industrial en el siglo XIX, se empezó a percibir un incremento en la temperatura del planeta debido a los gases de efecto invernadero, fue a mediados del siglo XX que la producción de estos gases evidenció la aceleración del calentamiento global, fenómeno del que ningún país está a salvo ni puede abordar solo.

De tal forma que el mundo actual enfrenta el reto de combatir y revertir los efectos del cambio climático y a la vez continuar con el crecimiento económico, por ello se precisa acelerar las acciones de respuesta en proyectos de energía sostenible, siendo las energías renovables el cambio sugerido hacia esa transición y dentro de este marco la energía geotérmica.

En cuanto al aprovechamiento geotérmico de muy baja temperatura los países europeos llevan la delantera, en México sólo se observa en casos de experimentación, se trata de una tecnología eficiente para calefacción y refrigeración con destacados ahorros energéticos basada en la geotermia y fundamentada en el principio de climatización tierra-aire, también conocida como pozo provenzal o canadiense.

El método consiste en el diseño de un intercambiador de calor de tierra aire para estudiar su funcionamiento en las diferentes épocas del año, el sistema está compuesto por una tubería de longitud y diámetro variable, enterrado a 2.5 m de profundidad, al que se bombea aire a diferentes temperaturas para estudio de su comportamiento y determinar los parámetros que optimizan su funcionamiento.

Se busca mantener de manera natural un ambiente estable que permita reducir la demanda eléctrica, por enfriamiento o calefacción, que sea económico y bajo costo de mantenimiento

CAPÍTULO UNO

1. Introducción

El cambio climático es la alteración relevante y perdurable de la distribución de los patrones climáticos, es el resultado del incremento de temperatura del planeta ocasionado por los gases de efecto invernadero, producto de la contaminación ambiental.

El principal gas de efecto invernadero es el dióxido de carbono (CO_2), por su capacidad de absorber la energía calorífica, el incremento de éste gas en la atmósfera ha provocado el aumento de la temperatura del globo terráqueo conocido este efecto como calentamiento global

El dióxido de carbono proviene tanto de la naturaleza como de la actividad antropogénica, las fuentes de emisión de CO_2 atribuibles a la actividad humana provienen del uso de combustibles fósiles como el petróleo, el gas natural y el carbón, denominados fuentes primarias, otra fuente de emisión es la energía eléctrica que se obtiene mayormente a partir de estos combustibles y se clasifica como fuente secundaria.

Los sectores que preferentemente utilizan la electricidad como fuente de energía son transporte, industria, residencia y comercio. El recurso energético en el sector residencial se utiliza en la producción de agua caliente, iluminación, cocina, funcionamiento de electrodomésticos y en mayor medida para climatización (AIE/SENER, 2011).

Lo anterior muestra que se enfrenta un problema energético que requiere buscar fuentes de energía menos contaminantes que satisfagan la demanda y en este rubro se cuenta con las energías renovables, de modo que es necesario acelerar las acciones de respuesta en proyectos de energías alternativas (Mejias-Brizuela, 2016), dentro de las que se

encuentra la energía geotérmica. Por lo que se pronostica que esta fuente de energía desempeñará un papel muy importante en el futuro (Santoyo E. , 2010).

La energía geotérmica se obtiene mediante el aprovechamiento del calor interno de la Tierra, no precisa quemar combustibles, por consiguiente no contribuye a la emisión de gases de efecto invernadero (LLOPIS TRILLO & ANGULO, 2008).

Tiene aplicaciones térmicas y eléctricas, dentro de las primeras destaca la climatización geotérmica que consiste en un sistema que utiliza la inercia térmica para atemperar los excesos de calor o frío en el interior de las habitaciones. No requiere excavaciones profundas, ni estar cerca de zonas volcánicas porque aprovecha la estabilidad térmica del subsuelo (ATECYR, 2010). La estructura consiste en circuito formado por tubos ubicados a cierta profundidad por el que se hace pasar un fluido, éste adquiere la temperatura del subsuelo antes de ser transferido a la habitación para lograr su acondicionamiento (ZIGURAT, 2013).

De acuerdo al Consejo Mundial de la Energía (WEC) aproximadamente un 40% de los recursos energéticos mundiales se destinan a calefacción, refrigeración e iluminación de edificios por tanto el uso racional y eficiente de la energía es una herramienta útil para disminuir las emisiones contaminantes.

Hoy en día, alrededor de 78 países reportan experiencia sobre la utilización de la geotermia (Gehring, 2012) y a través de los años se han desarrollado modelos para tal fin (Chen, Wang, Maloney, & Newman, 1983), (Flores & Lesino, 2000), y más recientemente (Ji, 2015) han presentado trabajos para predecir el comportamiento de los intercambiadores de calor, en este contexto se desarrolla el sistema de climatización geotérmico de baja entalpía, que permitirá mantener la temperatura estable en una habitación expuesta a las diferentes condiciones climatológicas naturales, el objetivo es, crear un modelo e implementar un sistema de climatización geotérmico de baja

transferencia de calor que utiliza el aire del interior de la habitación para tratarlo e introducirlo de nuevo, estudiar las variables y condiciones para la viabilidad teórica de la implementación del sistema.

1.1 Antecedentes

El hombre en la prehistoria buscó protegerse de las variaciones del clima dentro de cavernas o cuevas subterráneas, los animales se resguardan del frío o calor excavando madrigueras en la tierra, ambos buscando intuitivamente lugares donde la inercia del subsuelo los proteja procurando sitios donde los cambios de temperatura ambiente son menores y más lentos.

De forma natural la energía de la Tierra en el interior de sus capas, se mantiene en equilibrio térmico, el origen de la energía se encuentra en la descomposición de los isótopos radiactivos presentes en las zonas internas de la tierra, por ello a mayor profundidad la temperatura se estabiliza, de modo que a los 10 metros de profundidad permanece constante y se aproxima a la temperatura media anual del aire ambiente en esa zona y a dimensiones menores a los 10 metros la temperatura de la tierra varía con de la profundidad y de las características del tipo de suelo. (ATECYR, 2010)

La energía que se obtiene mediante el aprovechamiento del calor interno de la Tierra se denomina energía geotérmica y forma parte de las energías renovables. En el estado actual de la tecnología, se puede decir que existen dos grupos grandes de aplicaciones: térmicas y eléctricas. Dentro de las primeras aplicaciones destaca la climatización geotérmica la cual consiste en un sistema que utiliza la inercia térmica antes mencionada para atemperar los excesos de calor o frío en el interior de las habitaciones. No requiere excavaciones a grandes profundidades, ni estar cerca de zonas volcánicas porque aprovecha la estabilidad térmica del subsuelo.

La estructura consiste en una línea de tubos enterrados a una profundidad de 2 a 5 m. y se hace pasar aire, éste en contacto con la tubería adquiere la temperatura del subsuelo antes de ser depositado en la habitación para lograr su temporización. En general se considera que a dos metros de profundidad es en un lugar óptimo para implantar un intercambiador de calor (Leilla Iannelli, 2012,). Cuando el sistema es usado para refrescar se le denomina pozo provenzal por su origen en la Provenza, Francia y cuando es para temporizar una baja temperatura se le denomina pozo canadiense por emplearse en ese país para tal fin.

El conductor térmico es el aire, el acumulador de calor es el subsuelo, el intercambiador térmico es el tubo y el beneficiado de una ventilación atemperada es la habitación. Las ventajas que presenta el modelo son entre otras que el sistema requiere de una inversión mínima en equipamiento, demanda poca energía de funcionamiento; sólo la necesaria para un extractor de aire en caso de necesitarlo, el mantenimiento es mínimo; se limita a la limpieza de tuberías y cambio de filtros, es un sistema natural basado en el aprovechamiento de una fuente de recursos inagotables, evita el uso excesivo de electricidad y de esta manera reduce el costo económico y contaminación creado un ambiente saludable para los usuarios. (ZIGURAT, 2013)

Las instalaciones que emplean energía geotérmica no precisan quemar combustibles, por consiguiente no contribuyen a la emisión de gases de efecto invernadero (Llopis & Angulo, 2008).

En cuanto a los aprovechamientos geotérmicos de muy baja temperatura como lo es el método propuesto, es usado en países como Francia, Alemania y España, se espera un gran auge para los próximos años. Sin embargo, en México aún no ha sido explotado y será el primero en la Ciudad de Chihuahua.

El Departamento de Energía de Estados Unidos, en su publicación de Septiembre de 2003 “La energía geotérmica en la actualidad”, afirma textualmente: “Es muy vasto el

potencial de energía geotérmica que poseemos en la Tierra, justo debajo de nuestros pies. Este increíble recurso equivale a 50.000 veces la energía que se obtiene de todos los recursos de gas y petróleo del mundo” (Llopis & Angulo, 2008)

En resumen, se tiene reconocido que el potencial de energía geotérmica disponible en varias partes del mundo es muy superior a la cantidad de energía que actualmente se explota, por lo que se pronostica que esta fuente de energía desempeñará un papel muy importante en el portafolio energético futuro de algunos países (Santoyo, Guevara, & Pérez-Zarate, 2010).

1.2 Justificación

Si uno tuviera que elegir entre una serie de supuestos que en las dos últimas décadas han influido más en el desarrollo del sector energético global, la mayoría escogería el medio ambiente, en particular el cambio climático y las energías renovables (WEC, 2013).

A medida que el mundo ha tomado conciencia de los efectos del cambio climático, el desarrollo sostenible se ha convertido en un pilar del futuro energético y las energías renovables la alternativa de solución.

El análisis de consumo energético indispensable para proponer las acciones para un desarrollo sostenible, muestra que el sector residencial fue el tercer consumidor de energía, tanto a nivel mundial como nacional, los principales usos son: calentamiento de agua, cocción de alimentos, calefacción, enfriamiento del espacio, iluminación, refrigeración y uso de equipos domésticos (AIE/SENER, 2011).

Por otro lado el Consejo Mundial de Energía (World Energy Council) informa sobre el uso de los recursos energéticos mundiales que aproximadamente el 40% de los mismos se destina a calefacción, refrigeración e iluminación de edificios y se estima que el potencial de ahorro energético en los mismos podría alcanzar entre 20 y 40%.

En consecuencia se precisa unir esfuerzos y fomentar el uso de fuentes de energía alternativas, siendo una de ellas la energía geotérmica que tiene su origen en la diferencia de temperaturas que existe en el interior de la Tierra y la superficie.

En los últimos años el uso de la energía geotérmica en forma directa ha aumentado notoriamente, en diferentes procesos industriales, en recreación y ambientación de espacios (León, 2007).

Hoy en día, alrededor de 78 países reportan experiencia sobre la utilización de la geotermia y cerca de 90 países han identificado recursos, que podrían desde una perspectiva técnica, satisfacer sus futuras demandas de electricidad y calor de proceso con un beneficio adicional en el ahorro de combustibles primarios (Gehring, 2012).

Aun así la energía geotérmica de baja entalpía no es aprovechada en muchos países, a pesar que a través de los años se han desarrollado varios modelos para tal fin (Chen, Wang, Maloney, & Newman, 1983) y más recientemente se han presentado trabajos para predecir el comportamiento de los intercambiadores tierra- aire (Flores & Lesino, 2000), que aprovechan este recurso.

Si bien el uso de la tecnología en sistemas de climatización de baja entalpía con uso de bombas de calor, ha sido probado y funcional, se han venido siguiendo recomendaciones técnicas generales, sin considerar las características particulares de cada proyecto, invirtiendo en instalaciones que no brindan la mayor eficiencia.

El objetivo del presente trabajo es generar una herramienta de predicción, que permita el estudio de las variables y condiciones para la viabilidad teórica de la implementación de un sistema de climatización geotérmico de baja entalpía sin bomba de calor, crear un modelo para simular su comportamiento, determinar las dimensiones longitud-diámetro que optimicen su operatividad, detectando las condiciones que lo puedan volver inoperante.

1.3 Hipótesis

El sistema de climatización geotérmico sin bomba de calor, permite mantener una temperatura estable dentro de una habitación expuesta a las diferentes condiciones del clima de la región durante el año.

1.4. Objetivo General

Generar una herramienta de predicción que permita el estudio de las variables y condiciones para la viabilidad teórica de la implementación del sistema de climatización geotérmico de baja entalpía.

1.4.1. Objetivos Específicos

- Crear un modelo para simular el comportamiento de un sistema de climatización geotérmico de baja transferencia de calor.
- Determinar los parámetros longitud-diámetro, para el funcionamiento óptimo del sistema.
- Determinar las condiciones que vuelven al sistema inoperante
- Determinar la transferencia de calor del sistema geotérmico de baja entalpía

CAPÍTULO DOS

2. Marco Teórico

2.1 Geotermia

Geotermia proviene del griego “geos” que significa tierra y “thermos” calor, calor de la Tierra.

La energía geotérmica es la energía almacenada en forma de calor por debajo de la superficie sólida de la Tierra”, (Cengel & Ghajar, 2011) adoptada por el Consejo Europeo de Energía Geotérmica (EGEC).

Los orígenes del calor interno de la Tierra se encuentran en los siguientes hechos:

- Desintegración de isótopos radiactivos presentes en la corteza y en el manto, principalmente, uranio (U-235, U-238), torio (Th- 232) y potasio (K-40) (Lubimova, 1969).
- Calor inicial que se liberó durante la formación del planeta hace 4.500 millones de años, y que todavía está llegando a la superficie.
- Movimientos diferenciales entre las diferentes capas que constituyen la Tierra, principalmente entre manto y núcleo.
- Cristalización del núcleo. El núcleo externo (líquido) está cristalizando continuamente, y en la zona de transición con el núcleo interno (sólido) se libera calor (Llopis & Angulo, 2008).

Considerando toda la superficie de la Tierra la potencia geotérmica total que llega desde su interior es de 42×10^{12} J, de ahí 8×10^{12} J provienen de la corteza, el 32.3×10^{12} proviene del manto y el 1.7×10^{12} provienen del núcleo, el calor de la Tierra es inmenso pero solo una fracción del mismo puede ser utilizado.

Además del calor interno, la superficie de la Tierra recibe del Sol cada segundo en forma de calor 2×10^{17} J. que es cuatro órdenes de magnitud superior al calor geotérmico (Llopis & Angulo, 2008).

Esa energía penetra a escasa profundidad en el subsuelo, contribuyendo a mantener la superficie del planeta a una temperatura promedio de 15°C y es irradiada de nuevo al espacio, no interviniendo en los procesos energéticos que afectan al interior de la Tierra. (Llopis & Angulo, 2008).

En la superficie terrestre los fenómenos observables que denotan el calor que proviene del subsuelo son las aguas termales, fumarolas y géiseres (IDAE, 2008).

Actualmente la utilización de la energía geotérmica muestra una interesante tendencia; en yacimientos de temperatura superior a 100°C , generalmente se usa en la generación de electricidad, en yacimientos de temperatura entre 25 y 100°C se usa en el sector industrial, servicios y residencial para acondicionamiento térmico y para temperaturas menores de 25°C ya sea directa o con uso de bombas de calor para acondicionamiento de habitaciones.

2.1.1 Gradiente Geotérmico

Es el incremento de la temperatura al penetrar hacia las capas interiores de la Tierra, se determina entre 2.5 a 3°C cada 100 metros, es decir por cada 1000 m de profundidad se espera un incremento de temperatura de 25 a 30°C .

Exceptuando las zonas con actividad geotermal inusual, el gradiente geotérmico permite estimar la cantidad de flujo de calor que se transmite desde las zonas internas de la corteza terrestre hacia las externas ver Ilustración 1.

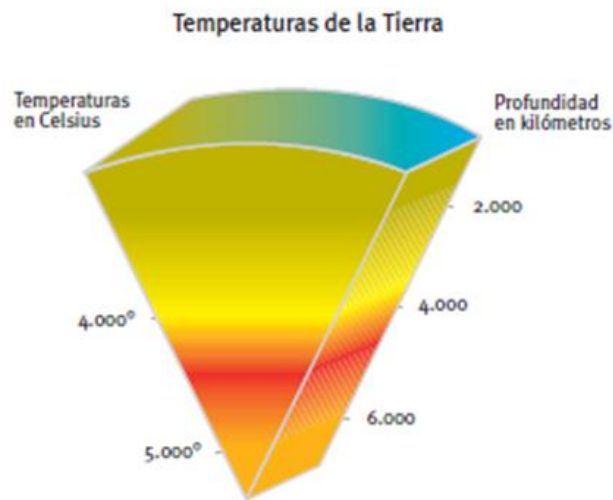


Ilustración 1 Variación de profundidad y temperatura de la Tierra.
(IDAE, 2008)

El flujo de calor se expresa en unidades de MW/m^2 , representa la cantidad de calor geotérmico que se desprende por unidad de superficie.

Una forma para determinar la temperatura del terreno a diferente profundidad es el uso de graficas de diseño (curva de embudo) como la que se muestra en la Ilustración 2 que permite determinar la temperatura máxima y mínima del suelo en función del tipo y profundidad del terreno (ATECYR, 2012).

La Ilustración 2 muestra la evolución de la temperatura con la profundidad para diferentes días a lo largo del año. La curva roja corresponde a la distribución de temperaturas en el día 30 (finales de enero), las curvas magenta, azul claro y amarilla, respectivamente, a los días 90, 180 y 270 (ATECYR, 2012).

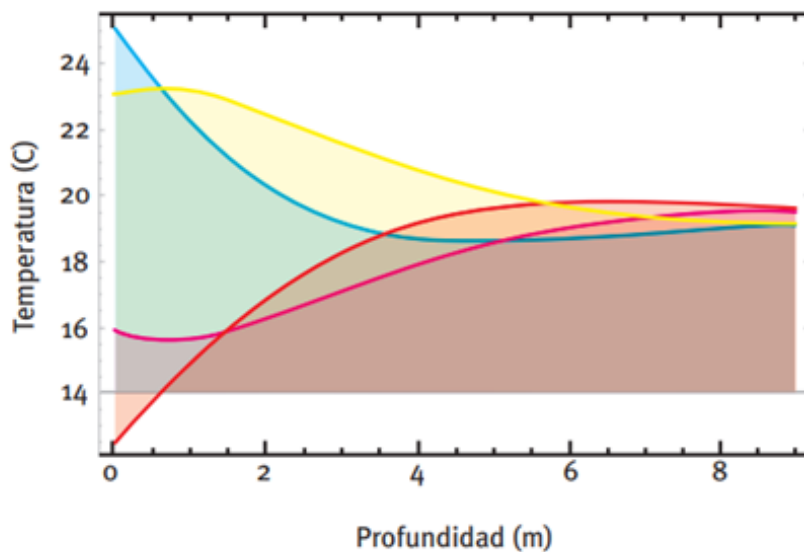


Ilustración 2 Evolución de la temperatura del suelo. Curva embudo.
(ATECYR, 2012)

2.1.2 Recursos Geotérmicos

Recurso geotérmico es una concentración de calor que existe en la corteza terrestre en forma y cantidad tales que su extracción económica es actual o potencialmente posible. Engloba desde el calor que se puede encontrar en los horizontes más superficiales del suelo, para los que el calor proviene del interior de la Tierra, hasta el calor almacenado en rocas situadas en las profundidades (Llopis & Angulo, 2008).

El espacio de la corteza terrestre en el que se localizan materiales permeables que albergan un recurso geotérmico susceptible de ser aprovechado por el hombre se conoce como yacimiento (IDAE, 2008).

Los yacimientos geotérmicos convencionales se clasifican de acuerdo con los niveles energéticos de los recursos que albergan, es decir, de los fluidos en ellos contenidos y se pueden clasificar en yacimientos de alta, media y baja entalpía (IDAE, 2008).

2.1.3 Manifestaciones superficiales visibles del calor de la Tierra.

Volcán: Estructura geológica por la que emerge el magma que se disocia en lava y gases provenientes del interior de la Tierra. El ascenso de magma ocurre en episodios de actividad violenta denominados erupciones, que pueden en intensidad, duración y frecuencia, desde suaves explosiones de lava hasta explosiones extremadamente destructivas.

Aguas termales: Aguas con una elevada cantidad de minerales que brotan del suelo de manera natural y a una temperatura que supera en 5°C la temperatura registrada en la superficie. Tienen su origen en los estratos subterráneos del planeta. De acuerdo a la temperatura las aguas termales se clasifican en aguas supertermales las que están a más de 100°C, aguas hipertermales las que se encuentran en un rango de 45 °C a 100°C, aguas mesotermales las que se encuentran entre 35°C y 45°C y aguas hipotermales las que se encuentran entre 20° C y 35°C.

Géiser: Surtidor intermitente de agua líquida mezclada con vapor de agua, que se mantienen de manera regular y periódica, su altura puede ser de unos centímetros o varios metros, presentan una temperatura entre 70 y 100 °C, con gran cantidad de sales disueltas y en suspensión.

