

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

**Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la
Producción**

“Diseño de un intercambiador de calor de baja entalpia por geotermia para
climatización de un edificio universitario”

PROYECTO INTEGRADOR

Previo la obtención del Título de:

Ingeniero Mecánico

Presentado por:

Christopher Josué Cevallos Rivera

Christian Stanley Morán Astudillo

GUAYAQUIL - ECUADOR

Año: 2021

DEDICATORIA

A mi madre y mi hermana:

Elena Rivera y Katherine Cevallos

A mis padres:

Javier Cevallos y Arnoldo Sánchez

A mis abuelos y tíos

Christopher Cevallos Rivera

A mis abuelos:

Celso y Luzmila

A mis padres:

Ufredo y Liliana

Christian Morán Astudillo

AGRADECIMIENTO

A mis padres: Elena y Arnoldo, por brindarme su apoyo incondicional para mi desarrollo académico y personal. A mi hermana por acompañarme y ayudarme en las largas jornadas de estudio y tareas. A mis abuelos y tíos: María, Pedro, Jessica, Pablo, Danilo y Elsa por su tiempo y consejos ofrecidos como si fueran mis padres. A la ESPOL por darme el espacio, donde me formé, y los maestros que tanto admiro: doctores Delgado, Espinoza y especialmente al Dr. Juan Peralta quien como tutor nos guio y ayudó de la mejor manera. A los amigos con quienes compartí este arduo camino: Raúl y Nathaly. Y a mi padre en el cielo, Javier Cevallos, por ser mi modelo a seguir.

Christopher Cevallos Rivera

A mis padres por apoyarme en todo lo que me propongo. A mis abuelos por enseñarme la importancia de la humildad. A mi tutor, el Dr. Juan Manuel Peralta por su desinteresado apoyo y significativos aportes en este proyecto. A la ESPOL por mostrarme el valor del sacrificio y la satisfacción de una meta cumplida. A los grandes amigos que hice durante mi carrera.

Christian Morán Astudillo

DECLARACIÓN EXPRESA

"Los derechos de titularidad y explotación, nos corresponde conforme al reglamento de propiedad intelectual de la institución; *Christopher Josué Cevallos Rivera* y *Christian Stanley Morán Astudillo* damos nuestro consentimiento para que la ESPOL realice la comunicación pública de la obra por cualquier medio con el fin de promover la consulta, difusión y uso público de la producción intelectual"



*Christopher Josué
Cevallos Rivera*



*Christian Stanley Morán
Astudillo*

EVALUADORES



Firmado electrónicamente por:

**MIGUEL ANGEL
QUILAMBAQUI
JARA**

PhD. Miguel Quilambaqui Jara

PROFESOR DE LA MATERIA

**JUAN MANUEL
PERALTA
JARAMILLO**

Digitally signed by JUAN MANUEL
PERALTA JARAMILLO
DN: cn=JUAN MANUEL PERALTA
JARAMILLO,
serialNumber=210921231337,
ou=ENTIDAD DE CERTIFICACION DE
INFORMACION, o=SECURITY DATA S.A. 2,
c=EC,
Date: 2021.11.29 13:31:40 -05'00'

PhD. Juan Peralta Jaramillo

PROFESOR TUTOR

RESUMEN

En el norte del Estado de Sonora, México se presentan temperaturas ambientales de hasta 37 ° C las cuales conllevan al uso desmedido de sistemas de climatización, como consecuencia de esto tienen el mayor consumo energético a nivel nacional. Por este motivo, este proyecto tiene como finalidad diseñar un intercambiador de calor enterrado de baja entalpía capaz de climatizar un edificio universitario considerando las propiedades térmicas del suelo, dimensionamiento y factibilidad económica del mismo. La infraestructura beneficiada fue el Laboratorio de Ingeniería Civil del Instituto Tecnológico de Sonora. Previo al diseño del intercambiador se llevó a cabo un análisis de temperaturas y propiedades de los diferentes niveles de suelo para lograr determinar la ubicación óptima para una buena transferencia de calor. Tomando en consideración las recomendaciones de IGSHA, el volumen de la zona a refrigerar y las renovaciones de aire necesarias se llegó a un prototipo. Con la ayuda de un software CAM/CAD de simulación se realizaron pruebas en cada capa de suelo, con lo cual fue posible validar el diseño y seleccionar la mejor opción. En este caso, un intercambiador con tuberías de 20 centímetros de diámetro el cual será ubicado en la capa 1-2 bajo el suelo. Además, como impulsor del sistema se selecciona un ventilador centrífugo capaz de mover 510 metros cúbicos de aire por hora. La utilización de la geotermia como fuente de climatización es clave para asentar las bases de un futuro sostenible y más amigable con el ambiente, además de ser económicamente viable.

Palabras Clave: Geotermia, sostenibilidad, climatización, baja entalpía

ABSTRACT

In the north of the State of Sonora, Mexico there are environmental temperatures of up to 37 ° C which lead to the excessive use of air conditioning systems, as a consequence of this they have the highest energy consumption nationwide. For this reason, this project aims to design a low enthalpy buried heat exchanger capable of air conditioning a university building considering the thermal properties of the soil, dimensioning and economic feasibility. The infrastructure benefited was the Civil Engineering Laboratory of the Technological Institute of Sonora. Prior to the design of the exchanger, an analysis of temperatures and properties of the different soil levels was carried out to determine the optimal location for a good heat transfer. Taking into consideration the IGSHPA recommendations, the volume of the area to be cooled and the necessary air changes, a prototype was reached. With the help of a simulation CAM / CAD software, tests were carried out on each soil layer, with which it was possible to validate the design and select the best option. In this case, an exchanger with pipes of 20 centimeters diameter which will be located in the layer 1-2 under the ground. In addition, a centrifugal fan capable of moving 510 cubic meters of air per hour is selected as the driver of the system. The use of geothermal energy as a source of air conditioning is key to laying the foundations for a sustainable and more environmentally friendly future, as well as being economically viable.

Keywords: *Geothermal, sustainability, air conditioning, low enthalpy*

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN.....	I
ABSTRACT	II
ÍNDICE GENERAL	III
ABREVIATURAS	VI
SIMBOLOGÍA	VII
ÍNDICE DE FIGURAS.....	VIII
ÍNDICE DE TABLAS.....	X
CAPÍTULO 1.....	1
1. Introducción	1
1.1 Definición del Problema.....	1
1.2 Justificación del proyecto.....	1
1.3 Objetivos.....	2
1.3.1 Objetivo General	2
1.3.2 Objetivos Específicos	2
1.4 Marco teórico.....	2
1.4.1 Energía Geotérmica	2
1.4.2 Intercambiadores de calor	5
1.4.3 Bomba de calor	6
1.4.4 Ventiladores	6
1.4.5 Instalaciones térmicas en edificios	7
CAPÍTULO 2.....	9
2. Metodología	9
2.1 Descripción de la infraestructura	9
2.1.1 Ubicación del edificio.....	9
2.1.2 Dimensiones.....	9
2.1.3 Condiciones climatológicas	10

2.2	Perfil térmico del suelo	12
2.2.1	Curvas de medición de respuestas térmica	12
2.2.2	Propiedades térmicas del suelo	13
2.3	Alternativas de solución.....	14
2.4	Diseño de intercambiador de calor horizontal.....	14
2.4.1	Dimensionamiento.....	14
2.4.2	Selección de material.....	17
2.5	Simulaciones	17
2.5.1	Simulación de la columna estratigráfica del suelo.....	17
2.5.2	Simulación del intercambiador de calor enterrado	17
CAPÍTULO 3.....		19
3.	Resultados y Análisis.....	19
3.1	Selección del ventilador centrifugo	19
3.2	Selección del diámetro de tubería	20
3.3	Dimensionamiento de longitud de tubería	20
3.4	Simulación de la columna estratigráfica	22
3.5	Simulación del intercambiador enterrado	26
3.6	Análisis económico.....	29
3.6.1	Materiales.....	29
3.6.2	Equipos	29
3.6.3	Mano de obra	30
3.6.4	Costos totales.....	30
CAPÍTULO 4.....		31
4.	Conclusiones y Recomendaciones.....	31
4.1	Conclusiones	31
4.2	Recomendaciones.....	32
BIBLIOGRAFÍA		

APÉNDICES

ABREVIATURAS

ESPOL	Escuela Superior Politécnica del Litoral
CONUEE	Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía
HVAC	Heating, Ventilating, Air conditioned
SENER	Secretaría de Energía
ONU	Organización de las Naciones Unidas
ATECYR	Asociación Técnica Española de Climatización y Refrigeración
ITSON	Instituto Tecnológico de Sonora
REMAS	Red de Estaciones Meteorológicas Automáticas de Sonora
IGSHPA	International Ground Source Heat Pump Association
3D	Three-dimensional
CAM/CAD	Computer-Aided Design/Computer-Aided Manufacturing
DIN	Instituto de Normalización Alemán

SIMBOLOGÍA

kWh	Kilovatios hora
$^{\circ}C, K$	Grados Celsius y Kelvin
m	Metro
m^2, m^3	Metro cuadrado y cubico
kg	Kilogramo
k_s, k_t, k_a	Conductividad térmica del suelo, de la tubería y el aire
W	Vatios
c_p	Calor especifico
kJ	Kilojulio
$\dot{V}_{total}, \dot{V}$	Caudal necesario para refrigerar y en un solo intercambiador
V	Volumen del espacio a refrigerar
hr	Hora
Re	Número de Reynolds
Nu	Número de Nusselt
h	Coeficiente de transferencia de calor por convección
D_i, D_o	Diámetro interno y externo de la tubería
L	Longitud de la tubería
ν	Viscosidad cinemática
s	Segundo
ρ	Densidad
PVC	Policloruro de vinilo
$T_{entrada}$	Temperatura de entrada al intercambiador
T_{salida}	Temperatura de salida del intercambiador
Pr	Número de Prandtl
T_s	Temperatura máxima de la capa de suelo
ΔT_{ml}	Temperatura media logarítmica
$BIAS$	Sesgo
$RMSE$	Error cuadrático medio

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Distribución del recurso geotérmico en el mundo (Chandrasekharam & Bundschuh, 2008).....	3
Figura 1.2 Perfil de temperaturas en función de la profundidad (Carta, Calero, Colmenar, & Castro, 2009)	3
Figura 1.3 Clasificación de la energía geotérmica (Cárcel & Martínez, La Energía Geotérmica de Baja Entalpía, 2015).....	4
Figura 1.4 Esquema de sistema geotérmico de baja entalpía en una zona residencial (ATECYR, 2010).....	6
Figura 2.1 Localización del Laboratorio de Ingeniería Civil (LV-800), Campus Náinari, ITSON (Google, s.f.)	9
Figura 2.2 Edificio de Laboratorios de Ingeniería Civil (ITSON, s.f.).....	10
Figura 2.3 Temperatura del aire de agosto a diciembre 2019 (Registro realizado por REMAS y la Estación Climatológica ITSON)	11
Figura 2.4 Curvas de máxima, media y mínima temperatura vs profundidad en la hora más caliente del día (Estudio de la Inercia Térmica del subsuelo realizado por ITSON)	12
Figura 2.5 Curvas de máxima, media y mínima temperatura vs profundidad en la hora más fría del día (Estudio de la Inercia Térmica del subsuelo realizado por ITSON).....	12
Figura 2.6 Curva de temperatura promedio vs profundidad en el momento más caliente en verano y más frío en invierno (Estudio de la Inercia Térmica del subsuelo realizado por ITSON).....	13
Figura 3.1 Modelo de la columna estratigráfica	23
Figura 3.2 Resultados de la simulación: Temperatura de suelo vs Tiempo de cada capa entre 13 a 20 de agosto 2019	23
Figura 3.3 Resultados de la simulación: Temperatura de suelo vs Profundidad en el intervalo más caliente entre 13 a 20 de agosto 2019	24
Figura 3.4 BIAS vs Profundidad del perfil del suelo.....	24
Figura 3.5 RMSE vs Profundidad del perfil del suelo.....	25
Figura 3.6 BIAS vs Profundidad del perfil del suelo en cada día	25
Figura 3.7 RMSE vs Profundidad del perfil del suelo en cada día.....	25
Figura 3.8 Intercambiador de calor de PVC.....	26
Figura 3.9 Intercambiador de calor enterrado.....	26

Figura 3.10 Temperatura del solido con el intercambiador ubicado a 7.5 metros	27
Figura 3.11 Temperatura del fluido con el intercambiador ubicado a 7.5 metros	27
Figura 3.12 Gradiente de temperatura del fluido vs Tiempo con datos del 18 de agosto del 2019	28

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Temperaturas más bajas, más altas y promedios de cada mes en 2019 (Registro registrado por REMAS y la Estación Climatológica ITSON).....	11
Tabla 2.2 Propiedades de cada nivel de suelo (Prueba de granulometría, límite líquido, límite plástico y contenido de humedad natural realizado por ITSON).....	13
Tabla 3.1 Parámetros de selección del ventilador centrifugo (reducir anchos).....	19
Tabla 3.2 Características del ventilador centrifugo Soler&Palau PL-154.....	19
Tabla 3.3 Parámetros usados para el dimensionamiento del diámetro de tubería	20
Tabla 3.4 Características de tubería seleccionada.....	20
Tabla 3.5 Parámetros usados para dimensionar la longitud de la tubería	21
Tabla 3.6 Temperatura media logarítmica en cada capa.....	21
Tabla 3.7 Longitud de tubería en cada nivel de suelo	22
Tabla 3.8 Costo de Materiales	29
Tabla 3.9 Costo de Equipos	30
Tabla 3.10 Costo de mano de obra	30
Tabla 3.11 Costos de diseño	30

CAPÍTULO 1

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Definición del Problema

Derivado a las altas temperaturas ambientales en el Estado de Sonora, México, la mayoría de los hogares cuentan con sistemas de climatización representando el mayor consumo energético a nivel nacional llegando a consumir incluso 4,488.42 kWh por hogar, lo que en promedio representa un 300% más respecto a otros estados (CONUEE, 2020). En los meses más calurosos que son julio, agosto y septiembre, se pueden alcanzar temperaturas de hasta 37 ° C y humedad de hasta el 98% (El clima promedio en Cd. Obregon, 2021). Estas condiciones climáticas dificultan en la práctica, lograr cubrir las necesidades de confort térmico en las edificaciones. Dentro del marco de esta problemática, como estrategia de reducción de consumo de energía se plantea el uso de energía renovables como es el caso de la geotermia (energía en forma de calor obtenida a partir del suelo), sin embargo, en la mayoría de casos no existen estudios técnicos o de viabilidad que sustenten o validen su implementación como una estrategia tecnológica en el marco de HVAC, evidencia de esto se encuentra en los datos de la Secretaría de Energía (SENER) del 2014 donde solo 7.5% de la demanda energética se cubrió con fuentes renovables y solo el 2% de esto corresponde a geotermia (Gómez & González, 2017).

1.2 Justificación del proyecto

Este proyecto se enmarca en las acciones establecidas para el cumplimiento de los objetivos de desarrollo sostenible 7 y 11, los cuales buscan garantizar el acceso a una energía asequible, segura, sostenible y moderna. Y además lograr que las ciudades sean más inclusivas, seguras, resilientes y sostenibles (ONU, 2015). Con esto se pretende aumentar el desarrollo y aplicación de las tecnologías relacionadas a la geotermia con la finalidad de volverlo económicamente viable, más eficiente y además de reducir el consumo energético e impacto ambiental que se genera debido al uso de sistemas de

climatización convencionales. Por otro lado, es vital el desarrollo de estas tecnologías debido a que las ondas solares afectan considerablemente a los pobladores del estado. Según (Peñuñuri, 2020) la Secretaría de Salud informa que, durante la temporada de calor en Sonora, el 43.2% de las muertes fue ocasionada por golpes de calor, deshidrataciones e insolaciones.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

Diseñar un intercambiador de calor horizontal enterrado de baja entalpía empleando la dinámica de fluidos computacional para el acondicionamiento de un edificio universitario en la ciudad de Obregón, Sonora, México.

1.3.2 Objetivos Específicos

1. Diseñar el intercambiador de calor considerando las propiedades térmicas del suelo usando la dinámica de fluidos computacional.
2. Evaluar factibilidad técnica económica para una correcta ubicación y dimensionamiento del sistema.

1.4 Marco teórico

1.4.1 Energía Geotérmica

La energía geotérmica se origina a partir del calor contenido en la tierra, cuyas fuentes son: la energía aportada por el sol, la cual se suele regular por la lluvia; y la energía propia de la tierra, proveniente del núcleo y la presión entre las diferentes capas (Cárcel & Martínez, La Energía Geotérmica de Baja Entalpía, 2015), se considera un recurso limpio y renovable, ya que el calor fluye de manera constante con un equivalente de 42 millones megavatios de poder (Kagel, Bates, & Gawell, 2005). La teoría para encontrar este tipo de energía surgió entre los siglos XVI y XVII, con la excavación de minas que ya pasaban los pocos cientos de metros, y en donde al ir más profundo se notó un aumento de temperatura. Dicho aumento de temperatura se lo conoce como gradiente geotérmico, que en

promedio es de 2.5 a 3 °C / 100 m. Incluso llegando a ser atractiva económicamente hablando dado que no requiere ser importada y en algunos casos siendo la única fuente de energía viable. La República de Filipinas es quien encabeza el listado de países con mayor aprovechamiento de este tipo de energía con fines de electricidad con un 16% del total instalado en dicho país hasta 1998 (Dickson & Fanelli, 2003).

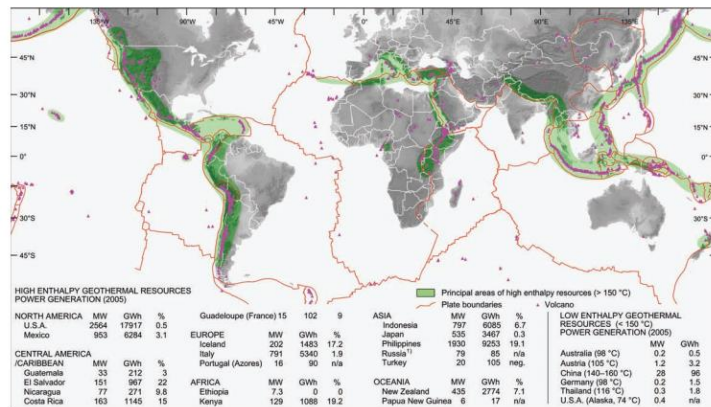


Figura 1.1 Distribución del recurso geotérmico en el mundo (Chandrasekharam & Bundschuh, 2008)

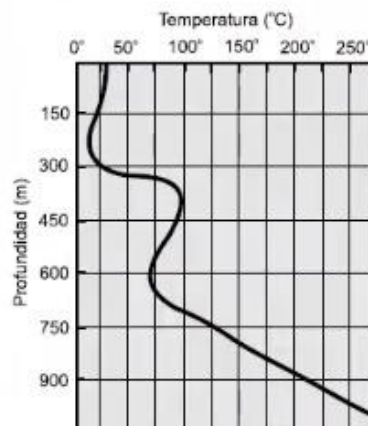


Figura 1.2 Perfil de temperaturas en función de la profundidad (Carta, Calero, Colmenar, & Castro, 2009)

Una de las ventajas de esta fuente renovable de energía es la limitada dependencia de las condiciones climáticas como lo son; la radiación solar y el viento. Para la correcta funcionabilidad del prototipo dependerá de las

características intrínsecas del subsuelo como son la permeabilidad, gradiente del suelo, conductividad térmica, que en todo caso son constantes (Delgado, Peralta, & Aveiga, 2016).

Se han mencionado beneficios de usar la geotermia como su fiabilidad al poder obtenerse las 24 horas del día sin llegar a depender de manera temporal de las condiciones ambientales; es un recurso renovable que no disminuirá como lo hace el combustible fósil; y es competitivo contra otros tipos de tecnologías energéticas a nivel económico. Pues además de estas ventajas también tenemos la baja producción de emisiones al aire, bajo impacto ambiental, cero combustión y uso de un territorio más pequeño que las plantas de combustible fósil (Kagel, Bates, & Gawell, 2005).

La clasificación del recurso geotérmico se basa en la entalpía del fluido el cual porta el calor. Con esta idea tenemos geotermia de muy baja, baja, media y alta entalpía o temperatura (Cárcel & Martínez, La Energía Geotérmica de Baja Entalpía, 2015).

TIPO DE YACIMIENTO		RANGO DE TEMPERATURA	USO PRINCIPAL
Muy baja entalpía	Subsuelo con o sin agua	5 °C < T < 30 °C	Climatización
	Aguas subterráneas	10 °C < T < 30 °C	
Baja entalpía	Aguas termales	22 °C < T < 50 °C	Balnearios, Acuicultura
	Zonas volcánicas	T < 100 °C	Calor de distrito
	Almacenes sedimentarios profundos		
Media entalpía		100 °C < T < 150 °C	Electricidad
			Ciclos binarios
Alta entalpía		T > 150 °C	Electricidad

Figura 1.3 Clasificación de la energía geotérmica (Cárcel & Martínez, La Energía Geotérmica de Baja Entalpía, 2015)

En las aplicaciones que utilizan la geotermia como fuente o recurso energético es la necesidad de extraer o depositar calor en la tierra, por lo que se vuelve imperiosa la utilización de sistema de intercambiador de calor el cual lleve a cabo dicha función.

1.4.2 Intercambiadores de calor

El intercambiador de calor es el sistema encargado de que sea posible la transferencia de energía entre el terreno y una edificación por medio de un fluido de trabajo. Esto aprovechando que el suelo a poca profundidad mantiene la temperatura constante a lo largo del año (Iannelli & Gil, 2013).

