

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA**



***“Diseño y simulación de un intercambiador de calor geotérmico  
empleando el módulo Flow Simulation de SolidWorks”***

**TESIS PARA OBTENER EL GRADO DE:  
INGENIERO MECÁNICO**

Presenta:

***Daniel Alfonso Huape Bermúdez***

Director de Tesis:

***Dr. Fernando Lara Chávez***

Co-Directora:

***Dra. Arilí Cárdenas Robles***

***Mexicali, Baja California***

***Diciembre de 2024***

***Con cariño dedico el presente trabajo...***

***A mis padres, Alejandra Bermudez Rojas y Simon Huape Estela, por haberme guiado por un camino lleno de enseñanza, por su cariño, paciencia y apoyo incondicional.***

***A mis hermanos, Ismael y Diana, por su cariño, consejos y buenos deseos que han servido como motivación en la realización del presente trabajo.***

***A mis amigos Daniel y Fabián por su compañía y confianza a lo largo de estos años.***

***A mi familia y a todas las personas que estuvieron involucradas durante la carrera y brindaron su apoyo.***

## Agradecimientos

### **Dr. Fernando Lara Chávez**

Director de tesis, por su disponibilidad y tiempo dedicado, por compartir sus conocimientos y orientarme dándome la oportunidad de desarrollar el presente trabajo, por la confianza, así como brindar su apoyo durante la carrera ampliando mis conocimientos en el área térmica.

### **Dra. Arili Cárdenas Robles**

Codirectora de tesis, por su apoyo durante la realización del presente trabajo, por sus correcciones puntuales y por transmitirme conocimientos en el área de diseño durante la carrera.

### **Dr. Oscar Alejandro López Núñez**

Por su amplia disponibilidad, por transmitirme los conocimientos necesarios en el apartado de simulación de fluidos y por el apoyo brindado durante la carrera.

Al Comité Sinodal, **Dr. Israel Saucedo Meza**, **Dr. Ricardo López Zavala**, **M.I. Eddna Teresa Valenzuela Martínez**, por su disponibilidad, por sus comentarios y aportes realizados en el presente trabajo de tesis enriqueciendo el trabajo final.

A mi compañera de carrera la **Ing. Ilse Lizbeth Campos Pérez**, por su apoyo durante la carrera, el conocimiento y tiempo compartido, así como la motivación por objetivos en común.

Agradezco a la **Universidad Autónoma de Baja California** por darme la oportunidad de desarrollarme profesionalmente, así como brindarme las herramientas para desenvolverme en mi proceso de formación.

## Resumen

En la actualidad, los intercambiadores de calor convencionales son fundamentales en la industria para procesos de calentamiento y enfriamiento entre dos fluidos. Sin embargo, la eficiencia de la transferencia de calor está a menudo limitada por la diferencia de temperatura entre el sistema y el medio circundante. En respuesta a la necesidad de mejorar la eficiencia y los beneficios que esto conlleva, se han explorado nuevas alternativas como lo son los intercambiadores de calor geotérmicos.

En el presente trabajo se evalúa un intercambiador de calor geotérmico tipo U, utilizando el software de simulación CFD SolidWorks Flow Simulation para estimar su comportamiento térmico, en donde el enfoque principal fue la estimación de los perfiles térmicos en un intercambiador de calor geotérmico para aplicaciones de baja entalpía.

La simulación se realizó durante 12,000 s con agua como fluido de trabajo y una profundidad del intercambiador de 24 metros. Se consideró una temperatura de entrada constante del fluido de  $35.52^{\circ}\text{C}$  a lo largo de la simulación, donde la temperatura de salida fue de  $31.46^{\circ}\text{C}$ , En el tiempo 3,000 s de simulación, la temperatura del fluido fue de 30.25, sin embargo, siendo esta la temperatura más baja registrada, a partir de ese instante el fluido empezó a disipar el calor en menor medida en consecuencia a la saturación de calor en el subsuelo.

Respecto a la comparativa efectuada del modelo planteado en este trabajo con datos experimentales en un tiempo de 2,280 s, la temperatura de salida del fluido en la simulación fue de  $30.31^{\circ}\text{C}$ , presentando una variación de  $0.06^{\circ}\text{C}$  respecto a la experimental. De acuerdo a los resultados obtenidos, la herramienta de simulación CFD fue capaz de predecir el comportamiento térmico del intercambiador de calor geotérmico. En futuros trabajos se recomienda realizar un estudio paramétrico que permita cuantificar la ganancia o pérdida de calor del intercambiador, evaluando aspectos tales como profundidades, materiales, diámetros y espesores del intercambiador, así como flujo másico y conductividades térmicas del subsuelo.

# Contenido

Resumen.....	iv
Lista de figuras.....	vii
Lista de tablas.....	ix
Nomenclatura.....	ix
Capítulo 1 INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Problemática.....	1
1.2 Justificación.....	2
1.3 Antecedentes.....	4
1.4 Objetivos.....	8
1.5 Descripción general de la tesis.....	9
Capítulo 2. MARCO REFERENCIAL.....	10
2.1 Energía geotérmica.....	10
2.2 Energía geotérmica de baja entalpía.....	11
2.3 Usos directos de la energía geotérmica.....	12
2.4 Características del subsuelo (enfoque geotérmico de baja entalpía)....	14
2.5 Intercambiadores de calor geotérmicos.....	16
2.5.1 Tipos de intercambiadores de calor geotérmicos.....	19
2.5.1.1 Tubo concéntrico vertical (carcasa coaxial).....	19
2.5.1.2 De baja profundidad (horizontales).....	21
2.5.1.3 Intercambiador de calor tipo U.....	23
2.6 Análisis CFD.....	27
2.6.1 Proceso de simulación CFD.....	30
Capítulo 3 MODELADO Y SIMULACIÓN.....	32
3.1 Descripción del sistema.....	32
3.2 Propiedades del sistema.....	34
3.3 Condiciones iniciales.....	35
3.4 Modelado de componentes del ICGU.....	38
3.4.1. Modelado de la tubería.....	38
3.4.2. Modelado del subsuelo.....	41
3.5 Ensamble.....	42
3.6 Simulación.....	43

3.7 Convergencia de la simulación.....	52
3.8 Independencia de malla.....	54
Capítulo 4 RESULTADOS.....	56
4.1 Instante $t= 2,280$ segundos.....	56
4.2 Comportamiento térmico a través del tiempo.....	60
4.3 Disipación de calor horaria.....	65
Capítulo 5. CONCLUSIONES.....	67
5.1 Conclusiones.....	67
5.2. Trabajos futuros.....	69
Referencias.....	70