Fumarolas: Son descargas convectivas en forma de vapor. Su presión debe ser algo mayor que la presión atmosférica del lugar, de lo contrario serían suelos vaporizantes. El vapor puede ser saturado, cuando se forman gotas pequeñas o sobrecalentado, en caso contrario. Normalmente son descargas directas de la fase vapor de un reservorio de alta temperatura; sin embargo, en ciertos casos la fumarola se origina del desprendimiento de vapor de una descarga líquida en ascenso o de un reservorio secundario de menor temperatura (Quijano, 2007).

2.1.4 Clasificación de los recursos geotérmicos por su temperatura

Uno de los criterios más comunes para clasificar los recursos geotérmicos es el basado en la entalpía de los fluidos geotermiales que actúan como medio de transporte desde las rocas calientes en profundidad hasta la superficie. La entalpía, puede considerarse más o menos proporcional a la temperatura, este término se utiliza para expresar el contenido de calor de los fluidos dando una idea de su “valor”. Los recursos geotérmicos se dividen en baja, media y alta entalpía (o temperatura) Tabla 1, de acuerdo con los criterios basados generalmente en la energía contenida y sus posibles formas de utilización (Dickson & Fanelli, 2004).

(a) Muffler and Cataldi (1978) (d) Nicholson (1993) (b) Hochstein (1990) (e) Axelsson and Gunnlaugsson (2000) (c) Benderitter and Cormy (1990)					
	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)
Baja entalpía	<90	<125	<100	<=150	<=190
Media entalpía	90-150	125-225	100-200	*	*
Alta entalpía	>150	>225	>200	>150	>190

Tabla 1 Clasificación de los recursos geotérmicos por su temperatura (°C).

2.1.5 Usos de la energía geotérmica

La energía renovable del futuro, a diferencia de otras fuentes de energía renovables, la geotermia no tiene su origen en la radiación solar sino en la diferencia de altas temperaturas que existen en el interior de la Tierra y que van desde los 15°C de la superficie a los 4000°C que rigen en el núcleo (IDAE, 2008).

Después de la segunda guerra mundial muchos países fueron atraídos por la energía geotérmica, considerándola económicamente competitiva respecto de otras fuentes energéticas. Ésta no requiere ser importada y en algunos casos, es la única fuente de energía local (IDAE, 2008).

La energía geotérmica se puede aprovechar en la actualidad de dos formas: directamente, como calor o para la producción de electricidad.

En la producción de electricidad se aprovecha la salida del vapor de las fuentes geotérmicas que accionan turbinas que ponen en marcha generadores eléctricos. Par ello se requiere que la temperatura del agua subterránea sea superior a 150 °C, usando la tecnología de ciclo binario, donde el agua cede el calor a otro fluido que vaporiza a menor temperatura, se pueden usar fuentes con temperatura de 100 °C. Estos yacimientos son los denominados de alta temperatura (ITC, 2008)

Dentro de este rubro se encuentran también los yacimientos de roca caliente seca que, a diferencia de los demás no tienen acuífero (se les inyecta un fluido), su uso es destinado a la producción de electricidad.

Una de las ventajas de la producción de electricidad con energía geotérmica es que no es intermitente, la producción es constante y previsible por lo que se puede usar para satisfacer la demanda eléctrica base.

Para la producción de calor a partir de la energía geotérmica, este se puede obtener de dos maneras distintas.

Aplicaciones de baja y media temperatura aprovechan directamente el agua subterránea con temperaturas entre 30°C y 50°C. Las aplicaciones más comunes son la calefacción de edificios, invernaderos, del agua de piscinas y balnearios, usos industriales como el secado de tejidos, el sedo de pavimentos y para evitar la formación de hielo en asfalto, mediante tubos enterrados por la que se hace pasar agua de los yacimientos. Con el uso de bombas de calor geotérmico se aprovechan aguas con temperatura menor a 15°C. (ITC, 2008).

2.1.6 Sistema intercambiador de calor tierra-aire

Sistema geotérmico de baja temperatura, aprovecha el flujo de calor del interior de la tierra a pocos metros de profundidad, se basa en el sistema de pozos provenzales o canadienses y no requiere situarse cerca de zonas volcánicas o similares, su estabilidad térmica permite atemperar los excesos de calor o frío durante el año.

El sistema se conforma de una serie de tubos enterrados por los que se hace pasar un fluido, que al contacto con la tubería durante su transporte adquiere la temperatura del suelo para después depositarse en la habitación a climatizar, Ilustración 3.

2.1.6.1 Tipos de instalaciones para el intercambiador de calor

Los sistemas geotérmicos de baja entalpía pueden clasificarse en dos categorías: abiertos o cerrados.

En los sistemas cerrados el fluido intercambiador recircula por el sistema excluyendo cualquier contacto del fluido con el entorno.

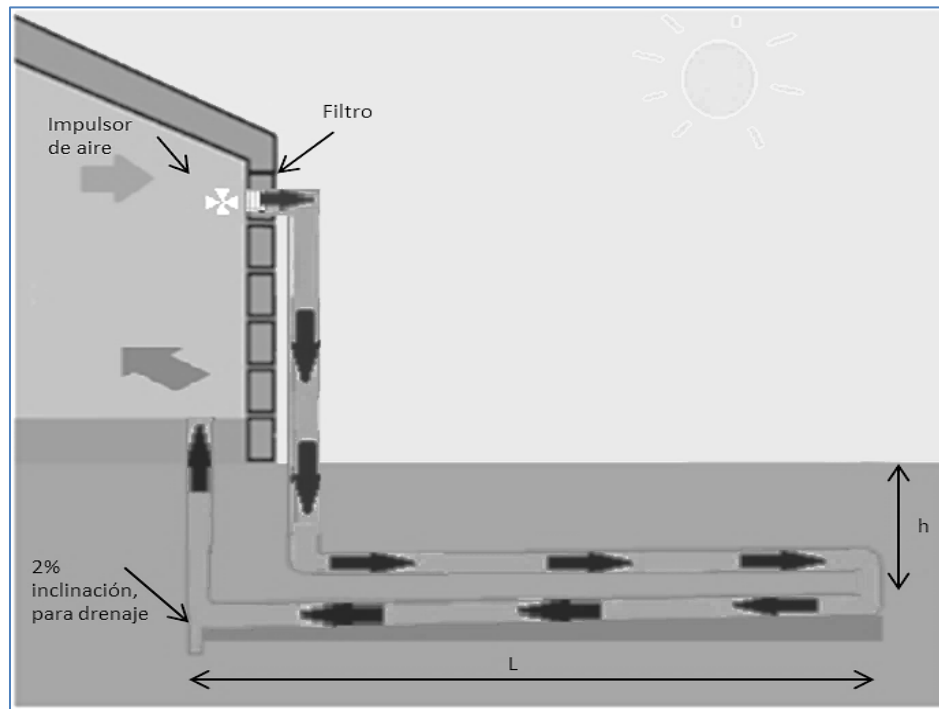


Ilustración 3 Esquema conceptual de del funcionamiento del intercambiador de calor también denominado pozo provenzal o canadiense. (Sitiosolar, 2013)

Los sistemas de lazo abierto toman el fluido del exterior y lo devuelven al medio sin mayor alteración que cambios de temperatura.

Según estén situados los intercambiadores, se pueden distinguir dos tipos de instalaciones: vertical y horizontal.

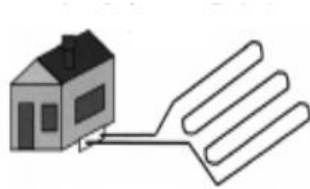
Colectores verticales.- Consiste en perforaciones verticales por las que se hace pasar la tubería en forma de U, a profundidades entre los 20 y 300 m. Ver Ilustración 4.

Colectores horizontales.- La disposición del sistema de tubos es horizontal, por lo que se requiere de terrenos casi llanos, se ubican a escasa profundidad. La distribución de los tubos puede ser variada, atendiendo las características del terreno y área disponible entre otros. Algunas de las disposiciones geométricas son; en forma lineal, serpentin, en paralelo y espiral. Ilustración 5.

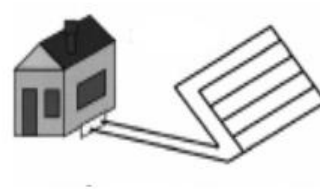


Ilustración 4 Colector vertical

(Arnabat, 2013)



Disposición en serpentin



Disposición en paralelo



Disposición en espiral



Disposición lineal

Ilustración 5 Algunos sistemas de disposición para colectores horizontales

(Llopis, López, & Franqueza, 2009)

2.1.6.2 Principales elementos del intercambiador de calor

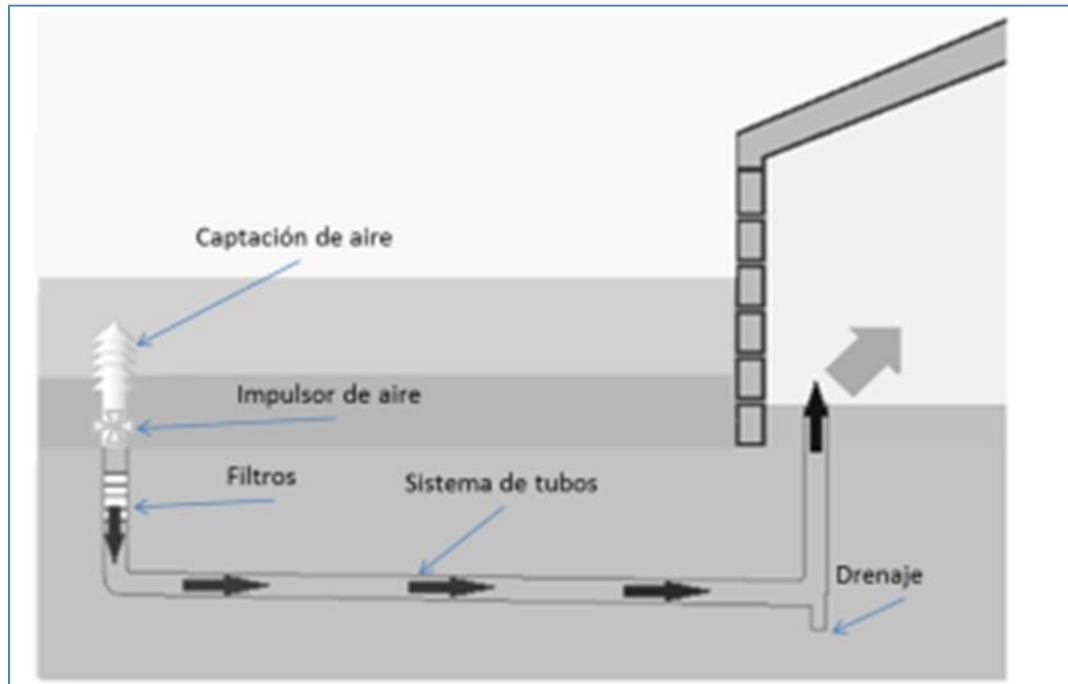


Ilustración 6 Principales elementos del intercambiador de calor
(Sitiosolar, 2013)

Sistema de tubos

Es el elemento que transfiere el calor del suelo al fluido, la longitud y el diámetro de los tubos puede ser de diferentes tamaños en función de aspectos como la profundidad, naturaleza del terreno, potencia del elemento que moviliza el fluido, diseño, etc.

El conducto debe ser impermeable y liso, resistente mecánicamente a la presión y a la deformación del terreno. También debe resistir la corrosión y presentar una conductividad térmica que permita la transferencia de calor entre el terreno y el fluido.

El sistema de tubos debe tener cierta inclinación para evitar acumulación de agua por condensación, permitiendo su dren por gravedad. Los filtros y el dren contribuyen a que no proliferen hongos y bacterias producto de la humedad y contaminantes en el medio ambiente.

El punto de captación de aire.

Es el punto de abastecimiento de aire del sistema, se sugiere colocarlo entre 1 y 5 m sobre el nivel del suelo para evitar captación de aire contaminado, así como la introducción de gas radón el cual se genera en forma natural en la corteza terrestre, siendo mas elevado su concentración en zonas con mayor actividad volcánica. Una característica del radón es que al ser un gas pesado tiende a acumularse en zonas bajas y donde no hay circulación de aire. El radón en altas dosis puede ser nocivo para la salud, además la entrada debe estar protegida con una rejilla que imposibilite el acceso de insectos al sistema.

Filtros.

Son lo encargados de purificar el aire y con ello evitar la entrada de polvo y suciedad al interior de los ductos.

Punto de drenaje.

El sistema debe contar con un punto de drenaje para evacuar condensaciones de humedad de la tubería y facilitar la limpieza. El agua condensada se dirige al punto de drenaje por gravedad siguiendo la pendiente del sistema.

Impulsor de aire.

El aire del interior del sistema requiere un impulsor que lo haga circular por la tubería, el elemento puede ser pasivo como una chimenea solar o activo como un extractor o ventilador o bien mixto.

2.2 Transferencia de calor y propiedades térmicas.

2.2.1 Calor.

Es la forma de la energía que se puede transferir de un sistema a otro como resultado de la diferencia en la temperatura. Todas las unidades que se usan comúnmente en la energía calórica se definen en términos de la cantidad de calor requerido para elevar un grado en la temperatura de una unidad de masa de agua. Así, en el sistema métrico, la unidad de calor es la caloría (cal), que es la cantidad de calor necesario para elevar un grado Celsius la temperatura de un gramo de agua, en el intervalo de 15 y 16° C. En el sistema inglés, es la unidad térmica británica (BTU), o sea, el calor que se necesita para elevar un grado Fahrenheit la temperatura de una libra de agua. La relación entre caloría y BTU se establece así $1 \text{ BTU} = 252.1644 \text{ cal}$ (Cengel, 2004).

2.2.2 Temperatura

Es un concepto utilizado para caracterizar las propiedades térmicas de un sistema, La temperatura es la intensidad o nivel de calor; es una condición de un cuerpo que determina la transferencia de calor a otros cuerpos (Cengel, 2004).

La temperatura es una variable intensiva, es decir, no depende del tamaño del cuerpo o porción de materia, se mide en grados Celsius (C) o Kelvin (K). Esta última se conoce como escala absoluta de temperatura; cero Kelvin representa el estado de mínima energía de un sistema (Quijano, 2007).

Podemos decir que la temperatura se relaciona con la “calidad” de la energía térmica de un cuerpo. A mayor temperatura, mayor calidad y por tanto, mayores posibilidades de aprovechar esta energía (Quijano, 2007).

2.2.3 Entalpía

Magnitud termodinámica cuya variación expresa la cantidad de energía absorbida o cedida de un sistema con su entorno. Se expresa en kJ/kg o en kcal/kg.

Como la entalpía y la temperatura pueden considerarse proporcionales, la práctica habitual ha generalizado el empleo de las temperaturas en lugar de los contenidos en calor.

La entalpía es una variable extensiva, la entalpía específica de una porción de materia es la entalpía por unidad de masa y se expresa como J/g o kJ/kg. (Quijano, 2007).

2.2.4 Transferencia de calor

Es la manera como se distribuye la energía calorífica, se puede transferir de forma básica por: conducción, convección y radiación, todos requieren la existencia de una diferencia de temperatura y ocurren del medio de mayor a menor temperatura.

2.2.4.1 Conducción

Es la transferencia de energía de las partículas más energéticas de una sustancia hacia las adyacentes menos energéticas, como resultado de interacciones entre esas partículas. La conducción puede tener lugar en los sólidos, líquidos o gases. En los gases y líquidos la conducción se debe a las colisiones y a la difusión de las moléculas durante su movimiento aleatorio. En los sólidos se debe a la combinación de las vibraciones de las moléculas en una retícula y al transporte de energía por parte de los electrones libres.

La rapidez o razón de la conducción de calor a través de un medio depende de la configuración geométrica de éste, su espesor y el material de que esté hecho, así como de la diferencia de temperatura a través de él. (Cengel & Ghajar, 2011)

La conducción térmica está determinada por la ley de Fourier, que establece que el flujo de transferencia de calor por conducción en un medio isótropo es proporcional y de sentido contrario al gradiente de temperatura en esa dirección.

$$\mathbf{q} = -k \nabla T \quad (2.1)$$

Dónde:

q : *vector flujo de calor por unidad de superficie*

k : *constante de proporcionalidad, conductividad térmica*

∇T : *gradiente campo de temperatura en el interior*

2.2.4.2 Convección

Es el modo de transferencia de energía entre una superficie sólida y el líquido o gas adyacente que está en movimiento y comprende los efectos combinados de la conducción y el movimiento de fluidos, Entre más rápido es el movimiento de un fluido, mayor es la transferencia de calor por convección. En ausencia de cualquier movimiento masivo de fluido, la transferencia de calor entre una superficie sólida y el fluido adyacente es por conducción pura.

La convección recibe el nombre de convección forzada si el fluido es forzado a fluir sobre la superficie mediante medios externos como un ventilador, una bomba o de viento. La rapidez de la transferencia de calor por convección es proporcional a la diferencia de temperatura y se expresa en forma conveniente por la ley de enfriamiento de Newton (Cengel & Ghajar, 2011).

$$q_c = hA_s(T_s - T_\infty) \quad (2.2)$$

Dónde:

h : *es el coeficiente de transferencia de calor por convección, en $Wm^{-2} \text{ } ^\circ C^{-1}$*

A_s : *es el área superficial a través de la cual tiene lugar la transferencia de calor por convección.*

T_s : es la temperatura de la superficie

T_∞ : es la temperatura del fluido suficientemente alejado de esta superficie.

El coeficiente de transmisión de calor por convección forzada depende en general, de la densidad, viscosidad, de la velocidad del fluido, de las propiedades térmicas del fluido (K, Cp).

a. Coeficiente de transferencia de calor por convección

El coeficiente de transferencia de calor por convección no es una propiedad del fluido. Es un parámetro que se determina en forma experimental y cuyo valor depende de todas las variables que influyen sobre la convección, como la configuración geométrica de la superficie, la naturaleza del movimiento del fluido, las propiedades de éste y la velocidad masiva del mismo.

La tabla muestra algunos valores típicos para el coeficiente de transferencia de calor por convección

Medio	Coefficiente de transferencia de calor h (W/m ² . K)
Aire (convección natural)	5-25
Aire/vapor supercalentado (convección forzada)	20-300
Petróleo (convección forzada)	60-1800
Agua (convección forzada)	300-6000
Agua (en ebullición)	3000-60.000
Vapor (en condensación)	6000-120.000

Tabla 2 Coeficiente de transferencia de calor por convección.
(Solidworks)

2.2.4.3 Radiación

La radiación es la energía emitida por la materia en forma de ondas electromagnéticas (o fotones) como resultado de los cambios en las configuraciones electrónicas de los átomos o moléculas. No requiere de un medio interventor, es rápida (a la velocidad de la luz) y no sufre atenuación en el vacío. La radiación térmica es la forma de radiación emitida por los cuerpos debido a su temperatura. Es diferente a otros tipos de radiación como los rayos x, microondas, radio, etc., que no están relacionadas con la temperatura. Todos los cuerpos con una temperatura arriba del cero absoluto emiten radiación térmica.

La radiación es un fenómeno volumétrico y todos los sólidos, líquidos y gases emite, absorben o transmiten radiación en diversos grados (Cengel & Ghajar, 2011).

La razón máxima de la radiación que se puede emitir desde una superficie a una temperatura termodinámica T_s (en K o R) es expresada por la ley de Stefan-Boltzmann para un cuerpo negro como:

$$q_r = \sigma A_s T_s^4 \quad (2.3)$$

Dónde:

q_r : *Calor emitido por una superficie en la unidad de tiempo*

σ : $5.67 \times 10^{-8} \text{ Wm}^{-2} \text{ K}^{-4}$, *Constante de Boltzmann*

A_s : *Área superficial que emite radiación*

T_s : *Temperatura del cuerpo sólido*

2.2.5 Propiedades Térmicas del suelo

Son las que determinan el comportamiento de los materiales ante el incremento de temperatura. Las propiedades físicas como la densidad aparente, el contenido de humedad y la granulometría de los suelos influyen en el comportamiento de las estas

propiedades tales como el calor específico, conductividad y difusividad térmica afectando el flujo y almacenamiento de calor (BGS, 2011).

Ante la presencia de temperaturas extremas el subsuelo mantiene estabilidad térmica, es decir ante las variaciones extremas de temperatura el subsuelo se mantiene templado. Es por eso que las propiedades térmicas del suelo son de gran importancia en el diseño de sistemas de enfriamiento y calentamiento de ambientes controlados.