En función de su aplicación y las facilidades que brinde el área a utilizar, los intercambiadores se pueden presentar de diferentes modos tales como abiertos en donde se suele bombear el fluido hacia el intercambiador desde un sumidero exterior para luego recircularlo hacia la misma fuente o cerrados en donde el fluido de trabajo se mantiene dentro del intercambiador en todo momento. También es importante considerar el tipo de perforación que se hará para la futura introducción de las sondas, basados en este criterio tenemos intercambiadores geotérmicos horizontales en donde es usual realizar excavaciones poco profundas de hasta 5 metros, sin embargo, se requiere de un área de trabajo considerablemente mayor. Por otro lado, se tienen los intercambiadores verticales los cuales contrario a los anteriormente mencionados, estos trabajan a una profundidad de entre 100 y 150 metros reduciendo así cualquier tipo de variación en el sistema debido a las condiciones climatológicas, la desventaja en este caso es que estos sistemas verticales son considerablemente más costosos y complejos de construir (Vallespir & Canals, 2019).

Otros 2 tipos de intercambiadores tiene requerimientos que los vuelve menos frecuentes: uno de ellos son los colectores de agua someros, los cuales usan agua como fluido de trabajo, por lo cual necesitan de un acuífero o de una fuente de agua cercana como un río; la otra alternativa se conoce como cimientos geotérmicos, los cuales son tuberías en forma de U incluidas en las fundaciones del edificio, al estar con el enrejado del concreto bajo la estructura este tipo de intercambiador es viable en una obra nueva (Fuenzalida & Frederick, 2014).

1.4.3 Bomba de calor

El uso de una bomba de calor es vital para la utilización de la energía geotérmica de baja entalpía y para sus aplicaciones referentes a la climatización. A pesar de eso, hoy en día su uso es escaso, aunque los beneficios que puede llegar a aportar son considerablemente altos. La bomba de calor es una máquina que funciona bajo el principio del ciclo inverso de Carnot para tomar energía de un foco frío y llevarla a uno caliente, esto con diferentes objetivos tales como aumentar la temperatura de interiores (calefacción) o disminuirla (refrigeración), con la ventaja que esto se realiza con un trabajo muy bajo por parte de un compresor. Para lograr que el acondicionamiento del lugar se logre en ambas temporadas, tanto verano como invierno, la bomba trabaja de manera reversible. En verano se extrae el calor del interior y lo lleva al ambiente o a un pozo, mientras que en invierno se toma la energía del suelo para calentar la edificación seleccionada (Cárcel & Martínez, Captación de la Energía Geotérmica para su uso en la Edificación, 2015).

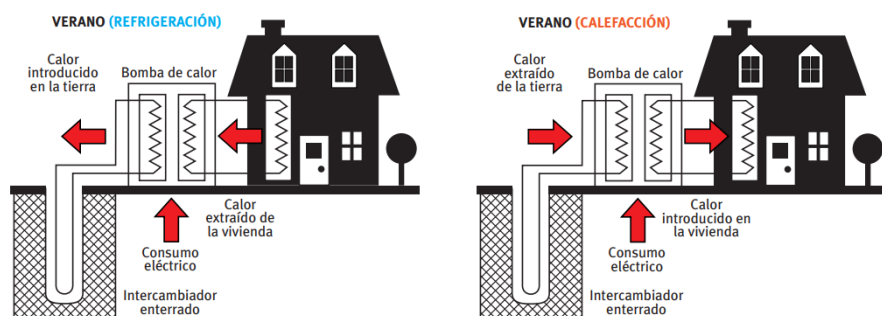


Figura 1.4 Esquema de sistema geotérmico de baja entalpía en una zona residencial (ATECYR, 2010)

1.4.4 Ventiladores

Como alternativa a la bomba de calor como sistema de impulsión del aire ambiente, existen los ventiladores, los cuales son un conjunto conformado por motor y álabes o aletas los cuales se encargan de movilizar un gas presente de un lugar hacia otro. En el mercado actual existen de varios

tipos que a su vez se clasifican según su función, tipo de accionamiento y también según la trayectoria de aire que generan (Soler&Palau, 2015). Para este caso en particular, se haría uso de un ventilador centrífugo el cual impulsa aire por la turbina la cual lo aspira y envía hacia la carcasa en espiral, para luego expulsarlo por medio de los álabes o paletas colocadas a 90 grados respecto a la entrada del flujo (Lahidalga, 2013).

1.4.5 Instalaciones térmicas en edificios

Dentro del concepto de edificación sostenible se están incorporando los sistemas basados en energía renovables, un caso particular es el uso de la geotermia de baja entalpia para los procesos de HVAC. Para su diseño se debe conocer la carga térmica a compensar dentro de la edificación, estas cargas provienen del movimiento de las personas, actividades que están siendo realizadas y la temperatura generada por equipos (Ramirez & Sarria, 2007).

Las instalaciones térmicas en una infraestructura tienen funciones como calefacción, refrigeración, ventilación y producción de agua caliente; además de tener que cumplir con exigencias de eficiencia energética, seguridad e higiene (Dirección General de Vivienda y Rehabilitación, 2013). Las instalaciones para climatización por geotermia constan de tres partes: intercambiador interior (dentro del edificio), la bomba de calor y el intercambiador exterior (enterrado). El proceso de intercambio de calor inicia en la bomba de calor que aporta la energía por medio del compresor luego dependiendo de si el objetivo es refrigeración o ventilación uno de los intercambiadores extraerá calor y otro lo transferirá a otro medio (Vallespir & Canals, 2019).

Uno de los aspectos a considerar antes de la instalación de estos sistemas, son los factores o parámetros geológicos como lo son: la dureza del medio, espesor, distintas formaciones geológicas y presencia de algún flujo subterráneo de agua, ya que todo esto cambia las propiedades del terreno que son necesarias para conocer la conductividad y realizar el diseño correctamente; también cambian los planes de perforación, la profundidad

y por ende pueden aumentar o disminuir los gastos (Fuenzalida & Frederick, 2014).

CAPÍTULO 2

2. METODOLOGÍA

2.1 Descripción de la infraestructura

2.1.1 Ubicación del edificio

La infraestructura seleccionada para el desarrollo de un sistema de geotermia por medio de un intercambiador de calor enterrado es el Laboratorio de Ingeniería Civil del Instituto Tecnológico de Sonora (ITSON) ubicado en la ciudad de Obregón en el sur del estado de Sonora, México.

El estudio de temperaturas y propiedades de los diferentes niveles de suelo fue llevado a cabo detrás del edificio LV-800 del campus Náinari, 3 metros al norte en las coordenadas geográficas: N 27° 29' 37.4", W 109° 58' 16.3".



Figura 2.1 Localización del Laboratorio de Ingeniería Civil (LV-800), Campus Náinari, ITSON (Google, s.f.)

2.1.2 Dimensiones

En base a las restricciones dadas por el cliente en lo que respecta a las dimensiones del edificio, el área disponible para construcción y la carga

térmica parcial a remover, se modeló un sistema de intercambiador de calor impulsado por un ventilador el cual se adecuó correctamente a los requerimientos mencionados.

El edificio de Laboratorios de Ingeniería Civil (LV-800) tiene un volumen interno de 3107.5 m^3 de los cuales 222.2 m^3 corresponden a las aulas que se van a acondicionar.

Se tiene a disponibilidad dos zonas en el norte del edificio para la excavación y ubicación de los intercambiadores de calor con áreas de 562 m^2 y 1150 m^2 respectivamente.

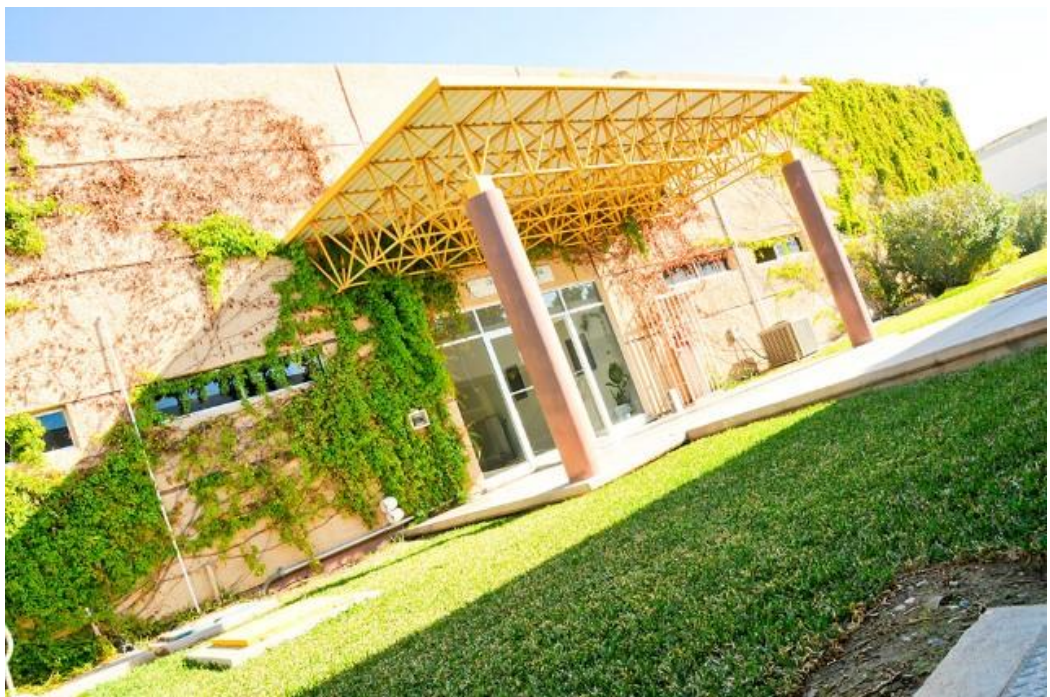


Figura 2.2 Edificio de Laboratorios de Ingeniería Civil (ITSON, s.f.)

2.1.3 Condiciones climatológicas

Los datos de condiciones climatológicas como temperatura del aire en la zona fueron proporcionados por el ITSON, a partir de los datos registrados por su estación climatológica y por la Red de Estaciones Meteorológicas Automáticas de Sonora (REMAS).

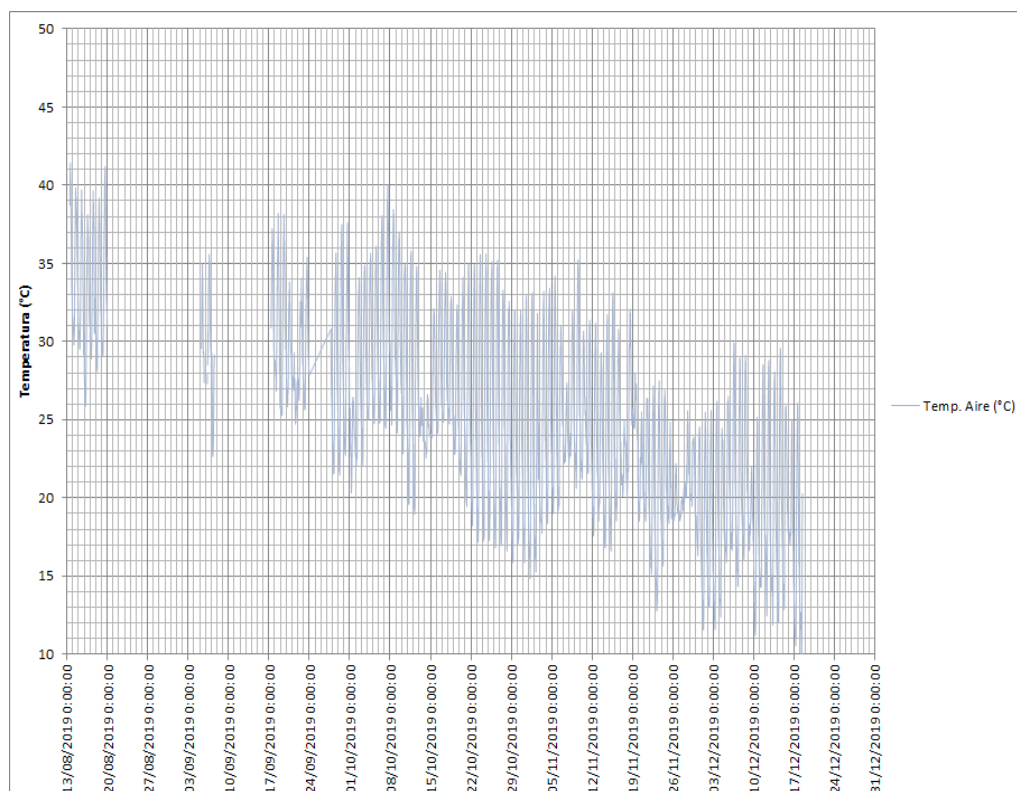


Figura 2.3 Temperatura del aire de agosto a diciembre 2019 (Registro realizado por REMAS y la Estación Climatológica ITSON)

Los datos de la figura 2 corresponden a las temperaturas del aire desde el 13 de agosto del 2019 al 31 de diciembre del mismo año. Se pudo observar que agosto y septiembre tienen las temperaturas más elevadas y a partir de octubre empiezan a disminuir hasta llegar al punto más bajo en diciembre.

Tabla 2.1 Temperaturas más bajas, más altas y promedios de cada mes en 2019 (Registro registrado por REMAS y la Estación Climatológica ITSON)

Mes	Temperatura más baja [°C]	Temperatura más alta [°C]	Temperatura promedio [°C]
Agosto	25.87	41.47	33.43
Septiembre	20.31	37.59	27.72
Octubre	17.16	40.04	27.53
Noviembre	12.78	35.23	23.59
Diciembre	8.73	26.49	19.12

2.2 Perfil térmico del suelo

2.2.1 Curvas de medición de respuestas térmica

El ITSON realizó el estudio de campo por medio de perforaciones al terreno para determinar la variación de temperatura, difusividad térmica, conductividad y capacidad térmicas en función de la profundidad del pozo. Para lograrlo se taladró el suelo con una barrena manual hasta 4 metros y posteriormente con un camión de perforación se llegó a los 10 metros. Dentro del pozo se colocaron termocuplas tipo K en intervalos de 1 metro.

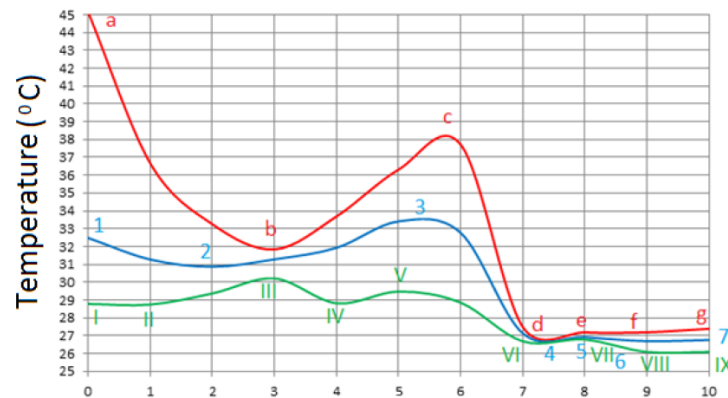


Figura 2.4 Curvas de máxima, media y mínima temperatura vs profundidad en la hora más caliente del día (Estudio de la Inercia Térmica del subsuelo realizado por ITSON)

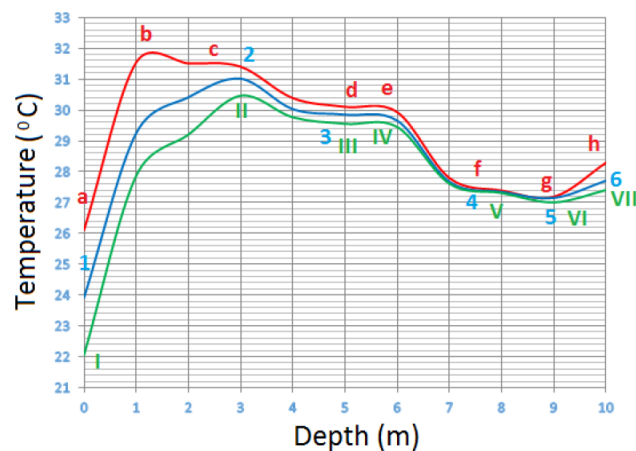


Figura 2.5 Curvas de máxima, media y mínima temperatura vs profundidad en la hora más fría del día (Estudio de la Inercia Térmica del subsuelo realizado por ITSON)

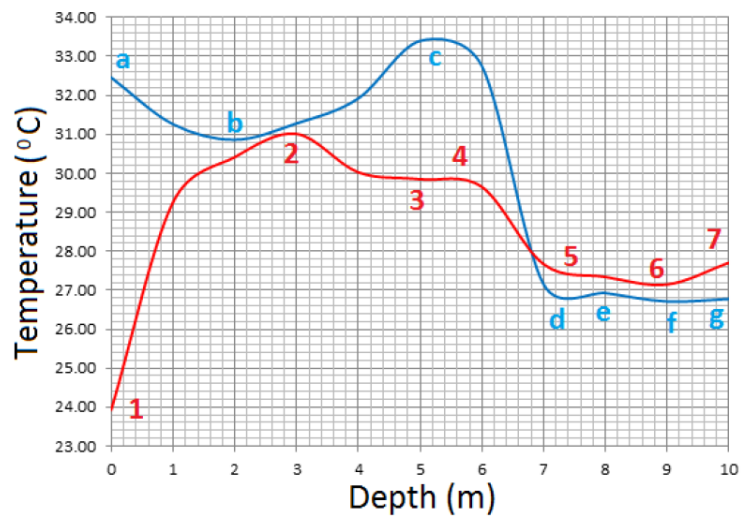


Figura 2.6 Curva de temperatura promedio vs profundidad en el momento más caliente en verano y más frío en invierno (Estudio de la Inercia Térmica del subsuelo realizado por ITSON)

2.2.2 Propiedades térmicas del suelo

En la tabla 2.2, se muestran las propiedades estimadas del suelo en función a la profundidad de las perforaciones realizadas.

Tabla 2.2 Propiedades de cada nivel de suelo (Prueba de granulometría, límite líquido, límite plástico y contenido de humedad natural realizado por ITSON)

Capa [m]	Tipo de suelo	Contenido de agua [%]	Densidad $\left[\frac{kg}{m^3}\right]$	Conductividad Térmica $k_s \left[\frac{W}{mK}\right]$	Calor específico $c_p \left[\frac{kJ}{kgK}\right]$
0.0 - 1.0	Arcilla limosa	9.2	1980	0.428	1.211
1.0 - 2.0	Arcilla limosa	6.5	2039	0.166	0.088
2.0 - 3.0	Arcilla limosa	13.5	1733	0.191	0.002
3.0 - 4.0	Arcilla limosa	21.4	1855	0.152	0.001
4.0 - 5.0	Arcilla	22.3	1843	0.195	0.002
5.0 - 6.0	Arena	9.9	1908	0.478	0.012

6.0 - 7.0	Limo arcilloso	19.0	1870	0.076	0.013
7.0 - 8.0	Limo arcilloso	26.7	1800	0.195	0.014
8.0 - 9.0	Limo arcilloso	28.8	1756	0.210	0.015
9.0 - 10.0	Arcilla limosa	27.4	1517	0.410	0.673

2.3 Alternativas de solución

Se identificó que había 2 parámetros de diseño: por tipo de fluido y ubicación por capas. Las opciones se pudieron evaluar y comparar una vez se logró tener el diseño final de cada uno.

Considerando el tipo de fluido, el diseño final puede ser impulsado por una bomba de calor que funciona con agua, o, por un ventilador centrífugo que toma el aire ambiente de los alrededores y lo lleva hacia el intercambiador.

Por otro lado, la ubicación por capas corresponde al nivel de suelo (10 capas separadas entre sí) en qué se colocaría el intercambiador.

Con el fin de seleccionar la mejor opción posible, se realizaron matrices de decisión que consideraron parámetros vitales para el desarrollo del presente proyecto tales como, factibilidad económica, costos de mantenimiento, capacidad de remoción de calor, complejidad de montaje y seguridad. Para facilidad del lector las matrices mencionadas se encuentran en el Apéndice C.

2.4 Diseño de intercambiador de calor horizontal

2.4.1 Dimensionamiento

El diseño del intercambiador de calor se llevó a cabo a través de un balance de energía y las recomendaciones de la metodología de la International Ground Source Heat Pump Association (IGSHPA).

Se seleccionó un ventilador centrífugo en función del volumen a acondicionar y del número de renovaciones de aire necesarias, para fijar un caudal.

$$\dot{V}_{total} = \#renovaciones * V \quad (2.1)$$

Donde $\dot{V}_{total}$ es el caudal necesario para el acondicionamiento en $[m^3/hr]$, $\#renovaciones$ en $[1/hr]$ y V es el volumen de los espacios en $[m^3]$.

Para el diámetro de las tuberías se consideró la recomendación de IGSHPA que debe ser lo suficientemente pequeño para lograr altas velocidades, un comportamiento turbulento y además mejorar la transferencia de calor (ATECYR, 2010). Para cumplir la condición el número de Reynolds se considera que:

$$Re = \frac{4\dot{V}}{\pi D_i \nu} > 10000 \quad (2.2)$$

Donde $\dot{V}$ es el caudal dentro de un intercambiador en $[m^3/s]$, D_i es el diámetro interno de la tubería en $[m]$ y ν es la viscosidad cinemática en $[m^2/s]$.