## Lista de figuras

<i>Figura 2.1</i>	<i>Recurso geotérmico</i> .....	10
<i>Figura 2.2</i>	<i>Distribución de la capacidad instalada en aplicaciones de usos directos de la energía geotérmica [12].</i> .....	13
<i>Figura 2.3</i>	<i>Uso de las aplicaciones de usos directos de la energía geotérmica [12].</i> .....	13
<i>Figura 2.4</i>	<i>Comportamiento térmico del subsuelo [13].</i> .....	15
<i>Figura 2.5</i>	<i>Intercambiador de calor geotérmico en proceso de disipación de calor (figura propia).</i> .....	17
<i>Figura 2.6</i>	<i>Secuencia en la transferencia de calor de un IC geotérmico de tubería simple en modo de disipación (figura propia).</i> .....	18
<i>Figura 2.7</i>	<i>Intercambiador de calor geotérmico en proceso de captación de calor (figura propia).</i> .....	18
<i>Figura 2.8</i>	<i>Geometría de un intercambiador de calor de tubo concéntrico [14].</i>	19
<i>Figura 2.9</i>	<i>Curva de comportamiento térmico para aplicación de calentamiento [15].</i> .....	20
<i>Figura 2.10</i>	<i>Tipos de configuración en intercambiadores de calor de baja profundidad de espiras verticales, tipo slinky y disposición recta (modificación propia) [16–18].</i> .....	21
<i>Figura 2.11</i>	<i>Disposiciones rectas simple, paralelo y tipo serpentín respectivamente [18].</i> .....	22
<i>Figura 2.12</i>	<i>Configuraciones simple, doble, serie y paralelo (figura propia).</i> .....	23
<i>Figura 2.13</i>	<i>Curva de comportamiento térmico para aplicación de calentamiento en ICG tipo U [15].</i> .....	24
<i>Figura 2.14</i>	<i>Conjunto de volúmenes finitos “malla-mesh”</i> .....	27
<i>Figura 3.1</i>	<i>Esquema de flujo de calor para un dispositivo emisor de calor (figura propia).</i> .....	32
<i>Figura 3.2</i>	<i>Histórico de temperaturas del ambiente en Mexicali, Baja California[20].</i> .....	33
<i>Figura 3.3</i>	<i>Gráfico de comportamiento térmico del subsuelo.</i> .....	36
<i>Figura 3.4</i>	<i>Interfaz de SolidWorks para modelado.</i> .....	38
<i>Figura 3.5</i>	<i>Dimensiones del perfil de la tubería U.</i> .....	39
<i>Figura 3.6</i>	<i>Perfil de la sección transversal de la tubería.</i> .....	39
<i>Figura 3.7</i>	<i>Vista de corte y tubería terminada.</i> .....	40

<i>Figura 3.8 Extrusión de cilindro (subsuelo)</i> .....	41
<i>Figura 3.9 Modelo del subsuelo</i> .....	41
<i>Figura 3.10 Ensamble del ICGU (en azul la tubería)</i> .....	42
<i>Figura 3.11 Wizard</i> .....	43
<i>Figura 3.12 Tipo de análisis</i> .....	44
<i>Figura 3.13 Selección del fluido y comportamiento</i> .....	45
<i>Figura 3.14 Selección de material sólido</i> .....	46
<i>Figura 3.15 Condición de la pared</i> .....	46
<i>Figura 3.16 Condiciones iniciales</i> .....	47
<i>Figura 3.17 Lids</i> .....	48
<i>Figura 3.18 Dominio computacional</i> .....	48
<i>Figura 3.19 Límites del fluido transportador</i> .....	49
<i>Figura 3.20 Selección del material de la tubería</i> .....	50
<i>Figura 3.21 Alta del material del subsuelo</i> .....	50
<i>Figura 3.22 Selección del material para el subsuelo</i> .....	51
<i>Figura 3.23 Condición de frontera a la entrada del ICGU</i> .....	51
<i>Figura 3.24 Refinación de malla</i> .....	53
<i>Figura 3.26 Porcentaje de error correspondiente a las simulaciones</i> .....	55
<i>Figura 4.1 Lecturas puntuales tomadas en el ICGU con distancia vertical entre lecturas de 2 metros cuando <math>t=2,280</math> s</i> .....	56
<i>Figura 4.2 Comportamiento térmico del fluido en función de la profundidad en <math>t=2,280</math> s</i> .....	58
<i>Figura 4.3 Diferencia de temperatura entre el subsuelo y el agua en diferentes instantes</i> .....	59
<i>Figura 4.4 Perfiles térmicos y diferencia de temperatura entre la entrada y salida a través del tiempo</i> .....	62
<i>Figura 4.5 Temperatura promedio del fluido en la salida del ICGU (<math>t=0-12,000</math> s)</i> .....	63
<i>Figura 4.6 Calor transferido hacia el subsuelo desde <math>t=0</math> s hasta <math>t=12,000</math> s</i> ..	64
<i>Figura 4.7 Tendencia del comportamiento de la transferencia de calor</i> .....	65
<i>Figura 4.8 Calor transferido al subsuelo</i> .....	66

## Lista de tablas

<i>Tabla 2.1 Clasificación de la energía geotérmica según su temperatura en °C.</i>	11
<i>Tabla 2.2 Fluidos transportadores o medios de transferencia térmica [19].</i>	.....25
<i>Tabla 3.1 Condiciones del flujo del agua como fluido transportador.</i>	..... 34
<i>Tabla 3.2 Propiedades del subsuelo.</i>	..... 34
<i>Tabla 3.3 Propiedades de la tubería.</i>	..... 35
<i>Tabla 3.4 Parámetros geométricos del ICG.</i>	..... 37
<i>Tabla 3.5 Comparativo de número de elementos malla por defecto y refinada.</i>	53

## Nomenclatura

<i>IC</i>	<i>Intercambiador de calor.</i>
<i>ICGU</i>	<i>Intercambiador de calor geotérmico tipo U.</i>
<i>ICG</i>	<i>Intercambiador de calor geotérmico.</i>
<i>BC</i>	<i>Bomba de calor.</i>
<i>BCG</i>	<i>Bomba de calor geotérmica.</i>
<i>COP</i>	<i>Coficiente de rendimiento-desempeño.</i>
<i>CFD</i>	<i>Dinámica de fluidos computacional.</i>
<i>CAD</i>	<i>Diseño asistido por computadora.</i>
<i>EG</i>	<i>Energía geotérmica.</i>
$\rho$	<i>Densidad.</i>
<i>K</i>	<i>Conductividad térmica.</i>
<i>C</i>	<i>Calor específico.</i>
$\alpha$	<i>Difusividad térmica.</i>
<i>ICGH</i>	<i>Intercambiador de calor geotérmico horizontal.</i>
<i>ICGV</i>	<i>Intercambiador de calor geotérmico vertical.</i>

## **Capítulo 1 INTRODUCCIÓN.**

### **1.1 Problemática.**

Comúnmente los Intercambiadores de calor (IC) juegan un papel importante en el conjunto de sistemas que directa o indirectamente hacen que las tareas de la vida cotidiana sean considerablemente más sencillas de efectuar, éstos son dispositivos que mediante dos o más fluidos con distintas condiciones de operación (como lo es la temperatura) efectúan la transferencia de calor con el objetivo de realizar funciones de calentamiento y enfriamiento según la aplicación deseada.