2.2.5.1 Capacidad calorífica o capacidad térmica

Se denomina capacidad térmica o calorífica al cociente entre el calor que se suministra a un sistema y la variación de temperatura provocada. Se puede expresar como la cantidad de calor requerida para elevar en un grado, la temperatura de una determinada cantidad de sustancia. A mayor capacidad calorífica de una sustancia, mayor cantidad de calor entregada para subir su temperatura. Es una propiedad extensiva.

$$C = \frac{dQ}{dT} \quad (2.4)$$

Donde:

C : *capacidad calorífica o térmica*

dQ : *el calor que es necesario suministrar para incrementar la temperatura*

dT : *incremento de temperatura*

La capacidad térmica del terreno expresa el calor que es capaz de almacenar un volumen de terreno al incrementar su temperatura, de ahí que se denomine “capacidad” a esta magnitud. (ATECYR, 2012).

El subsuelo tiene una capacidad calorífica alta, es decir, es buen acumulador de calor.

2.2.5.2 Calor específico

Se define como la cantidad de energía calorífica necesaria para elevar una unidad de masa del material en una unidad de temperatura. Es una propiedad intensiva, no depende de la materia y es un valor fijo para la sustancia.

$$c = \frac{C}{m} \quad (2.5)$$

Donde:

C : *Capacidad calorífica*

m : *masa*

2.2.5.3 Conductividad térmica

La conductividad térmica es la capacidad de un material para conducir o transmitir calor, es la propiedad de transmitir el calor.

Mide la capacidad que tiene un material de conducir el calor. Las rocas poseen conductividades termales mayores a las del agua y esta a su vez conduce mejor el calor que el aire. Es por esto que una roca solida tendrá mayor conductividad que un sedimento no consolidado, ya que este último posee poros que pueden estar rellenos de aire o agua.

La conductividad térmica del suelo es un factor importante, esta propiedad sirve para determinar el dimensionado. Se dice que el subsuelo tiene baja conductividad térmica, lo que hace que la penetración del calor o su enfriamiento sea lento.

2.2.5.4 Difusividad

La difusividad térmica describe la velocidad a la que se conduce el calor a través de un medio, varía con el contenido de agua, granulometría y agregación del suelo.

$$\alpha = \frac{k}{\rho C_p} \quad (2.6)$$

Donde:

k : *Conductividad térmica*

C_p : *Capacidad calorífica a presión constante*

ρ : *Densidad*

Las rocas y sedimentos poseen una alta capacidad calorífica y bajos valores de conductividad, lo que hace que su difusividad sea baja.

2.3 Factores Geológicos

El tipo de suelo, sus componentes, las placas tectónicas y relieve son factores geológicos que intervienen en el comportamiento térmico del suelo siendo así que cada tipo de suelo tiene un comportamiento diferente a la transferencia de calor y a la factibilidad de utilización de la energía geotérmica.

En función de la transferencia de calor, los suelos con mejores características son aquellos que requieren de mayor cantidad de calor para elevar su temperatura, presentan poca habilidad para transferir el calor y lentitud al hacerlo, es decir, suelos con alta capacidad calorífica, baja conductividad y baja difusividad con el fin de que la penetración del calor o su enfriamiento sea lento.

Propiedades térmicas de suelos			
Tipo de suelo	Densidad [Kg/m ³]	Conductividad [W/mK]	Capacidad Calorífica [kJ/kg K]
Arcilla arenosa	1650	2.3	2.85
Óxido de calcio	1670	2.23	0.71
Arcilla arenosa húmeda	1800	1.49	1.34
Arena	1780	0.93	1.39
Arena seca	1500	0.7	0.92
Grava gruesa	2000	0.52	1.84

Tabla 3 Propiedades térmicas de algunos tipos de suelos.

(Zenteno, 2013)

La naturaleza del suelo, la porosidad y grado de saturación influyen en estas propiedades donde la transferencia de calor ocurre principalmente por conducción y convección.

Conductividad térmica y Capacidad térmica volumétrica de tipos de suelo				
Tipo de roca	Conductividad térmica [W/mK]			Capacidad térmica volumétrica
	Mínimo	Valor típico	Máximo	[MJ/m ³ K]
Arena, saturada, agua	1.7	2.4	5	2.2-2.9
Grava, saturada de agua	-	1.8	-	2.4
Arcilla /limo, saturada, agua	0.9	1.7	2.3	1.6-3.4
Arcilla /limo, seco	0.4	0.5	1	1.5-1.6
Arena, seca	0.3	0.4	0.8	1.3-1.6
Turba	0.2	0.4	0.7	0.5-3.8
Grava, seca	0.4	0.4	0.5	1.4-1.6

Tabla 4 Conductividad y capacidad térmica volumétrica de algunos tipos de suelo.

(ATECYR, 2010)

En función de la viabilidad de implementación del sistema, tanto suelos rocosos como la presencia de agua dificultan el desarrollo del sistema.

Valores típicos de conductividad y difusividad térmica para depósitos superficiales		
Tipo	Conductividad térmica [W/m K]	Difusividad térmica [m ² /día]
Arena saturada	2.50	0.079
Limo saturado o arcilla	1.67	0.056
Limo	1.67	0.050
Arcilla	1.11	0.046
Marga	0.91	0.042
Arena	0.77	0.039

Tabla 5 Valores típicos de conductividad y difusividad térmica de algunos tipos de suelo.

(BGS, 2011)

De acuerdo a la tabla 5, Los depósitos con limo o arcilla presentan conductividad térmica más elevada que la arena granular limpia insaturada, sin embargo la arena granular saturada presenta alta conductividad.

Respecto a la difusividad la arena saturada presenta una mayor velocidad de transmisión de calor que las arcillas.

2.3.1 Tipo de suelo

Suelo es la parte superficial de la corteza terrestre, biológicamente activa que proviene de la desintegración o alteración física y química de las rocas y de los residuos de las actividades de los seres vivos.

Existen varios sistemas de clasificación de suelos, uno es el que presentan Thorp, Baldwin y Kellog (1938-1948-9). Esta clasificación distingue tres órdenes de suelos: los

azonales, los interzonales y los zonales, cada uno con subórdenes y grupos. (AEPECT, 2001)

❖ **Azonales**

Son suelos inmaduros, se ubican en las primeras etapas de desarrollo ya que carecen de límites bien marcados y no tienen grandes influencias climáticas, se dividen en:

- **Regosoles:** con formados sobre materiales no consolidados y recientes como arena, dunas o aluviones.
- **Litosuelos:** conformados sobre la roca madre en la que la naturaleza aún no ha logrado afectar su evolución, temporal o desarrollo en grandes pendientes.

❖ **Interzonales**

Son suelos poco evolucionados y reflejan la influencia del mal drenaje y de la roca madre, se clasifican en:

- **Ranker:** Se encuentra sobre rocas silíceas, en lugares de bajas temperaturas, montañosos y con pendientes. Son suelos ácidos pobres en carbonatos. Sin horidzonte B.
- **Rendsina:** Es de menos espesor, se ubica sobre climas diversos, sobre las rocas calizas. Poco espesor, sin horizonte B.
- **Salinos:** Ricos en sales. Climas secos, escasa vegetación, pobre en humus.
- **Gley:** Suelo de zonas pantanosas, horizontes interiores encharcados en los que se acumula Fe dándole un color gris azulado.
- **Turberías:** Terreno encharcado con abundante vegetación y exceso de materia orgánica, es un suelo ácido.

❖ Zonales

Son suelos condicionados por el clima, que ha actuado largo tiempo, se conocen como suelos maduros muy evolucionados. Se clasifican por su latitud en alta, media e intertropical.

- **Latitud alta:**

- **La tundra**, suelo de vegetación escasa, evolución lenta limitada al periodo estival.

- **Latitud media:**

- **Podsol**, tierras grises o de cenizas, asociado a bosques de coníferas, rico en humus, suelo ácido y arenoso.
- **Tierra parda de bosque**, suelo de bosques caducifolios, rico en humus.
- **Mediterráneos**, suelo asociado a bosques de encinas y arbustos pobre en humus y arcilloso por descalcificación de calizas. Destacan los suelos rojos mediterráneos o tierra rosa.
- **Chernozion**, tierras negras de estepa en climas continentales, horizonte A muy desarrollado rico en humus.
- **Desérticos**, suelo de poca materia orgánica, de color claro.

- **Latitud Intertropical:**

- **Lateritas**, suelo de clima ecuatorial, cálido muy lluvioso, con intensa meteorización.

2.3.2 Clasificación de los suelos en el estado de Chihuahua

En el estado de Chihuahua se presentan 16 unidades de suelo. Estas en orden de dominancia son: Regosol (25.46%) Xerosol (20.94), Litosol (20.67), Feozem (15.89%) Yermosol (4.59%), y entre los que abarcan menos del 3% del territorio estatal en orden de dominancia son el Cambisol, Luvisol, Renzina, Solonchak, Vertisol, Solonetz, Planosol, Fluvisol, Ranker, Castañozem, Chernozem (INEGI, 2003).

Generalmente la infiltración de agua en el estado es buena, ya que dominan los suelos de textura media (80% del territorio estatal) y en menor porcentaje las texturas gruesa y fina (6.63% y 7.94% respectivamente) (INEGI, 2003).

En la provincia Sierras y Llanuras del Norte la evapotranspiración supera la precipitación, lo que genera el arrastre de las partículas más finas, dando lugar así a la formación de horizontes arcillosos, salinos, sódicos o cálcicos que gradualmente forman un horizonte cementado o caliche. Aquí la saturación de bases en casi todos los horizontes de los suelos es alta con pH's alcalinos (INEGI, 2003).

La vegetación no ha tenido mucha participación en la formación de los suelos ya que los matorrales desérticos de baja densidad y poco desarrollo aportan mínimas cantidades de materia orgánica que se degrada muy lentamente (INEGI, 2003).

2.4 Factores Geográficos

El clima de una región está determinado por los siguientes factores:

Latitud

Es la distancia de un lugar con respecto a la línea del ecuador.

Corrientes marinas

Son los movimientos de masas de agua que recorren grandes distancias transfiriendo la energía calorífica de las regiones que circundan incidiendo en las presiones, humedad y seres vivos que las habitan.

Altitud

Distancia de un punto en relación al nivel del mar, tiene influencia sobre la temperatura del lugar y las precipitaciones.

Relieve

Son las formas que presenta la corteza terrestre, son las elevaciones, depresiones, planicies que presenta la superficie terrestre.

2.5 Radón

El radón se produce a partir de la desintegración radiactiva natural del uranio presente de forma natural en la Tierra, por tanto es un gas de origen natural, sin olor, color ni sabor, según la Organización Mundial de la Salud (OMS), la segunda causa de muerte por cáncer de pulmón y el responsable de entre el 3 y 14% de este tipo de cánceres en el mundo.

El radón emana del suelo y pasa al aire donde se desintegra y emite partículas radiactivas, estando al aire libre se diluye rápidamente presentando concentraciones muy bajas que no representan ningún problema. La concentración media de radón al aire libre varía de 5 a 15Bq/m³, en cambio en espacios cerrados las concentraciones son más elevadas en especial en lugares como minas, cuevas y plantas de tratamiento de agua (OMS, 2016).

La mayor exposición de radón suele producirse en el hogar, las concentraciones elevadas del gas en la vivienda dependen de la cantidad de uranio de las rocas del terreno, las vías que el radón encuentra para filtrarse y la tasa de intercambio de aire entre el interior y el exterior. El radón se filtra en las casas a través de grietas en los suelos o en la unión del piso con las paredes, espacios alrededor de las tuberías o cables pequeños poros que presentan las paredes construidas con bloques de hormigón, huecos, o por los sumideros y desagües (OMS, 2016).

Al respirar e inhalar esas partículas, éstas se depositan en las células que recubren las vías respiratorias, donde pueden dañar el ADN y provocar cáncer de pulmón (OMS, 2016).

El radón también puede estar presente en el agua, la concentración es más alta cuando proviene de fuentes subterráneas como manantiales o pozos, que en aguas superficiales como ríos, lagos y pantanos (OMS, 2016).

2.6 Confort Térmico

La sensación de confort está relacionada con las condiciones del clima del local. Los parámetros básicos a controlar son:

Temperatura del aire y superficies, esta depende en gran parte de la ropa que se use, el grado de actividad física y el contenido de humedad, se puede considerar los siguientes valores:

Invierno 18-23 °c (22°C y 50% HR)

Verano 23-27°C (25°C y 50% HR)

Humedad relativa, gran parte del calor del cuerpo humano se disipa por evaporación a través de la piel, favoreciéndose con una humedad relativa del aire baja en 50%. HR menores a 30% producen sequedad en la piel, HR mayores al 70% causan náuseas por la reducción de la capacidad de disipar el calor por sudoración.

La humedad relativa en el Estado de Chihuahua es muy baja alrededor del 40% durante la mayor parte del año.

La humedad relativa en la Ciudad de Chihuahua es baja, entre el 45 y 50 % promedio durante el año.

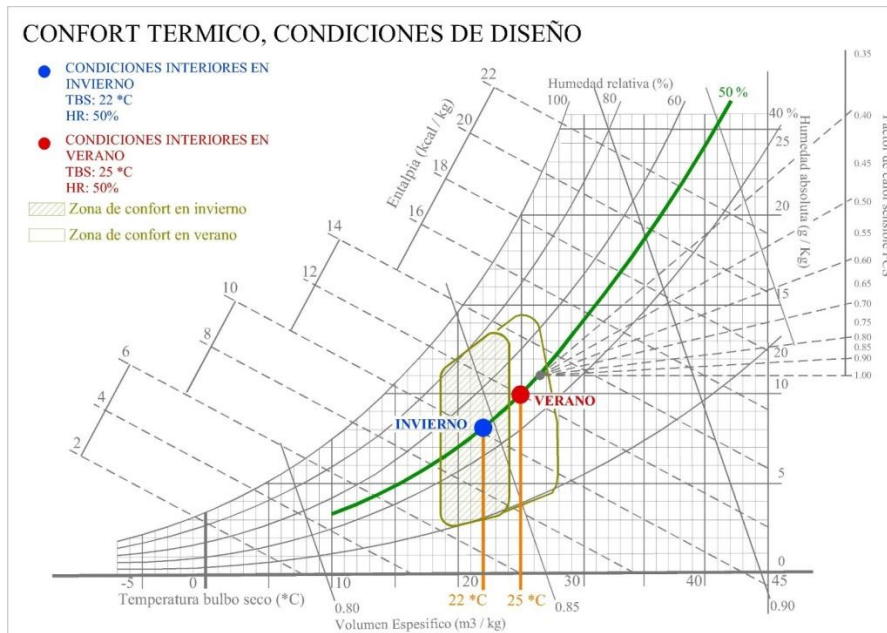


Ilustración 7 Carta psicométrica

(A.Díaz, 2013)

Considerando que la temperatura máxima en la ciudad de Chihuahua es extrema con variaciones que van desde 41°C hasta -18°C y con apoyo de la carta psicométrica determinamos la temperatura de confort que se utilizará para comparar con el resultado de nuestra simulación, ver Gráfico 7.

CAPÍTULO TRES

3 Metodología

El presente estudio permite determinar la funcionalidad del sistema de transferencia de calor geotérmico de baja entalpía, el proyecto busca mantener de manera natural un ambiente térmico estable y con ello minimizar el uso de mecanismos convencionales de climatización, además que sea económico y bajo costo de mantenimiento.

El sistema de climatización geotérmico propuesto consiste en una serie de tubos de policloruro de vinilo (PVC) enterrados a una profundidad de 2.5m, con diámetro y longitud variables, dispuestos en forma lineal, por donde circula aire, el cual se atempera con la inercia térmica de la Tierra aprovechando que la temperatura a esa profundidad oscila entre 18°C y 24°C (Dickson, 2004).

La entrada y la salida de aire se conectan a la habitación, es decir, el aire es tomado del interior de la habitación mediante un extractor a una velocidad de 4 m/s y se regresa a la misma después de ser temporizado, la temperatura promedio del suelo a la profundidad establecida se consideró a 18°C.

Dado que parte del sistema de climatización geotérmico se encuentra en el subsuelo, se tiene que conocer bajo qué circunstancias se va a trabajar, ya que cada tipo de suelo tiene diferentes características, ver Tabla 6, tanto para ser tratado como también para hacer uso de su extracción o manipulación (Llopis Trillo, 2008).

Permeabilidad, conductividad y capacidad térmica para cada tipo de suelo					
Tipo de suelo	Permeabilidad	Conductividad térmica		Capacidad térmica volumétrica	
		(W/m-K)		(MJ/m ³ K)	
	(m/s)	seco	saturado	seco	saturado
Arcilla	10 ⁻⁸ -10 ⁻¹⁰	0.2-0.3	1.1-1.6	0.3-0.6	2.1-3.2
Limo	10 ⁻⁵ -10 ⁻⁸	0.2-0.3	1.5-2.5	0.6-1.0	2.1-2.4
Arena	10 ⁻³ -10 ⁻⁴	0.3-0.4	1.7-3.2	1.0-1.3	2.2-2.4
Grava	10 ⁻¹ -10 ⁻³	0.3-0.4	1.8-3.3	1.2-1.6	2.2-2.4

Tabla 6 Permeabilidad, conductividad y capacidad térmica para cada tipo de suelo.

(LLOPIS TRILLO & ANGULO, 2008)

Dadas las características comunes de suelo en la localidad, para el diseño se consideró suelo mixto seco, una combinación de arcilla, limo, arena y grava, con capacidad térmica volumétrica de 1.2 MJ/m³K.

Se efectuó un análisis del comportamiento de temperaturas del medio ambiente de la ciudad de Chihuahua en un periodo de 27 años donde se pudo observar que la temperatura máxima en el periodo analizado fue 41°C, la mínima de -18°C con promedio anual de 21 °C, Tabla7.

Tabla temperaturas en la Cd. de Chihuahua.				
Periodo 1990-2016				
	Año	Temperatura en °C		
		Máxima	Mínima	Promedio
1	1990	40	2	22.6
2	1991	39	2	20.4
3	1992	41	-6	20.5
4	1993	38	-6	21.4
5	1994	40	-7	22.3
6	1995	39	-4	22.5
7	1996	39	-10	21.3
8	1997	37	-10	19.7
9	1998	40	-6	21.4
10	1999	38	-8	20.7
11	2000	38	-10	20.4
12	2001	38	-11	20.3
13	2002	38	-9	20.4
14	2003	38	-12	20.5
15	2004	38	-8	19.2
16	2005	39	-6	20.3
17	2006	38	-8	20.5
18	2007	38	-8	19.8
19	2008	39	-8	20.3
20	2009	38	-7	20.7
21	2010	41	-10	20
22	2011	40	-18	21.3
23	2012	39	-6	21
24	2013	38	-9	20.9
25	2014	39	-8	19.6
26	2015	38	-7	19.7
27	2016	37	-9	17.8
Promedio				20.57

Tabla 7 Temperaturas de la Cd. de Chihuahua periodo 1990-2016.

Fuente: Estación Aeropuerto GENERAL R FIERRO VILLALOBOS INTL (MMCU)

El gráfico 1 muestra las temperaturas máximas y mínimas de la Cd. de Chihuahua en el periodo 1990-2016, el promedio para las temperaturas más elevadas es 38.7 °C y el promedio de las temperaturas mínimas es -7.7°C.

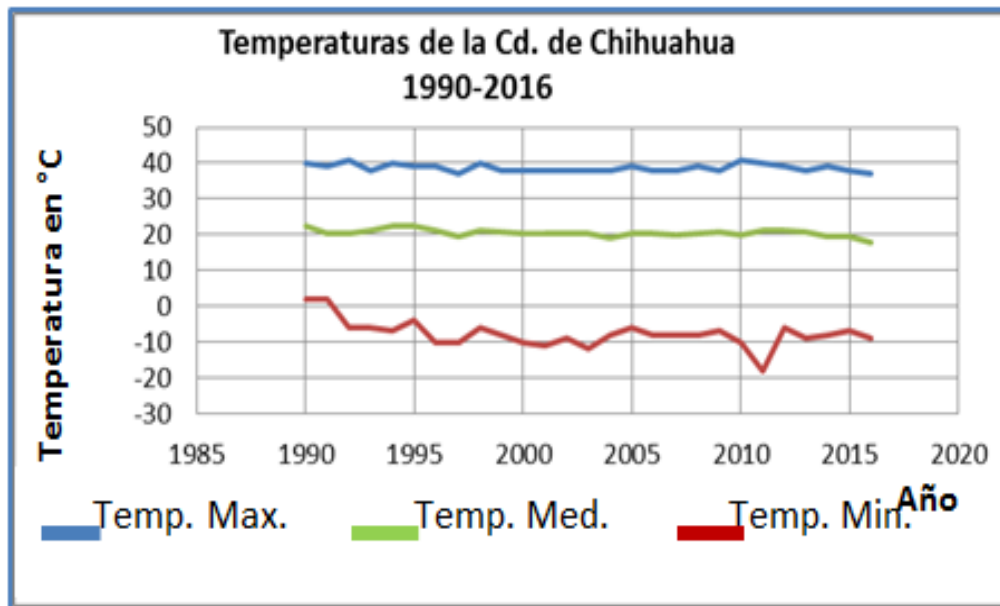


Gráfico 1 Gráfico que muestra las temperaturas máxima, mínima y media de la Cd. de Chihuahua en el periodo 1990-2016.