La longitud del intercambiador se determinó a través de la ley de conservación de la energía, donde la rapidez de la transferencia de calor por convección es igual a la rapidez del cambio de energía interna del fluido (Incropera & Dewitt, 2011).

$$q_{conv} = E_{int} = \dot{m}c_p\Delta T = \rho\dot{V}c_p\Delta T \quad (2.3)$$

Siendo ρ la densidad del fluido en $[kg/m^3]$, c_p el calor específico en $[kJ/kgK]$ y ΔT es la diferencia de temperaturas entre la entrada y salida del intercambiador en $[^\circ C]$.

La transferencia de calor por convección también se puede expresar en términos de las dimensiones y propiedades de la tubería y el comportamiento del fluido, de la siguiente manera:

$$q_{conv} = \frac{\Delta T_{ml}}{\frac{1}{h\pi D_i L} + \frac{\ln(D_o/D_i)}{2\pi L k_t}} \quad (2.4)$$

Donde ΔT_{ml} es la temperatura media logarítmica en $[\text{°C}]$, h es el coeficiente de transferencia de calor por convección en $[W/m^2 K]$, L es la longitud de la tubería en $[m]$, D_o es el diámetro externo en $[m]$ y k_t es la conductividad térmica de la tubería en $[W/mK]$.

Luego del balance entre las ecuaciones (2.3) y (2.4) se deduce la siguiente expresión:

$$\rho \dot{V} c_p \Delta T = \frac{\Delta T_{ml}}{\frac{1}{h\pi D_i L} + \frac{\ln(D_o/D_i)}{2\pi L k_t}} \quad (2.5)$$

Se utilizó la temperatura media logarítmica ya que considera la tasa de cambio de transferencia debido a la temperatura del suelo.

$$\Delta T_{ml} = \frac{T_{entrada} - T_{salida}}{\ln\left(\frac{T_{entrada} - T_s}{T_{salida} - T_s}\right)} \quad (2.6)$$

Siendo $T_{entrada}$ la temperatura de entrada al intercambiador, T_{salida} la temperatura de salida del intercambiador y T_s la temperatura del suelo. Todo expresado en $[\text{°C}]$.

Para obtener el coeficiente de transferencia de calor por convección es necesario determinar el número exacto de Reynolds y el número de Nusselt para flujo turbulento (condición que se tuvo que cumplir al seleccionar el diámetro interno).

$$Re = \frac{4\dot{V}}{\pi D_i v} \quad (2.7)$$

$$Nu = 0.023 Re^{4/5} Pr^{1/3} \quad (2.8)$$

$$h = \frac{Nu k_a}{D_i} \quad (2.9)$$

Siendo Pr el número de Prandtl del fluido y k_a la conductividad térmica del fluido en $[W/mK]$.

2.4.2 Selección de material

Tras un análisis donde se consideraron las ventajas, desventajas y variables de interés se llegó al consenso de utilizar Policloruro de Vinilo (PVC) para las tuberías que transportarán el fluido a lo largo del sistema. Este material posee las características ideales de trabajo ya que llega a soportar hasta 80°C y a su vez es de fácil acceso en todo el mundo.

2.5 Simulaciones

2.5.1 Simulación de la columna estratigráfica del suelo

Con los datos de condiciones climáticas y propiedades del suelo proporcionados por ITSON se construyó un modelo 3D con un software CAM/CAD para recrear el ambiente donde se ubicará el intercambiador de calor. Dentro del dominio computacional se colocaron datos puntuales en el centro de cada capa en intervalos de un metro para medir la temperatura.

Los resultados de la simulación fueron comparados con los datos registrados por los dataloggers, realizando el cálculo de los estimadores estadísticos como el BIAS, diferencia entre la predicción del modelo y los valores verdaderos; y el RMSE, error cuadrático medio entre dos conjuntos de datos. La comparación tuvo como objetivo validar la simulación para comprobar el potencial de transferencia de calor de cada capa.

2.5.2 Simulación del intercambiador de calor enterrado

Una vez validada la simulación anterior, se construyó un intercambiador de calor con las dimensiones y material seleccionado el cual fue probado en cada capa de suelo con los puntos objetivos a la salida y entrada de este para medir la temperatura.

Con los resultados de las simulaciones fue posible calcular los gradientes de temperatura a lo largo de un día para comparar la transferencia de calor lograda en cada capa y de este modo seleccionar la mejor opción de solución posible.

CAPÍTULO 3

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

3.1 Selección del ventilador centrífugo

Previo a realizar el dimensionamiento es necesario seleccionar el ventilador, para lo cual se consideró el volumen de la zona a climatizar y el número de renovaciones necesarias. Según la Norma DIN 1946 para aulas de estudio es recomendable de 5 a 7 renovaciones de aire por hora.

Tabla 3.1 Parámetros de selección del ventilador centrífugo (reducir anchos)

Volumen	222.2 m ³
Renovaciones por hora	5

$$\dot{V}_{total} = 5 * (222.2) = 1111 \frac{m^3}{h}$$

Para cubrir la demanda de aire se consideraron dos escenarios. Se podrían integrar unos algunos ventiladores de gran capacidad de aspiración, con lo cual sería necesario una menor cantidad de intercambiadores. Por otro lado, un banco de ventilación que remueva un menor flujo de manera individual permitiría que exista un mayor tiempo de transferencia con lo cual el calor removido sería mayor.

Tabla 3.2 Características del ventilador centrífugo Soler&Palau PL-154

Velocidad	1700 RPM
Potencia	½ HP
Caudal	510 m ³ /hr

3.2 Selección del diámetro de tubería

Para determinar el diámetro de tubería se tomó en consideración la condición de flujo turbulento y además los siguientes parámetros:

Tabla 3.3 Parámetros usados para el dimensionamiento del diámetro de tubería

Parámetro	Nom.	Valor	Unid.
Caudal	$\dot{V}$	0.1417	m^3/s
Viscosidad cinemática del aire	ν	16.69×10^{-6}	m^2/s
Número de Reynolds	Re	10000	-

$$D_i < \frac{4 * 0.1417}{\pi * 16.69 \times 10^{-6} * 10000}$$

$$D_i < 1.08 \text{ m}$$

Gracias al cálculo anterior y además de las especificaciones del cliente fue posible seleccionar la tubería con las características mostradas a continuación:

Tabla 3.4 Características de tubería seleccionada

Diámetro interno (D_i)	0.192 m
Diámetro externo (D_o)	0.200 m
Conductividad térmica (k_t)	$0.16 \frac{W}{mk}$

3.3 Dimensionamiento de longitud de tubería

Para el dimensionamiento del intercambiador de calor enterrado se consideraron parámetros como la temperatura de entrada al sistema, el calor específico del fluido y el caudal de este, entre otros como se lo muestra a continuación.

Tabla 3.5 Parámetros usados para dimensionar la longitud de la tubería

Parámetro	Nom.	Valor	Unid.
Temperatura de entrada	$T_{entrada}$	41.47	°C
Temperatura de salida	T_{salida}	30	°C
Densidad del aire	ρ	1.1348	kg/m^3
Calor específico del aire	c_p	1.007	$\frac{kJ}{kgK}$
Viscosidad cinemática del aire	ν	16.69×10^{-6}	m^2/s
Conductividad térmica del aire	k_a	0.0269	$\frac{W}{mk}$
Número de Prandtl del aire	Pr	0.706	-
Caudal	$\dot{V}$	0.1417	m^3/s

Haciendo uso de la ecuación de energía.

$$L = \frac{\rho \dot{V} c_p (T_{entrada} - T_{salida})}{\Delta T_{ml}} \left(\frac{1}{h \pi D_i} + \frac{\ln \left(\frac{D_o}{D_i} \right)}{2 \pi k_t} \right)$$

Se calculó la temperatura media logarítmica.

$$\Delta T_{ml} = \frac{41.47 - 30}{\ln \left(\frac{41.47 - T_s}{30 - T_s} \right)}$$

Tabla 3.6 Temperatura media logarítmica en cada capa

Capa	Temperatura máxima de la capa T_s [°C]	Temperatura media logarítmica [°C]
6-7 m	29.59	3.41
7-8 m	27.35	6.86
8-9 m	27.2	7.04
9-10 m	27.15	7.11

Para determinar el coeficiente de transferencia de calor, debemos hallar el número de Reynolds y número de Nusselt.

$$Re = \frac{4 * 0.1417}{\pi * 0.192 * 16.69 * 10^{-6}} = 56301.82$$

$$Nu = 0.023 * 56301.82^{4/5} * 0.706^{1/3} = 129.34$$

$$h = \frac{129.34 * 0.0269}{0.192} = 18.12 \frac{W}{m^2K}$$

Así, de este modo, se dispuso una longitud de tubería para cada nivel de suelo en función de su temperatura media logarítmica.

$$L = \frac{1.1348 * 0.1417 * 1007 * (41.47 - 30)}{\Delta T_{ml}} \left(\frac{1}{18.12 * \pi * 0.192} + \frac{\ln\left(\frac{0.2}{0.192}\right)}{2\pi * 0.16} \right)$$

Tabla 3.7 Longitud de tubería en cada nivel de suelo

Capa	Temperatura media logarítmica [°C]	Longitud del intercambiador [m]
6-7 m	29.59	72.01
7-8 m	27.35	35.79
8-9 m	27.20	34.83
9-10 m	27.15	34.53

3.4 Simulación de la columna estratigráfica

La presente simulación se realizó utilizando herramienta FlowSimulation perteneciente al software SolidWorks 2018. Se muestran las capas de suelo donde se establecieron las propiedades constantes de cada una de estas. Además, las condiciones meteorológicas referenciales en función del tiempo

como la humedad, presión atmosférica, radiación solar, temperatura ambiental y velocidad del viento.

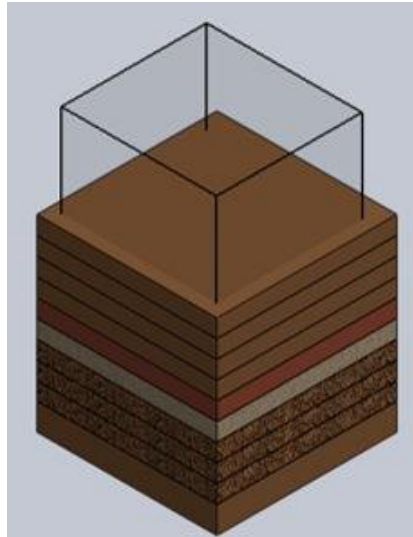


Figura 3.1 Modelo de la columna estratigráfica

Para este análisis se tomaron los datos críticos del estudio, es decir, los valores comprendidos entre el 13 y el 20 agosto del 2019 en intervalos de 10 minutos, obteniendo así un total de 1008 iteraciones.

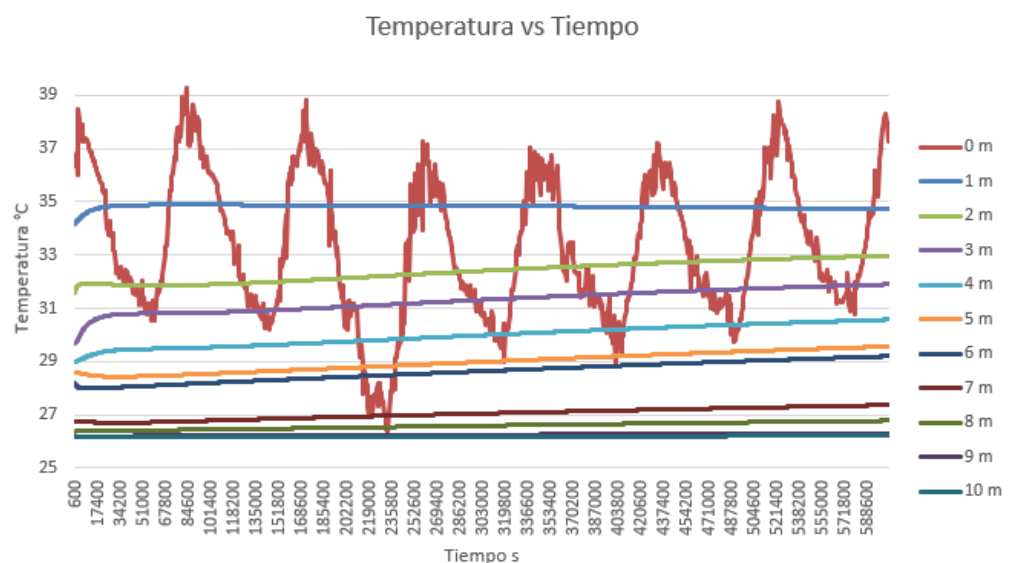


Figura 3.2 Resultados de la simulación: Temperatura de suelo vs Tiempo de cada capa entre 13 a 20 de agosto 2019

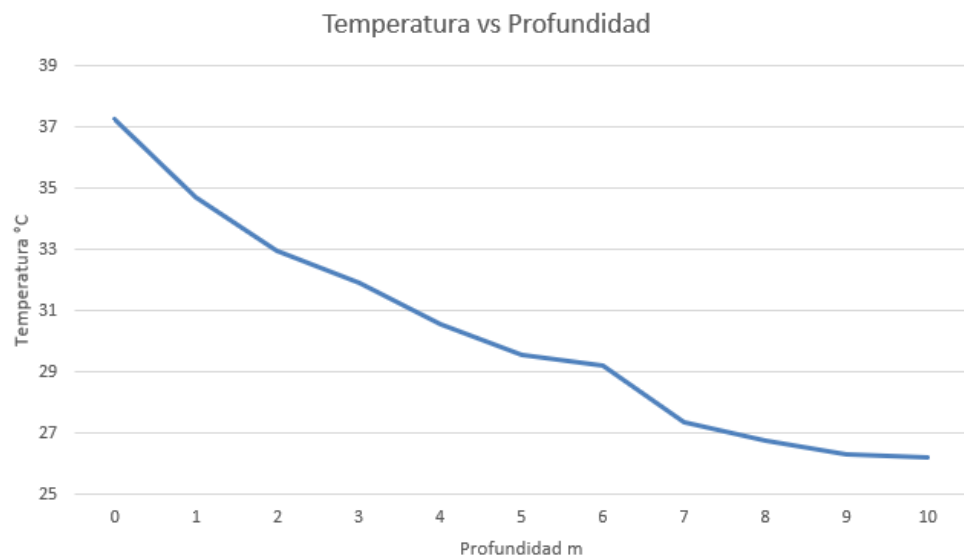


Figura 3.3 Resultados de la simulación: Temperatura de suelo vs Profundidad en el intervalo más caliente entre 13 a 20 de agosto 2019

Por medio de los resultados de la simulación en FlowSimulation y los datos recuperados a partir del uso de termopares a lo largo de las capas, se calcularon los parámetros estadísticos BIAS y RMSE para validar el modelo establecido.

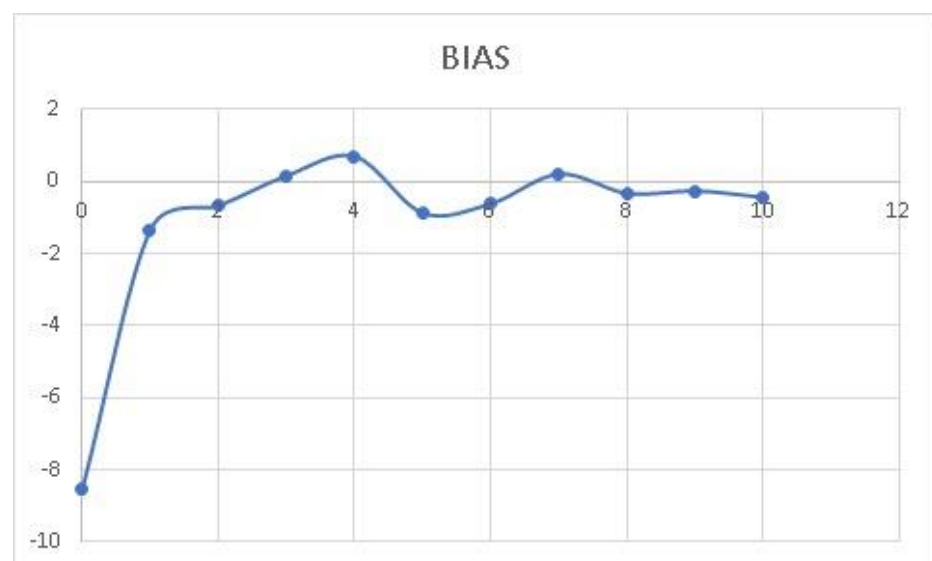


Figura 3.4 BIAS vs Profundidad del perfil del suelo

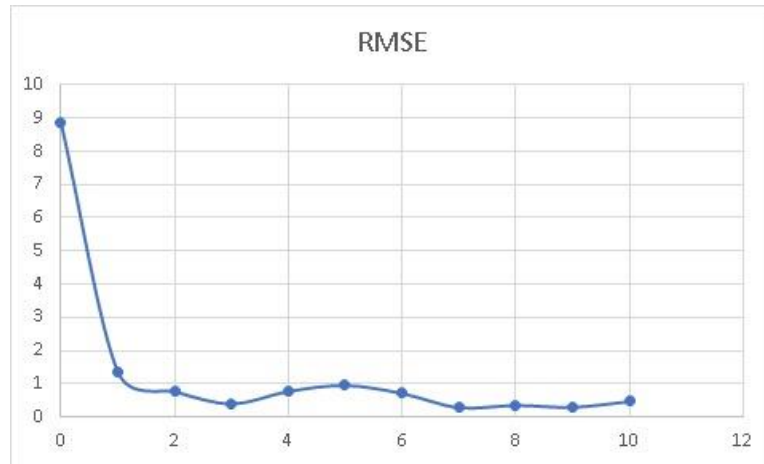


Figura 3.5 RMSE vs Profundidad del perfil del suelo

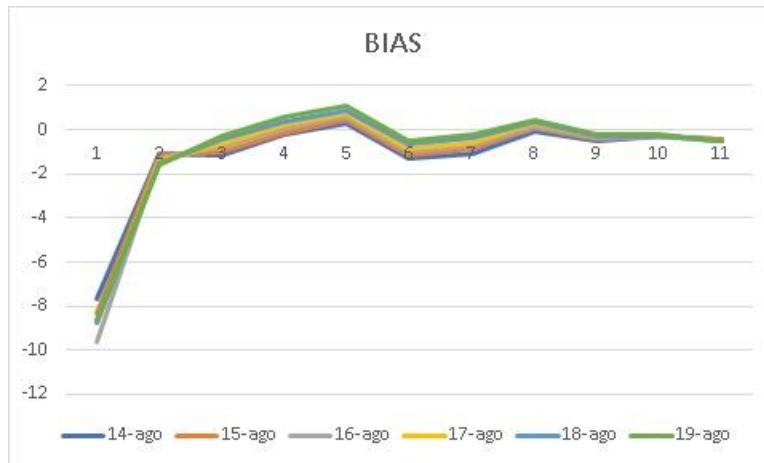


Figura 3.6 BIAS vs Profundidad del perfil del suelo en cada día

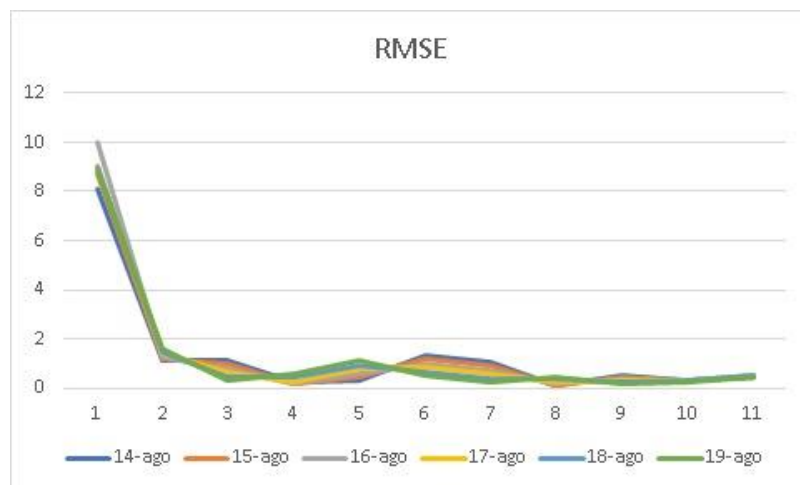


Figura 3.7 RMSE vs Profundidad del perfil del suelo en cada día

Estos errores nos mostraron una precisión de la simulación que va de 0 a 1 °C con excepción en la superficie, donde el modelo de radiación no reflejó el comportamiento real subestimando en un valor de 8 °C con los registros existentes.

3.5 Simulación del intercambiador enterrado

Para el modelado del intercambiador de calor se conservaron los diámetros seleccionados previamente, y a su vez la longitud de tubería en cada capa sería de 200 metros, con la finalidad de comprobar la capacidad de remover calor en cada nivel de suelo y de este modo optar por la mejor opción posible.