Son distintos los tipos y tamaños, pero los de tipo serpentín o dispositivos coil son los más empleados en la industria y a nivel doméstico, sin embargo, en muchos casos estos suelen estar limitados a la diferencia de temperatura que el medio convectivo (aire) es capaz de proveer en algunas de las aplicaciones más comunes, siendo esta una limitante a la hora de extraer calor del sistema requerido, logrando dar pie al empleo de mecanismos más eficientes que permitan una mejor disipación de energía, como lo puede ser la interacción del medio conductivo envolvente.

Entre otros factores que se añaden a la problemática suelen ser los altos costes por energía eléctrica relacionados a la extracción y adición de calor en distintos procesos, así como el impacto económico-ambiental en el cual se suelen incluir las prácticas de generación de energías, las cuales podrían verse reducidas si se adquieren sistemas más eficientes y de categoría renovable como lo puede ser el uso de los intercambiadores de calor geotérmico de tipo “u” (ICGU) teniendo en consideración aspectos como la mejora de la eficiencia y coeficientes de desempeño/rendimiento de los distintos equipos.

De esta manera podríamos establecer que el empleo de IC convencionales que interactúan con el medio de manera convectiva empleando aire, podrían verse mejorados con el empleo de intercambiadores geotérmicos (ICG) que puedan

mejorar las condiciones de operación de las máquinas térmicas, así como los diversos equipos a los cuales estos se puedan acoplar.

## **1.2 Justificación.**

Actualmente los IC juegan un papel importante en procesos y sistemas que facilitan distintas tareas de la vida cotidiana, estos dispositivos realizan funciones de calentamiento y enfriamiento según su aplicación y estas mismas varían desde el sector doméstico hasta procesos industriales.

En la gran mayoría de los casos es de apreciarse que estos dispositivos interactúan con el medio ambiente (aire) y de esta manera la limitante de los mismos está dada por la temperatura del aire circundante, en este sentido variables dependientes como la transferencia de calor y el desempeño que estos pueden entregar pueden verse afectados.

De la misma manera en algunas regiones las condiciones climáticas no favorecen la temperatura que el medio circundante puede proveer a estos dispositivos, por lo que es de esperarse que, en la implementación de IC convencionales expuestos a aire, la transferencia de calor se vea minimizada debido a la respuesta de una diferencia de temperatura menor, un aspecto que es primordial en estos dispositivos.

En contraparte los IC que interactúan con fluidos (agua) ofrecen maximizar la transferencia de calor, pero en cambio el fluido de trabajo debe ser acoplado a un dispositivo que sea capaz de suministrar una fuente fría o caliente siendo esta la principal limitante.

A su vez es necesario ver que mientras más se vea afectada dicha transferencia el gasto energético se verá aumentado, lo que directamente se ve reflejado con mayores costos operativos del equipo e indirectamente con un mayor impacto ambiental.

Desde esta perspectiva algunos de los aspectos mejorables de los IC que interactúan con el aire circundante y agua son:

- Maximizar la adición/disipación de calor limitadas por la temperatura del aire.
- Proporcionar una fuente de calor o sumidero con mejores condiciones de enfriamiento o calentamiento.
- Reducir la entrada de energía para la realización de distintos procesos de absorción y adición de calor al sistema conjunto acoplado con el intercambiador.
- Reducir en el costo operativo y con ello contribuir a la disminución del impacto ambiental que afecta actual y futuramente a la sociedad.

En este sentido se hace presente la necesidad de implementar sistemas de alta eficiencia que mejoren las condiciones operativas de los IC anteponiendo los aspectos antes mencionados.

De esta manera se propone la implementación de un intercambiador de calor geotérmico tipo U para mejorar los aspectos antes mencionados utilizando para su análisis software de simulación de fluidos CFD(dinámica de fluidos computacional).

### **1.3 Antecedentes.**

Los inicios de la geotermia en materia de aplicación datan de principios del siglo XX en un esfuerzo constante por la producción de energía [1], en este sentido el captar y disipar energía desde-hacia el subsuelo ha sido un enfoque que ha tomado relevancia en los últimos años, debido al menor impacto ambiental generado y la alta eficiencia que la implementación de estos sistemas puede conllevar. Se han hecho diversos estudios tanto prácticos como analíticos que comprueban la efectividad de los ICG, a su vez acoplados a bombas de calor (BC) brindan un alto potencial para el uso de calefacción y acondicionamiento de espacios principalmente.

Se ha visto que la implementación de los ICG brinda en conjunto al dispositivo acoplado, la virtud de aumentar su eficiencia, en perspectiva un sistema de calefacción que acopla a un ICG podría pasar de un COP (coeficiente de rendimiento) con valor de entre 2.3 y 3.5 a valores de 3-5 dependiendo las condiciones de operación [2], sin embargo, los factores que intervienen en el funcionamiento óptimo de los ICG los hacen a su vez una oportunidad de estudio en beneficio de la sociedad. Debido a ello los ICG han estado variando parámetros que evalúan su rentabilidad y para ello se han empleado diferentes metodologías tanto prácticas como analíticas, a su vez en tiempos actuales y gracias a los recursos computacionales han surgido diversas herramientas que ayudan a predecir diversos fenómenos; uno de los principales en dicho campo de estudio han sido los softwares de simulación CFD (computational fluid dynamics).

Para la determinación de las condiciones térmicas operacionales de los ICG los softwares CFD han sido una gran contribución. A grandes rasgos estos predicen el comportamiento de los fluidos con resultados aproximados basándose en métodos numéricos y a su vez en aproximaciones de las soluciones particulares de las ecuaciones de Navier-Stoke, dichas ecuaciones en conjunto con los recursos computacionales y programación sentaron las bases en el campo de la dinámica de fluidos computacional, atribuyendo algoritmos al ingeniero mecánico Sushas V.

Patankar quien hace mención a la resolución numérica de transferencia de calor y flujo de fluidos en el periodo de 1974-1979 [3].