Fuente: Estación Aeropuerto GENERAL R FIERRO VILLALOBOS INTL (MMCUI)

Se efectuó un análisis de las temperaturas mensual durante 2015, determinando el comportamiento de las temperaturas máximas y mínimas de la localidad, el resumen de la información se muestra en la Tabla 8. El promedio anual de las temperaturas máximas es 32.1°C y para las temperaturas mínimas el promedio fue 4.4°C.

Temperatura máxima, media, mínima y diferencia de temperaturas, mensual de la Cd. de Chihuahua en 2015. [°C]				
MES	T MEDI	TMAXI	TMINI	TMAXI-TMINI Diferencia de temp.
Enero	8.9	24	-7	31
Febrero	13.7	30	-1	31
Marzo	15.3	30	-2	32
Abril	19.4	32	4	28
Mayo	23.7	36	6	30
Junio	27	38	15	23
Julio	26.2	35	14	21
Agosto	26.9	37	14	23
Septiembre	26.6	35	12	23
Octubre	21	33	6	27
Noviembre	15.8	29	-2	31
Diciembre	11.3	27	-6	33

Tabla 8 Temperaturas máxima, media, mínima y diferencia de temperaturas máximas y mínimas. Cd. de Chihuahua 2015.

Fuente: Estación Aeropuerto GENERAL R FIERRO VILLALOBOS INTL (MMCUC)

El gráfico 2 muestra las temperaturas máximas y mínimas mes a mes durante 2015, el intervalo promedio entre temperaturas extremas es de 28°C.

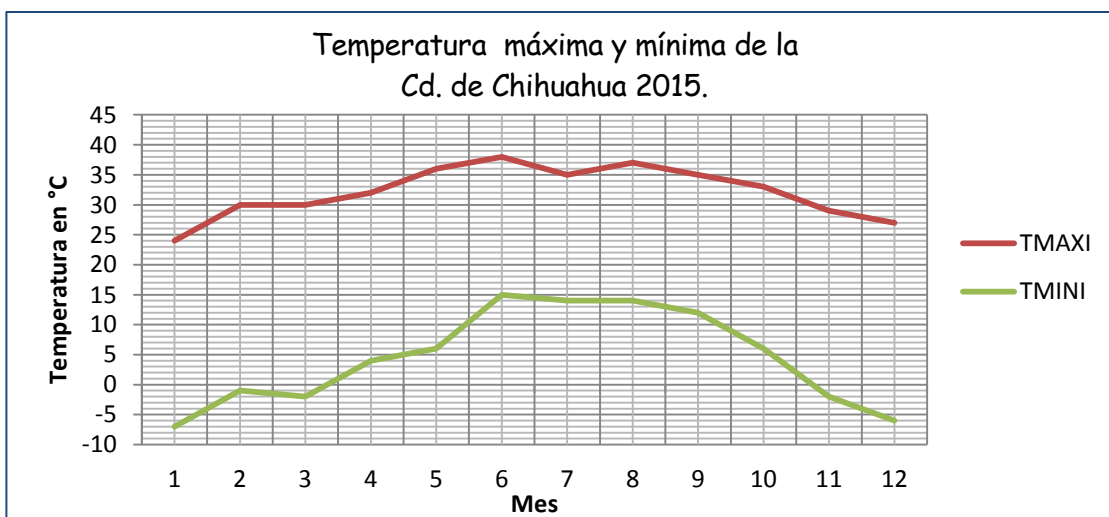


Gráfico 2 Temperatura máxima, media y mínima mensual en la Cd. de Chihuahua, 2015.

3.1 Diseño del sistema

3.1.1 Cálculos de la simulación

Las simulaciones del modelo se realizan en software COMSOL, la información considerada para el desarrollo del sistema es: Presión atmosférica de 84500 N/m², a 1500 MSNM, la densidad del aire se calcula.

Como gas real obedece la ecuación de estado:

$$pV = nZRT \quad (3.1)$$

Donde:

- p : Presión
- V : Volumen del gas
- n : cantidad de sustancia
- Z : Factor de compresibilidad
- R : Constante universal de los gases ideales
- T : Temperatura del aire en K

Para el factor de compresibilidad se tiene la siguiente ecuación (CENAM, 2003):

$$Z = 1 - \frac{p}{T} [a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + (b_0 + b_1 t)x_v + (c_0 + c_1 t)x_v^2] + \frac{p^2}{T^2} (d + ex_v^2) \quad (3.2)$$

Dónde:

- t : temperatura en °C
- a_0 : $1.58123 \times 10^{-6} \text{ K Pa}^{-1}$
- a_1 : $-2.9331 \times 10^{-8} \text{ Pa}^{-1}$

$$\begin{aligned}
 a_2 & : 1.1043 \times 10^{-10} \text{ K}^{-1} \text{ Pa}^{-1} \\
 b_0 & : 5.707 \times 10^{-6} \text{ K Pa}^{-1} \\
 b_1 & : -2.051 \times 10^{-8} \text{ Pa}^{-1} \\
 c_0 & : 1.9898 \times 10^{-4} \text{ K Pa}^{-1} \\
 c_1 & : -2.376 \times 10^{-6} \text{ Pa}^{-1} \\
 d & : 1.83 \times 10^{-11} \text{ K}^2 \text{ Pa}^{-2} \\
 E & : -0.765 \times 10^{-8} \text{ K}^2 \text{ Pa}^{-2} \\
 T & : \text{temperatura del aire en K} \\
 xv & : \text{fracción molar del vapor de agua}
 \end{aligned}$$

Valores obtenidos para la densidad del aire a diferentes temperaturas y presión constante, Tabla 9.

Calculo de la densidad del aire		
AIRE	Temperatura	Densidad
$pV=nZRT$	°C	$m/V=pM/ZRT$
	-20	1.16
Presión: 84500 N/m ²	-15	1.14
	-10	1.12
	-5	1.1
R: 286.9 Nm/KgK	0	1.08
	5	1.06
	10	1.04
	15	1.02
	20	1
	25	0.99
	30	0.97
	35	0.96
	40	0.94
	45	0.93

Tabla 9 Densidad del aire a diferentes temperaturas, altitud 1500m.

El calor específico del aire no es constante, depende de la temperatura.

La ecuación que define el C_p del aire para fines prácticos a 25°C y presión constante de 1 atm.

$$C_p = 0.2415 \frac{\text{Btu}}{\text{lb } ^\circ\text{F}} = 1.0111 \frac{\text{kJ}}{\text{kg } ^\circ\text{C}}$$

Peso específico del aire seco.

$$w = 1.2007 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \text{ (a } 21^\circ\text{C y 1atm)}$$

Peso del aire seco contenido en un m^3 de aire saturado:

$$w = 1.1708 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \text{ (a } 21^\circ\text{C y 1atm)}$$

Peso de la mezcla saturada:

$$w = 1.1892 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \text{ (a } 21^\circ\text{C y 1atm)}$$

La ecuación utilizada para transferencia de calor en sólidos es:

$$\rho C_p u \nabla T = \nabla (k \nabla T) + Q \quad (3.3)$$

La ecuación incluye las siguientes propiedades del material: densidad ρ , capacidad calorífica C_p , conductividad térmica k , el campo de velocidad u y una fuente de calor Q .

La conductividad térmica describe la relación entre el campo vectorial de flujo calor q y el gradiente de temperatura ∇T como en la ley de Fourier de conducción de calor.

Aislamiento térmico.

Esta condición límite significa que no hay flujo de calor a través del límite, específica donde el dominio está bien aislado, nos muestra que el gradiente de temperatura a través del límite es cero. Para que esto sea cierto, la temperatura en un lado del límite debe ser

igual a la temperatura del otro lado. Debido a que no hay diferencia de temperatura a través del límite, el calor no puede transferirse a través de él.

$$-n \cdot (-k \nabla T) = 0 \quad (3.4)$$

Las ecuaciones utilizadas para el canal cilíndrico son:

$$\rho A C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho A C_p u \cdot \nabla T = \nabla \cdot (k \nabla T) + f_D \frac{\rho A}{2d_h} |u|^3 + Q + Q_{wall} + Q_p \quad (3.5)$$

Dónde:

ρ : Densidad del fluido

C_p : Capacidad calórica del material a presión constante

u : Vector de velocidad

k : Conductividad térmica del material

Q : Generación de calor por una fuente determinada

Q_{wall} : Intercambio de calor externo a través de la pared del tubo

T : Temperatura

t : Tiempo

A : Área de sección transversal del tubo

f_D : Factor de fricción definido en la ecuación

Q_p : Trabajo de presión

Al no existir generación de calor por parte del sistema en ningún punto en la pared del tubo o el fluido se considera $Q = 0$.

Flujo de calor convectivo.

Flujo de calor en el interior de la tubería de PVC se rige por la siguiente ecuación.

$$-n \cdot (-k \nabla T) = h (T_{ext} - T) \quad (3.6)$$

Coefficiente de transferencia de calor del aire.

La ley de enfriamiento de Newton establece que la tasa de transferencia de calor que abandona una superficie a una temperatura T_s para pasar a un fluido del entorno a temperatura T_f se establece por la ecuación:

$$Q_{convección} = hA (T_s - T_f) \quad (3.7)$$

3.1.2 Diseño geométrico del modelo

Se diseña un intercambiador de tipo lineal con tubería de PVC, recubierto por una composición mixta arena grava, arcilla y limo, la longitud y diámetro de la tubería son variables y el fluido que se hace pasar a través de ella es aire.

El sistema construido corresponde al mostrado en la ilustración 8.

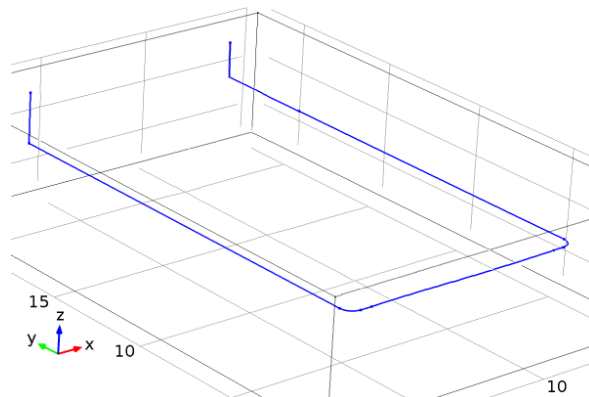


Ilustración 8 Propuesta para el diseño de intercambiador lineal con tubos de PVC

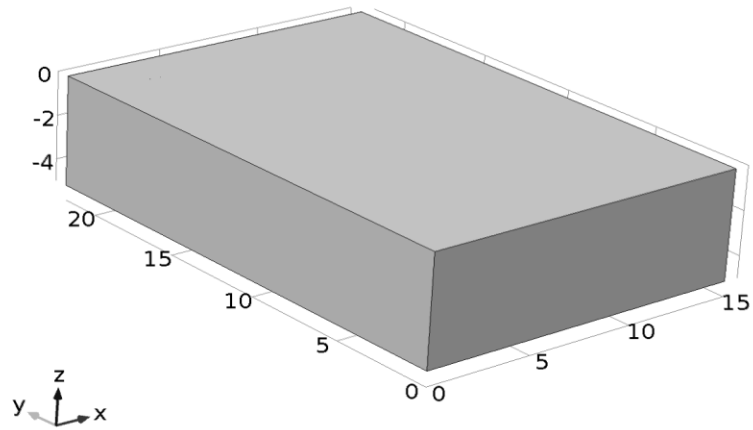


Ilustración 9 Área de dominio del sistema.

Aislamiento térmico

El aislamiento térmico es donde ya no hay transferencia de calor, la temperatura en un punto y otro contiguo es igual.

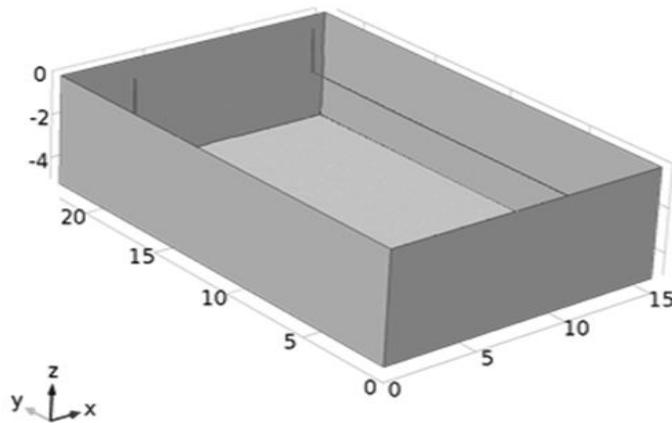


Ilustración 10 Geometría de aislamiento térmico.

Temperatura exterior

La temperatura exterior se considera en la cara superior del prisma y en la base del tubo es decir la entrada de aire.

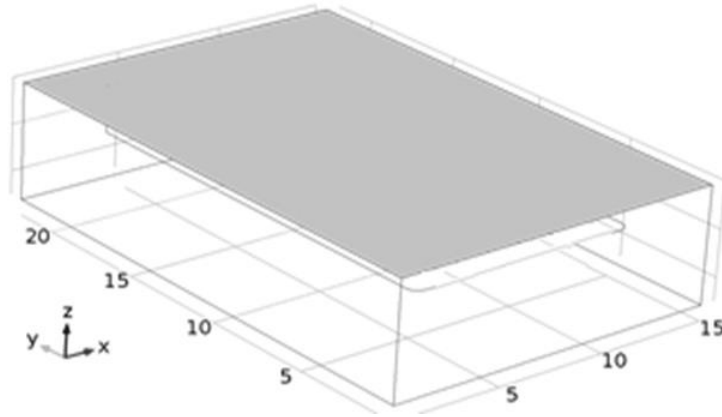


Ilustración 11 Geometría capa exterior y tubería

Flujo de calor convectivo

Flujo de calor en el interior de la tubería de PVC, es un flujo de convección forzado, por la presencia del impulsor de aire, cuya movilidad provee una velocidad de 4 m/s a la entrada del sistema.

Parámetros de diseño, longitud y diámetro de tubería

Se desarrollaron una serie de estudios para analizar el comportamiento del sistema variando la combinación longitud-diámetro a diferentes temperaturas, se analizó el comportamiento de 5 medidas comerciales de tubos de PVC con longitudes de 10, 20, 30 y 40m, bajo la acción de temperaturas que variaron de -10°C a 40°C con incrementos de 10 grados. Cada variación representa un sistema, de tal modo que se desarrollaron 24

sistemas diferentes bajo la acción de 6 distintas temperaturas. La tabla 10 muestra los 24 sistemas desarrollados.

Dónde: La nomenclatura para cada uno de los sistemas obedece a una nomenclatura personal para efectos de orden e identificación.

TC; Transferencia de Calor

Primer par de números corresponde al diámetro en “in”

Segundo par de números corresponde a la longitud en metros.

Cuando aparece un tercer par de números corresponde a la temperatura en °C.

Diámetros y longitudes seleccionadas para el diseño del sistema.							
Num.	Diámetro		Longitud	Num.	Diámetro		Longitud
TC	m	In	m	TC	m	In	m
0410	0.1016	4	10	1010	0.254	10	10
0420	0.1016	4	20	1020	0.254	10	20
0430	0.1016	4	30	1030	0.254	10	30
0440	0.1016	4	40	1040	0.254	10	40
0610	0.1524	6	10	1210	0.3048	12	10
0620	0.1524	6	20	1220	0.3048	12	20
0630	0.1524	6	30	1230	0.3048	12	30
0640	0.1524	6	40	1240	0.3048	12	40
0810	0.2032	8	10	1410	0.3556	14	10
0820	0.2032	8	20	1420	0.3556	14	20
0830	0.2032	8	30	1430	0.3556	14	30
0840	0.2032	8	40	1440	0.3556	14	40

Tabla 10 Parámetros de diseño en longitud y diámetro

CAPÍTULO CUATRO

4 Resultados

El objetivo del presente trabajo fue generar una herramienta de predicción que permita el estudio de las variables y condiciones para la viabilidad teórica de la implementación del sistema de climatización geotérmico de baja entalpía. Los objetivos específicos se enfocaron en crear un modelo para simular el comportamiento del sistema, determinar los parámetros longitud-diámetro, para el funcionamiento óptimo, determinar las condiciones que lo vuelven inoperante, determinar la transferencia de calor.

Los objetivos planeados han sido ampliamente cumplidos primeramente se creó un modelo que permite simular el comportamiento de un sistema de transferencia de calor tierra-aire con flujo forzado, se determinaron los parámetros longitud-diámetro que optimizan el funcionamiento del sistema, posteriormente se detectaron las condiciones menos favorables para su funcionamiento y se generó como herramienta de predicción una matriz de 144 elementos que contribuye al estudio de las variables y condiciones para la viabilidad teórica de la implementación del sistema.

Los detalles sobre los resultados mencionados se describen a continuación:

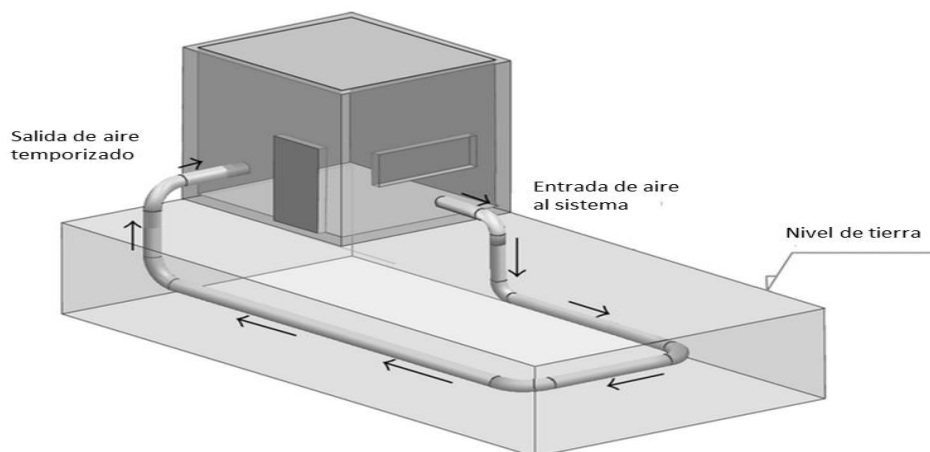


Ilustración 12 Ejemplo del modelo del sistema de climatización, propuesto.

Singh, 2017

Se consideraron tres variables importantes para el sistema:

- 1- Longitud de tubería
- 2- Diámetro de tubería
- 3- Temperatura exterior

Se diseñaron 24 sistemas de climatización variando longitud y diámetro, ver Tabla 10, y se evaluó su funcionamiento bajo la acción de 6 parámetros de temperatura distintos.

Se diseñó un sistema inicial TC0420 al cual se le hicieron 7 pruebas de funcionamiento, ver Tabla 11, se alimentó con diferentes temperaturas al azar que oscilaron entre -20°C y 50°C considerando de esta manera un rango de temperaturas de 70°C , el sistema en funcionamiento arrojó temperaturas de salida de -1.17°C a 34°C lo que reduce el rango a 35°C .

Parámetros considerados para el desarrollo del sistema de climatización. TC0420			
Profundidad 2.5m, Diámetro 0.1m, Long 20m			
Evento	Temp. Entrada °C	Temp. Salida °C	 Te-Ts °C
1	-20	-1.17	18.83
2	-10	4	14
3	10	14	4
4	30	24	6
5	39	28.6	10.4
6	40	29	11
7	50	34	16

Tabla 11 Parámetros de prueba para el desarrollo del sistema de climatización TC0420.