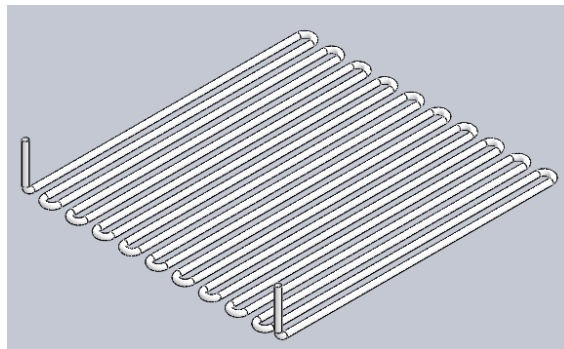


Figura 3.8 Intercambiador de calor de PVC

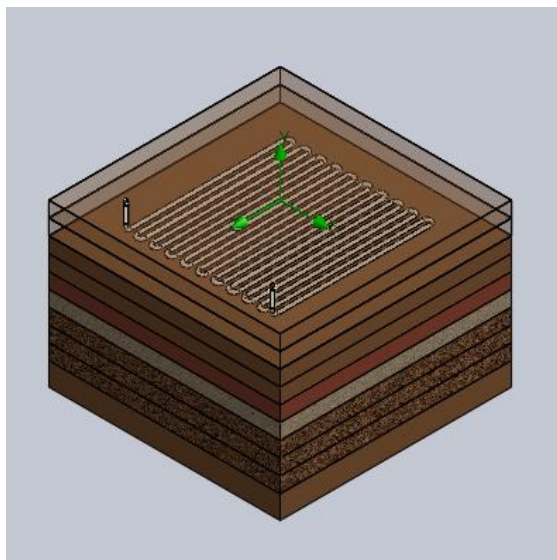


Figura 3.9 Intercambiador de calor enterrado

Para la simulación del intercambiador de calor se hizo uso de los datos previamente establecidos en la representación de las capas de suelo, pero en lugar de utilizar la semana entera, se tomó únicamente información de 3 días. Además, se agregaron los datos de flujo de aire entrante al intercambiador con temperatura y presión ambiental.

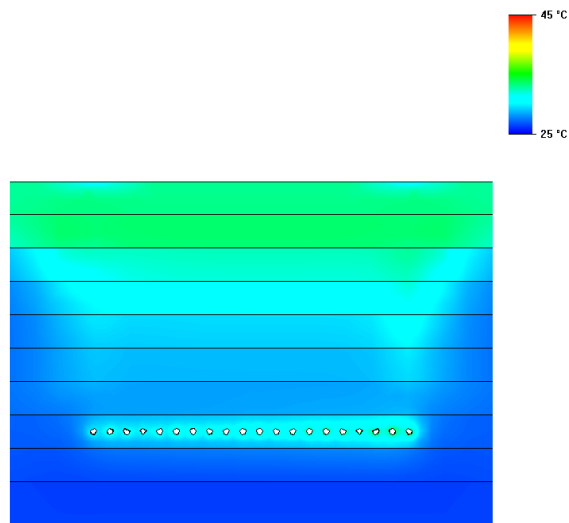


Figura 3.10 Temperatura del solido con el intercambiador ubicado a 7.5 metros

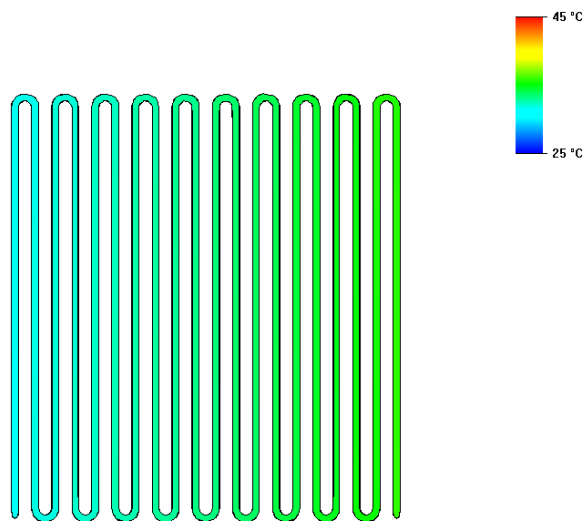


Figura 3.11 Temperatura del fluido con el intercambiador ubicado a 7.5 metros

Los puntos objetivo de la simulación fueron de temperatura de fluido en la entrada y salida del intercambiador de calor a nivel de la superficie, de este modo fue posible calcular el gradiente de temperatura en las diferentes capas de suelo. Es importante recalcar que no fue posible ubicar el intercambiador en la capa de 0 a 1 metros por el error encontrado durante la simulación del suelo, así mismo, tampoco fue posible hacerlo en la capa de 9 a 10 metros ya que se desconocen las propiedades y temperaturas por debajo de esta.

Por otro lado, de la información de los días simulados se tomaron los datos del segundo día debido a que se consideran los más estables, obteniendo así la siguiente gráfica:

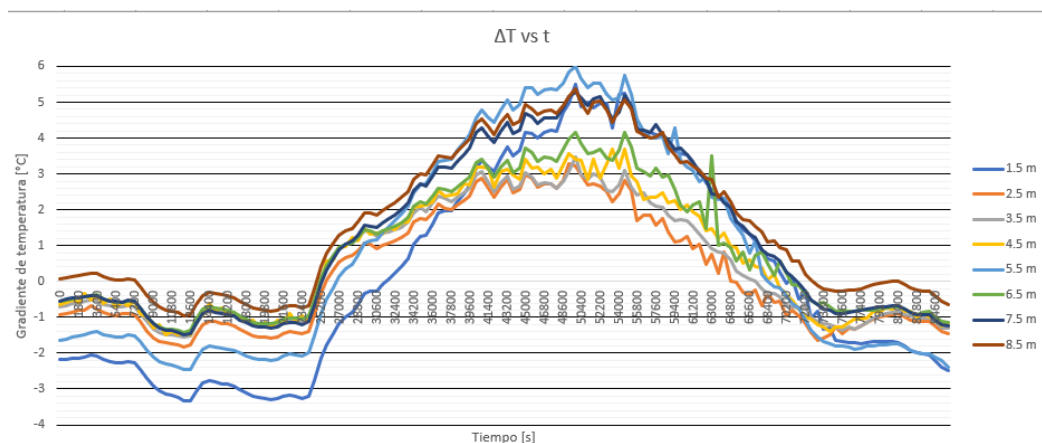


Figura 3.12 Gradiente de temperatura del fluido vs Tiempo con datos del 18 de agosto del 2019

Según la gráfica mostrada, los mayores gradientes obtenidos ordenados de manera ascendente fueron los de las capas 1-2, 7-8, 8-9 y 5-6. La ventaja de las capas 1-2 y 5-6 frente a las otras se debe a sus propiedades, teniendo el mejor valor de calor específico y conductividad térmica, respectivamente. Mientras que las capas más profundas 7-8 y 8-9 tienen la ventaja por tener las temperaturas de sólido más bajas. Con un gradiente de temperatura entre 4 y 5 °C en el intervalo más caliente del día, la mejor opción para no realizar una excavación muy profunda y poco beneficiosa es ubicar el intercambiador de calor en la capa 1-2.

3.6 Análisis económico

Para la elaboración del presente análisis se tomó en consideración la excavación del área en donde se colocará el sistema de geotermia, la construcción del intercambiador de calor y la puesta en marcha de este sistema. También se tuvo en cuenta el costo de la mano de obra, los materiales, herramientas y equipos necesarios para el correcto funcionamiento. Además, el costo de diseño de proyecto el cual también es agregado los costos totales. Debido a que el proyecto se desarrollará en el estado de Sonora, México, los costos estimados van en contexto a la realidad económica y social del mismo. Considerando además una tasa de cambio promedio de 20 pesos mexicanos por dólar estadounidense.

3.6.1 Materiales

Para la construcción del intercambiador enterrado se requieren tuberías PVC de 200 mm de diámetro o su equivalencia aproximada más cercana de 8 pulgadas y accesorios de acople.

Tabla 3.8 Costo de Materiales

Concepto	Medidas	Unidad	Cantidad	Costo unitario	Costo Total
Tubería PVC	0.2x1	m	410	\$7.20	\$2952
Codo de 90° suavizado	-	-	85	\$9.50	\$807.5
Total					\$3759.50

3.6.2 Equipos

Para impulsar el sistema se requiere un ventilador centrífugo el cual tomará el aire ambiente y lo llevará a través de las tuberías del intercambiador enterrado. Además, un panel de control general, sensor de presión para mantener estables las condiciones necesarias en el intercambiador.

Tabla 3.9 Costo de Equipos

Concepto	Modelo	Cantidad	Costo unitario	Costo Total
Ventilador centrífugo	PLE-154	2	\$3100	\$6200
Panel de control	PCS 110FZ	1	\$950	\$950
Sensor de presión	LF10-1H1	2	\$15	\$30
Total				\$7180

3.6.3 Mano de obra

El intercambiador de calor enterrado ocupará un área superficial aproximada 220 m^2 , el cual será colocado a 1.5 metros por debajo del suelo. Para lo cual es necesario un equipo encargado de la excavación y otro para el ensamble del sistema de tubos.

Tabla 3.10 Costo de mano de obra

Concepto	Personal requerido	Costo Total
Excavación de suelo	1 supervisor 5 obreros	\$1400
Ensamble e instalación del intercambiador	1 supervisor 3 obreros	\$3000
Instalación de ventilador centrífugo	1 ingeniero	\$200
Instalación y configuración de panel de control	1 ingeniero	\$400
Total		\$5000

3.6.4 Costos totales

Tabla 3.11 Costos de diseño

Concepto	Costo Total
Materiales	\$3759.50
Equipos	\$7180.00
Mano de obra	\$5000.00
Costo de diseño	\$4000.00
Total	\$19939.50

CAPÍTULO 4

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 Conclusiones

- El intercambiador de calor enterrado está conformado por tuberías y uniones de PVC, consiste en una entrada de aire conectada a un ventilador centrífugo el cual lo alimenta con aire ambiente, por el otro lado, posee una salida la cual se conecta hacia la infraestructura a climatizar. El sistema mencionado es capaz de cubrir desde el 40 hasta el 50% de carga térmica existente.
- El sistema conformado por dos intercambiadores de calor enterrados se ubicará en la capa 1-2 bajo el suelo y tendrá una longitud total de 410 metros ocupando un área de 440 metros cuadrados, las tuberías tendrán un diámetro exterior de 20 cm e interior de 19,2 cm. Los ventiladores centrífugos que impulsarán el sistema serán capaces de mover 510 metros cúbicos de aire por hora cada uno.
- El error existente entre la simulación y los datos registrados en la capa superficial entregados por el cliente fueron muy altos debido a una aproximación deficiente en el modelo de radiación. Sin embargo, esto no afectó al resto de capas, las cuales se mantuvieron con una bias de +1 °C como máximo, demostrando así que la geotermia no depende de factores externos sino únicamente de las propiedades intrínsecas de la tierra en donde se colocará el intercambiador.
- Tras el estudio y la simulación realizados se llegó a la conclusión de que el sistema de intercambio de calor será ubicado en la capa de suelo 1-2, esto debido al gradiente de temperatura existente de 5 °C y, además que este nivel nos brinda un ahorro económico considerable respecto a la construcción y mantenimiento en una capa inferior. El diseño y dimensionamiento viene dado principalmente debido a las limitaciones de espacio en donde se puede colocar el sistema (longitud de tubería) y

además los límites entre cada capa (diámetro de tubería), optimizando el área ocupada y aprovechando el máximo de transferencia de calor posible en esta.

- Tras las pruebas realizadas se seleccionó el aire como fluido caloportador debido a que se llegan a disminuir hasta 5 °C a lo largo de intercambiador ubicado en la capa de suelo 1-2, a diferencia de un sistema que funciona con agua el cual solo fue capaz de obtener un gradiente máximo de 2 °C en su mejor ubicación posible.
- Con un exhaustivo análisis de desarrollo y comparación de costos se llegó a la resolución de que, si bien actualmente implementar un sistema de geotermia de baja entalpía es relativamente más costoso que las opciones ya existentes en el mercado, el presente proyecto se estima un gasto alrededor de \$20000. Se espera que en un futuro no muy lejano sea posible desarrollar más profundamente esta tecnología por lo que promete ser y mejorar respecto a sustentabilidad y desarrollo sostenible, para así finalmente reducir de manera considerable los costos y poder llevarlo no solo a edificios de alto nivel sino también al hogar común.

4.2 Recomendaciones

- En caso de que se requiera un mayor caudal con la finalidad de cubrir una mayor demanda de aire, es necesario aumentar el diámetro de la tubería para mantener el gradiente resultante y la velocidad del flujo.
- La utilización de un simulador que sea capaz de recrear el modelo de radiación permite comprobar el potencial del diseño en cada capa de suelo, esto además nos hace posible realizar variaciones que afectarán o no directamente al resultado final.
- Dividir el área de estudio en capas es una manera conveniente de visualizar y controlar la simulación del medio, sin embargo, no se tiene la

certeza de que dichas propiedades se hayan mantenido desde el 2019 (fecha de los datos utilizados para desarrollar el presente proyecto) y que sean consistentes a lo largo del metro de altura y de toda el área que abarca el intercambiador de calor. Por estas razones es recomendable llevar a cabo un nuevo estudio de suelo para obtener datos más actuales y por ende un resultado más acertado con respecto a la realidad.

- Para evitar ganancias de calor al transportar el aire desde la salida del intercambiador hacia el interior de la infraestructura se deben cubrir las tuberías con algún tipo aislante térmico.
- Al momento de seleccionar los materiales y equipos tales como el tipo de tubería, el ventilador centrífugo o los sensores de presión, es importante tener en consideración las condiciones a las que estos se someterán, en este caso, bajo tierra o a la intemperie. Además, en caso de querer incrementar el gradiente térmico del sistema se puede considerar cambiar el material de las tuberías, teniendo en cuenta que, esto conlleva un aumento en los costos.

BIBLIOGRAFÍA

- ATECYR. (2010). Guía técnica de diseño de sistemas de bomba de calor geotérmica. Madrid: Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE).
- Cárcel, F. J., & Martínez, D. (2015). Captación de la Energía Geotérmica para su uso en la Edificación. *3C Tecnología*, 4(2), 84-95. Obtenido de <http://ojs.3ciencias.com/index.php/3c-tecnologia/article/view/257>
- Cárcel, F. J., & Martínez, D. (2015). La Energía Geotérmica de Baja Entalpía. *3C Tecnología*, 4(3), 101-104. doi:10.17993/3ctecno.2015.v4n3e15.96-108
- Carta, J. A., Calero, R., Colmenar, A., & Castro, M.-A. (2009). Centrales de energías renovables: Generación eléctrica con energías renovables. Madrid: Pearson Educación .
- Chandrasekharam, D., & Bundschuh, J. (2008). Low-Enthalpy Geothermal Resources for Power Generation. London: CRC Press.
- CONUEE. (2020). *Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía (CONUEE)*. Obtenido de Base de Indicadores de Eficiencia Energética (BIEE): <https://www.biee-conuee.net/>
- Delgado, E., Peralta, J., & Aveiga, G. (2016). Análisis de un sistema de aerogeotermia de baja entalpía.
- Dickson, M., & Fanelli, M. (2003). *Geothermal Energy: Utilization and Technology* (1st ed.). London: UNESCO.
- Dirección General de Vivienda y Rehabilitación. (2013). Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios (RITE). Obtenido de <http://www.madrid.org/bdccm/normativa/PDF/Instalaciones/Instalaciones%20termicas/Normas%20Tratadas/ESRd10272007.pdf>
- El clima promedio en Cd. Obregon*. (2021). Obtenido de Weather Spark: <https://es.weatherspark.com/y/2961/Clima-promedio-en-Cd.-Obreg%C3%B3n-M%C3%A9xico-durante-todo-el-a%C3%B1o#Sections-Humidity>
- Fuenzalida, F. A., & Frederick, R. (2014). Diseño y evaluación de un intercambiador de calor para recuperar energía geotérmica de muy baja entalpía. 11-13. Obtenido de <http://repositorio.uchile.cl/handle/2250/130726>
- Gómez, E., & González, A. (2017). La Geotermia como Energía Renovable y Sustentable en México. *Perspectivas de Sustentabilidad en México*. Madrid: CIEMAT.

- Google. (s.f.). *Instituto Tecnológico de Sonora Campus Nainari*. Obtenido de <https://www.google.com/maps/place/Instituto+Tecnol%C3%B3gico+de+Sonora+Campus+Nainari/@27.4919449,-109.972631,16.75z/data=!4m5!3m4!1s0x86c83e15044c7d1f:0x3f83c44d115acacb!8m2!3d27.4930878!4d-109.9710183>
- Iannelli, L., & Gil, S. (2013, Febrero). Acondicionamiento Térmico de Aire mediante el uso de Energía Geotérmica. 13. doi:10.13140/RG.2.2.23586.27841
- Incropera, F., & Dewitt, D. (2011). *Fundamentals of Heat Transfer* (7th ed.). Hoboken: John Wiley & Sons, Inc.
- ITSON. (s.f.). *Galería de Fotos*. Obtenido de <https://www.itson.mx/Universidad/Paginas/galeria.aspx>
- Kagel, A., Bates, D., & Gawell, K. (2005). *A guide to geothermal energy and the environment*. Technical Report, Geothermal Energy Association, Washington. doi:10.2172/897425
- Lahidalga, J. (2013). *Ventiladores centrífugos*. Obtenido de Acta: https://www.acta.es/medios/articulos/ciencias_y_tecnologia/059095.pdf
- ONU. (2015). *Objetivos y metas de desarrollo sostenible*. Obtenido de Naciones Unidas: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/sustainable-development-goals/>
- Peñuñuri, A. (2020, Octubre 11). Sonora cierra temporada de calor con más muertes en el país. *El Sol de Hermosillo*.
- Ramirez, H. J., & Sarria, B. (2007). Determinación de las cargas térmicas para garantizar el confort en los locales del piso 1 del edificio de aulas 2 en la UTB. Obtenido de <https://biblioteca.utb.edu.co/notas/tesis/0043111.pdf>
- Soler&Palau. (2015). *La Ventilación*. Obtenido de Soler&Palau México: <https://www.solerpalau.mx/ASW/recursos/panels/arch/la-ventilacion.pdf>
- Vallespir, T. M., & Canals, V. J. (2019, Septiembre 16). Dimensionamiento de la instalación geotérmica para la climatización de un hotel de 4 estrellas. 16-17, 21.

APÉNDICES

APÉNDICE A

Condiciones ambientales

Los datos proporcionados por la Estación Meteorológica de ITSON comprenden condiciones entre agosto a diciembre del 2019. Para las simulaciones de la columna estratigráfica se usaron del 13 al 20 de agosto por ser los críticos y para la simulación del intercambiador del 17 al 19 de agosto.

A continuación, se adjuntan los datos del 19 de agosto del 2019 como referencia.

Tiempo	Temperatura ambiente [°C]	Presión atmosférica [Pa]	Velocidad del viento [$\frac{m}{s}$]	Radiación Solar [W]	Humedad
8/19/2019 0:00	30.43	97400	0.323	0	60.47
8/19/2019 0:10	30.31	97400	0.261	0	61.1
8/19/2019 0:20	30.2	97400	0.611	0	61.55
8/19/2019 0:30	30.03	97400	0.19	0	62.83
8/19/2019 0:40	30.01	97400	0.248	0	63.54
8/19/2019 0:50	29.92	97400	0.416	0	64.39
8/19/2019 1:00	29.98	97400	0.606	0	63.45
8/19/2019 1:10	29.93	97400	0.491	0	62.8
8/19/2019 1:20	29.81	97400	0.022	0	63.4
8/19/2019 1:30	29.76	97400	0.102	0	64.79
8/19/2019 1:40	29.67	97400	0.213	0	66.91
8/19/2019 1:50	29.83	97400	0.122	0	68.22999
8/19/2019 2:00	29.92	97400	0.288	0	68.82
8/19/2019 2:10	29.97	97400	0.457	0	68.67
8/19/2019 2:20	29.94	97400	0.46	0	68.66
8/19/2019 2:30	29.92	97400	0.029	0	69.06
8/19/2019 2:40	29.84	97400	0.115	0	69.84
8/19/2019 2:50	29.83	97400	0.064	0	70.56
8/19/2019 3:00	29.83	97400	0.13	0	70.7
8/19/2019 3:10	29.8	97400	0.167	0	71.27
8/19/2019 3:20	29.74	97400	0.095	0	72.04
8/19/2019 3:30	29.61	97400	0.082	0	72.32
8/19/2019 3:40	29.64	97400	0	0	72.43999
8/19/2019 3:50	29.61	97400	0	0	72.13
8/19/2019 4:00	29.64	97400	0	0	71.43999
8/19/2019 4:10	29.63	97400	0	0	70.92
8/19/2019 4:20	29.61	97400	0	0	69.68
8/19/2019 4:30	29.56	97400	0	0	69.59
8/19/2019 4:40	29.39	97400	0	0	69.89