Las ventajas del uso de la simulación radican principalmente en la no necesidad de la construcción de un modelo físico que sea capaz de describir la interacción entre las condiciones del entorno y fenómeno a analizar, teniéndose simulaciones de diferentes propiedades como lo puede ser la presión, temperatura, concentración de esfuerzos y dinámica de fluidos tanto en el dominio estacionario como en el transitorio. En el campo de estudio geotérmico, la simulación térmica de fluidos es una gran herramienta foco de análisis, teniendo diferentes estudios que se apoyan en la utilización de software de simulación que ayudan a verificar-describir o validar el comportamiento de los ICG en cuestión.

Visto desde este enfoque los softwares de simulación brindan a los usuarios el poder de describir fenómenos de manera predictiva, aunque aun así estos comúnmente y basado en la naturaleza de los métodos numéricos suelen diferir en cierto grado a los resultados descritos por un fenómeno experimental, tal es el caso de un artículo realizado en la Universidad de Stuttgart [4], en el cual se desarrolla la aplicación de un modelo de simulación tridimensional para la interpretación térmica de los ICGU; además de hacer énfasis en la simplificación del mismo reduciendo la cantidad de nodos por medio de incorporación de modelos 2D ligados a modelos 3D; se destaca que para la convergencia del estudio fue necesario el refinar la malla iterativamente hasta que los cambios en los calores calculados tuvieron una tolerancia en el orden del 5%, posteriormente el modelo fue verificado en ANSYS (software de simulación de elementos finitos).

De esta manera se puede entender que para poder describir correctamente el comportamiento del modelo (simulación) es necesario establecer los parámetros iniciales del ICG y algunas veces variar parámetros del software, en 2019 la revista *Internacional Energy Conversión and Management*, publicó un artículo en el cual se mencionan algunos de los factores más importantes para el planteamiento de los ICG poco profundos [5] entre estos se encuentran variables como la velocidad, el calor específico, densidad y conductividad térmica del fluido, así como

características del modelo geométrico como lo son la configuración del sistema tipo U, espesor, conductividad y longitud del tubo, además de abordar características como el espaciado del tubo, conductividad del medio, temperatura del medio, el tiempo de operación del sistema y la temperatura de salida, teniendo como resultados de la investigación que el rendimiento de los ICG se veía incrementado en climas cálidos y describiendo como condiciones óptimas un campo con menos vegetación, mayor conductividad térmica de la lechada (relleno del ICG), mayor diámetro de la lechada, mayor espacio entre tubería, diámetro interior de la tubería en U mayor, tubería más delgada (espesor) y mayor conductividad térmica de tubería, lo anterior validado mediante software CFD.

Aunque la revisión de dichos parámetros es propia de cada sistema de ICG el alcance debería establecer una pauta en los límites de diseño e implementación y al ser una de las aplicaciones potenciales de los ICG el acoplamiento a edificios y casas con fines de acondicionamiento de espacios (BCG), también existen estudios y artículos que evalúan la rentabilidad de la aplicación misma, un ejemplo sería el artículo publicado por la revista Renewable Energy [6], en el cual se establece la metodología realizada para el dimensionamiento del ICG empleado para proveer de calefacción y aire acondicionado un edificio de bajo consumo. Para este estudio se empleó la herramienta de simulación TRNSYS (componente de simulación de conductos) diseñando un programa base para el análisis relacionado al almacenamiento de energía en los suelos y ICG. El estudio determinó que los edificios de bajo consumo son potencialmente “interesantes” y que la ubicación geográfica del ICG es determinante en su desempeño.

En cambio y desde una perspectiva más general se han empleado metodologías que establecen el análisis de carga térmica independiente, tomando consideraciones específicas según la aplicación, posteriormente se implementan corridas exploratorias de software CFD para la determinación de las características de los ICG, tal es el ejemplo del artículo “Combining direct ground cooling with ground-source heat pumps and district heating” [7] en el cual se explica que se utilizaron herramientas de simulación específicas para la determinación de cargas

térmicas (IDA ICE) y parámetros del ICG, utilizando para este último la herramienta Earth Energy Design (EED) y posteriormente realizar un análisis con la extensión IDA ICE borehole que permite simular y predecir el rendimiento energético del ICG.

La explicación de la naturaleza de los ICG ha incluso propiciado la investigación de estudios en territorio nacional, como el caso del estudio “Análisis integral de una bomba de calor geotérmica vertical para uso residencial en México” [8], donde se analiza un prototipo constituido por 3 intercambiadores de calor con una profundidad de 80m, el estudio determina que la implementación del sistema constituido por los intercambiadores obtiene un índice de eficiencia energética EER=6.63. Para llevar a cabo la validación se hace un análisis CFD en el que se destacan aspectos como el estudio de 2 dominios sólidos constituidos por una tubería de polietileno de alta densidad (tubería) y el suelo, el medio de disipación con una geometría de 1m de diámetro x 120m de profundidad, se considera un solo dominio de fluido propio del agua que circula por la tubería, se utilizan elementos de malla hexagonal entre los dominios sólido-fluido para una buena convergencia de información utilizando mallas independientes. Entre los resultados se determinaron las variaciones de temperatura promedio de la entrada y salida del fluido mensualmente estimando de enero a diciembre de la siguiente manera  $\Delta T(^{\circ}C)$ : 7.64, 7.62, 7.57, 7.55, 7.519, 7.59, 7.595, 7.595, 7.65, 7.63, 7.64 y 7.645 consecutivamente. Finalmente se concluye que el cambio más apreciable de temperatura del suelo ocurre durante los primeros 5 meses para el primer semestre del año, y durante los primeros 6.5 meses para el segundo semestre del año. Además, el intercambiador de calor geotérmico se comportó correctamente durante la estación cálida y disminuyó su rendimiento durante el periodo invernal.

Teniendo en cuenta la revisión de trabajos previos, en el presente documento se pretende analizar mediante software CFD el comportamiento operativo térmico de un ICGU apoyado del software SolidWorks Flow simulation analizando la información obtenida.

## **1.4 Objetivos.**

### **General:**

Analizar mediante software de simulación el comportamiento térmico en régimen estacionario y transitorio de un intercambiador de calor enterrado en el subsuelo que emplea agua como fluido de trabajo en función de sus características geométricas y fluidodinámicas.

### **Específicos:**

- 1- Realizar una breve revisión sobre simulación CFD en intercambiadores de calor geotérmicos.
- 2- Diseñar la geometría del intercambiador de calor geotérmico mediante software CAD.
- 3- Establecer los parámetros fluidodinámicos del intercambiador de calor geotérmico.
- 4- Establecer la geometría y las características del medio envolvente.
- 5- Realizar la simulación en régimen transitorio del intercambiador de calor geotérmico.
- 6- Realizar corridas exploratorias y verificar supuestos.
- 7- Analizar los perfiles de temperatura obtenidos.
- 8- Construir gráficas de comportamiento térmico.
- 9- Analizar los resultados obtenidos.
- 10- Redacción de tesis.