El gráfico 3 muestra el comportamiento del sistema TC0420 ante los siete eventos de prueba, las temperaturas extremas son atenuadas con clara tendencia a alcanzar la

temperatura de confort la cuál de acuerdo a la carta psicométrica se encuentra entre los 18°C y 23°C

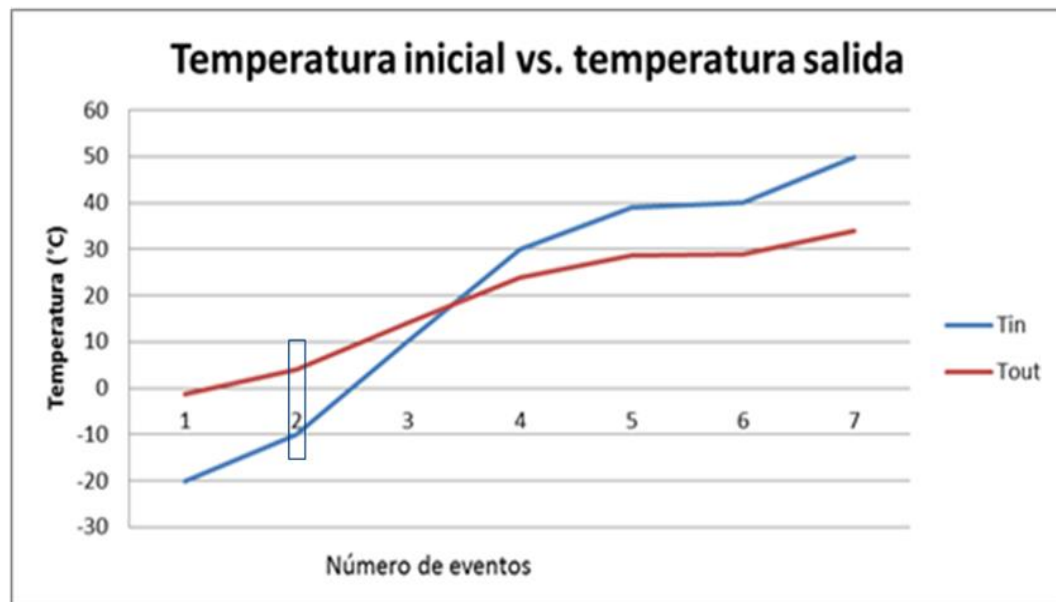


Gráfico 3 Comparativo de temperaturas de entrada y salida del sistema TC0420, con diámetro de 0.1 m y longitud 20m.

La ilustración 13 representa el evento 2 del sistema TC0420-10, muestra los contornos isotérmicos del comportamiento del sistema, para un flujo de aire que entra a una temperatura de -10°C y sale a una temperatura de 4°C. Los vectores denotan el sentido de la transferencia de calor que van de donde hay mayor temperatura a donde hay menor temperatura, en este caso el exterior tiene menor temperatura que el interior de suelo.

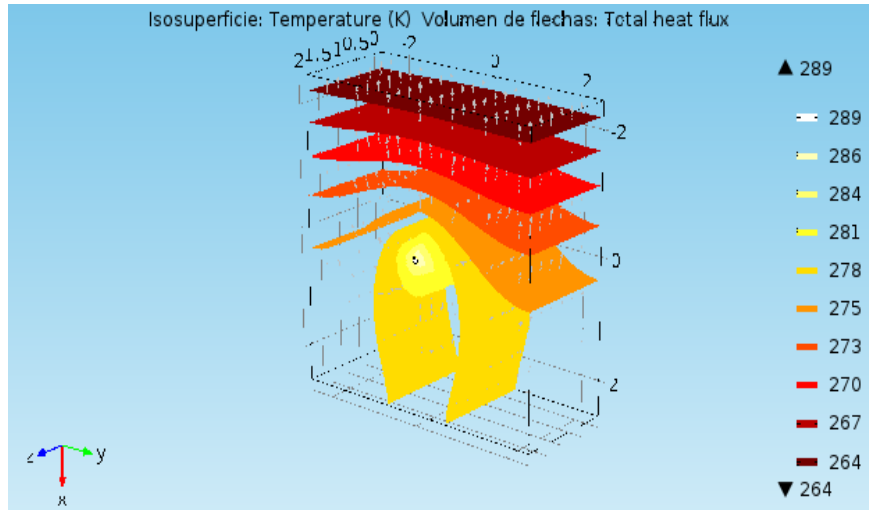


Ilustración 13 Contornos Isotérmicos para el sistema TC0420-10, con respuesta de 4°C a una temperatura de entrada de -10°C.

El gráfico 4 muestra el comportamiento de la temperatura del aire a lo largo del sistema de tubos enterrados TC0420-10, la temperatura externa proporcionada al sistema es -10°C (263.15 K), la temperatura de salida del sistema es 4.43°C (277.53K).

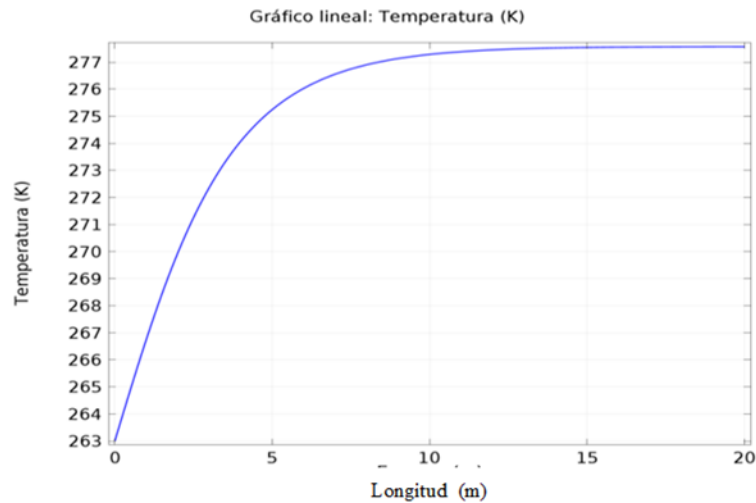


Gráfico 4 Muestra el comportamiento de la temperatura del aire en el interior del sistema de tubos enterrados TC0420-10.

Se consideraron las temperaturas máximas y mínimas mensuales durante el año de 2015 y se proporcionó la información al modelo, el resultado proporcionado por el sistema es como se muestra en las Tablas 12 y 13.

La Tabla 12 contiene las temperaturas máximas registradas de cada mes (TMAXI), la temperatura máxima a la salida del sistema (TMAXS) y la diferencia de temperatura (DT).

El mes de enero presentó una temperatura máxima de 24°C, es la temperatura con la que se alimenta el sistema como temperatura inicial, a la salida del sistema se reporta una temperatura de 20.85 °C, la diferencia de temperatura es el efecto de temporización y en este caso fue 3.15°C. El mes de junio presentó la temperatura más alta del año 38°C y el efecto de temporización reflejó una atenuación de 10.28°C, obteniendo a la salida del sistema una temperatura de 27.72°C.

Efecto de temporización del sistema TC0420, para temperaturas máximas mensuales en 2015. Cd. Chihuahua, Chih.				
Evento	Mes	TMAXI	TMAXS	DT
		°C	°C	°C
1	Ene	24	20.85	3.15
2	Feb	30	23.79	6.21
3	Mar	30	23.79	6.21
4	Abr	32	24.77	7.23
5	May	36	26.74	9.26
6	Jun	38	27.72	10.28
7	Jul	35	26.24	8.76
8	Ago	37	27.23	9.77
9	Sep	35	26.24	8.76
10	Oct	33	25.26	7.74
11	Nov	29	23.3	5.7
12	Dic	27	22.32	4.68
Prom		32.17	24.85	7.31

Tabla 12 Temperatura máxima (TMAXI) y temperatura a la salida del sistema (TMAXS).

El gráfico 5 muestra la el efecto de atenuación de temperaturas máximas en el sistema TC0420, que como ya fue mencionado es un sistema de tubos de PVC con 20m de longitud y .010m de diámetro.

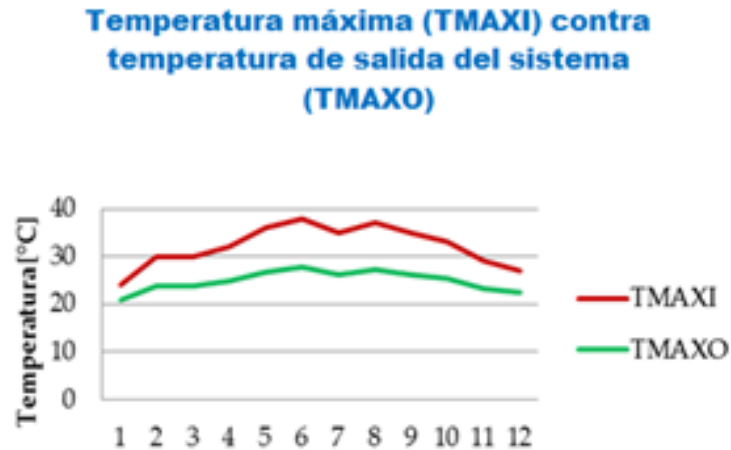


Gráfico 5 Comparativo de la temperatura máxima en el exterior con temperatura a la salida del sistema TC0420.

La tabla 13 contiene las temperaturas mínimas registradas de cada mes (TMINI), la temperatura mínima a la salida del sistema (TMINS) y la diferencia de temperatura (DT).

El mes de enero presentó una temperatura mínima de -7°C , es la temperatura con la que se alimenta el sistema como temperatura inicial, a la salida del sistema se reporta una temperatura de 5.76°C , la diferencia de temperatura es el efecto de temporización y en este caso fue 12.76°C . El mes de junio presentó una temperatura de 15°C y el efecto de temporización reflejó una atenuación de 1.46°C , obteniendo a la salida del sistema una temperatura de 16.46°C .

Efecto de temporización del sistema TC0420, para temperaturas mínimas mensuales en 2015				
Cd. Chihuahua, Chih.				
Evento	Mes	TMINI	TMINS	DT
		°C	°C	°C
1	Ene	-7	5.76	12.76
2	Feb	-1	8.68	9.68
3	Mar	-2	8.18	10.18
4	Abr	4	11.1	7.1
5	May	6	12.08	6.08
6	Jun	15	16.46	1.46
7	Jul	14	15.97	1.97
8	Ago	14	15.97	1.97
9	Sep	12	15	3
10	Oct	6	12.08	6.08
11	Nov	-2	8.18	10.18
12	Dic	-6	6.23	12.23
Prom.		4.42	11.31	6.89

Tabla 13 Temperaturas mínimas (TMINI) y temperaturas a la salida del sistema (TMINS)

El gráfico 6 muestra la el comportamiento del sistema TC0420 ante las bajas temperaturas, se observa un mejor comportamiento ante las temperaturas más bajas.

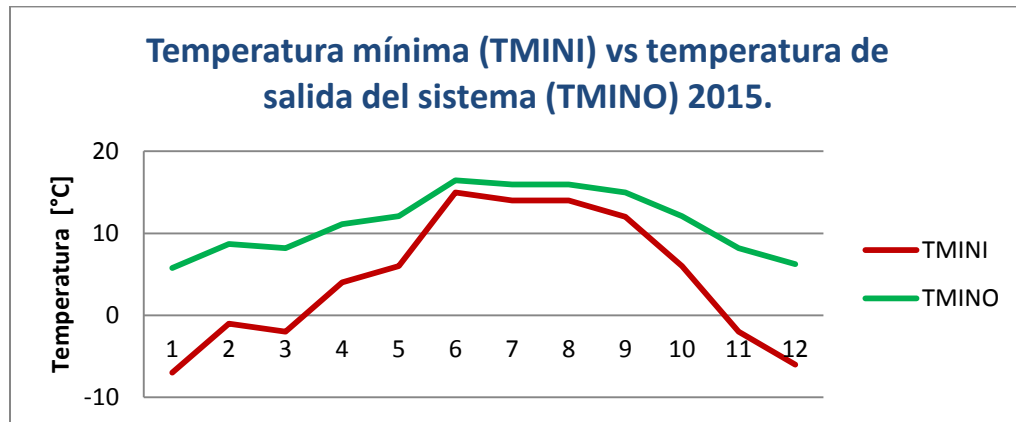


Gráfico 6 Comparativo de la temperatura mínima del exterior con la temperatura a la salida del sistema TC0420.

La diferencia de temperatura promedio en el exterior fue 28°C y en la salida del sistema 14°C. La mayor atenuación registrada por el sistema fue en las temperaturas mínimas en el mes Enero y para las temperaturas máximas la mayor atenuación se presentó en el mes de Junio.

Diferencia de temperatura máxima y mínima en el exterior contra diferencia de temperatura atenuado por el sistema TC0420		
Mes	Diferencia de Temperatura en el exterior en °C	Diferencia de Temperatura acondicionada en °C
Ene	31	15.09
Feb	31	15.11
Mar	32	15.61
Abr	28	13.67
May	30	14.66
Jun	23	11.26
Jul	21	10.27
Ago	23	11.26
Sep	23	11.24
Oct	27	13.18
Nov	31	15.12
Dic	33	16.09
Diferencia promedio	28	14

Tabla 14 Intervalos de temperatura máxima y mínima externa y temperatura acondicionada por el sistema.

El gráfico 7 muestra el resumen del funcionamiento del sistema TC0420 ante las temperaturas extremas de la localidad para el año 2015. La franja rosa representa la temperatura de confort de bulbo seco de acuerdo a la carta psicrométrica.

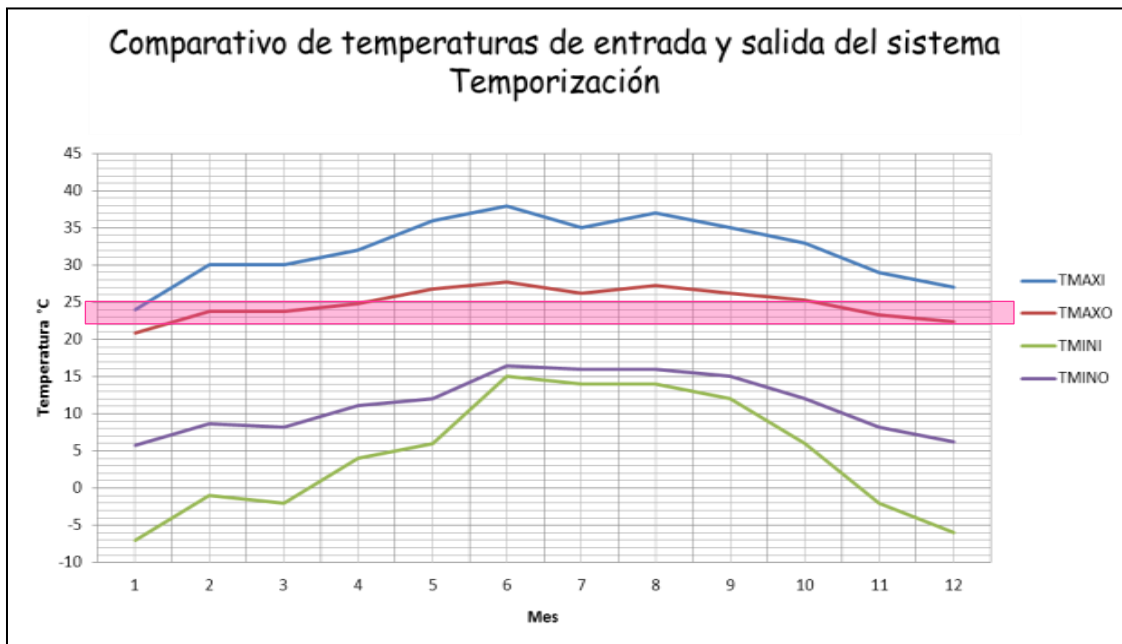


Gráfico 7 Comparativo de temperaturas máximas y mínimas contra temperaturas de salida del sistema TC0420 y temperatura de confort de acuerdo a la carta psicrométrica.

Para obtener el sistema de funcionamiento óptimo se desarrollaron 24 propuestas con características diferentes en longitud y diámetro, para el diámetro se consideraron los siguientes valores comerciales para tubería de PVC: 4, 6, 8, 10, 12 y 14 pulgadas, para la longitud del sistema se inició con 10m, considerando las pruebas de funcionamiento anteriores donde se muestra que el sistema se estabiliza a partir de los 10m de longitud, de ahí en adelante se efectuaron incrementos de 10 hasta alcanzar 40m de longitud. Cada sistema fue alimentado con 6 temperaturas distintas: -10°C, 0°C, 10°C, 20°C, 30°C y 40°C y se registró su comportamiento en la tabla 15.

Temperatura del aire a la salida del sistema geotérmico baja entalpia. Comparativo diámetro contra longitud									
Núm.	Diámetro		Longitud	Temperatura a la entrada del sistema					
	TC	m		in	m	-10°C	0°C	10°C	20°C
0410	0.1016	4	10	4.4418	9.0941	14.0223	18.8983	23.7817	28.6989
0420	0.1016	4	20	4.4318	9.0833	14.0207	18.8988	23.7891	28.7123
0430	0.1016	4	30	4.3731	9.0514	14.0037	18.9035	23.8106	28.7515
0440	0.1016	4	40	4.3611	9.0319	13.9942	18.9060	23.8238	28.7756
0610	0.1524	6	10	5.4747	9.8945	14.3805	18.8003	23.2411	27.7130
0620	0.1524	6	20	5.4789	9.8974	14.3818	18.7999	23.2391	27.7094
0630	0.1524	6	30	5.4615	9.8857	14.3767	18.8013	23.2470	27.7238
0640	0.1524	6	40	5.4276	9.8628	14.3667	18.8095	23.2625	27.7520
0810	0.2032	8	10	6.1513	10.3274	14.5702	18.7484	22.9471	27.1767
0820	0.2032	8	20	6.1568	10.3320	14.5763	18.7480	22.9454	27.1735
0830	0.2032	8	30	6.1478	10.3272	14.5692	18.7536	22.9487	27.1794
0840	0.2032	8	40	6.1314	10.3166	14.4215	18.7564	22.9558	27.1925
1010	0.254	10	10	7.0142	10.8841	14.8121	18.6821	22.5721	26.4922
1020	0.254	10	20	7.0184	10.8887	14.8133	18.6817	22.5703	26.4889
1030	0.254	10	30	7.0162	10.8854	14.8127	18.6819	22.5713	26.4907
1040	0.254	10	40	7.0087	10.8806	14.8106	18.6825	22.5745	26.4966
1210	0.3048	12	10	7.5185	11.2083	14.9535	18.6433	22.3528	26.0919
1220	0.3048	12	20	7.5227	11.2111	14.9547	18.6430	22.3510	26.0886
1230	0.3048	12	30	7.5252	11.2126	14.9554	18.6428	22.3499	26.0866
1240	0.3048	12	40	7.5205	11.2096	14.9540	18.6432	22.3520	26.0904
1410	0.3556	14	10	8.1978	11.6450	15.1439	18.5912	22.0573	25.5524
1420	0.3556	14	20	8.2017	11.6475	15.1450	18.5908	22.0557	25.5493
1430	0.3556	14	30	8.2075	11.6518	15.1466	18.5904	22.0532	25.5447
1440	0.3556	14	40	8.1993	11.6460	15.1443	18.5910	22.0567	25.5512

Tabla 15 Temperatura del aire a la salida de los diferentes sistemas geotérmicos desarrollados.

Comparativo del comportamiento del sistema a un mismo diámetro con variación en la longitud de la tubería.

Los cuatro sistemas resaltados con verde se analizarán posteriormente, representan los sistemas con desempeño más y menos favorable en condiciones de temperatura extrema.

Temperatura del aire a la salida del sistema geotérmico de baja entalpía. Comparativo longitud contra diámetro								
Num.	Long	Diám	Temperatura a la entrada del sistema					
	m	in	-10°C	0°C	10°C	20°C	30°C	40°C
TC0410	10	4	4.44177	9.09411	14.0223	18.89834	23.78173	28.69891
TC0610	10	6	5.47469	9.89446	14.38052	18.80026	23.2411	27.71301
TC0810	10	8	6.1513	10.32743	14.57021	18.74835	22.94711	27.17666
TC1010	10	10	7.01418	10.88412	14.8121	18.68206	22.57208	26.49218
TC1210	10	12	7.51846	11.20831	14.95349	18.6433	22.35284	26.09191
TC1410	10	14	8.19781	11.64501	15.14391	18.59118	22.05734	25.55239
TC0420	20	4	4.43176	9.08328	14.02072	18.8988	23.78909	28.71227
TC0620	20	6	5.47888	9.89742	14.3818	18.79992	23.23913	27.70938
TC0820	20	8	6.15682	10.33196	14.57634	18.74804	22.9454	27.17352
TC1020	20	10	7.0184	10.88868	14.81329	18.68173	22.57028	26.48889
TC1220	20	12	7.52273	11.21105	14.95468	18.64297	22.35098	26.08856
TC1420	20	14	8.20168	11.64749	15.14504	18.59084	22.05566	25.5493
TC0430	30	4	4.37307	9.05142	14.00366	18.90347	23.81063	28.75152
TC0630	30	6	5.46148	9.88568	14.37673	18.80129	23.247	27.72378
TC0830	30	8	6.14776	10.3272	14.56921	18.75363	22.94866	27.17944
TC1030	30	10	7.01617	10.8854	14.81265	18.68191	22.57125	26.49069
TC1230	30	12	7.52523	11.21264	14.95538	18.64279	22.34994	26.08657
TC1430	30	14	8.20748	11.651821	15.1466	18.59042	22.05316	25.5447
TC0440	40	4	4.36114	9.03188	13.9942	18.90603	23.82375	28.77563
TC0640	40	6	5.42755	9.86279	14.36672	18.80947	23.26248	27.75204
TC0840	40	8	6.13137	10.31655	14.42146	18.75643	22.95583	27.19253
TC1040	40	10	7.00869	10.88058	14.81057	18.68246	22.57449	26.49661
TC1240	40	12	7.5205	11.20956	14.95403	18.64318	22.35198	26.09036
TC1440	40	14	8.19927	11.64596	15.14434	18.59103	22.05673	25.5512

Tabla 16 Temperatura del aire a la salida de los diferentes sistemas geotérmicos desarrollados

Comparativo del comportamiento del sistema a una misma longitud con variación en el diámetro de la tubería.