8/19/2019 4:50	29.34	97400	0	0	69.93
8/19/2019 5:00	29.33	97400	0	0	70.04999
8/19/2019 5:10	29.25	97500	0	0	69.72
8/19/2019 5:20	29.13	97500	0	0	69.91
8/19/2019 5:30	29.18	97500	0	0	69.85
8/19/2019 5:40	29.03	97500	0	0	70.24
8/19/2019 5:50	29.01	97500	0	0	71.25
8/19/2019 6:00	29.09	97500	0	1	71.09
8/19/2019 6:10	29.03	97500	0	8	70.78
8/19/2019 6:20	29.08	97500	0	20	70.18999
8/19/2019 6:30	29.17	97500	0	32	69.88
8/19/2019 6:40	29.18	97500	0	54	69.74
8/19/2019 6:50	29.41	97500	0	88.00001	69.16
8/19/2019 7:00	29.61	97500	0	109	67.79999
8/19/2019 7:10	29.92	97500	0	120	65.93
8/19/2019 7:20	30	97500	0	148	64.61999
8/19/2019 7:30	30.19	97500	0	187	63.79
8/19/2019 7:40	30.46	97500	0	253	63.53
8/19/2019 7:50	30.93	97500	0	285	61.85999
8/19/2019 8:00	31.33	97500	0	324	60.51
8/19/2019 8:10	31.47	97500	0.031	340	59.61
8/19/2019 8:20	31.43	97500	0.723	411	60.65
8/19/2019 8:30	31.75	97500	0.529	460	59.08
8/19/2019 8:40	32.12	97500	1.017	510	57.42
8/19/2019 8:50	32.27	97500	1.296	561.0001	57.89
8/19/2019 9:00	32.43	97500	0.925	595.0001	57.96
8/19/2019 9:10	33.06	97500	0.849	626.0001	52.93
8/19/2019 9:20	33.37	97500	0.83	663.0001	49.39
8/19/2019 9:30	33.98	97500	0.922	688	48.23
8/19/2019 9:40	34.14	97500	1.025	712	46.03
8/19/2019 9:50	34.22	97500	0.904	736.0001	47.11
8/19/2019 10:00	34.69	97500	0.957	763	44.13
8/19/2019 10:10	35.27	97500	1.097	789	41.59
8/19/2019 10:20	35.38	97500	1.035	815.0001	37.52
8/19/2019 10:30	35.81	97400	0.957	830.0001	37.97
8/19/2019 10:40	36.24	97400	1.127	849	36.77
8/19/2019 10:50	36.23	97400	1.332	875.0001	34.32
8/19/2019 11:00	36.6	97400	1.05	889.0001	34.13
8/19/2019 11:10	36.59	97400	0.814	899.0001	34.73
8/19/2019 11:20	37.06	97400	1.053	909	34.95
8/19/2019 11:30	37.19	97400	1.082	928	35.57
8/19/2019 11:40	37.15	97400	1.77	941.0001	35.69
8/19/2019 11:50	37.31	97400	1.359	948.0001	34.94
8/19/2019 12:00	37.8	97300	1.205	950.0001	34.06
8/19/2019 12:10	37.69	97300	1.378	954.0001	34.49

8/19/2019 12:20	38.32	97300	1.665	951	33.17
8/19/2019 12:30	38.29	97300	1.125	954.0001	32.95
8/19/2019 12:40	39.04	97300	1.467	950.0001	31.93
8/19/2019 12:50	39.03	97300	1.229	952	31.94
8/19/2019 13:00	39.68	97200.01	1.205	953.0001	31.09
8/19/2019 13:10	40.21	97200.01	0.868	938	29.76
8/19/2019 13:20	40.24	97200.01	1.505	962.0001	29.26
8/19/2019 13:30	40.27	97200.01	0.986	967.0001	29.21
8/19/2019 13:40	40.27	97200.01	1.288	860	29.22
8/19/2019 13:50	40.55	97200.01	1.225	892	28.61
8/19/2019 14:00	40.6	97200.01	1.592	913.0001	28.46
8/19/2019 14:10	40.08	97100	0.98	880.0001	29.05
8/19/2019 14:20	40.88	97100	1.362	692	28.32
8/19/2019 14:30	40.69	97100	0.982	796.0001	28.32
8/19/2019 14:40	40.46	97100	1.181	678	28.59
8/19/2019 14:50	40.92	97100	1.374	794	27.89
8/19/2019 15:00	41.03	97100	0.961	754	27.71
8/19/2019 15:10	41.21	97100	0.947	729	27.59
8/19/2019 15:20	41.09	97000	1.272	698	27.49
8/19/2019 15:30	40.64	97000	2.769	678	29.84
8/19/2019 15:40	40.27	97000	2.502	650.0001	30.48
8/19/2019 15:50	40.08	97000	2.44	620	30.49
8/19/2019 16:00	40.06	97000	2.591	591.0001	29.79
8/19/2019 16:10	39.95	97000	2.651	558.0001	29.63
8/19/2019 16:20	40.14	97000	2.058	527	29.3
8/19/2019 16:30	40.14	97000	2.314	489	29.4
8/19/2019 16:40	39.86	97100	1.965	454	29.99
8/19/2019 16:50	39.71	97100	2.219	417	30.33
8/19/2019 17:00	39.16	97100	2.159	320	31.35
8/19/2019 17:10	38.43	97000	2.24	225	32.83
8/19/2019 17:20	38.03	97100	2.441	223	33.82
8/19/2019 17:30	37.97	97000	2.236	258	34.25
8/19/2019 17:40	37.82	97100	2.307	232	35.03
8/19/2019 17:50	37.55	97100	2.078	180	35.74
8/19/2019 18:00	37.02	97100	2.305	67	36.47
8/19/2019 18:10	36.49	97100	1.98	42	36.62
8/19/2019 18:20	36.34	97100	1.699	38	37.37
8/19/2019 18:30	36.25	97100	1.428	38	38.39
8/19/2019 18:40	35.9	97100	2.105	23	39.41
8/19/2019 18:50	35.44	97100	2.001	11	40.98
8/19/2019 19:00	35.19	97100	1.176	3	42.11
8/19/2019 19:10	34.96	97100	1.683	0	43.28
8/19/2019 19:20	34.72	97100	1.128	0	44.2
8/19/2019 19:30	34.46	97100	0.903	0	45.62
8/19/2019 19:40	34.1	97100	1.292	0	47.44

8/19/2019 19:50	33.87	97100	0.795	0	48.3
8/19/2019 20:00	33.7	97100	1.284	0	49.16
8/19/2019 20:10	33.58	97100	0.742	0	49.9
8/19/2019 20:20	33.46	97100	1.39	0	50.68
8/19/2019 20:30	33.26	97100	0.704	0	51.35
8/19/2019 20:40	33.17	97100	0.951	0	51.57
8/19/2019 20:50	33.09	97200.01	1.243	0	51.83
8/19/2019 21:00	32.86	97200.01	1.088	0	52.71
8/19/2019 21:10	32.77	97200.01	1.28	0	53.38
8/19/2019 21:20	32.68	97200.01	0.746	0	53.95
8/19/2019 21:30	32.49	97200.01	1.215	0	54.7
8/19/2019 21:40	32.41	97200.01	0.668	0	55.07
8/19/2019 21:50	32.36	97200.01	0.852	0	55.21
8/19/2019 22:00	32.28	97200.01	0.789	0	55.25
8/19/2019 22:10	32.22	97200.01	0.777	0	55.58
8/19/2019 22:20	32.06	97200.01	0.304	0	56.45
8/19/2019 22:30	31.85	97200.01	0.359	0	57.45
8/19/2019 22:40	31.85	97200.01	0.316	0	57.66
8/19/2019 22:50	31.77	97200.01	1.032	0	58.23
8/19/2019 23:00	31.69	97200.01	0.508	0	58.74
8/19/2019 23:10	31.65	97200.01	0.951	0	59.21
8/19/2019 23:20	31.58	97100	1.257	0	60.08
8/19/2019 23:30	31.44	97100	0.983	0	61.2
8/19/2019 23:40	31.23	97200.01	0.213	0	62.17
8/19/2019 23:50	31.06	97200.01	0.024	0	63.08

APÉNDICE B

Datos tomados por los Dataloggers

Al igual que el apéndice anterior se tomaron datos a lo largo de unos meses, pero para simplificar la tabla, se adjuntan solo los datos del 19 de agosto.

Tiempo	Temp. a 0 m [°C]	Temp. a 1 m [°C]	Temp. a 2 m [°C]	Temp. a 3 m [°C]	Temp. a 4 m [°C]	Temp. a 5 m [°C]	Temp. a 6 m [°C]	Temp. a 7 m [°C]	Temp. a 8 m [°C]	Temp. a 9 m [°C]	Temp. a 10 m [°C]
8/19/2019 0:00	42.414	36.155	33.005	31.15	29.295	29.89	29.225	26.9	26.9	26.5	26.7
8/19/2019 0:10	42.482	36.435	33.18	31.15	29.365	29.96	29.365	26.9	26.9	26.6	26.7
8/19/2019 0:20	42.244	36.33	33.145	31.22	29.4	29.925	29.26	26.8	26.9	26.6	26.7
8/19/2019 0:30	42.278	36.295	33.04	31.255	29.365	29.995	29.26	26.8	26.9	26.5	26.7
8/19/2019 0:40	42.176	36.47	33.145	31.185	29.295	29.89	29.26	26.8	26.9	26.6	26.7
8/19/2019 0:50	42.142	36.295	33.145	31.185	29.33	29.995	29.33	26.8	26.9	26.5	26.7
8/19/2019 1:00	42.006	36.33	33.145	31.22	29.365	29.89	29.295	26.9	27	26.6	26.8
8/19/2019 1:10	41.768	36.26	33.075	31.045	29.295	29.925	29.295	26.8	26.9	26.6	26.7
8/19/2019 1:20	41.87	36.33	33.145	31.15	29.365	29.89	29.295	26.9	26.9	26.6	26.7
8/19/2019 1:30	41.666	36.4	33.075	31.22	29.4	29.855	29.295	26.9	27	26.6	26.7
8/19/2019 1:40	41.7	36.33	33.145	31.185	29.435	29.995	29.33	26.9	26.9	26.7	26.7
8/19/2019 1:50	41.7	36.365	33.18	31.29	29.47	29.96	29.4	26.8	26.9	26.6	26.7
8/19/2019 2:00	41.564	36.225	33.075	31.185	29.47	29.995	29.225	26.9	26.9	26.6	26.8
8/19/2019 2:10	41.394	36.26	33.11	31.22	29.47	29.925	29.26	26.8	26.9	26.6	26.7
8/19/2019 2:20	41.36	36.33	33.215	31.22	29.4	29.925	29.26	26.8	26.9	26.6	26.7
8/19/2019 2:30	41.292	36.33	33.18	31.22	29.505	29.96	29.4	26.9	27	26.6	26.7
8/19/2019 2:40	41.19	36.435	33.18	31.325	29.365	29.995	29.365	26.8	26.9	26.6	26.7
8/19/2019 2:50	41.088	36.295	33.11	31.15	29.33	29.925	29.225	26.8	27	26.6	26.7
8/19/2019 3:00	41.088	36.33	33.075	31.255	29.4	29.89	29.4	26.8	27	26.6	26.7
8/19/2019 3:10	40.952	36.33	33.215	31.15	29.33	29.855	29.225	26.8	27	26.6	26.7
8/19/2019 3:20	40.986	36.4	33.11	31.22	29.4	29.995	29.26	26.9	27	26.6	26.7
8/19/2019 3:30	40.85	36.365	33.145	31.15	29.26	29.89	29.225	26.8	26.9	26.6	26.7
8/19/2019 3:40	40.918	36.33	33.25	31.29	29.365	29.96	29.435	26.9	27	26.6	26.8
8/19/2019 3:50	40.884	36.4	33.215	31.325	29.4	30.065	29.365	26.8	27	26.6	26.8
8/19/2019 4:00	40.714	36.33	33.18	31.22	29.365	29.96	29.26	26.8	26.9	26.6	26.7
8/19/2019 4:10	40.68	36.33	33.18	31.255	29.365	29.96	29.295	26.8	27	26.6	26.8
8/19/2019 4:20	40.544	36.365	33.18	31.255	29.365	29.89	29.4	26.9	26.9	26.6	26.7
8/19/2019 4:30	40.578	36.435	33.215	31.255	29.33	29.925	29.295	26.8	26.9	26.7	26.7
8/19/2019 4:40	40	36.435	33.215	31.29	29.435	30.03	29.33	26.9	26.9	26.6	26.7
8/19/2019 4:50	40.578	36.4	33.285	31.36	29.435	30.03	29.365	26.9	27	26.6	26.8
8/19/2019 5:00	40.306	36.365	33.11	31.22	29.4	29.925	29.26	26.9	27	26.7	26.8
8/19/2019 5:10	40.306	36.365	33.215	31.15	29.365	29.925	29.26	26.9	26.9	26.6	26.7
8/19/2019 5:20	40.34	36.435	33.18	31.22	29.365	29.995	29.365	26.9	27	26.6	26.7

8/19/2019 5:30	40.272	36.47	33.145	31.29	29.47	29.89	29.33	26.9	27	26.6	26.8
8/19/2019 5:40	40.136	36.4	33.18	31.255	29.4	29.89	29.295	26.9	26.9	26.7	26.7
8/19/2019 5:50	40.068	36.4	33.11	31.29	29.365	29.995	29.33	26.9	26.9	26.6	26.7
8/19/2019 6:00	40.102	36.435	33.32	31.325	29.365	29.96	29.4	26.8	27	26.6	26.8
8/19/2019 6:10	39.898	36.26	33.145	31.185	29.295	29.96	29.295	26.9	27	26.7	26.8
8/19/2019 6:20	39.932	36.47	33.355	31.255	29.4	30.135	29.33	26.9	27	26.7	26.7
8/19/2019 6:30	39.898	36.365	33.145	31.255	29.435	29.96	29.33	26.9	27	26.6	26.8
8/19/2019 6:40	39.796	36.33	33.11	31.15	29.365	29.925	29.33	26.8	27	26.6	26.8
8/19/2019 6:50	39.83	36.4	33.145	31.22	29.435	29.96	29.295	26.8	27	26.7	26.8
8/19/2019 7:00	39.694	36.4	33.18	31.185	29.365	29.995	29.4	26.8	27	26.6	26.8
8/19/2019 7:10	39.694	36.4	33.11	31.22	29.4	29.96	29.365	26.9	27	26.6	26.8
8/19/2019 7:20	39.66	36.26	33.18	31.255	28.91	29.995	29.33	26.9	26.9	26.6	26.8
8/19/2019 7:30	39.592	36.47	33.18	31.325	29.47	30.03	29.295	26.9	27	26.6	26.8
8/19/2019 7:40	39.524	36.47	33.18	31.22	29.365	29.89	29.4	26.9	26.9	26.6	26.8
8/19/2019 7:50	39.524	36.365	33.215	31.325	29.4	29.925	29.365	26.9	26.9	26.7	26.8
8/19/2019 8:00	39.456	36.47	33.18	31.22	29.4	30.1	29.295	26.8	27	26.6	26.8
8/19/2019 8:10	39.49	36.505	33.285	31.29	29.47	29.995	29.4	26.8	26.9	26.7	26.8
8/19/2019 8:20	39.388	36.33	33.145	31.325	29.295	29.995	29.33	26.8	26.9	26.6	26.8
8/19/2019 8:30	39.456	36.365	33.145	31.325	29.295	29.925	29.365	26.9	27	26.7	26.8
8/19/2019 8:40	39.252	36.295	33.11	31.185	29.26	29.855	29.19	26.8	26.9	26.7	26.8
8/19/2019 8:50	39.32	36.4	33.145	31.185	29.435	30.03	29.295	26.9	26.9	26.7	26.8
8/19/2019 9:00	39.286	36.435	33.18	31.29	29.4	30.03	29.4	26.9	27	26.7	26.8
8/19/2019 9:10	39.354	36.505	33.145	31.325	29.47	29.925	29.4	26.9	27	26.7	26.8
8/19/2019 9:20	39.32	36.365	33.18	31.115	29.33	29.925	29.26	26.9	26.9	26.7	26.8
8/19/2019 9:30	39.286	36.33	33.145	31.185	29.365	29.925	29.295	26.9	27	26.7	26.8
8/19/2019 9:40	39.388	36.4	33.145	31.255	29.4	29.855	29.365	26.8	26.9	26.7	26.7
8/19/2019 9:50	39.49	36.365	33.11	31.185	29.33	29.96	29.365	26.8	26.9	26.7	26.8
8/19/2019 10:00	39.66	36.4	33.18	31.29	29.26	29.96	29.33	26.8	27	26.6	26.7
8/19/2019 10:10	39.524	36.4	33.18	31.36	29.435	29.995	29.19	26.9	26.9	26.7	26.7
8/19/2019 10:20	39.66	36.26	33.075	31.185	29.4	29.855	29.295	26.8	26.9	26.6	26.7
8/19/2019 10:30	39.728	36.33	33.145	31.255	29.435	29.925	29.33	26.8	26.9	26.7	26.7
8/19/2019 10:40	39.864	36.26	33.18	31.255	29.26	29.89	29.225	26.9	26.9	26.6	26.8
8/19/2019 10:50	39.932	36.33	33.18	31.185	29.4	29.89	29.155	26.8	26.9	26.6	26.8
8/19/2019 11:00	40.204	36.26	33.25	31.255	29.47	29.89	29.365	26.9	26.9	26.7	26.8
8/19/2019 11:10	40.17	36.365	33.11	31.325	29.435	29.925	29.26	26.8	27	26.6	26.7
8/19/2019 11:20	40.306	36.295	33.285	31.115	29.365	29.995	29.26	26.8	26.9	26.6	26.8
8/19/2019 11:30	40.51	36.365	33.145	31.185	29.295	29.925	29.295	26.8	26.9	26.6	26.7
8/19/2019 11:40	40.68	36.33	33.04	31.15	29.26	29.785	29.33	26.9	26.9	26.6	26.7
8/19/2019 11:50	40.85	36.47	33.145	31.22	29.4	29.89	29.295	26.8	26.9	26.6	26.7
8/19/2019 12:00	41.054	36.4	33.075	31.255	28.805	29.855	29.295	26.9	26.9	26.6	26.7
8/19/2019 12:10	41.088	36.295	33.145	31.15	29.26	29.82	29.12	26.9	27	26.6	26.7
8/19/2019 12:20	41.326	36.26	33.18	31.22	29.365	29.96	29.19	26.8	26.9	26.6	26.7
8/19/2019 12:30	41.564	36.365	33.145	31.185	29.33	29.855	29.33	26.8	26.9	26.6	26.7
8/19/2019 12:40	41.632	36.365	33.18	31.255	29.435	29.925	29.33	26.9	26.9	26.5	26.6
8/19/2019 12:50	41.904	36.295	33.18	31.15	28.875	29.715	29.225	26.8	26.9	26.5	26.6

8/19/2019 13:00	42.04	36.33	33.005	31.115	29.33	29.785	29.155	26.9	26.9	26.5	26.6
8/19/2019 13:10	42.278	36.33	33.11	31.115	29.33	29.82	29.19	26.8	26.9	26.5	26.7
8/19/2019 13:20	42.516	36.225	32.97	31.045	29.19	29.785	29.19	26.8	26.9	26.5	26.6
8/19/2019 13:30	42.754	36.26	33.145	31.115	29.33	29.89	29.155	26.9	26.9	26.5	26.6
8/19/2019 13:40	42.856	36.225	33.075	31.01	29.26	29.75	29.19	26.8	26.9	26.5	26.6
8/19/2019 13:50	43.026	36.33	32.55	31.22	29.33	29.82	29.155	26.8	26.9	26.5	26.6
8/19/2019 14:00	43.196	36.295	32.9	31.01	29.225	29.785	29.05	26.8	26.9	26.4	26.6
8/19/2019 14:10	43.468	36.295	33.005	31.08	29.33	29.82	29.26	26.8	26.9	26.4	26.6
8/19/2019 14:20	43.604	36.295	33.005	31.01	29.19	29.785	29.12	26.8	26.9	26.5	26.6
8/19/2019 14:30	43.774	36.295	33.075	31.115	29.33	29.82	29.155	26.8	26.9	26.4	26.6
8/19/2019 14:40	43.842	36.295	32.97	31.115	29.26	29.785	29.155	26.8	26.9	26.5	26.6
8/19/2019 14:50	44.114	36.33	33.075	31.15	29.26	29.925	29.26	26.8	26.9	26.4	26.6
8/19/2019 15:00	44.25	36.19	33.005	31.15	29.225	29.645	29.05	26.8	26.9	26.4	26.5
8/19/2019 15:10	44.386	36.19	32.9	31.045	29.12	29.68	29.12	26.8	26.9	26.4	26.6
8/19/2019 15:20	44.59	36.26	32.97	31.045	29.26	29.82	29.05	26.8	26.9	26.4	26.6
8/19/2019 15:30	44.76	36.155	33.005	31.01	29.26	29.68	29.05	26.9	26.9	26.4	26.6
8/19/2019 15:40	44.964	36.295	32.97	31.01	29.225	29.855	29.015	26.8	26.9	26.4	26.5
8/19/2019 15:50	45.1	36.295	33.075	31.08	29.365	29.82	29.12	26.7	26.9	26.4	26.5
8/19/2019 16:00	45.168	36.295	33.04	31.01	29.19	29.645	29.085	26.8	26.9	26.4	26.6
8/19/2019 16:10	45.44	36.33	33.11	31.185	29.4	29.82	29.12	26.8	26.9	26.4	26.5
8/19/2019 16:20	45.474	36.295	33.145	31.08	29.19	29.82	29.155	26.8	26.9	26.4	26.5
8/19/2019 16:30	45.542	36.19	33.04	31.045	29.225	29.785	29.12	26.8	26.9	26.4	26.5
8/19/2019 16:40	45.61	36.33	32.97	31.15	29.295	29.785	29.05	26.8	26.9	26.4	26.5
8/19/2019 16:50	45.576	36.26	33.005	31.08	29.19	29.75	28.945	26.8	26.9	26.3	26.5
8/19/2019 17:00	45.712	36.295	33.04	31.08	29.225	29.785	29.12	26.8	26.9	26.4	26.6
8/19/2019 17:10	45.644	36.26	33.005	31.08	29.26	29.75	28.98	26.8	26.8	26.3	26.5
8/19/2019 17:20	45.814	36.225	33.04	31.115	29.295	29.785	29.085	26.8	26.9	26.4	26.5
8/19/2019 17:30	45.712	36.295	33.04	30.94	29.225	29.75	29.015	26.8	26.9	26.4	26.5
8/19/2019 17:40	45.814	36.33	33.04	31.01	29.26	29.855	29.155	26.8	26.9	26.4	26.5
8/19/2019 17:50	45.814	36.33	33.075	30.94	29.155	29.785	29.155	26.8	26.9	26.4	26.5
8/19/2019 18:00	46.018	36.225	33.04	31.115	29.26	29.785	29.085	26.8	26.9	26.3	26.5
8/19/2019 18:10	45.882	36.295	33.11	31.15	29.33	29.785	29.12	26.8	26.9	26.4	26.5
8/19/2019 18:20	45.746	36.33	33.04	31.01	29.225	29.785	29.12	26.8	26.9	26.4	26.5
8/19/2019 18:30	45.814	36.295	33.04	31.01	29.225	29.715	29.015	26.8	26.9	26.3	26.5
8/19/2019 18:40	45.712	36.26	32.97	31.045	29.225	29.75	29.085	26.8	26.9	26.4	26.6
8/19/2019 18:50	45.712	36.295	33.04	31.115	29.225	29.75	29.12	26.9	27	26.4	26.6
8/19/2019 19:00	45.61	36.225	32.97	31.045	29.225	29.82	29.05	26.8	26.9	26.4	26.6
8/19/2019 19:10	45.644	36.365	32.97	31.045	29.26	29.75	29.19	26.9	26.9	26.4	26.6
8/19/2019 19:20	45.576	36.4	32.97	31.115	29.225	29.82	29.155	26.8	26.9	26.4	26.6
8/19/2019 19:30	45.61	36.54	33.11	31.22	29.33	29.82	29.33	26.8	26.9	26.4	26.6
8/19/2019 19:40	45.304	36.225	33.11	31.045	29.225	29.75	29.19	26.8	26.9	26.4	26.6
8/19/2019 19:50	45.338	36.33	33.075	31.08	29.33	29.82	29.155	26.8	26.9	26.4	26.6
8/19/2019 20:00	45.338	36.365	33.25	31.15	29.295	29.855	29.085	26.8	26.9	26.4	26.6
8/19/2019 20:10	45.066	36.365	33.11	31.115	29.295	29.855	29.26	26.8	26.9	26.4	26.6
8/19/2019 20:20	44.964	36.295	33.04	31.115	29.295	29.855	29.155	26.9	26.9	26.4	26.6