## **1.5 Descripción general de la tesis.**

**Capítulo 1**, a manera de introducción se describe la problemática que presentan los IC convencionales (que interactúan con aire y agua) y la necesidad de migrar a tecnologías con un enfoque más eficiente y sustentable, también se presenta un breve estado del arte referente a simulaciones de software dinámica de fluidos computacional (CFD) describiendo algunos aspectos de interés para el presente trabajo.

**Capítulo 2**, se presentan los principales fundamentos para una mejor comprensión de los términos que contemplan energía geotérmica, usos directos de la energía geotérmica, intercambiadores de calor convencionales, intercambiadores de calor geotérmicos y algunos aspectos de resolución del software CFD.

**Capítulo 3**, se establecen los parámetros y condiciones de operabilidad del intercambiador de calor geotérmico, se describe la metodología empleada para la realización de la simulación de un intercambiador de calor geotérmico, el diseño del pozo mediante software CAD, la revisión de las características geométricas y la realización de las corridas experimentales de la simulación.

**Capítulo 4**, se revisan las gráficas construidas del comportamiento térmico del intercambiador de calor geotérmico en estado estable y transitorio, destacando algunos aspectos como el comportamiento en función de la profundidad y la diferencia de temperatura entre el subsuelo y el intercambiador.

**Capítulo 5**, en este capítulo se presentan las principales conclusiones obtenidas destacando algunos aspectos relacionados directamente con las figuras construidas en el capítulo 4, así como algunas proyecciones para trabajos futuros.

## **Capítulo 2. MARCO REFERENCIAL.**

### **2.1 Energía geotérmica.**

La manifestación de la energía puede darse de diferentes maneras y una de las más comunes es mediante la temperatura. La energía geotérmica (EG) se fundamenta en las características térmicas que el subsuelo puede proveer en función de la temperatura del mismo, por lo tanto, las aplicaciones principales de la EG son la disipación y captación de energía llevadas a cabo en el subsuelo.

La EG es referida como la energía que se deriva del calor natural existente en el interior de la tierra [9], cumpliendo a su vez con ser un recurso viable al ser considerada altamente explotable y prácticamente constante a lo largo de todo el año.

De la misma manera es un hecho el incremento en la explotación de dicho recurso, y este ha crecido en los últimos años por lo que se espera que la capacidad se vea aumentada y a su vez se proyecta un mejor aprovechamiento en los usos directos de la EG y procesos de generación de energía.



***Figura 2.1 Recurso geotérmico.***

## 2.2 Energía geotérmica de baja entalpía.

La EG puede ser clasificada según la aplicación a la cual esté asociada la temperatura del subsuelo; la temperatura del subsuelo describe distintas variaciones a medida que se ve aumentada la profundidad y con ello se ve afectado el fenómeno de transporte de calor asociado a la entalpía; la entalpía puede conceptualizarse propiamente como la cantidad de energía que un sistema termodinámico puede intercambiar con su entorno [10].

Es común ver que la EG es clasificada en función de la temperatura y entalpía, según el autor la clasificación puede variar como se puede observar en la siguiente tabla [11]:

**Tabla 2.1 Clasificación de la energía geotérmica según su temperatura en °C.**

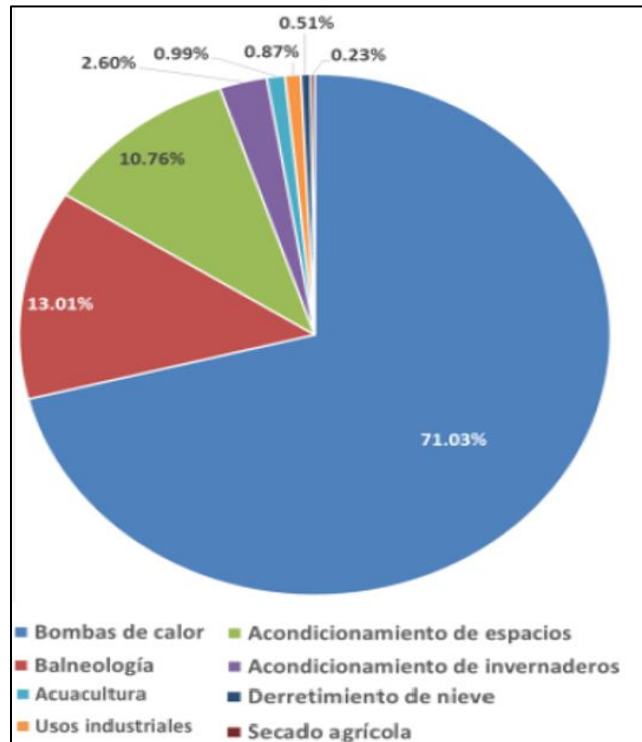
TIPO DE YACIMIENTO		RANGO DE TEMPERATURA
<b>Muy baja entalpía</b>	Subsuelo con o sin agua	5 °C < T < 30 °C
	Aguas subterráneas	10 °C < T < 30 °C
<b>Baja entalpía</b>	Aguas termales	22 °C < T < 50 °C
	Zonas volcánicas	T < 100 °C
	Almacenes sedimentarios profundos	
<b>Media entalpía</b>		100 °C < T < 150 °C
<b>Alta entalpía</b>		T > 150 °C

Como se puede apreciar la EG de baja entalpía se describe comúnmente en un rango menor a los 100°C, cabe mencionar que en ocasiones algunos autores suelen generalizar la baja y muy baja entalpía, aunque si asociamos el fenómeno de calentamiento y enfriamiento del fluido de trabajo sin la presencia del cambio de fase se estaría hablando puntualmente de la energía geotérmica de baja entalpía, en el caso particular de ambos, estos suelen ser empleados en aplicaciones directas lo que hace que su implementación pueda darse de una manera más particular, debido a que su uso directo se asocia a construcciones poco profundas.