A continuación se muestran los resultados de los sistemas con mayor y menor desempeño bajo la acción de las temperaturas máxima y mínima consideradas en este trabajo.

Para determinar el desempeño de los sistemas se analizó la temperatura de salida de cada uno para detectar el menos eficiente.

En este primer caso analizado se puede ver que el sistema TC0440-10 es que tiene un desempeño menos favorable, ver Tabla 17.

El gráfico 8 muestra el comparativo de las temperaturas de salida de los sistemas seleccionados en la tabla 17, el resultado muestra que la combinación de los parámetro diámetro 0.10m, con longitud de 40m, son la combinación menor favorable para el buen desempeño del sistema.

Temperatura de salida de los sistemas TC04XX-10		
Diam	Long	Temp
in	m	-10°C
4	10	4.442
4	20	4.432
4	30	4.373
4	40	4.361

Tabla 17 Temperaturas de salida de los sistemas TC04XX-10

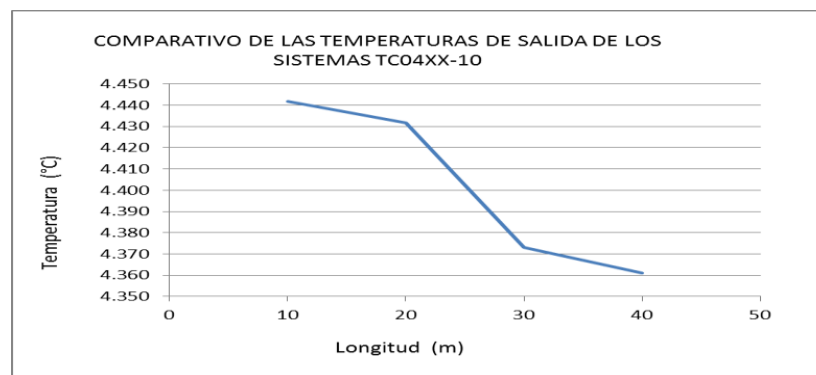


Gráfico 8 Comparativo de las temperaturas de salida de los sistemas TC04XX-10

El gráfico 9 muestra el comportamiento de la temperatura a lo largo del sistema TC0440-10, que resultó ser el de menor desempeño.

La ilustración 14 muestra la distribución de la temperatura en el sistema y la ilustración 15 presenta los contornos isotérmicos y el sentido de la transferencia de calor, en este caso como la temperatura externa es menor que la del interior del suelo, el sentido de los vectores de transferencia de energía calorífica es hacia la superficie de la tierra.

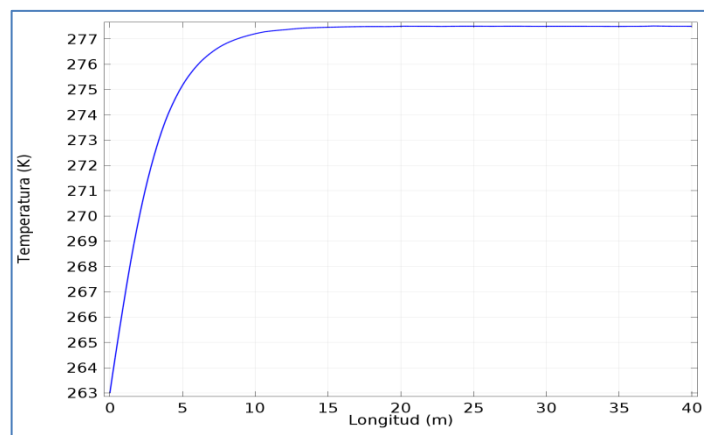


Gráfico 9 Comportamiento de la temperatura a largo del sistema.

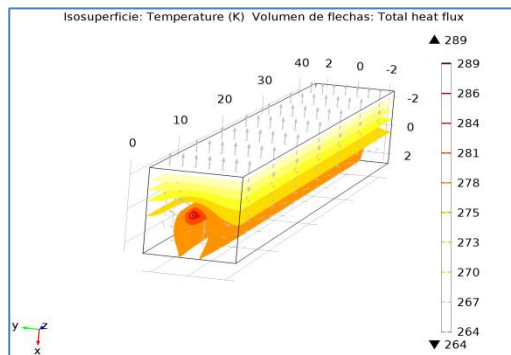


Ilustración 14 Contornos isotérmicos del sistema TC0440-10

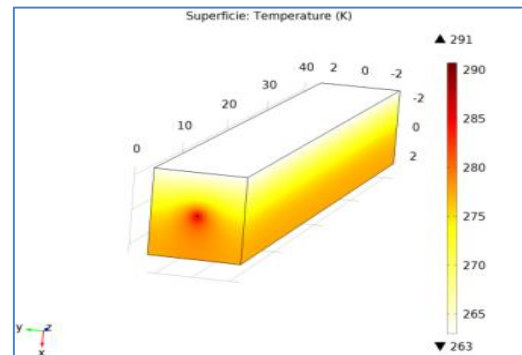


Ilustración 15 Distribución de la temperatura del sistema TC0440-10

La tabla 18, muestran los resultados de la temperatura de salida para los sistemas con diámetro de 4" o 0.10m en las cuatro longitudes consideradas 10, 20, 30 y 40 m , bajo la acción de una temperatura exterior de 40 °C.

El gráfico 10 muestra el comparativo de las temperaturas de salida de los sistemas seleccionados en la tabla 18, el resultado muestra que la combinación de los parámetro diámetro 0.10m, con longitud de 40m, son la combinación menos favorable para el buen desempeño del sistema.

Temperatura de salida de los sistemas TC04XX40		
Diam	Long	Temp
in	m	40°C
4	10	28.70
4	20	28.71
4	30	28.75
4	40	28.78

Tabla 18 Temperaturas de salida de los sistemas TC04XX40

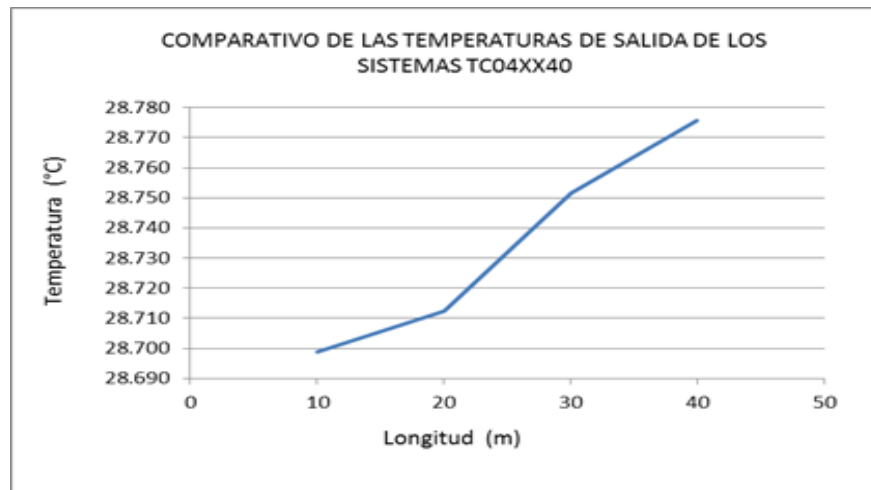


Gráfico 10 Comparativo de las temperaturas de salida de los sistemas TC04XX40

El gráfico 11 muestra el comportamiento de la temperatura a lo largo del sistema TC044040, que resultó ser el de menor desempeño.

La ilustración 17 muestra la distribución de la temperatura en el sistema y la ilustración 16 presenta los contornos isotérmicos y el sentido de la transferencia de calor, en este caso como la temperatura externa es mayor que la del interior del suelo, el sentido de los vectores de transferencia de energía calorífica es hacia el interior de la tierra.

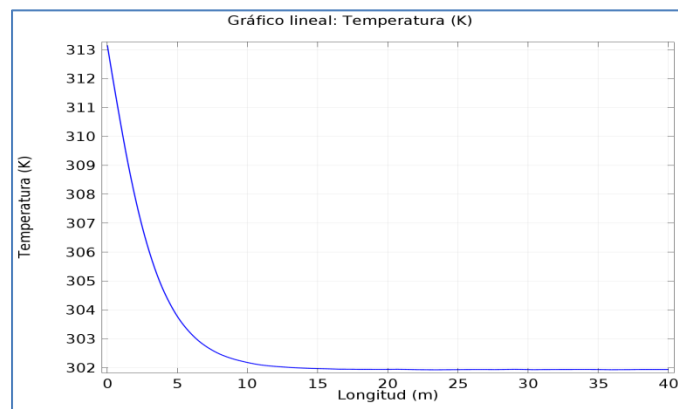


Gráfico 11 Comportamiento de la temperatura a largo del sistema

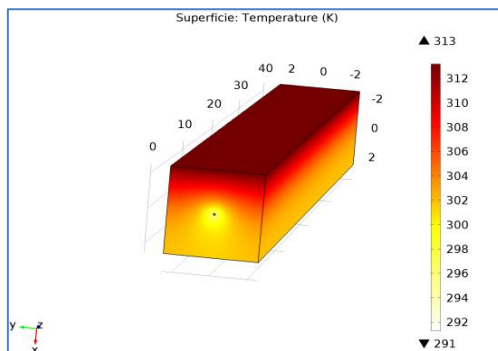


Ilustración 17 Distribución de la temperatura del sistema TC044040

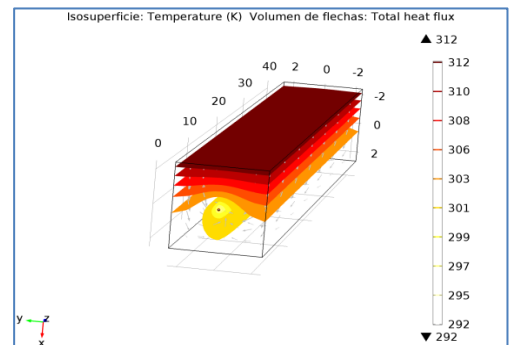


Ilustración 16 Contornos isotérmicos del sistema TC044040

La tabla 19, muestran los resultados de la temperatura de salida para los sistemas con diámetro de 14" o 0.35m en las cuatro longitudes consideradas 10, 20, 30 y 40 m , bajo la acción de una temperatura exterior de -10 °C.

El gráfico 12 muestra el comparativo de las temperaturas de salida de los sistemas seleccionados en la tabla 19, el resultado muestra que la combinación de los parámetro diámetro 0.35m, con longitud de 30m, son la combinación más favorable para el desempeño del sistema.

Temperatura de salida de los sistemas TC14XX-10		
Diam	Long	Temp
in	m	-10°C
14	10	8.20
14	20	8.20
14	30	8.21
14	40	8.20

Tabla 19 Temperaturas de salida de los sistemas TC14XX-10

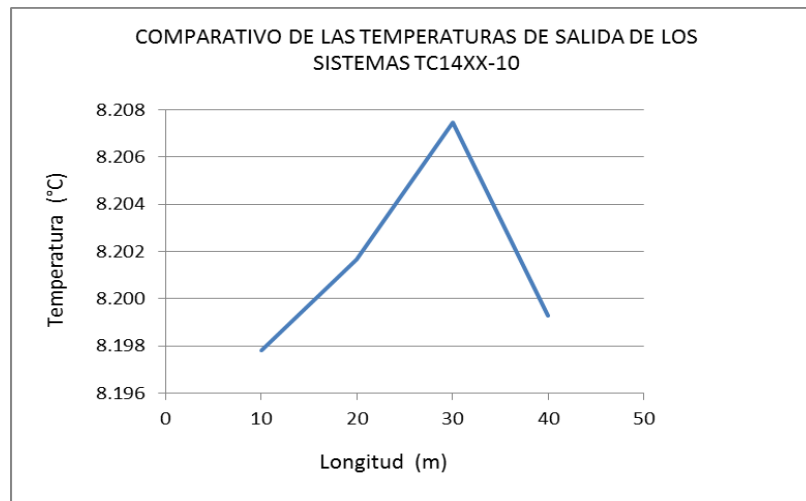


Gráfico 12 Comparativo de las temperaturas de salida de los sistemas TC14XX-10

El gráfico 13 muestra el comportamiento de la temperatura a lo largo del sistema TC1430-10, que resultó ser el de mejor desempeño.

La ilustración 18 muestra la distribución de la temperatura en el sistema y la ilustración 19 presenta los contornos isotérmicos y el sentido de la transferencia de calor, en este caso como la temperatura externa es menor que la del interior del suelo, el sentido de los vectores de transferencia de energía calorífica es hacia la superficie de la tierra.

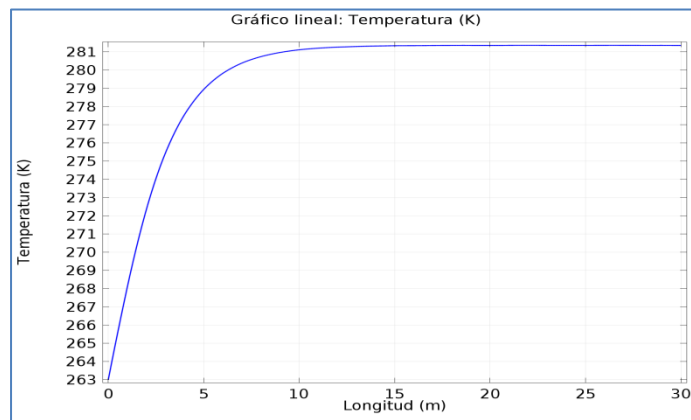


Gráfico 13 Comportamiento de la temperatura a largo del sistema

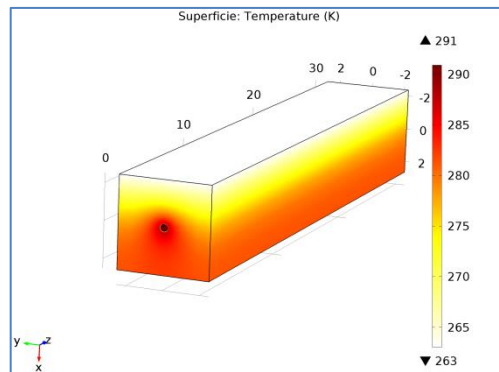


Ilustración 18 Distribución de la temperatura del sistema TC1430-10

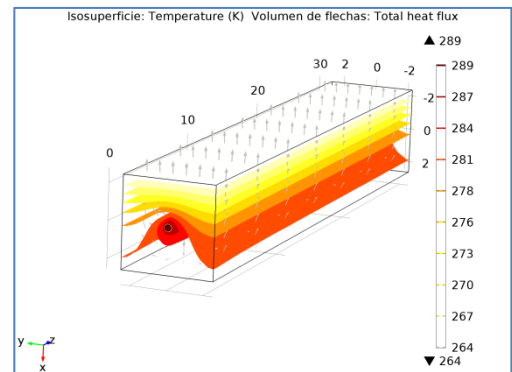


Ilustración 19 Contornos isotérmicos del sistema TC1430-10

La tabla 20, muestran los resultados de la temperatura de salida para los sistemas con diámetro de 0.34m o 14” en las cuatro longitudes consideradas 10, 20, 30 y 40 m , bajo la acción de una temperatura exterior de 40 °C.

El gráfico 14 muestra el comparativo de las temperaturas de salida de los sistemas seleccionados en la tabla 20, el resultado muestra que la combinación de los parámetro diámetro 0.35m, con longitud de 30m, son la combinación más favorable para el desempeño del sistema.

Temperatura de salida de los sistemas TC14XX40		
Diam	Long	Temp
in	m	40°C
14	10	25.55
14	20	25.55
14	30	25.54
14	40	25.55

Tabla 20 Temperaturas de salida de los sistemas TC14XX40

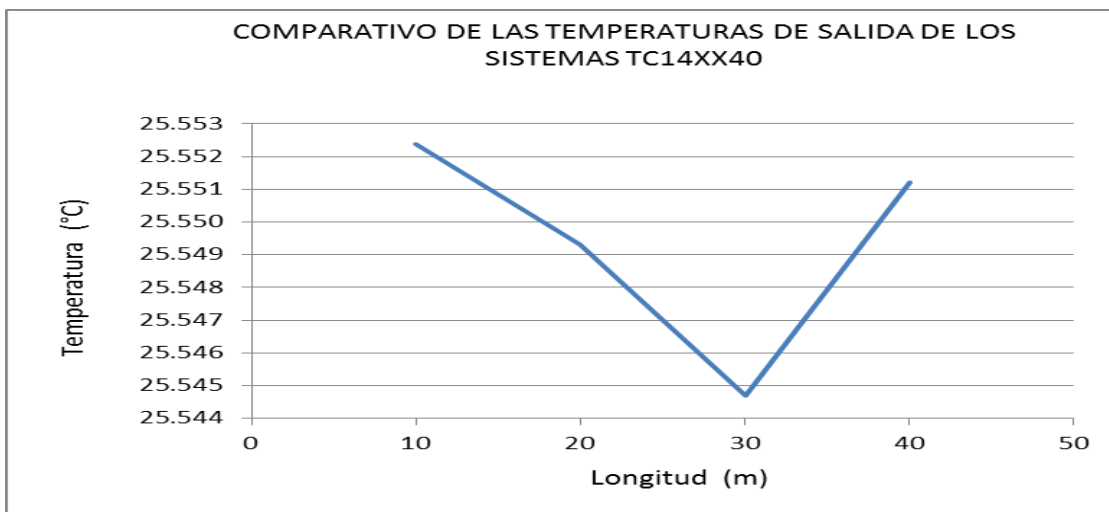


Gráfico 14 Comparativo de las temperaturas de salida de los sistemas TC14XX40

El gráfico 15 muestra el comportamiento de la temperatura a lo largo del sistema TC143040, que resultó ser el de mejor desempeño.

La ilustración 21 muestra la distribución de la temperatura en el sistema y la ilustración 20 presenta los contornos isotérmicos y el sentido de la transferencia de calor, en este caso como la temperatura externa es mayor que la del interior del suelo, el sentido de los vectores de transferencia de energía calorífica es hacia el interior de la tierra.