8/19/2019 20:30	44.862	36.26	32.515	31.115	29.19	29.785	29.12	26.8	26.9	26.4	26.6
8/19/2019 20:40	44.828	36.365	33.04	31.22	29.295	29.855	29.225	26.8	26.9	26.4	26.6
8/19/2019 20:50	44.76	36.4	33.075	31.185	29.365	29.89	29.225	26.8	26.9	26.5	26.6
8/19/2019 21:00	44.556	36.26	33.11	31.08	29.26	29.75	29.225	26.8	26.9	26.4	26.6
8/19/2019 21:10	44.352	36.365	33.18	31.115	29.26	29.89	29.12	26.9	26.9	26.5	26.6
8/19/2019 21:20	44.488	36.365	33.11	31.115	29.33	29.82	29.225	26.8	26.9	26.5	26.6
8/19/2019 21:30	44.318	36.4	33.075	31.185	29.4	29.89	29.26	26.9	26.9	26.5	26.6
8/19/2019 21:40	44.216	36.33	33.11	31.115	29.33	29.855	29.19	26.8	26.9	26.4	26.6
8/19/2019 21:50	44.114	36.295	33.11	31.15	29.26	29.855	29.26	26.9	26.9	26.5	26.7
8/19/2019 22:00	43.978	36.435	33.25	31.22	29.365	29.82	29.225	26.8	26.9	26.5	26.6
8/19/2019 22:10	43.876	36.365	33.145	31.255	29.26	29.96	29.225	26.8	26.9	26.5	26.6
8/19/2019 22:20	43.808	36.4	33.215	31.15	29.435	29.925	29.19	26.8	26.9	26.5	26.7
8/19/2019 22:30	43.604	36.365	33.075	31.115	29.295	29.82	29.26	26.8	26.9	26.5	26.6
8/19/2019 22:40	43.502	36.33	33.11	31.08	29.295	29.82	29.155	26.8	26.9	26.5	26.6
8/19/2019 22:50	43.536	36.26	33.11	31.115	29.33	29.785	29.33	26.9	26.9	26.5	26.7
8/19/2019 23:00	43.366	36.295	33.075	31.22	29.4	29.995	29.225	26.9	27	26.5	26.7
8/19/2019 23:10	43.332	36.33	33.11	31.185	29.33	29.89	29.33	26.8	26.9	26.5	26.7
8/19/2019 23:20	43.23	36.365	33.215	31.255	29.435	29.925	29.33	26.9	26.9	26.5	26.7
8/19/2019 23:30	43.06	36.365	33.11	31.185	29.295	29.96	29.19	26.9	26.9	26.5	26.7
8/19/2019 23:40	42.992	36.365	33.18	31.15	29.365	29.89	29.26	26.8	26.9	26.5	26.7
8/19/2019 23:50	42.958	36.435	33.215	31.15	29.4	29.96	29.33	26.8	26.9	26.5	26.7

APÉNDICE C

Matrices de selección

Después del cálculo y simulación de las opciones se evaluó para seleccionar la mejor.

		Factibilidad económica	Costos de mantenimiento	Capacidad de remoción de calor	Complejidad de montaje	Seguridad	Total
	Valores	0.25	0.25	0.3	0.1	0.1	1
1	Agua con bomba de calor	2	2	1	4	4	2.1
2	Aire con ventilador centrífugo	5	4	5	4	3	4.45

		Factibilidad económica	Costos de mantenimiento	Capacidad de remoción de calor	Total
	Valores	0.4	0.35	0.25	1
1	Capa 1-2	5	5	2	4.25
2	Capa 5-6	3	3	5	3.5
3	Capa 7-8	2	2	3	2.25
4	Capa 8-9	1	1	4	1.75

APÉNDICE D

Tabla de resultados de la simulación de la columna estratigráfica

Tiempo	PG Temperatura Sólido 0 m [°C]	PG Temperatura Sólido 1 m [°C]	PG Temperatura Sólido 2 m [°C]	PG Temperatura Sólido 3 m [°C]	PG Temperatura Sólido 4 m [°C]	PG Temperatura Sólido 5 m [°C]
8/19/2019 0:00	32.22523818	34.78753372	32.76407199	31.67565699	30.34036326	29.32653066
8/19/2019 0:10	31.67565739	34.78727393	32.76514137	31.67677639	30.34150722	29.32767165
8/19/2019 0:20	31.93204322	34.78701389	32.76620925	31.67789453	30.34265024	29.32881196
8/19/2019 0:30	32.31472609	34.78675361	32.76727561	31.67901141	30.34379232	29.32995159
8/19/2019 0:40	31.86702266	34.78649309	32.76834047	31.68012702	30.34493345	29.33109052
8/19/2019 0:50	31.43566545	34.78623233	32.76940383	31.68124136	30.34607365	29.33222877
8/19/2019 1:00	31.49765076	34.78597133	32.77046568	31.68235444	30.34721291	29.33336633
8/19/2019 1:10	31.20180656	34.7857101	32.77152603	31.68346626	30.34835123	29.33450321
8/19/2019 1:20	31.01509859	34.78544862	32.77258487	31.68457682	30.34948861	29.33563939
8/19/2019 1:30	31.65356175	34.78518691	32.77364222	31.68568611	30.35062505	29.33677489
8/19/2019 1:40	31.22433116	34.78492496	32.77469807	31.68679415	30.35176055	29.3379097
8/19/2019 1:50	30.92554673	34.78466278	32.77575242	31.68790092	30.35289511	29.33904382
8/19/2019 2:00	31.67534836	34.78440036	32.77680528	31.68900644	30.35402874	29.34017725
8/19/2019 2:10	31.22630461	34.78413771	32.77785665	31.6901107	30.35516142	29.34130999
8/19/2019 2:20	31.21358704	34.78387482	32.77890652	31.6912137	30.35629316	29.34244205
8/19/2019 2:30	30.92264619	34.7836117	32.7799549	31.69231544	30.35742397	29.34357341
8/19/2019 2:40	30.81182395	34.78334834	32.78100179	31.69341593	30.35855383	29.34470408
8/19/2019 2:50	30.99852675	34.78308476	32.78204719	31.69451517	30.35968276	29.34583405
8/19/2019 3:00	30.98050148	34.78282094	32.78309111	31.69561315	30.36081075	29.34696334
8/19/2019 3:10	31.37172848	34.78255688	32.78413354	31.69670987	30.3619378	29.34809194
8/19/2019 3:20	31.01417347	34.78229259	32.78517449	31.69780535	30.36306391	29.34921984
8/19/2019 3:30	31.24005257	34.78202807	32.78621396	31.69889957	30.36418909	29.35034705
8/19/2019 3:40	31.08144064	34.78176332	32.78725194	31.69999255	30.36531332	29.35147356
8/19/2019 3:50	31.17240711	34.78149833	32.78828845	31.70108427	30.36643662	29.35259939
8/19/2019 4:00	31.37489355	34.78123311	32.78932347	31.70217475	30.36755898	29.35372452
8/19/2019 4:10	31.18240174	34.78096766	32.79035703	31.70326397	30.36868041	29.35484895
8/19/2019 4:20	31.59227364	34.78070197	32.7913891	31.70435195	30.36980089	29.35597269
8/19/2019 4:30	31.22527656	34.78043605	32.7924197	31.70543869	30.37092044	29.35709574
8/19/2019 4:40	31.04401892	34.78016989	32.79344883	31.70652418	30.37203905	29.35821809
8/19/2019 4:50	30.53535651	34.7799035	32.79447649	31.70760842	30.37315673	29.35933975
8/19/2019 5:00	31.47737154	34.77963687	32.79550268	31.70869142	30.37427346	29.36046071
8/19/2019 5:10	30.55689588	34.77937	32.7965274	31.70977318	30.37538926	29.36158097
8/19/2019 5:20	31.18825084	34.7791029	32.79755066	31.71085369	30.37650413	29.36270054
8/19/2019 5:30	30.01323875	34.77883556	32.79857245	31.71193297	30.37761806	29.36381941
8/19/2019 5:40	30.00815748	34.77856798	32.79959278	31.713011	30.37873105	29.36493758
8/19/2019 5:50	30.43430798	34.77830016	32.80061164	31.71408779	30.3798431	29.36605506
8/19/2019 6:00	29.7625417	34.77803211	32.80162905	31.71516335	30.38095422	29.36717184

8/19/2019 6:10	29.97639125	34.77776381	32.80264499	31.71623767	30.38206441	29.36828792
8/19/2019 6:20	30.27987286	34.77749527	32.80365948	31.71731075	30.38317366	29.3694033
8/19/2019 6:30	29.77629952	34.77722649	32.80467251	31.71838259	30.38428197	29.37051798
8/19/2019 6:40	30.17634446	34.77695746	32.80568409	31.7194532	30.38538935	29.37163197
8/19/2019 6:50	30.1666823	34.77668819	32.80669421	31.72052258	30.38649579	29.37274525
8/19/2019 7:00	30.20783345	34.77641867	32.80770288	31.72159072	30.3876013	29.37385784
8/19/2019 7:10	30.4449147	34.7761489	32.8087101	31.72265763	30.38870588	29.37496972
8/19/2019 7:20	30.60315871	34.77587889	32.80971587	31.72372331	30.38980952	29.37608091
8/19/2019 7:30	30.5872201	34.77560862	32.81072019	31.72478776	30.39091222	29.37719139
8/19/2019 7:40	30.83865781	34.77533811	32.81172307	31.72585098	30.39201399	29.37830118
8/19/2019 7:50	31.00074482	34.77506733	32.8127245	31.72691297	30.39311483	29.37941026
8/19/2019 8:00	31.40931026	34.77479631	32.81372449	31.72797373	30.39421473	29.38051865
8/19/2019 8:10	31.65020086	34.77452503	32.81472304	31.72903326	30.3953137	29.38162633
8/19/2019 8:20	31.64946551	34.77425349	32.81572015	31.73009157	30.39641174	29.38273331
8/19/2019 8:30	31.86924837	34.77398169	32.81671582	31.73114865	30.39750885	29.38383958
8/19/2019 8:40	32.05884192	34.77370963	32.81771005	31.73220451	30.39860502	29.38494516
8/19/2019 8:50	32.21159475	34.77343731	32.81870284	31.73325914	30.39970026	29.38605003
8/19/2019 9:00	32.21533951	34.77316473	32.8196942	31.73431255	30.40079456	29.3871542
8/19/2019 9:10	32.70010255	34.77289189	32.82068413	31.73536474	30.40188794	29.38825767
8/19/2019 9:20	32.96682896	34.77261877	32.82167263	31.73641571	30.40298038	29.38936043
8/19/2019 9:30	33.24576431	34.77234539	32.82265969	31.73746545	30.40407189	29.39046249
8/19/2019 9:40	33.45756838	34.77207174	32.82364533	31.73851398	30.40516247	29.39156385
8/19/2019 9:50	33.7169562	34.77179783	32.82462954	31.73956129	30.40625212	29.3926645
8/19/2019 10:00	33.88682062	34.77152364	32.82561232	31.74060739	30.40734084	29.39376444
8/19/2019 10:10	34.00800465	34.77124918	32.82659368	31.74165226	30.40842862	29.39486369
8/19/2019 10:20	34.4764423	34.77097445	32.82757362	31.74269592	30.40951548	29.39596222
8/19/2019 10:30	34.68707491	34.77069944	32.82855213	31.74373837	30.4106014	29.39706006
8/19/2019 10:40	35.07151955	34.77042416	32.82952923	31.7447796	30.4116864	29.39815718
8/19/2019 10:50	34.14152836	34.77014861	32.8305049	31.74581962	30.41277046	29.39925361
8/19/2019 11:00	33.75911714	34.76987278	32.83147916	31.74685843	30.4138536	29.40034932
8/19/2019 11:10	34.67473904	34.76959667	32.832452	31.74789602	30.41493581	29.40144433
8/19/2019 11:20	35.3490648	34.76932029	32.83342343	31.74893241	30.41601708	29.40253863
8/19/2019 11:30	34.50465699	34.76904362	32.83439345	31.74996759	30.41709743	29.40363223
8/19/2019 11:40	35.18706858	34.76876669	32.83536206	31.75100155	30.41817685	29.40472512
8/19/2019 11:50	34.91401344	34.76848947	32.83632925	31.75203431	30.41925534	29.4058173
8/19/2019 12:00	35.51365843	34.76821198	32.83729504	31.75306587	30.4203329	29.40690878
8/19/2019 12:10	35.15076947	34.7679342	32.83825942	31.75409622	30.42140954	29.40799955
8/19/2019 12:20	36.09946351	34.76765615	32.83922239	31.75512536	30.42248524	29.40908961
8/19/2019 12:30	37.02530135	34.76737783	32.84018396	31.7561533	30.42356002	29.41017896
8/19/2019 12:40	36.87911553	34.76709922	32.84114413	31.75718004	30.42463387	29.4112676
8/19/2019 12:50	36.46616357	34.76682034	32.8421029	31.75820557	30.4257068	29.41235554
8/19/2019 13:00	36.86459425	34.76654118	32.84306027	31.7592299	30.4267788	29.41344277
8/19/2019 13:10	36.90274096	34.76626175	32.84401624	31.76025304	30.42784987	29.41452929
8/19/2019 13:20	37.01115066	34.76598204	32.84497081	31.76127497	30.42892002	29.4156151
8/19/2019 13:30	36.79672118	34.76570206	32.84592399	31.76229571	30.42998924	29.4167002

8/19/2019 13:40	35.9015723	34.7654218	32.84687577	31.76331524	30.43105753	29.41778459
8/19/2019 13:50	37.29645905	34.76514127	32.84782616	31.76433359	30.4321249	29.41886827
8/19/2019 14:00	36.67661588	34.76486047	32.84877516	31.76535073	30.43319134	29.41995124
8/19/2019 14:10	38.25077267	34.7645794	32.84972277	31.76636668	30.43425686	29.4210335
8/19/2019 14:20	37.58261814	34.76429807	32.85066899	31.76738144	30.43532145	29.42211506
8/19/2019 14:30	37.93301631	34.76401647	32.85161383	31.768395	30.43638513	29.4231959
8/19/2019 14:40	37.8672189	34.7637346	32.85255728	31.76940738	30.43744787	29.42427603
8/19/2019 14:50	37.4645504	34.76345247	32.85349935	31.77041856	30.43850969	29.42535545
8/19/2019 15:00	36.76800616	34.76317008	32.85444003	31.77142855	30.43957059	29.42643416
8/19/2019 15:10	37.7751831	34.76288743	32.85537934	31.77243735	30.44063057	29.42751216
8/19/2019 15:20	38.77071195	34.76260453	32.85631726	31.77344497	30.44168962	29.42858945
8/19/2019 15:30	38.40875708	34.76232137	32.85725381	31.77445139	30.44274775	29.42966603
8/19/2019 15:40	38.20688804	34.76203796	32.85818898	31.77545663	30.44380496	29.43074189
8/19/2019 15:50	38.06031449	34.7617543	32.85912277	31.77646069	30.44486124	29.43181704
8/19/2019 16:00	37.93338326	34.76147039	32.8600552	31.77746356	30.44591661	29.43289149
8/19/2019 16:10	37.88021231	34.76118625	32.86098625	31.77846524	30.44697105	29.43396521
8/19/2019 16:20	37.78159378	34.76090186	32.86191592	31.77946575	30.44802457	29.43503823
8/19/2019 16:30	37.56143126	34.76061723	32.86284423	31.78046507	30.44907717	29.43611054
8/19/2019 16:40	37.69034705	34.76033237	32.86377118	31.78146321	30.45012885	29.43718213
8/19/2019 16:50	37.35337565	34.76004728	32.86469675	31.78246017	30.45117961	29.43825301
8/19/2019 17:00	37.39796446	34.75976196	32.86562096	31.78345595	30.45222945	29.43932318
8/19/2019 17:10	36.57988294	34.75947642	32.86654381	31.78445056	30.45327837	29.44039263
8/19/2019 17:20	37.11119561	34.75919065	32.86746529	31.78544398	30.45432637	29.44146137
8/19/2019 17:30	36.97847303	34.75890467	32.86838542	31.78643624	30.45537345	29.4425294
8/19/2019 17:40	36.75912525	34.75861848	32.86930418	31.78742731	30.45641962	29.44359671
8/19/2019 17:50	36.55424687	34.75833207	32.87022159	31.78841721	30.45746486	29.44466331
8/19/2019 18:00	36.47348136	34.75804546	32.87113764	31.78940594	30.45850919	29.4457292
8/19/2019 18:10	35.95919083	34.75775864	32.87205234	31.7903935	30.45955259	29.44679437
8/19/2019 18:20	35.97308148	34.75747162	32.87296568	31.79137988	30.46059509	29.44785883
8/19/2019 18:30	36.02258097	34.75718441	32.87387767	31.79236509	30.46163666	29.44892258
8/19/2019 18:40	35.80255748	34.756897	32.87478831	31.79334914	30.46267732	29.44998561
8/19/2019 18:50	35.50766827	34.75660941	32.8756976	31.79433201	30.46371706	29.45104792
8/19/2019 19:00	35.25495425	34.75632163	32.87660555	31.79531372	30.46475588	29.45210952
8/19/2019 19:10	35.14063677	34.75603367	32.87751214	31.79629426	30.46579379	29.45317041
8/19/2019 19:20	34.96116433	34.75574553	32.8784174	31.79727363	30.46683078	29.45423058
8/19/2019 19:30	34.77503715	34.75545722	32.8793213	31.79825184	30.46786686	29.45529004
8/19/2019 19:40	34.52920859	34.75516874	32.88022387	31.79922889	30.46890202	29.45634878
8/19/2019 19:50	34.35097133	34.75488009	32.8811251	31.80020477	30.46993626	29.45740681
8/19/2019 20:00	34.27662161	34.75459127	32.88202499	31.80117949	30.4709696	29.45846412
8/19/2019 20:10	34.21358639	34.7543023	32.88292353	31.80215305	30.47200202	29.45952072
8/19/2019 20:20	34.47677758	34.75401317	32.88382075	31.80312544	30.47303352	29.4605766
8/19/2019 20:30	34.48498414	34.75372389	32.88471663	31.80409668	30.47406411	29.46163176
8/19/2019 20:40	34.05568885	34.75343445	32.88561117	31.80506676	30.47509379	29.46268621
8/19/2019 20:50	33.93410991	34.75314487	32.88650438	31.80603569	30.47612256	29.46373994
8/19/2019 21:00	33.84193595	34.75285515	32.88739627	31.80700345	30.47715041	29.46479296