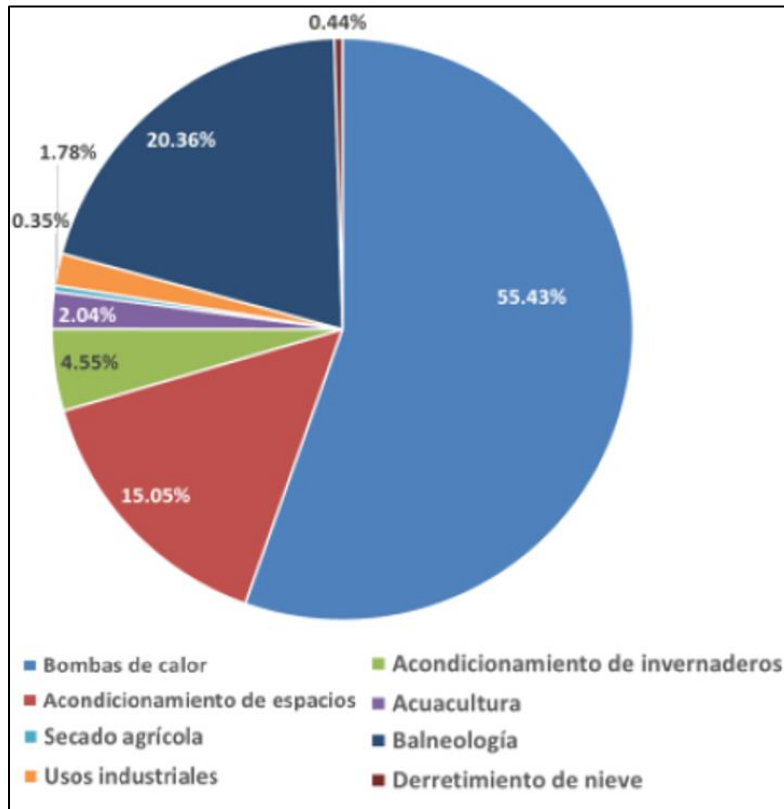
## 2.3 Usos directos de la energía geotérmica.

El uso directo de la energía geotérmica consiste en proporcionar un uso a los sistemas geotérmicos a bajas profundidades del subsuelo sin la propia generación de energía la cual requiere de procesos secundarios a la extracción de calor en plantas de generación donde el proceso de extracción de calor suele estar ligado a profundidades elevadas, en este sentido los usos directos de la energía geotérmica consisten en todos aquellos que sean aprovechables desde profundidades superficiales donde el acoplamiento del ICG es directo al dispositivo de interés realizando su tarea correspondiente.

Son diversos los usos directos de la EG, entre algunos de los más recurrentes podemos destacar procesos de calefacción urbana, aplicación en invernaderos, elaboración de conservas, secado de productos agrícolas e industriales, deshielo, lavado de lana y tintes, sistemas de refrigeración empleando amoníaco, extracción de sustancias químicas, destilación de agua dulce, recuperación de metales, evaporación de soluciones concentradas, balneología y fabricación de la pulpa de papel [12].



**Figura 2.2 Distribución de la capacidad instalada en aplicaciones de usos directos de la energía geotérmica [12].**



**Figura 2.3 Uso de las aplicaciones de usos directos de la energía geotérmica [12].**

Como se puede observar el uso del recurso geotérmico es mayormente aplicado a dispositivos bombas de calor, por lo que el acondicionamiento de espacios parece ser una de las aplicaciones potenciales, estimando de la misma manera que estos permitirán un ahorro importante de energía en ciudades con climas que involucren condiciones extremas de temperatura.

## 2.4 Características del subsuelo (enfoque geotérmico de baja entalpía).

Como ya se ha mencionado la energía geotérmica puede ser descrita como “la energía que se deriva del calor natural existente en el interior de la tierra” [9]; dentro de este marco podemos destacar que la capacidad de transferir y almacenar calor con relación al subsuelo dependerá en gran medida de las propiedades térmicas que este pueda proveer tales como:

### Densidad

Esta relación determina la unidad de masa contenida en una unidad de volumen, sus unidades son  $\text{kgm}^{-3}$ , y se suele denotar por el símbolo Rho ( $\rho$ ), en ese sentido podemos afirmar que si comparamos diferentes muestras de suelo contenidas en un mismo espacio, la que tenga mayor coeficiente de densidad tendrá una masa mayor.

### Conductividad térmica

Es la capacidad que tienen los materiales para conducir el calor, es expresada en  $W \cdot (m^{\circ}K)^{-1}$  y usualmente denotada por la letra  $K$ , entre mayor sea la magnitud de este coeficiente mayor será la conducción de calor.

### Calor específico

Es la cantidad de calor que se debe aplicar a una unidad de masa específica para aumentar su temperatura en  $1^{\circ}$ , es decir a mayor sea el coeficiente de calor específico del suelo, éste tendrá la capacidad de mantenerse de manera “estable” sin variar en medida de la magnitud del calor suministrado su temperatura, sus unidades son  $\text{kJ} \cdot (\text{kg}^{\circ}K)^{-1}$  y se suele denotar por la letra  $C$ .

Estos parámetros pueden ser determinados con ensayos de respuesta térmica del suelo.

### Difusividad térmica

Esta es la relación entre las propiedades antes mencionadas definiéndolas como  $\alpha = k \cdot (\rho C)^{-1}$ . Esta propiedad mide la velocidad con la cual un material reacciona a un flujo de calor ya sea por calentamiento o enfriamiento, sus unidades son  $m^2 \cdot s^{-1}$ .

### Perfil térmico del subsuelo

Dependiendo de la región, el perfil térmico del subsuelo suele variar su temperatura describiendo curvas de comportamiento en función de la profundidad y la temperatura registrada como se puede observar en la siguiente figura (2.4):