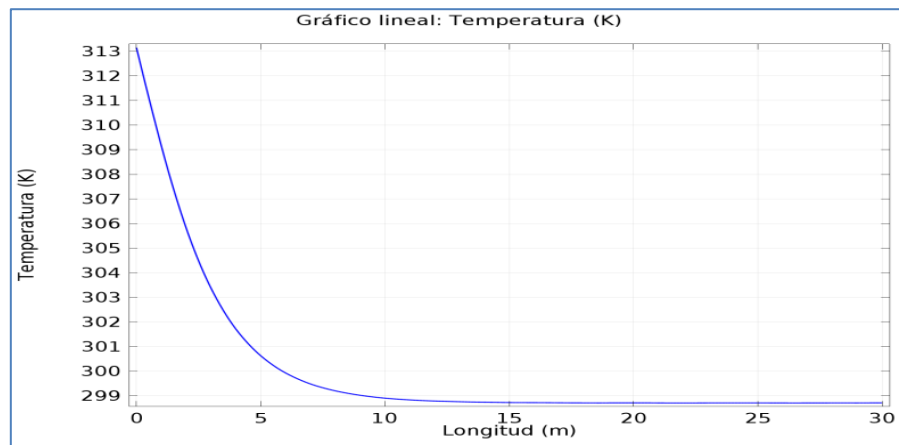


Gráfico 15 Comportamiento de la temperatura a largo del sistema

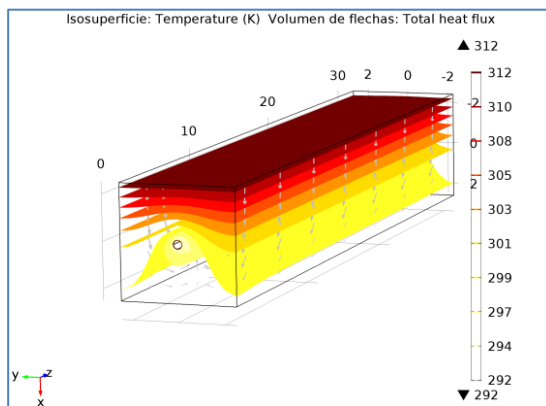


Ilustración 20 Contornos isotérmicos del sistema TC143040

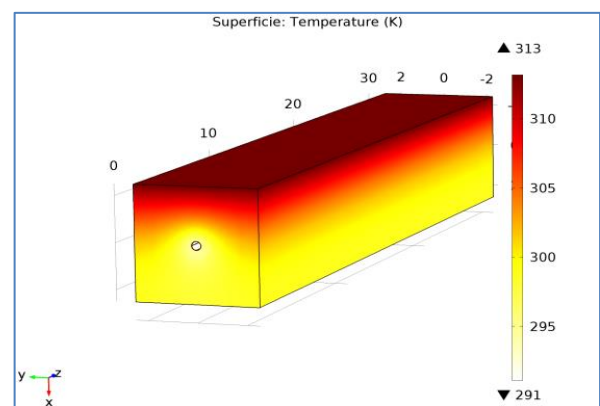


Ilustración 21 Distribución de la temperatura del sistema TC143040

Transferencia de calor de un sistema geotérmico de baja entalpía									
Num	Long	Diám		Transferencia de calor (W)					
	m	m	in	-10°C	0°C	10°C	20°C	30°C	40°C
TC0410	10	0.10	4	1152.40	725.68	320.97	87.91	496.20	901.79
TC0610	10	0.15	6	1852.24	1184.32	524.33	143.60	809.01	1470.69
TC0810	10	0.20	8	2577.64	1648.19	729.37	199.75	1125.59	2046.52
TC1010	10	0.25	10	3394.19	2171.29	959.97	262.92	1481.81	2694.70
TC1210	10	0.30	12	4193.74	2683.16	1185.82	324.78	1830.65	3329.46
TC1410	10	0.36	14	5082.43	3252.31	1436.63	393.47	2218.29	4035.05
TC0420	20	0.15	4	3454.82	2174.45	962.52	263.62	1486.83	2702.17
TC0620	20	0.15	6	3705.49	2369.34	1048.96	287.29	1618.48	2942.25
TC0820	20	0.20	8	5157.04	3297.82	1460.71	399.61	2251.73	4094.04
TC1020	20	0.20	10	5432.04	3475.52	1536.34	420.77	2371.47	4312.56
TC1220	20	0.20	12	5593.02	3578.42	1581.47	433.15	2441.46	4440.34
TC1420	20	0.20	14	5809.73	3717.72	1642.23	449.78	2535.73	4612.47
TC0430	30	0.25	4	8601.92	5417.05	2396.09	656.25	3704.18	6731.93
TC0630	30	0.25	6	9253.31	5916.33	2619.36	717.40	4041.50	7347.01
TC0830	30	0.25	8	9664.03	6180.57	2734.56	745.92	4220.05	7672.78
TC1030	30	0.25	10	10183.75	6514.64	2880.25	788.84	4445.92	8084.98
TC1230	30	0.30	12	12586.09	8052.58	3558.80	974.71	5494.04	9992.20
TC1430	30	0.30	14	13076.06	8367.99	3696.13	1012.32	5707.18	10381.36
TC0440	40	0.30	4	13751.65	8648.56	3824.68	1047.54	5914.13	10748.00
TC0640	40	0.30	6	14772.80	9444.21	4181.40	1140.00	6451.58	11728.15
TC0840	40	0.36	8	18021.21	11525.16	4939.45	1389.26	7869.42	14307.90
TC1040	40	0.36	10	19001.31	12155.27	5374.14	1471.89	8295.43	15085.35
TC1240	40	0.36	12	19573.08	12522.79	5534.41	1515.78	8544.01	15539.20
TC1440	40	0.36	14	20331.37	13010.32	5747.01	1574.04	8873.85	16141.52

Tabla 21 Transferencia de calor para los diferentes sistemas de climatización de baja entalpía.

La transferencia de calor se calcula con la ecuación de la ley de enfriamiento de Newton.

Interferencia térmica en arreglo de dos tubos.

Al absorber o entregar calor a la Tierra se modifica la temperatura del suelo alrededor de los tubos que causa interferencia alterando la transferencia de calor.

Para evaluar la interferencia de transferencia de calor por la cercanía entre tubos, se propone un sistema de 2 tubos horizontales enterrados a una profundidad suficiente de modo que no exista interacción con la superficie, el fluido en el interior de los tubos es aire.

Las simulaciones se efectúan con variaciones en la separación de los tubos, diámetro y temperatura inicial del fluido que será iguala la temperatura del exterior, la longitud del sistema se considerará en todos los casos 10m.

Se diseñan dos sistemas uno de tubo único y el segundo con 2 tubos paralelos y se compara el comportamiento térmico de los sistemas.

Se simula en software COMSOL, software comercial de análisis y resolución de elementos finitos para variados fenómenos físicos y de ingeniería. Se usa el módulo de “Heat Transfer”.

A fin de obtener una resolución apropiada a las condiciones del sistema se utiliza el tipo de malla más fino.

Se calcula la variación porcentual de temperatura entre sistemas.

Modelo

Se diseñan dos sistemas el primero con un tubo único y el segundo con 2 tubos paralelos horizontales, enterrados a 2.5m de profundidad, la temperatura inicial a esa profundidad se configura como la media anual en la Cd. de Chihuahua (21°C), el fluido considerado es aire, la longitud de los sistemas es 10m en todos los casos, el suelo se considera un medio homogéneo isótropo con propiedades constantes, Ver figura xx.

Se efectúa la simulación de los sistemas en software COMSOL, con mallado de tipo más fino, efectuando variaciones en la separación de tubos en el siguiente orden: 0.5, 1, 1.5, 2, 5 y 10 metros. Los diámetros considerados fueron: 0.10, 0.15 y 0.35m y para la temperatura exterior se consideraron -10°C y 30°C, Ver Ilustración 22.

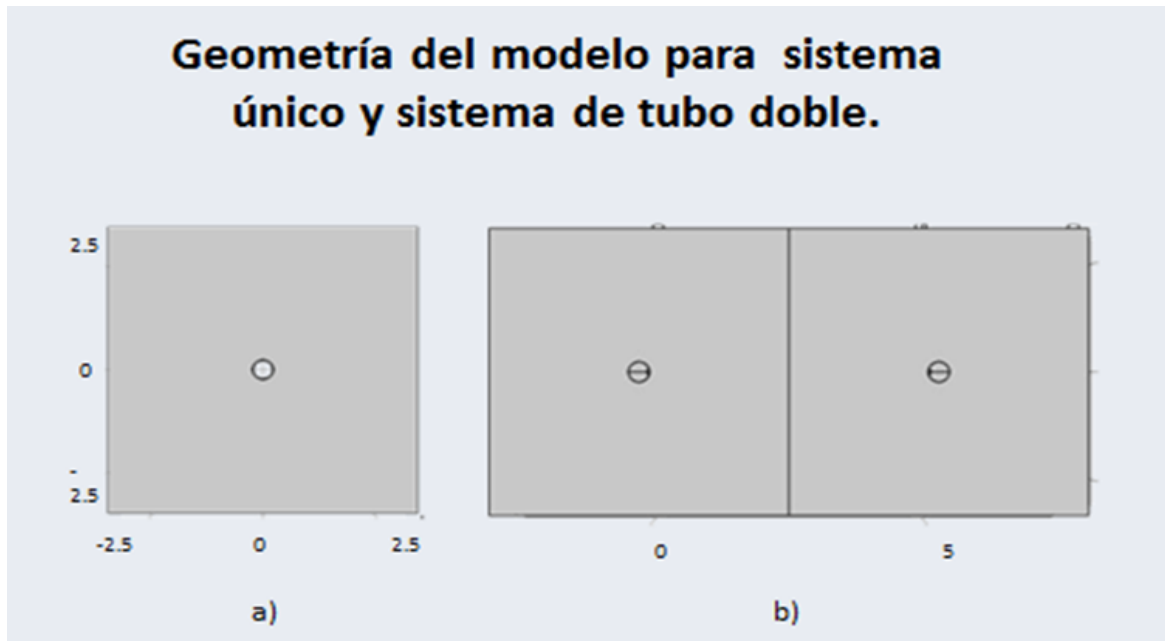


Ilustración 22 Geometría del modelo: a) Sistema de tubo único, b) Sistema de tubo doble.
 Separación de tubos considerados: 0.5, 1, 1.5, 2, 5 y 10 metros.
 Los diámetros considerados fueron: 0.10, 0.15 y 0.35m

Distribución del calor por conducción.

Distribución para tubo único.

Se simula el sistema de tubo único donde se varía el diámetro y temperatura exterior para obtener el perfil de distribución de temperatura, ver Ilustración 23 incisos: a) y e)

Distribución para sistema de dos tubos.

Se simula el sistema de dos tubos paralelos horizontales, donde se varía el diámetro, separación y temperatura exterior, para el análisis de interferencia térmica, ver Ilustración 23 incisos b), c), d) y f), g) y h).

Nomenclatura de los sistemas.

TCN,YY,ZZ,XX

Dónde:

TCN= Transferencia de calor en N tubos

YY= Diámetro del tubo

ZZ= Temperatura inicial en el exterior

XX= Distancia entre tubos.

Con las simulaciones, se busca el campo de temperatura alrededor de los tubos y el campo de magnitud del flujo de calor conductivo.

Se realizan diferentes simulaciones, haciendo variar el distanciamiento entre tubos, diámetro y temperatura externa.

Las Ilustraciones 23 y 24 muestran los resultados de la distribución de calor para los sistemas TCN06-10XX y TCN0630XX respectivamente, donde se observa la influencia de la cercanía de los tubos en la transferencia de calor, a menor distanciamiento mayor interferencia, el comportamiento de los sistemas es similar para temperaturas abatidas o elevadas.

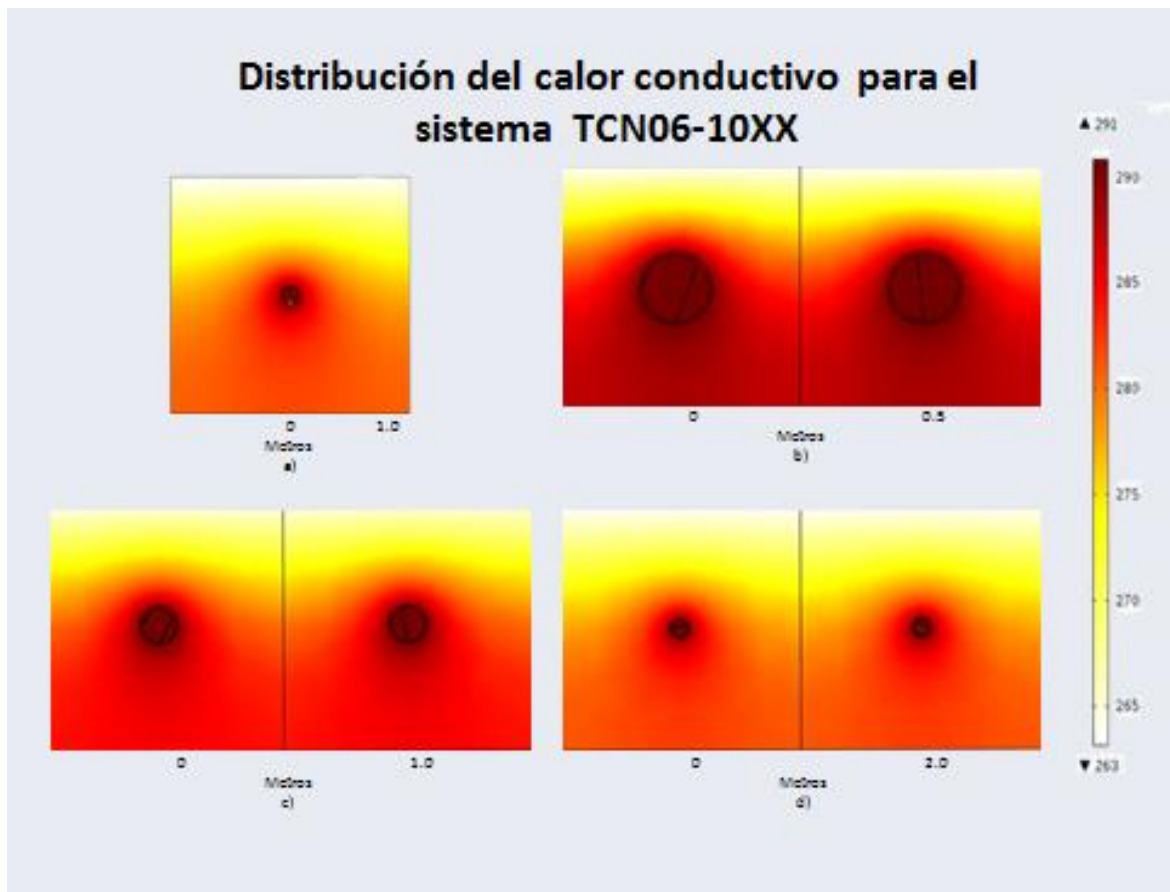


Ilustración 23 Muestra la distribución del flujo de calor conductivo para un sistema de 10m de longitud, diámetro de 6" y temperatura inicial del fluido -10°C , con las siguientes variaciones en la separación entre tubos: a) Sistema de tubo único. b) Separación 0.5m. c) 1m. y d) 2m.

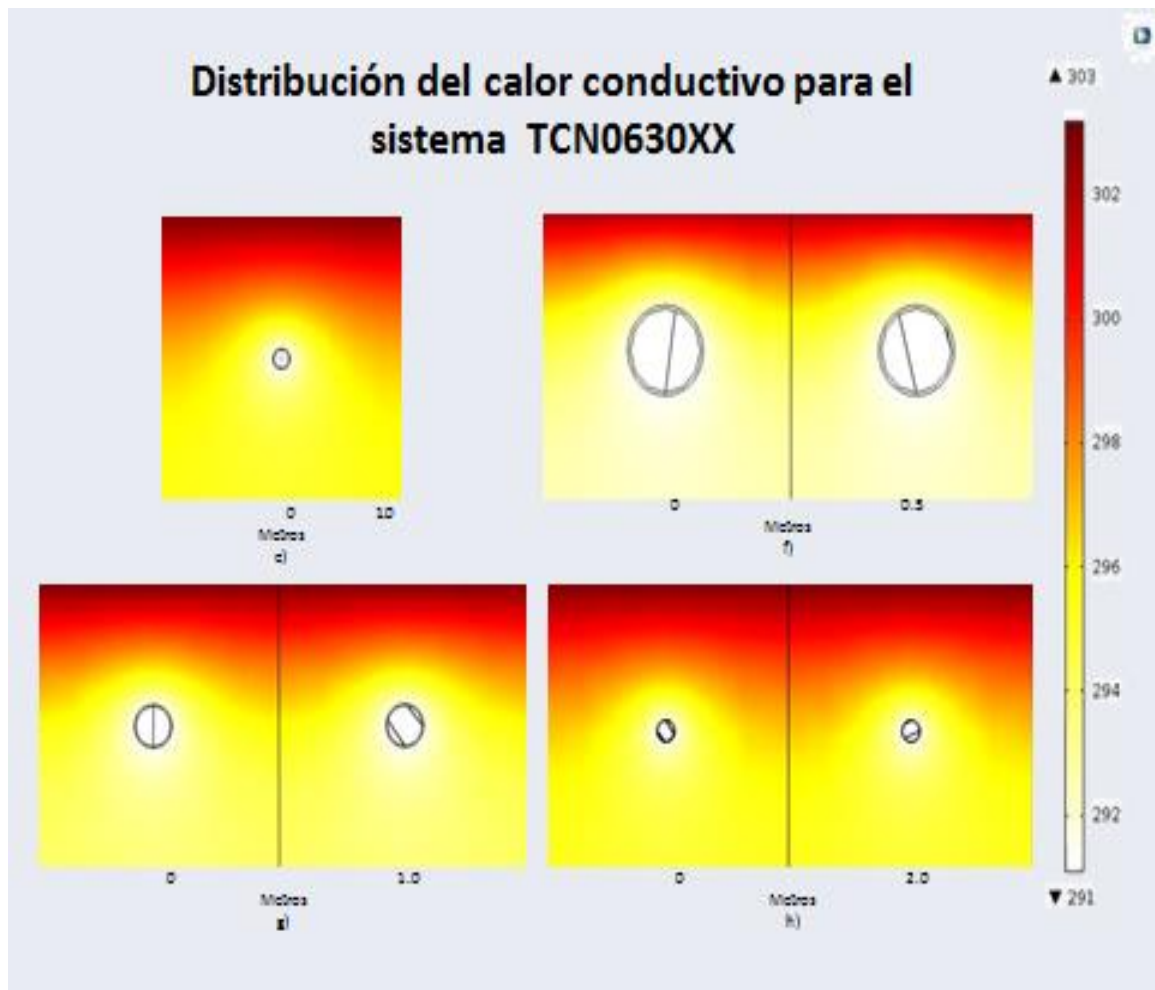


Ilustración 24 Muestra la distribución del flujo de calor conductivo para un sistema de 10m de longitud, diámetro de 6" y temperatura inicial del fluido 30°C, con las siguientes variaciones en la separación entre tubos: e) Sistema de tubo único. f) Separación 0.5m. g) 1m. y h) 2m.

Las ilustraciones 25 y 26 muestran cómo evolucionan las isotermas de los sistemas simulados bajo temperaturas externas abatidas [-10°C] o elevadas [30°C]

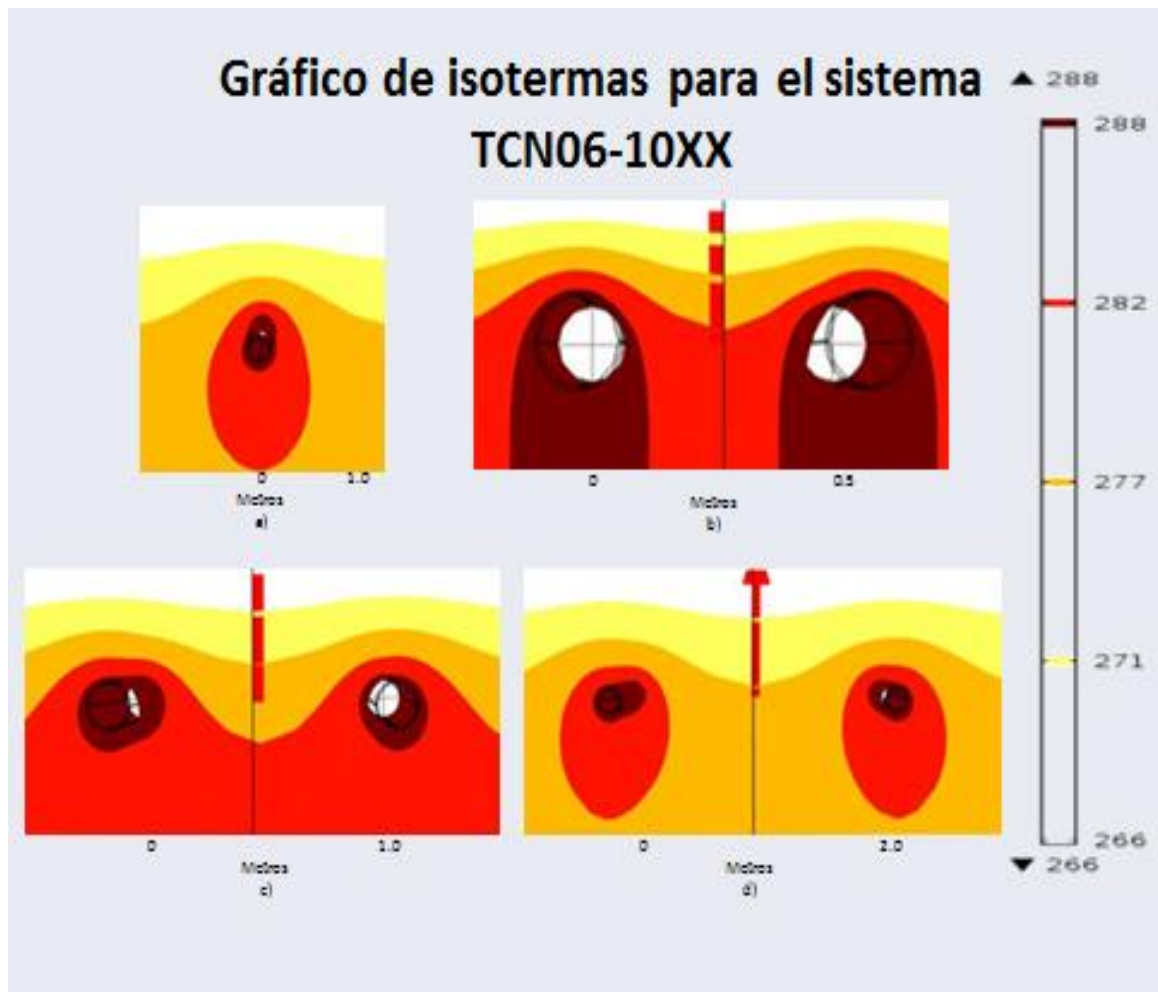


Ilustración 25 Muestra la evolución de las isotermas alrededor de los tubos para un sistema de 10m de longitud, diámetro de tubo 6" y temperatura inicial del fluido a -10°C , con las siguientes variaciones en la separación de tubos: a) Sistema de tubo único. b) Separación 0.5m. c) 1m. y d) 2m.