8/19/2019 21:10	33.56709174	34.75256529	32.88828682	31.80797006	30.47817735	29.46584526
8/19/2019 21:20	33.46138908	34.75227529	32.88917604	31.80893552	30.47920338	29.46689685
8/19/2019 21:30	33.41914657	34.75198516	32.89006394	31.80989982	30.4802285	29.46794772
8/19/2019 21:40	33.52630336	34.7516949	32.89095052	31.81086297	30.48125271	29.46899787
8/19/2019 21:50	33.65725668	34.75140451	32.89183577	31.81182497	30.482276	29.47004731
8/19/2019 22:00	33.89443779	34.75111399	32.8927197	31.81278581	30.48329839	29.47109603
8/19/2019 22:10	33.35322917	34.75082335	32.8936023	31.81374551	30.48431987	29.47214403
8/19/2019 22:20	33.23300528	34.7505326	32.89448359	31.81470406	30.48534043	29.47319132
8/19/2019 22:30	33.18626353	34.75024173	32.89536356	31.81566146	30.48636009	29.47423789
8/19/2019 22:40	32.76746635	34.74995074	32.89624222	31.81661771	30.48737884	29.47528374
8/19/2019 22:50	33.13473572	34.74965965	32.89711956	31.81757281	30.48839668	29.47632887
8/19/2019 23:00	33.19865166	34.74936844	32.89799558	31.81852677	30.48941361	29.47737329
8/19/2019 23:10	33.63724376	34.74907713	32.8988703	31.81947959	30.49042963	29.47841699
8/19/2019 23:20	33.19979568	34.74878572	32.8997437	31.82043126	30.49144475	29.47945998
8/19/2019 23:30	33.12620453	34.74849421	32.90061579	31.82138179	30.49245895	29.48050225
8/19/2019 23:40	32.34573819	34.74820259	32.90148658	31.82233118	30.49347226	29.48154379
8/19/2019 23:50	32.17556336	34.74791089	32.90235606	31.82327943	30.49448465	29.48258463

Tiempo	PG Temperatura Sólido 6 m [°C]	PG Temperatura Sólido 7 m [°C]	PG Temperatura Sólido 8 m [°C]	PG Temperatura Sólido 9 m [°C]	PG Temperatura Sólido 10 m [°C]
8/19/2019 0:00	28.96559841	27.23435818	26.70213585	26.2829776	26.20430006
8/19/2019 0:10	28.9667071	27.23497972	26.70250342	26.28308053	26.20431392
8/19/2019 0:20	28.96781518	27.23560099	26.70287084	26.28318347	26.20432782
8/19/2019 0:30	28.96892267	27.23622199	26.70323812	26.28328641	26.20434173
8/19/2019 0:40	28.97002955	27.23684271	26.70360526	26.28338936	26.20435567
8/19/2019 0:50	28.97113582	27.23746316	26.70397226	26.28349231	26.20436963
8/19/2019 1:00	28.9722415	27.23808333	26.70433912	26.28359527	26.20438361
8/19/2019 1:10	28.97334657	27.23870324	26.70470583	26.28369823	26.20439762
8/19/2019 1:20	28.97445103	27.23932287	26.70507241	26.28380119	26.20441165
8/19/2019 1:30	28.97555489	27.23994223	26.70543884	26.28390416	26.2044257
8/19/2019 1:40	28.97665815	27.24056132	26.70580513	26.28400713	26.20443977
8/19/2019 1:50	28.9777608	27.24118014	26.70617128	26.28411011	26.20445387
8/19/2019 2:00	28.97886284	27.24179868	26.70653729	26.28421309	26.20446799
8/19/2019 2:10	28.97996428	27.24241695	26.70690316	26.28431608	26.20448214
8/19/2019 2:20	28.98106511	27.24303495	26.70726889	26.28441907	26.2044963
8/19/2019 2:30	28.98216533	27.24365268	26.70763448	26.28452206	26.20451049
8/19/2019 2:40	28.98326495	27.24427014	26.70799993	26.28462506	26.2045247
8/19/2019 2:50	28.98436395	27.24488732	26.70836524	26.28472806	26.20453894
8/19/2019 3:00	28.98546235	27.24550423	26.70873041	26.28483106	26.20455319
8/19/2019 3:10	28.98656014	27.24612088	26.70909544	26.28493407	26.20456748
8/19/2019 3:20	28.98765731	27.24673725	26.70946033	26.28503709	26.20458178
8/19/2019 3:30	28.98875388	27.24735335	26.70982508	26.28514011	26.2045961
8/19/2019 3:40	28.98984984	27.24796917	26.7101897	26.28524313	26.20461045
8/19/2019 3:50	28.99094519	27.24858473	26.71055417	26.28534615	26.20462483
8/19/2019 4:00	28.99203992	27.24920002	26.7109185	26.28544918	26.20463922
8/19/2019 4:10	28.99313405	27.24981503	26.71128269	26.28555222	26.20465364
8/19/2019 4:20	28.99422756	27.25042977	26.71164675	26.28565525	26.20466808
8/19/2019 4:30	28.99532046	27.25104424	26.71201066	26.2857583	26.20468254
8/19/2019 4:40	28.99641274	27.25165845	26.71237444	26.28586134	26.20469703
8/19/2019 4:50	28.99750442	27.25227238	26.71273808	26.28596439	26.20471154
8/19/2019 5:00	28.99859548	27.25288604	26.71310158	26.28606745	26.20472607
8/19/2019 5:10	28.99968592	27.25349942	26.71346494	26.2861705	26.20474062
8/19/2019 5:20	29.00077575	27.25411254	26.71382817	26.28627356	26.2047552
8/19/2019 5:30	29.00186497	27.25472539	26.71419125	26.28637663	26.2047698
8/19/2019 5:40	29.00295357	27.25533797	26.7145542	26.2864797	26.20478442
8/19/2019 5:50	29.00404155	27.25595027	26.71491701	26.28658277	26.20479907
8/19/2019 6:00	29.00512892	27.25656231	26.71527968	26.28668585	26.20481374
8/19/2019 6:10	29.00621567	27.25717408	26.71564221	26.28678893	26.20482843
8/19/2019 6:20	29.0073018	27.25778557	26.71600461	26.28689202	26.20484314
8/19/2019 6:30	29.00838732	27.25839679	26.71636686	26.2869951	26.20485788
8/19/2019 6:40	29.00947222	27.25900775	26.71672899	26.2870982	26.20487264

8/19/2019 6:50	29.0105565	27.25961843	26.71709097	26.28720129	26.20488742
8/19/2019 7:00	29.01164017	27.26022885	26.71745281	26.28730439	26.20490223
8/19/2019 7:10	29.01272321	27.26083899	26.71781452	26.2874075	26.20491706
8/19/2019 7:20	29.01380564	27.26144886	26.71817609	26.2875106	26.20493191
8/19/2019 7:30	29.01488744	27.26205847	26.71853753	26.28761372	26.20494678
8/19/2019 7:40	29.01596863	27.2626678	26.71889883	26.28771683	26.20496168
8/19/2019 7:50	29.01704919	27.26327687	26.71925999	26.28781995	26.2049766
8/19/2019 8:00	29.01812914	27.26388566	26.71962101	26.28792307	26.20499154
8/19/2019 8:10	29.01920846	27.26449418	26.7199819	26.2880262	26.20500651
8/19/2019 8:20	29.02028716	27.26510244	26.72034265	26.28812933	26.2050215
8/19/2019 8:30	29.02136525	27.26571042	26.72070327	26.28823246	26.20503651
8/19/2019 8:40	29.02244271	27.26631814	26.72106374	26.2883356	26.20505154
8/19/2019 8:50	29.02351954	27.26692558	26.72142409	26.28843874	26.2050666
8/19/2019 9:00	29.02459576	27.26753275	26.72178429	26.28854189	26.20508168
8/19/2019 9:10	29.02567135	27.26813966	26.72214436	26.28864504	26.20509678
8/19/2019 9:20	29.02674632	27.2687463	26.7225043	26.28874819	26.2051119
8/19/2019 9:30	29.02782066	27.26935266	26.72286409	26.28885135	26.20512705
8/19/2019 9:40	29.02889438	27.26995876	26.72322376	26.2889545	26.20514222
8/19/2019 9:50	29.02996747	27.27056458	26.72358328	26.28905767	26.20515742
8/19/2019 10:00	29.03103995	27.27117014	26.72394267	26.28916083	26.20517263
8/19/2019 10:10	29.03211179	27.27177543	26.72430193	26.28926401	26.20518787
8/19/2019 10:20	29.03318301	27.27238045	26.72466105	26.28936718	26.20520313
8/19/2019 10:30	29.03425361	27.2729852	26.72502003	26.28947036	26.20521842
8/19/2019 10:40	29.03532357	27.27358968	26.72537888	26.28957354	26.20523372
8/19/2019 10:50	29.03639292	27.27419389	26.7257376	26.28967672	26.20524905
8/19/2019 11:00	29.03746163	27.27479783	26.72609617	26.28977991	26.20526441
8/19/2019 11:10	29.03852972	27.2754015	26.72645462	26.2898831	26.20527978
8/19/2019 11:20	29.03959718	27.2760049	26.72681293	26.2899863	26.20529518
8/19/2019 11:30	29.04066402	27.27660803	26.7271711	26.2900895	26.2053106
8/19/2019 11:40	29.04173022	27.2772109	26.72752914	26.2901927	26.20532605
8/19/2019 11:50	29.0427958	27.27781349	26.72788704	26.29029591	26.20534151
8/19/2019 12:00	29.04386075	27.27841582	26.72824481	26.29039911	26.205357
8/19/2019 12:10	29.04492507	27.27901787	26.72860245	26.29050233	26.20537252
8/19/2019 12:20	29.04598876	27.27961966	26.72895995	26.29060554	26.20538805
8/19/2019 12:30	29.04705182	27.28022118	26.72931731	26.29070876	26.20540361
8/19/2019 12:40	29.04811425	27.28082243	26.72967455	26.29081199	26.20541919
8/19/2019 12:50	29.04917606	27.28142341	26.73003164	26.29091521	26.20543479
8/19/2019 13:00	29.05023723	27.28202412	26.73038861	26.29101844	26.20545042
8/19/2019 13:10	29.05129777	27.28262456	26.73074543	26.29112168	26.20546607
8/19/2019 13:20	29.05235768	27.28322473	26.73110213	26.29122491	26.20548174
8/19/2019 13:30	29.05341696	27.28382464	26.73145869	26.29132815	26.20549744
8/19/2019 13:40	29.0544756	27.28442427	26.73181512	26.2914314	26.20551315
8/19/2019 13:50	29.05553362	27.28502364	26.73217141	26.29153464	26.20552889
8/19/2019 14:00	29.056591	27.28562273	26.73252757	26.29163789	26.20554466
8/19/2019 14:10	29.05764776	27.28622156	26.73288359	26.29174115	26.20556044

8/19/2019 14:20	29.05870387	27.28682012	26.73323949	26.2918444	26.20557625
8/19/2019 14:30	29.05975936	27.28741841	26.73359524	26.29194766	26.20559208
8/19/2019 14:40	29.06081421	27.28801643	26.73395087	26.29205092	26.20560794
8/19/2019 14:50	29.06186843	27.28861418	26.73430636	26.29215419	26.20562381
8/19/2019 15:00	29.06292202	27.28921166	26.73466172	26.29225746	26.20563971
8/19/2019 15:10	29.06397497	27.28980888	26.73501694	26.29236073	26.20565563
8/19/2019 15:20	29.06502729	27.29040582	26.73537203	26.29246401	26.20567158
8/19/2019 15:30	29.06607897	27.2910025	26.73572699	26.29256729	26.20568755
8/19/2019 15:40	29.06713002	27.29159891	26.73608181	26.29267057	26.20570354
8/19/2019 15:50	29.06818043	27.29219504	26.7364365	26.29277386	26.20571955
8/19/2019 16:00	29.06923021	27.29279091	26.73679106	26.29287714	26.20573559
8/19/2019 16:10	29.07027935	27.29338652	26.73714549	26.29298044	26.20575164
8/19/2019 16:20	29.07132786	27.29398185	26.73749978	26.29308373	26.20576773
8/19/2019 16:30	29.07237573	27.29457691	26.73785394	26.29318703	26.20578383
8/19/2019 16:40	29.07342296	27.29517171	26.73820796	26.29329033	26.20579996
8/19/2019 16:50	29.07446956	27.29576623	26.73856186	26.29339363	26.20581611
8/19/2019 17:00	29.07551552	27.29636049	26.73891562	26.29349694	26.20583228
8/19/2019 17:10	29.07656085	27.29695448	26.73926925	26.29360025	26.20584847
8/19/2019 17:20	29.07760554	27.2975482	26.73962274	26.29370357	26.20586469
8/19/2019 17:30	29.07864959	27.29814165	26.7399761	26.29380688	26.20588093
8/19/2019 17:40	29.079693	27.29873483	26.74032933	26.2939102	26.20589719
8/19/2019 17:50	29.08073577	27.29932774	26.74068243	26.29401352	26.20591348
8/19/2019 18:00	29.08177791	27.29992038	26.7410354	26.29411685	26.20592979
8/19/2019 18:10	29.08281941	27.30051276	26.74138823	26.29422018	26.20594612
8/19/2019 18:20	29.08386027	27.30110487	26.74174093	26.29432351	26.20596247
8/19/2019 18:30	29.08490049	27.3016967	26.7420935	26.29442684	26.20597885
8/19/2019 18:40	29.08594007	27.30228827	26.74244594	26.29453018	26.20599525
8/19/2019 18:50	29.08697901	27.30287957	26.74279824	26.29463352	26.20601167
8/19/2019 19:00	29.08801731	27.3034706	26.74315041	26.29473687	26.20602812
8/19/2019 19:10	29.08905497	27.30406137	26.74350245	26.29484021	26.20604459
8/19/2019 19:20	29.090092	27.30465186	26.74385436	26.29494356	26.20606108
8/19/2019 19:30	29.09112838	27.30524209	26.74420614	26.29504691	26.20607759
8/19/2019 19:40	29.09216412	27.30583204	26.74455778	26.29515027	26.20609412
8/19/2019 19:50	29.09319922	27.30642173	26.74490929	26.29525362	26.20611068
8/19/2019 20:00	29.09423369	27.30701115	26.74526068	26.29535698	26.20612726
8/19/2019 20:10	29.09526751	27.3076003	26.74561192	26.29546035	26.20614387
8/19/2019 20:20	29.09630069	27.30818918	26.74596304	26.29556371	26.20616049
8/19/2019 20:30	29.09733322	27.30877779	26.74631403	26.29566708	26.20617714
8/19/2019 20:40	29.09836512	27.30936614	26.74666488	26.29577045	26.20619381
8/19/2019 20:50	29.09939637	27.30995421	26.7470156	26.29587383	26.20621051
8/19/2019 21:00	29.10042699	27.31054202	26.74736619	26.29597721	26.20622722
8/19/2019 21:10	29.10145696	27.31112955	26.74771665	26.29608059	26.20624396
8/19/2019 21:20	29.10248628	27.31171682	26.74806698	26.29618397	26.20626073
8/19/2019 21:30	29.10351497	27.31230382	26.74841717	26.29628735	26.20627751
8/19/2019 21:40	29.10454301	27.31289055	26.74876724	26.29639074	26.20629432

8/19/2019 21:50	29.10557041	27.31347701	26.74911717	26.29649413	26.20631115
8/19/2019 22:00	29.10659717	27.3140632	26.74946697	26.29659752	26.206328
8/19/2019 22:10	29.10762328	27.31464913	26.74981664	26.29670092	26.20634488
8/19/2019 22:20	29.10864875	27.31523478	26.75016618	26.29680432	26.20636178
8/19/2019 22:30	29.10967357	27.31582017	26.75051559	26.29690772	26.2063787
8/19/2019 22:40	29.11069776	27.31640529	26.75086487	26.29701112	26.20639564
8/19/2019 22:50	29.11172129	27.31699013	26.75121401	26.29711453	26.20641261
8/19/2019 23:00	29.11274419	27.31757471	26.75156303	26.29721794	26.2064296
8/19/2019 23:10	29.11376644	27.31815902	26.75191191	26.29732135	26.20644661
8/19/2019 23:20	29.11478804	27.31874306	26.75226067	26.29742476	26.20646364
8/19/2019 23:30	29.115809	27.31932684	26.75260929	26.29752818	26.2064807
8/19/2019 23:40	29.11682932	27.31991034	26.75295778	26.2976316	26.20649778
8/19/2019 23:50	29.11784899	27.32049358	26.75330614	26.29773502	26.20651488

APÉNDICE E

Datos de la simulación del intercambiador en la capa 1-2

Tiempo	PG Temperatura Fluido Entrada del intercambiador [°C]	PG Temperatura Fluido Salida del intercambiador [°C]
8/19/2019 0:00	30.45537857	32.95015489
8/19/2019 0:10	30.39073871	32.90117026
8/19/2019 0:20	30.27643995	32.84953312
8/19/2019 0:30	30.13728834	32.80039108
8/19/2019 0:40	30.04282129	32.74859597
8/19/2019 0:50	29.98810508	32.69984933
8/19/2019 1:00	29.97314276	32.64994788
8/19/2019 1:10	29.97807051	32.603389
8/19/2019 1:20	29.8936119	32.55715177
8/19/2019 1:30	29.80911691	32.51323431
8/19/2019 1:40	29.73951527	32.46852208
8/19/2019 1:50	29.7742201	32.4268788
8/19/2019 2:00	29.89837377	32.386495
8/19/2019 2:10	29.96794509	32.3514046
8/19/2019 2:20	29.97790268	32.31896141
8/19/2019 2:30	29.95306712	32.28903554
8/19/2019 2:40	29.90337725	32.25993387
8/19/2019 2:50	29.85863953	32.2331718
8/19/2019 3:00	29.85363396	32.20478557
8/19/2019 3:10	29.83871329	32.17876362
8/19/2019 3:20	29.79399076	32.15210112
8/19/2019 3:30	29.69958946	32.1277783
8/19/2019 3:40	29.64986095	32.09977524
8/19/2019 3:50	29.64981797	32.07408632
8/19/2019 4:00	29.64979686	32.04617265
8/19/2019 4:10	29.65971687	32.02107375
8/19/2019 4:20	29.64480864	31.99569284
8/19/2019 4:30	29.61002556	31.97337979
8/19/2019 4:40	29.50072826	31.94751041
8/19/2019 4:50	29.39139782	31.92387559
8/19/2019 5:00	29.36152481	31.89544165
8/19/2019 5:10	29.31678735	31.8778616
8/19/2019 5:20	29.2174136	31.85315247
8/19/2019 5:30	29.18258392	31.82428438
8/19/2019 5:40	29.13287792	31.79550674

8/19/2019 5:50	29.04840244	31.766492
8/19/2019 6:00	29.07814623	31.73792594
8/19/2019 6:10	29.08807277	31.70891992
8/19/2019 6:20	29.0830987	31.6821489
8/19/2019 6:30	29.15262188	31.65542068
8/19/2019 6:40	29.20231088	31.63261809
8/19/2019 6:50	29.32153365	31.61284419
8/19/2019 7:00	29.53515713	31.59625927
8/19/2019 7:10	29.78856528	31.5855782
8/19/2019 7:20	29.98240104	31.58189122
8/19/2019 7:30	30.11661841	31.58178434
8/19/2019 7:40	30.34517514	31.58833274
8/19/2019 7:50	30.71283763	31.59881701
8/19/2019 8:00	31.14513494	31.61908257
8/19/2019 8:10	31.41357615	31.64499071
8/19/2019 8:20	31.46344043	31.67797412
8/19/2019 8:30	31.60256818	31.71233121
8/19/2019 8:40	31.945368	31.75104827
8/19/2019 8:50	32.20386758	31.79038884
8/19/2019 9:00	32.35818563	31.83466213
8/19/2019 9:10	32.75048935	31.88030582
8/19/2019 9:20	33.21735043	31.93307898
8/19/2019 9:30	33.67454606	31.99083909
8/19/2019 9:40	34.05728557	32.05936092
8/19/2019 9:50	34.17678025	32.13204545
8/19/2019 10:00	34.45006622	32.2135865
8/19/2019 10:10	34.97173286	32.2966039
8/19/2019 10:20	35.3147114	32.38840767
8/19/2019 10:30	35.58313543	32.46673229
8/19/2019 10:40	36.01044502	32.55820338
8/19/2019 10:50	36.21929232	32.65055063
8/19/2019 11:00	36.39825861	32.74494852
8/19/2019 11:10	36.57720142	32.83714271
8/19/2019 11:20	36.80579668	32.93147386
8/19/2019 11:30	37.10393998	33.02193723
8/19/2019 11:40	37.14882784	33.11597047
8/19/2019 11:50	37.20852356	33.20277248
8/19/2019 12:00	37.53141689	33.04942703
8/19/2019 12:10	37.7203198	33.15580902
8/19/2019 12:20	37.97871451	32.95410701
8/19/2019 12:30	38.2768638	33.32377166
8/19/2019 12:40	38.63462313	33.08461752
8/19/2019 12:50	39.00234384	33.46372049
8/19/2019 13:00	39.32040815	33.03505405
8/19/2019 13:10	39.90663385	33.29284765