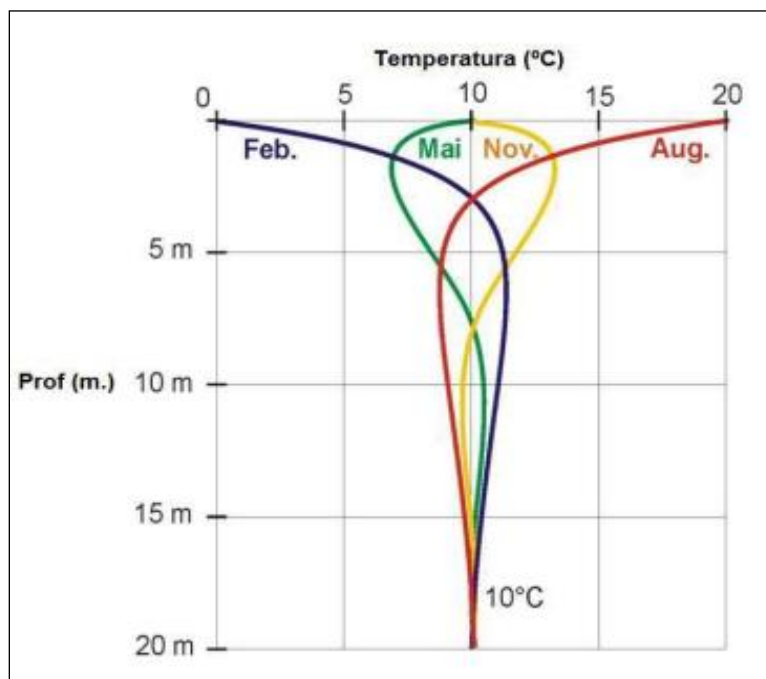


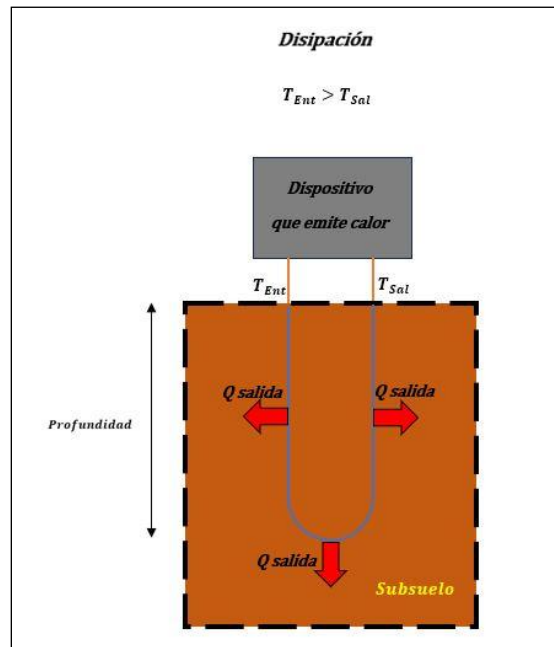
Figura 2.4 Comportamiento térmico del subsuelo [13].

En la figura 2.4 se puede apreciar que el dominio temporal es cubierto según el mes que describa la curva en el cual a medida que se aumente la profundidad tiende a estabilizarse, en el caso concreto de esta gráfica en torno a los 10°C comportándose desde este punto de manera estable a lo largo del año en aplicaciones de baja entalpía, sin embargo, en otras aplicaciones se logra ver incrementado este valor, inclinando la curva de estabilidad hacia la derecha dependiendo el gradiente de temperatura el cual indica el ascenso de temperatura a medida que se aumente la profundidad (grados de temperatura/ unidad de longitud de profundidad) aunque en aplicaciones de baja profundidad dicho gradiente suele ser despreciable ya que generalmente estos cambios de temperatura se dan en el orden de los  $^{\circ}\text{C} \cdot \text{km}^{-1}$ .

## **2.5 Intercambiadores de calor geotérmicos.**

Un IC busca transferir calor de un medio “A” hacia un medio “B”, en este sentido se tienen diferentes mecanismos de transferencia de calor como lo pueden ser la conducción y la convección, principalmente. La conducción tiene lugar en aquellos materiales sólidos que constituyen el intercambiador como lo pueden ser sus múltiples aletas, tuberías y conexiones. La convección tiene lugar en la interacción de aquellos fluidos en contacto con las superficies sólidas.

Para el caso del ICG su principal objetivo es interactuar con el subsuelo para dar lugar al intercambio de calor con el mismo. En aplicaciones de baja entalpía sus usos potenciales pueden ser los usos directos de la energía geotérmica.



**Figura 2.5 Intercambiador de calor geotérmico en proceso de disipación de calor (figura propia).**

En el proceso de disipación se respetan las condiciones:

$$T_{ent} > T_{sal} \ \& \ T_{ent} > T_{subsuelo}$$

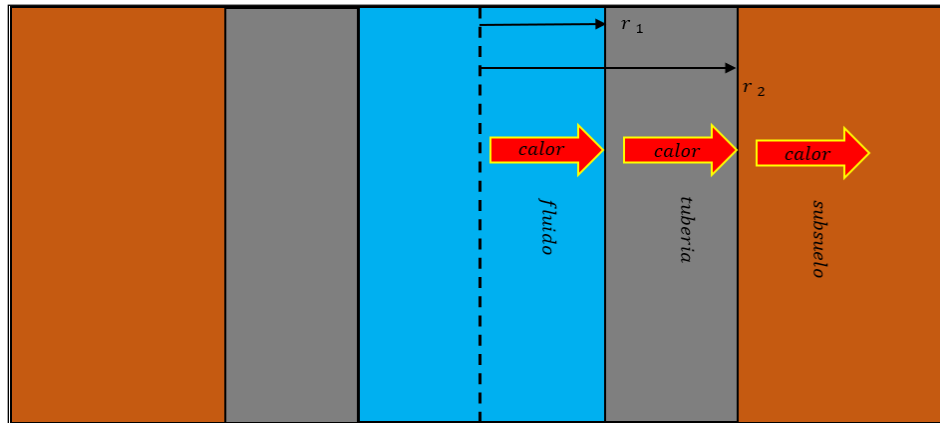
Podemos destacar que en el proceso de disipación la transferencia de calor se da del fluido con una temperatura de entrada mayor hacia el medio de disipación dando pie a la interacción con la secuencia:

***fluido → Intercambiador(paredes del intercambiador) → subsuelo.***

Lo que podría verse de igual manera como:

***Convección → conducción → conducción.***

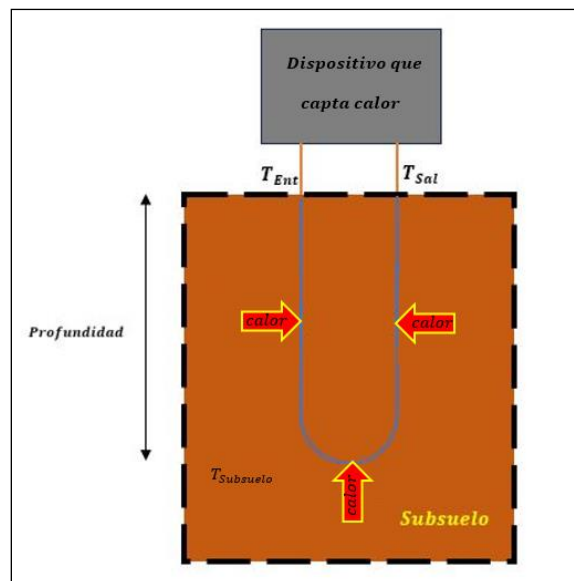
En el cual la transferencia de calor idealmente se efectúa de manera radial y la concentración de calores y perfiles térmicos puede darse según la geometría del intercambiador, existiendo diferentes tipos entre los cuales se pueden destacar los intercambiadores concéntricos, de baja profundidad (horizontales) y de tipo en "U" principalmente.



**Figura 2.6** Secuencia en la transferencia de calor de un IC geotérmico de tubería simple en modo de disipación (figura propia).