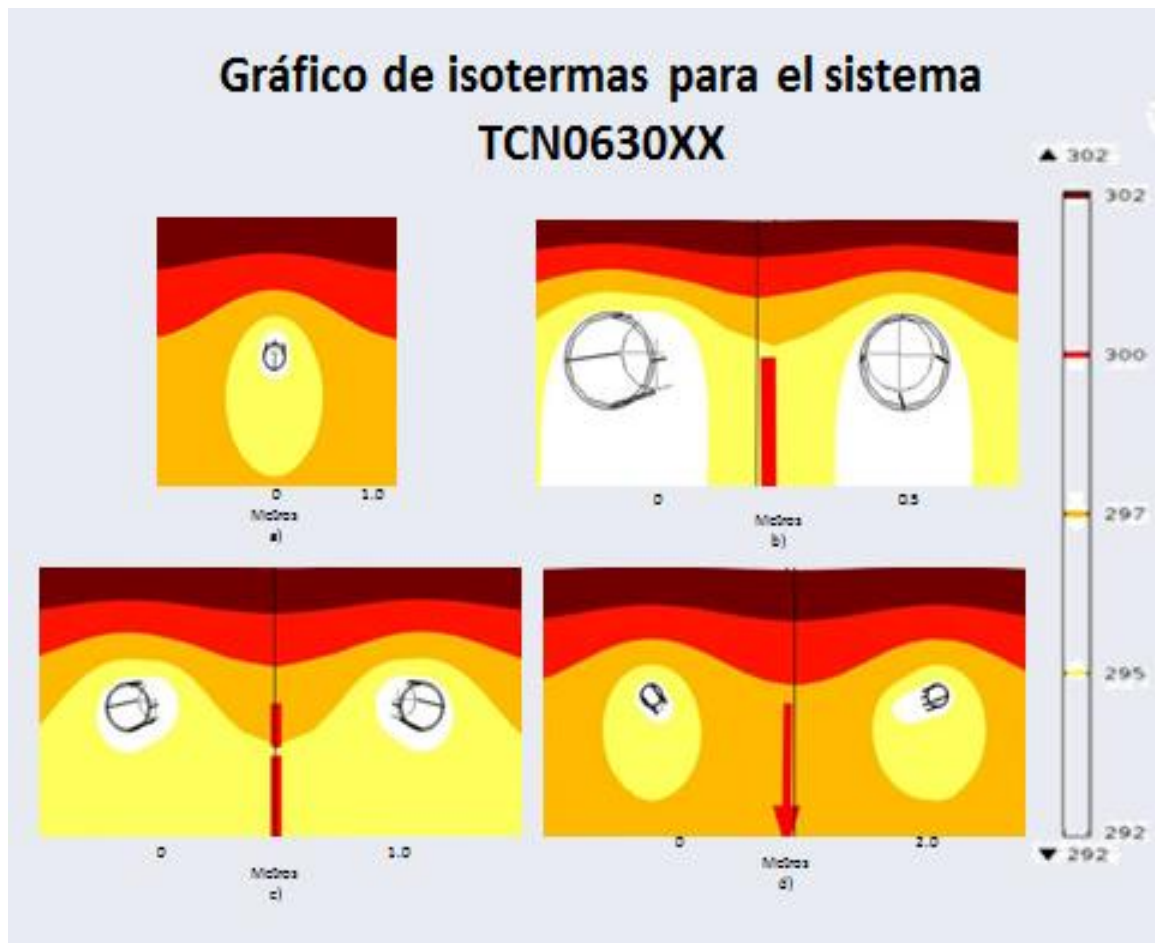


Ilustración 26 Muestra la evolución de las isotermas alrededor de los tubos para un sistema de 10m de longitud, diámetro de tubo 6" y temperatura inicial del fluido a 30°C, con las siguientes variaciones en la separación de tubos: a) Sistema de tubo único. b) Separación 0.5m. c) 1m. y d) 2m.

Interferencia en sistema de dos tubos paralelos

Los gráficos 16 y 17 muestran el resultado de la variación porcentual de transferencia de calor en un sistema de dos tubos paralelos donde se varió la separación entre tubos, el diámetro del tubo y la temperatura exterior, el comportamiento muestra que la interferencia entre tubos disminuye conforme aumenta la distancia. Los resultados indican que la interferencia es mayor cuando el diámetro es mayor, otro elemento que interfiere es la temperatura inicial, a temperatura de -10°C observa mayor interferencia. En ninguno de los casos analizados la variación sobrepasa los dos puntos porcentuales.

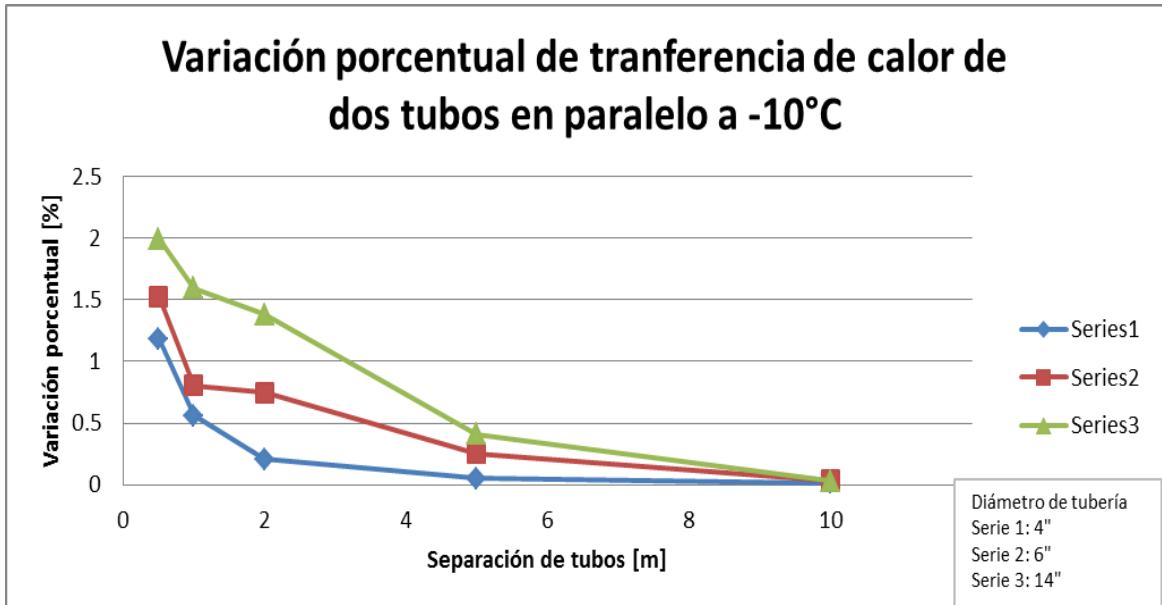


Gráfico 16 Muestra la variación porcentual de la transferencia de calor en relación a la separación de tubos paralelos a una temperatura exterior de -10°C, en un sistema de 10m de longitud con variación en el diámetro de la tubería.

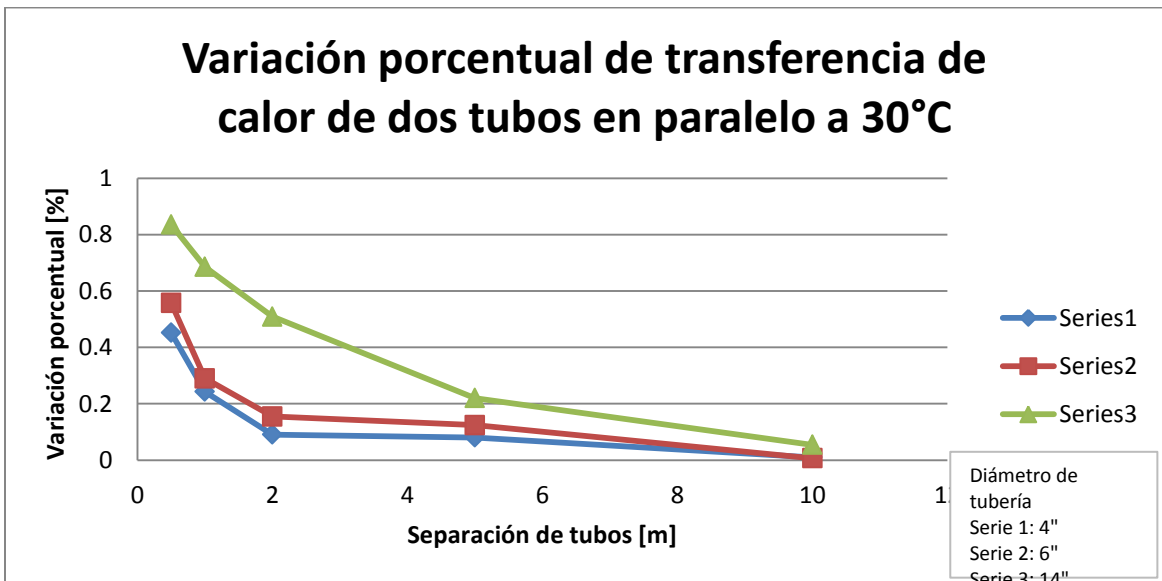


Gráfico 17 Muestra la variación porcentual de la transferencia de calor en relación a la separación de tubos paralelos a una temperatura exterior de 30°C, en un sistema de 10m de longitud con variación en el diámetro de la tubería.

CAPÍTULO CINCO

5. Conclusiones

- 1 El clima extremo de la localidad reporta temperaturas que van desde -18°C hasta 41°C , se estudiaron 24 modelos se probó con el comportamiento mensual de las diferentes temperaturas registradas durante 2015, la temperatura mínima fue de -7°C en invierno y la máxima en verano fue 38°C dando así un rango de variación de temperatura de 45°C .
- 2 El rango de temperatura exterior promedio es de 28°C , el rango atemperado promedio es 14°C lo que significa que el sistema reduce un 48% esa diferencia de temperatura.
- 3 Variaciones en la longitud del sistema de tubos no genera variaciones de temperatura mayores a 1°C .
- 4 Por cambio de diámetro la variación de temperatura es poco más de 1°C .
- 5 El sistema de tubos con longitud de 20m presenta una mejor respuesta ante las variaciones del diámetro en el 50% de los casos.
- 6 El mejor comportamiento del sistema se presentó bajo las siguientes características: diámetro de 0.35m y longitud de 30m.
- 7 Las características del sistema con un comportamiento menos favorable son: diámetro de 0.10m y longitud de 40m.
- 8 En todos los escenarios se obtuvo mejora.
- 9 El modelo no es un sistema de enfriamiento o calentamiento, es un complemento a los sistemas tradicionales de climatización.
- 10 El beneficio que reporta es no tener que enfriar o calentar una habitación desde una temperatura extrema.
- 11 La transferencia de calor, la tendencia marca un aumento directamente proporcional con el largo de la tubería

-
- 12 Si consideramos que el precio de la tubería y excavaciones el realizar sistemas demasiado largos puede encarecer de manera sustancial el sistema de climatización, por tanto es importantes seleccionar el que presente mejores condiciones de funcionamiento.
 - 13 Los resultados de las simulaciones efectuadas en el presente estudio y bajo las condiciones ya especificadas muestran que el espacio entre tubos es un factor a considerar en el diseño de un sistema de climatización geotérmico, la cercanía entre tubos modifica el funcionamiento del sistema. A menor distanciamiento, mayor interferencia.
 - 14 En condiciones de temperatura externa elevada o abatida, el comportamiento del sistema es similar solo que la dirección del flujo de calor es inverso, el estudio muestra que a bajas temperaturas la interferencia fue mayor.
 - 15 Los resultados muestran que la interferencia térmica es mayor si los tubos tienen mayor diámetro.
 - 16 En todos los casos la variación porcentual no supera los dos puntos.
 - 17 La interferencia térmica en arreglos de tubos cercanos tiene efecto en la reducción de la transferencia de calor, del orden de 0.2 porcentual a distancias no mayores a un metro.

ANEXOS

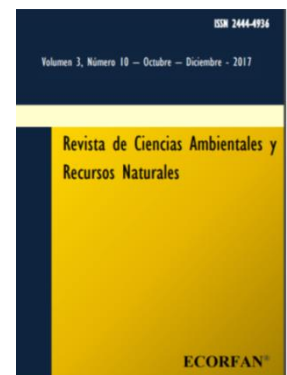
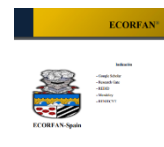
Anexo 1 Productos del trabajo de investigación

1) Participación en congreso:

Ponencia, “Sistema de climatización geotérmico de baja entalpía!”
Segundo Congreso Interdisciplinario de Energías Renovables,
Mantenimiento Industrial, Mecatrónica e Informática

2) Publicación de Artículo:

Esparza-Delgado, Carmen; Herrera-Peraza, Eduardo; Solorio-Rodríguez,
Luis Enrique, “Sistema de climatización geotérmica de baja entalpía”
Revista de Ciencias Ambientales y Recursos Naturales
Edit. ECORFAN-Spain, Dic 2017, v 3-No. 10, pp. 1-7



BIBLIOGRAFÍA

- A.Díaz, F. (2013). *Acondicionamiento térmico en la arquitectura*. Recuperado el 02 de 12 de 2017, de <http://acondicionamientotermicoarquitectura.blogspot.mx/2013/02/confort-termico.html>
- AEPECT. (2001). Seminario permanente de Ciencias de la Tierra y del Medio Ambiente. *Suelo*. Madrid, España: Asociación Española Para la Enseñanza de las Ciencias de la Tierra <http://platea.pntic.mec.es/~cmarti3/index2.html>.
- AIE/SENER. (2011). *Indicadores de Eficiencia Energética en México: 5 sectores, 5 retos*. Agencia Internacional de Energía / Secretaria de Energia. British Embassy, Mexico City: Gobierno Federal.
- Arnabat, I. (18 de 09 de 2013). *Calor y frío.com*. Recuperado el 27 de 10 de 2017, de <http://plus.google.com/107033862071989558843/posts>
- ATECYR. (2010). *Guía técnica de diseño de sistemas de bomba de calor geotérmica*. Madrid: IDAE.
- ATECYR. (2010). *Guía técnica de diseño de sistemas de bomba de calor geotérmica*. Asociación Técnica Española de Climatización y Refrigeración . Madrid: IDAE.
- ATECYR, A. t. (2012). *Guía Técnica: Diseño de sistemas de intercambio geotérmico de circuito cerrado*. Madrid, España: IDAE.
- BGS. (27 de Abril de 2011). *British Geological Survey, Temperature and Thermal Popierities (Basic)*. GeoReports.
- CAMACHO-IXTA, I. B.-M.-B. (2016). . Propuesta de. *Revista de Ciencias Ambientales y Recursos Naturales*, 22-26.

-
- CENAM, C. N. (2003). *Estimación de la incertidumbre en la determinación de la densidad del aire*. Queretaro, Mex.
- Cengel, Y. (2004). *Termodinámica*. MC GRAW HILL.
- Cengel, Y. A., & Ghajar, A. J. (2011). *Transferencia de calor y masa* (Cuarta ed.). Mc Graw Hill.
- Chen, B., Wang, T., Maloney, J., & Newman, M. (1983). Measured and predicted cooling performance of earth cooling tubes. *ASES*(Annual Meeting Minneapolis).
- Dickson, M. H., & Fanelli, M. (2004). *Geothermal Energy*. (U. d. Alfredo Lahsen, Trad.) Pisa, Italia: Istituto di Geoscienze e Georisorse, CNR.
- Escuer, J. (2008). Intercambiadores Tierra-Aire en al climatización de contrucciones, Pozos provenzales y técnicas emparentadas. España.
- Flores, S., & Lesino, G. (2000). Intercambiadores tierra-aire: uso del suelo para enfriamiento pasivo. Buenos Aires, Salta, Argentina.
- GARCÍA-MEJÍA, J. Z.-S.-S.-G. (2016). Aprendizaje de variables ambientales de las condiciones de un micro invernadero en la producción de vegetales. *Revista de Ciencias Ambientales y Recursos Naturales*, 1-12.
- Gehring, M. L. (2012). *Geothermal handbook: planning and financing power generation*. *Technical Report 002/12*,. The World Bank Group, Energy Sector Management Assistance Program (ESMAP),.
- González, E. P. (Junio de 2014). *Diseño de un sistema deshidratador de alimentos geotérmico de baja entalpía*. México D.F. : Universidad Nacional Autónoma de México.
- Iannelli, L., & Gil , S. (March de 2012,). Acondicionamiento térmico de aire usando energía geotérmica-ondas de calor. *Lat. Am. J. Phys. Educ.*, 6(1), 99-105.
- IDAE, I. p. (2008). *Manual de Geotermia*. Madrid: IDAE.
- IGME, I. p. (2008). *Manual de Geotermia*. Madrid: IDAE.

-
- INEGI. (2003). Guía para la Interpretación de Cartografía Edafológica. *Clasificación de Suelos (México)*. Mexico: Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática.
- ITC. (2008). *Energías renovables y eficiencia energética* (Primera ed.). (S. A. Instituto Tecnológico de Canarias, Ed.)
- Ji, B. (Mayo de 2015). Disipación de calor en un sistema geotermico de baja entalpía. Barcelona, España: Universidad Politécnica de Catalunya.
- León, J. L. (2007). *MANUAL DE GEOTERMIA Ciencias de la Tierra e Ingenieria de Reservorios*. Mexico.
- LLOPIS TRILLO, G., & ANGULO, V. R. (2008). *Guía de la Energía Geotérmica*. Madrid: Fundación de la Energia de la Comunidad de Madrid.
- Llopis, T. G., & Angulo, V. R. (2008). *Guía de la Energía Geotérmica*. Madrid: Fundación de la Energia de la Comunidad de Madrid.
- Llopis, T. G., López, J. C., & Franqueza, P. J. (2009). *Guía técnica de Sondeos Geotérmicos Superficiales*. Madrid: Consejería de Economía y Hacienda.
- Lubimova, E. A. (1969). *Thermal history of the Earth*. In: *The Earth's Crust and Upper Mantle*. (P. J. Hart, Ed.) Washington, D. C.: American Geophysical Union.
- Mejias-Brizuela. (2016). Aprovechamiento de los residuos agroindustriales y su contribución al desarrollo sostenible de México. *Ciencias Ambientales y Recursos Naturales*, 2-6.
- OMS. (Junio de 2016). *El radón y sus efectos en la salud*. Organización Mundial de la Salud.
- Quijano, L. J. (México de 2007). Manual de Geotermia, Ciencias de la Tierra e Ingenieria de Reservorios.
- Real Academia Española. (2001). Diccionario de la lengua española. (22). Madrid, España.
- Santoyo, E. (2010). *Estrategias de transición para promover el uso de tecnologías y combustibles más limpios en el tema de la energía geotérmica*. México: UNAM.

-
- Santoyo, E., Guevara, M., & Pérez-Zarate, D. (2010). *Estrategias de transición para promover el uso de tecnologías y combustibles más limpios en el tema de la energía geotérmica*. México: UNAM.
- Sitiosolar. (2013). *Sitiosolar.com*. Recuperado el 18 de Diciembre de 2016, de <http://www.sitiosolar.com/contacta-con-sitiosolar/>
- WEC. (2013). *WORLD ENERGY COUNCIL*. Recuperado el 10 de 10 de 2016, de https://www.worldenergy.org/wp-content/uploads/2014/04/WEC_16_page_document_21.3.14_ES_FINAL.pdf
- Zenteno, A. (2013). *Modelación térmica del suelo alrededor de tubos enterrados en sistemas de colección de energía geotérmica de baja entalpía*. Santiago de Chile, Chile.
- ZIGURAT. (2013). Recuperado el 09 de octubre de 2016, de Global Institute of Technology: <http://www.e-zigurat.com/noticias/soluciones-bioclimaticas-pozos-provenzales-canadienses/>