8/19/2019 13:20	40.18504533	33.43969765
8/19/2019 13:30	40.21506242	33.41689465
8/19/2019 13:40	40.23006865	33.61039706
8/19/2019 13:50	40.36919709	33.62522365
8/19/2019 14:00	40.53318698	33.79623164
8/19/2019 14:10	40.29990436	33.6612774
8/19/2019 14:20	40.43893727	33.77639668
8/19/2019 14:30	40.74195511	33.82593972
8/19/2019 14:40	40.53353813	33.95959297
8/19/2019 14:50	40.6477579	33.95027738
8/19/2019 15:00	40.93089927	34.09628312
8/19/2019 15:10	41.07506647	34.08287651
8/19/2019 15:20	41.10498107	34.10396724
8/19/2019 15:30	40.82198691	34.05719461
8/19/2019 15:40	40.414712	34.2404893
8/19/2019 15:50	40.13647574	34.18721508
8/19/2019 16:00	40.03207286	34.30289973
8/19/2019 16:10	39.96746529	34.2660078
8/19/2019 16:20	40.00717333	34.36002422
8/19/2019 16:30	40.10155532	34.32412261
8/19/2019 16:40	39.96255694	34.52194808
8/19/2019 16:50	39.74899107	34.5437414
8/19/2019 17:00	39.40128907	34.53646226
8/19/2019 17:10	38.76548415	34.40086222
8/19/2019 17:20	38.2040375	34.51615544
8/19/2019 17:30	37.97531657	34.4553457
8/19/2019 17:40	37.87086838	34.46463286
8/19/2019 17:50	37.66220133	34.56934823
8/19/2019 18:00	37.26479111	34.47091062
8/19/2019 18:10	36.73817722	34.45337767
8/19/2019 18:20	36.40020779	34.42733342
8/19/2019 18:30	36.28080884	34.38288429
8/19/2019 18:40	36.06217545	34.34842814
8/19/2019 18:50	35.6597673	34.30475326
8/19/2019 19:00	35.30688282	34.25964852
8/19/2019 19:10	35.06819957	34.21612505
8/19/2019 19:20	34.83467062	34.17805628
8/19/2019 19:30	34.58627564	34.12327937
8/19/2019 19:40	34.27825278	34.06932032
8/19/2019 19:50	33.98513337	34.01980383
8/19/2019 20:00	33.7861836	33.95716847
8/19/2019 20:10	33.64205633	33.90552763
8/19/2019 20:20	33.5226963	33.84294323
8/19/2019 20:30	33.36366402	33.79366648
8/19/2019 20:40	33.21950595	33.7339658

8/19/2019 20:50	33.13495579	33.81730202
8/19/2019 21:00	32.98090801	33.82488538
8/19/2019 21:10	32.82186263	33.71324637
8/19/2019 21:20	32.73234239	33.66951013
8/19/2019 21:30	32.59319016	33.62232772
8/19/2019 21:40	32.45898467	33.55581441
8/19/2019 21:50	32.39431108	33.51976286
8/19/2019 22:00	32.32966935	33.45674272
8/19/2019 22:10	32.2600672	33.42279778
8/19/2019 22:20	32.15073303	33.36062606
8/19/2019 22:30	31.96688343	33.32853312
8/19/2019 22:40	31.86246084	33.26987868
8/19/2019 22:50	31.82263322	33.23767916
8/19/2019 23:00	31.74310641	33.17916536
8/19/2019 23:10	31.6834351	33.14861629
8/19/2019 23:20	31.62873874	32.97000406
8/19/2019 23:30	31.52438078	32.91316538
8/19/2019 23:40	31.35046873	33.00656022
8/19/2019 23:50	31.16162127	33.02236026

APÉNDICE F

Datos de entrada a simulación de columna estratigráfica

Global Mesh Settings	
Automatic initial mesh	On
Result resolution level	3
Advanced narrow channel refinement	Off
Refinement in solid region	Off
Geometry Resolution	
Evaluation of minimum gap size	Automatic
Evaluation of minimum wall thickness	Manual
Minimum wall thickness	0.010 m
Computational Domain (Size)	
X min	-11.660 m
X max	1.196 m
Y min	1.000 m
Y max	16.580 m
Z min	2.111 m
Z max	14.890 m
Computational Domain (Boundary Conditions)	
2D plane flow	None
At X min	Default
At X max	Default
At Y min	Default
At Y max	Default
At Z min	Default
At Z max	Default

Physical Features	
Heat conduction in solids	On
Heat conduction in solids only	Off
Radiation	On
Time dependent	On
Gravitational effects	On
Rotation	Off

Flow type	Turbulent only
High Mach number flow	Off
Relative humidity	Table from time
Default roughness	0 micrometer
Gravitational Settings	
X component	0 m/s ²
Y component	-9.81 m/s ²
Z component	0 m/s ²
Radiation	
Default wall radiative surface	Absorbent wall
Radiation model	DO
Environment radiation	
Radiative Temperature	Table from time
Spectrum	Blackbody
Solar Radiation	
Intensity	Table from time
Solar Radiation (Direction)	
X component	0
Y component	-1
Z component	0
Spectrum	
Number of bands	1
Ambient Conditions (Thermodynamic parameters)	
Static Pressure	Table from time
Temperature	Table from time
Ambient Conditions (Velocity parameters)	
Velocity vector	
Velocity in X direction	Table from time
Velocity in Y direction	0 m/s
Velocity in Z direction	0 m/s
Ambient Conditions (Solid parameters)	
Default material	capa 1
Temperature of solid bodies	Table from time (Solo temperatura inicial)
Radiation Transparency	Opaque
Material Settings	
Fluids	Air
Solids	capa 1 Capa 2 Capa 3

	Capa 4 Capa 5 Capa 6 Capa 7 Capa 8 Capa 9 capa 10
Material Settings (Solid Materials)	
capa 1 Solid Material 1 Components: Capa de 0-1 m-1@Capas Solid substance: capa 1 Radiation Transparency: Opaque	
Capa 2 Solid Material 1 Components: Capa de 1-2 m-1@Capas Solid substance: Capa 2 Radiation Transparency: Opaque	
Capa 3 Solid Material 1 Components: Capa de 2-3 m-1@Capas Solid substance: Capa 3 Radiation Transparency: Opaque	
Capa 4 Solid Material 1 Components: Capa de 3-4 m-1@Capas Solid substance: Capa 4 Radiation Transparency: Opaque	
Capa 5 Solid Material 1 Components: Capa de 4-5 m-1@Capas Solid substance: Capa 5 Radiation Transparency: Opaque	
Capa 6 Solid Material 1 Components: Capa de 5-6 m-1@Capas Solid substance: Capa 6 Radiation Transparency: Opaque	
Capa 7 Solid Material 1 Components: Capa de 6-7 m-1@Capas Solid substance: Capa 7 Radiation Transparency: Opaque	
Capa 8 Solid Material 1 Components: Capa de 7-8 m-1@Capas Solid substance: Capa 8 Radiation Transparency: Opaque	
Capa 9 Solid Material 1 Components: Capa de 8-9 m-1@Capas Solid substance: Capa 9 Radiation Transparency: Opaque	
capa 10 Solid Material 1 Components: Capa de 9-10 m-1@Capas Solid substance: capa 10 Radiation Transparency: Opaque	
Material Settings (Local Initial Conditions)	
Initial Condition 1 Components: Capa de 0-1 m-1@Capas Coordinate system: Global coordinate system Reference axis: X Temperature of solid bodies: 35.35 °C	
Initial Condition 2 Components: Capa de 1-2 m-1@Capas Coordinate system: Global coordinate system Reference axis: X Temperature of solid bodies: 32.24 °C	

Initial Condition 3 Components: Capa de 2-3 m-1@Capas Coordinate system: Global coordinate system Reference axis: X Temperature of solid bodies: 30.42 °C	
Initial Condition 4 Components: Capa de 3-4 m-1@Capas Coordinate system: Global coordinate system Reference axis: X Temperature of solid bodies: 28.56 °C	
Initial Condition 5 Components: Capa de 4-5 m-1@Capas Coordinate system: Global coordinate system Reference axis: X Temperature of solid bodies: 29.23 °C	
Initial Condition 6 Components: Capa de 5-6 m-1@Capas Coordinate system: Global coordinate system Reference axis: X Temperature of solid bodies: 28.42 °C	
Initial Condition 7 Components: Capa de 6-7 m-1@Capas Coordinate system: Global coordinate system Reference axis: X Temperature of solid bodies: 26.80 °C	
Initial Condition 8 Components: Capa de 7-8 m-1@Capas Coordinate system: Global coordinate system Reference axis: X Temperature of solid bodies: 26.70 °C	
Initial Condition 9 Components: Capa de 8-9 m-1@Capas Coordinate system: Global coordinate system Reference axis: X Temperature of solid bodies: 26.10 °C	
Initial Condition 10 Components: Capa de 9-10 m-1@Capas Coordinate system: Global coordinate system Reference axis: X Temperature of solid bodies: 26.20 °C	
Calculation Control Options (Finish Conditions)	
Finish Conditions	If all are satisfied
Maximum physical time	604800 s
Calculation Control Options (Solver Refinement)	
Refinement	Disabled
Calculation Control Options (Results Saving)	
Save before refinement	On
Calculation Control Options (Advanced Control Options)	
Flow Freezing Flow freezing strategy: Disabled Manual time step (Freezing): Off Manual time step: 600 s Discretization level: 3	

APÉNDICE G

Datos de entrada a simulación del intercambiador de calor

Global Mesh Settings	
Automatic initial mesh	On
Result resolution level	3
Advanced narrow channel refinement	Off
Refinement in solid region	Off
Geometry Resolution	
Evaluation of minimum gap size	Automatic
Evaluation of minimum wall thickness	Automatic
Computational Domain (Size)	
X min	-7.250 m
X max	7.250 m
Y min	-10.250 m
Y max	5.000 m
Z min	-7.250 m
Z max	7.250 m
Computational Domain (Boundary Conditions)	
2D plane flow	None
At X min	Default
At X max	Default
At Y min	Default
At Y max	Default
At Z min	Default
At Z max	Default

Physical Features	
Heat conduction in solids	On
Heat conduction in solids only	Off
Radiation	Off
Time dependent	On
Gravitational effects	On
Rotation	Off
Flow type	Turbulent only

High Mach number flow	Off
Humidity	Off
Default roughness	0 micrometer
Gravitational Settings	
X component	0 m/s ²
Y component	-9.81 m/s ²
Z component	0 m/s ²
Default outer wall condition	
Wall temperature	Table from time
Initial Conditions (Thermodynamic parameters)	
Static Pressure	Table from time
Temperature	Table from time
Initial Conditions (Velocity parameters)	
Velocity vector	
Velocity in X direction	0 m/s
Velocity in Y direction	0 m/s
Velocity in Z direction	0 m/s
Ambient Conditions (Solid parameters)	
Default material	PVC 0.007 Plasticized
Temperature of solid bodies	Table from time (Solo temperatura inicial)
Material Settings	
Fluids	Air
Solids	PVC 0.007 Plasticized capa 1 Capa 2 Capa 3 Capa 4 Capa 5 Capa 6 Capa 7 Capa 8 Capa 9 capa 10 PVC
Material Settings (Solid Materials)	
capa 1 Solid Material 1 Components: Capa de 0-1 m (Intercambiador-agujero)-1@Capas e Intercambiador 6.5 m Solid substance: capa 1	
Capa 2 Solid Material 1 Components: Capa de 1-2 m (Intercambiador 1.5 m)-1@Capas e Intercambiador 1.5 m Solid substance: Capa 2	
Capa 3 Solid Material 1 Components: Capa de 2-3 m-1@Capas e Intercambiador 1.5 m Solid substance: Capa 3	

Capa 4 Solid Material 1 Components: Capa de 3-4 m-1@Capas e Intercambiador 2.5 m Solid substance: Capa 4	
Capa 5 Solid Material 1 Components: Capa de 4-5 m-1@Capas e Intercambiador 3.5 m Solid substance: Capa 5	
Capa 6 Solid Material 1 Components: Capa de 5-6 m-1@Capas e Intercambiador 4.5 m Solid substance: Capa 6	
Capa 7 Solid Material 1 Components: Capa de 6-7 m-1@Capas e Intercambiador 5.5 m Solid substance: Capa 7	
Capa 8 Solid Material 1 Components: Capa de 7-8 m-1@Capas e Intercambiador 6.5 m Solid substance: Capa 8	
Capa 9 Solid Material 1 Components: Capa de 8-9 m-1@Capas e Intercambiador 6.5 m Solid substance: Capa 9	
capa 10 Solid Material 1 Components: Capa de 9-10 m-1@Capas e Intercambiador 6.5 m Solid substance: capa 10	
PVC Solid Material 1 Components: Intercambiador 200 m (1.5 m)-1@Capas e Intercambiador 1.5 m Solid substance: PVC	
Boundary Conditions (Inlet Volume Flow 1)	
Type	Inlet Volume Flow
Faces	LID1-1/Imported1//Face
Coordinate system	Face Coordinate System
Reference axis	X
Flow vectors direction	Normal to face
Volume flow rate	0.1417 m ³ /s
Fully developed flow	Yes
Approximate pressure	Table from time
Temperature type	Temperature of initial components
Temperature	Table from time
Boundary Conditions (Environment Pressure 1)	
Type	Environment Pressure
Faces	LID2-1/Imported1//Face
Coordinate system	Face Coordinate System
Reference axis	X
Environment pressure	Table from time
Temperature type	Temperature of initial components
Temperature	Table from time
Material Settings (Local Initial Conditions)	
Initial Condition 1 Components: Capa de 0-1 m (Intercambiador-agujero)-1@Capas e Intercambiador 6.5 m Coordinate system: Global coordinate system Reference axis: X Temperature of solid bodies: Table from time	
Initial Condition 2 Components: Capa de 1-2 m (Intercambiador 1.5 m)-1@Capas e Intercambiador 1.5 m Coordinate system: Global coordinate system	

Reference axis: X Temperature of solid bodies: Table from time	
Initial Condition 3 Components: Capa de 2-3 m-1@Capas e Intercambiador 1.5 m Coordinate system: Global coordinate system Reference axis: X Temperature of solid bodies: Table from time	
Initial Condition 4 Components: Capa de 3-4 m-1@Capas e Intercambiador 2.5 m Coordinate system: Global coordinate system Reference axis: X Temperature of solid bodies: Table from time	
Initial Condition 5 Components: Capa de 4-5 m-1@Capas e Intercambiador 3.5 m Coordinate system: Global coordinate system Reference axis: X Temperature of solid bodies: Table from time	
Initial Condition 6 Components: Capa de 5-6 m-1@Capas e Intercambiador 4.5 m Coordinate system: Global coordinate system Reference axis: X Temperature of solid bodies: Table from time	
Initial Condition 7 Components: Capa de 6-7 m-1@Capas e Intercambiador 5.5 m Coordinate system: Global coordinate system Reference axis: X Temperature of solid bodies: Table from time	
Initial Condition 8 Components: Capa de 7-8 m-1@Capas e Intercambiador 6.5 m Coordinate system: Global coordinate system Reference axis: X Temperature of solid bodies: Table from time	
Initial Condition 9 Components: Capa de 8-9 m-1@Capas e Intercambiador 6.5 m Coordinate system: Global coordinate system Reference axis: X Temperature of solid bodies: Table from time	
Initial Condition 10 Components: Capa de 9-10 m-1@Capas e Intercambiador 6.5 m Coordinate system: Global coordinate system Reference axis: X Temperature of solid bodies: Table from time	
Calculation Control Options (Finish Conditions)	
Finish Conditions	If all are satisfied
Maximum physical time	258600 s
Calculation Control Options (Solver Refinement)	
Refinement	Disabled
Calculation Control Options (Results Saving)	
Save before refinement	On
Calculation Control Options (Advanced Control Options)	
Flow Freezing Flow freezing strategy: Disabled Manual time step (Freezing): Off Manual time step: 600 s	

APÉNDICE H

Capturas de los catálogos

El ventilador centrifugo se seleccionó el ventilador PL-154 del catálogo de Soler&Palau.



Características

- Conjunto carcasa en una sola pieza fabricada en polipropileno.
- Rodete tipo álabes curvos adelantados.
- Opción de motor a prueba de explosión clase I grupo D.
- Bajo nivel sonoro.
- Motor estándar cerrado con protección IP55.

Soler&Palau
Ventilation Group

PL Centrifugos para atmósferas corrosivas o explosivas

PL/E 10, 15, 20, 25, 30 y 35

Brindan una gran eficiencia caudal-presión, en atmósferas donde el alto grado de sustancias corrosivas o explosivas disueltas en el ambiente, hacen imposible la colocación de extractores convencionales.

Aplicaciones



Accesorios



Características técnicas

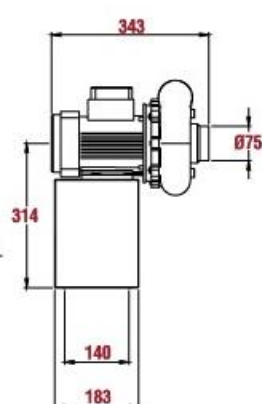
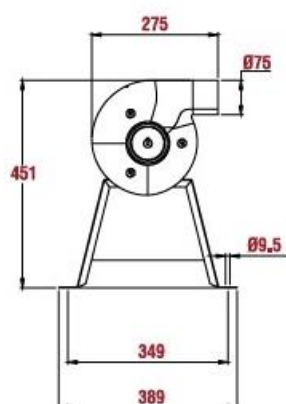
*Los valores de velocidad, potencia, voltaje e intensidad son nominales

Modelo	Velocidad RPM	Potencia HP	Tensión Volts	Intensidad A	Caudal a descarga libre m³/hr / CFM	Potencia sonora dB(A)*	Peso aprox. kg
PL-102	3450	1/2	220 / 440	1.60 / 0.80	272 / 160	70	8
PL-152	3450	1/2	220 / 440	1.60 / 0.80	1,037 / 610	72	11
PL /PLE-154	1700	1/2	220 / 440	1.90 / 1.00	510 / 300	54	10
PL-202	3450	1 1/2	208-230 / 460	4.00 / 2.00	2,082 / 1,225	75	15
PL /PLE-204	1700	1/2	220 / 440	1.90 / 1.00	1,530 / 900	58	12
PL /PLE-254	1740	3/4	208-230 / 460	2.80 / 1.40	2,890 / 1,700	58	16
PL /PLE-304	1765	2	208-230 / 460	5,738 / 3,375	5,738 / 3,375	54	28
PL /PLE-354	1765	10	208-230 / 460	10,431 / 6,136	10,431 / 6,136	81	75
PL-356	1150	5	208-230 / 460	7,715 / 4,538	7,715 / 4,541	78	68

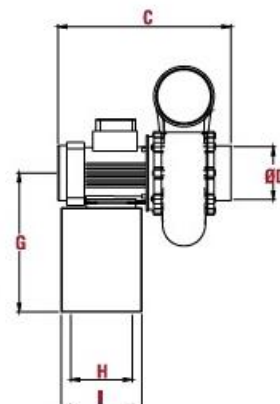
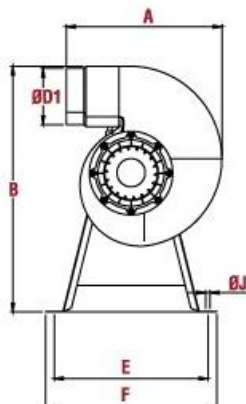
*Nivel sonoro medido con acuerdo con las normas AMCA 300 / 05 y 301 / 05
Modelo PLE: Equipo a prueba de explosión.

– Dimensiones

MODELOS 10



MODELOS 15-35



Dimensiones de motor a prueba de explosión

Dimensiones en mm

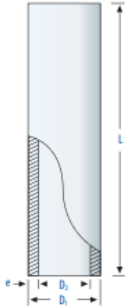
Modelo	15		20		25	30	35	
Motor	1/2 HP 4P	1/2 HP 2P	1/2 HP 4P	1/2 HP 2P	1/4 HP 4P	2 HP 4P	5 HP 6P	10 HP 4P
A	353	353	390	390	465	547	726	726
B	569 556	556	619 616	616	779 777	898 897	1172	1169 1172
C	463 392	392	479 471	490	518 547	554 538	771	819 771
ØD	120	120	158	158	200	248	323	323
ØD1	127	127	165	165	217	274	320	320
E	349	349	349	349	385	407	555	555
F	389	389	389	389	425	447	605	605
G	327 314	314	327 324	324	399 397	442 441	607	604 607
H	140	140	140	140	140	140	220	220
I	183	183	183	183	183	183	303	303
J	9.5	9.5	9.5	9.5	9.5	9.5	11	11

Las tuberías se seleccionaron de un catálogo CRESCO.

VENTAJAS

- ▶ *Bajo Coeficiente de Fricción*, mayor eficiencia.
- ▶ *Paredes Lisas* permitiendo una descarga más rápida.
- ▶ *Bajo Peso*, facilitando su instalación, transporte e instalación.
- ▶ *Facilidad de Instalación*, mayor avance en menos tiempo.
- ▶ *Alta Resistencia al impacto* y gran flexibilidad.
- ▶ *Auto Extinguible*, no propaga flama.
- ▶ *Diámetros disponibles desde 1-½" hasta 8".*
- ▶ *Fabricación de acuerdo a NMX-E-199/1.*

Diámetro Exterior (mm)	Diámetro Interior (mm)	Espesor Mínimo (mm)	Peso Promedio (kg/m)	Cantidad por Camión (Torton)
D ₁	D ₂	e		
40	36.40	1.8	0.3185	2,000
50	46.40	1.8	0.4023	1,350
75	71.40	1.8	0.6112	700
110	105.40	2.3	1.1505	500
160	153.40	3.3	2.4023	238
200	192.00	4.0	3.6440	143



Para el sistema de control:

PCS110FZ

PCS 110FZ Operator Panel

Manufacturers

Lauer

Estimated Shipping Size

Dimensions: 13.0" x 8.0" x 2.0"

(33.0 cm x 20.3 cm x 5.1 cm)

Weight: 3 lbs 8.0 oz (1.6kg)

Tariff Code: 8528510000

Country of Origin: Germany

Ships from Webster NY, USA





MODEL	Min ON (Cut-In) PSI	Max Off (Cut-Out) PSI	Differential PSI	Factory Setting PSI	Electrical Rating		Pipe Fittings	Contact Arrangement
					120VAC	240VAC		
LF10-1H1	25	100	20-30	50-80	20A	12A	NPT 1/4 Male or Female NPT	NC