Se respetan los esquemas anteriores (figura 2.5 y 2.6) para el proceso de captación de energía únicamente invirtiendo los flujos de calor como se puede ver en la figura 2.7 donde se respetan las siguientes condiciones:

$$T_{sal} > T_{ent} \quad \& \quad T_{subsuelo} > T_{ent}$$



**Figura 2.7** Intercambiador de calor geotérmico en proceso de captación de calor (figura propia).

## 2.5.1 Tipos de intercambiadores de calor geotérmicos.

Es importante hacer mención a algunos de los diferentes tipos de intercambiadores de calor geotérmicos, al contemplar que este tipo de tecnologías son relativamente “recientes” aún en la actualidad son ampliamente estudiadas las interacciones entre los diferentes tipos de geometrías empleadas en distintas aplicaciones.

Diversos factores pueden hacer más idónea la implementación de una geometría a otra, así como los límites financieros que estas construcciones puedan presentar.

Entre las principales geometrías podemos mencionar los de tubo concéntrico, baja profundidad y tipo U.

### 2.5.1.1 Tubo concéntrico vertical (carcasa coaxial).

La geometría del tubo concéntrico describe una tubería simple sin dobleces que en su interior almacena una tubería de menor longitud y diámetro centrado concéntricamente por espaciadores que permiten el flujo de fluidos, se caracteriza por su doble interacción debido a que dependiendo el sentido del flujo puede modificar su comportamiento en la transferencia de calor.

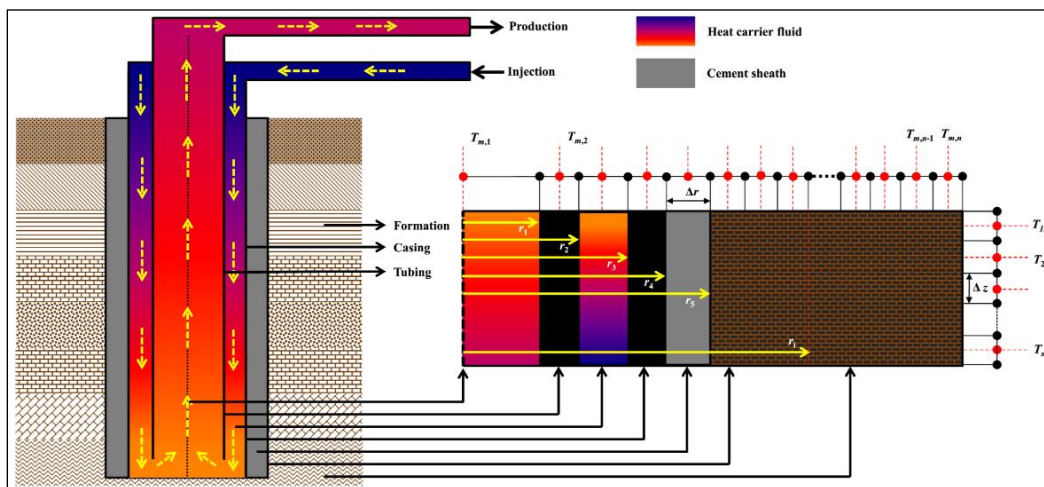
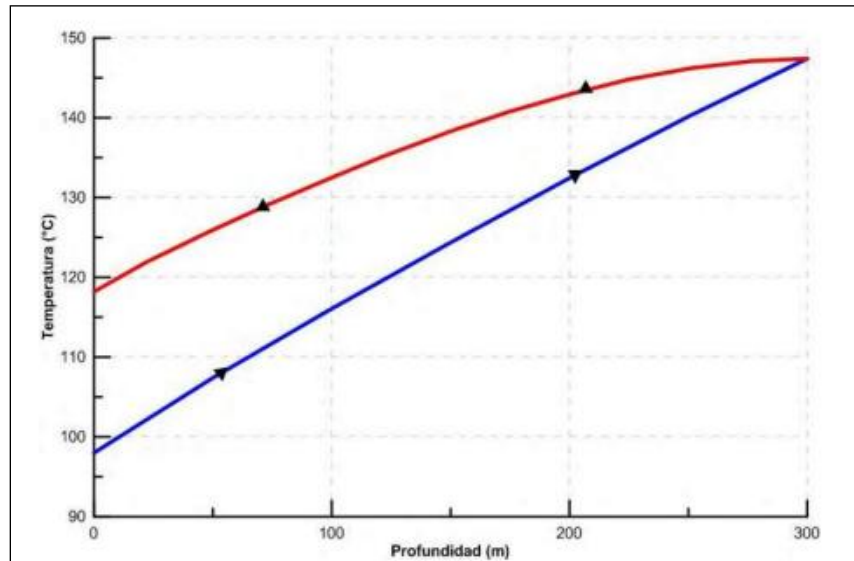


Figura 2.8 Geometría de un intercambiador de calor de tubo concéntrico [14].

A la derecha se observa la simetría en las paredes representadas por radios empleados para su común análisis, describiendo para el caso de esta (ver figura 2.8) el flujo del tubo exterior al interior.

Dependiendo la aplicación ya sea calentamiento o enfriamiento estos describen una curva de comportamiento térmico similar a la que se puede apreciar en la figura 2.9:



**Figura 2.9 Curva de comportamiento térmico para aplicación de calentamiento [15].**

Podemos apreciar que el fluido entra a una temperatura al IC y esta va aumentando, pero en la regresión (parte más profunda del intercambiador) la temperatura tiende a una máxima transferencia y a su vez esta desciende conforme el fluido se aproxima a las condiciones de temperatura en la superficie.

### 2.5.1.2 De baja profundidad (horizontales).

La geometría de estos está situada a profundidades bajas de entre 1.5 m y 3 m de profundidad. Estos pueden ubicarse en una región térmica inestable debido a que en la superficie suelen manifestarse en mayor instancia los fenómenos meteorológicos los cuales suelen influir en el comportamiento del perfil térmico del subsuelo pudiendo reducir su eficiencia.

Este tipo de intercambiadores son los más simples en el sentido que no es necesario llevar a cabo una perforación vertical profunda como tal, en consecuencia, requieren de excavaciones longitudinales de poca profundidad. Si se demanda transferir una considerable cantidad de calor, estos IC podrían satisfacer la demanda incorporando longitudes de gran magnitud o mayor área de implementación.

Dentro de esta categoría se suelen citar los intercambiadores de tipo espirales, tipo slinky y rectos como se muestra en la figura 2.10.



**Figura 2.10 Tipos de configuración en intercambiadores de calor de baja profundidad de espiras verticales, tipo slinky y disposición recta (modificación propia) [16–18].**

La principal diferencia entre la configuración slinky y la de espirales verticales es la disposición de las mismas; en la de espiras verticales se encuentran orientadas de manera vertical, mientras que en la configuración de tipo slinky se encuentran orientadas de manera paralela al suelo. Para ambos casos los parámetros a tomar en cuenta son el radio y espaciamiento entre espiras, así como la profundidad a la que estas se encontrarán ubicadas, siendo este último un factor no tan importante como en los ICG verticales (ICGV).

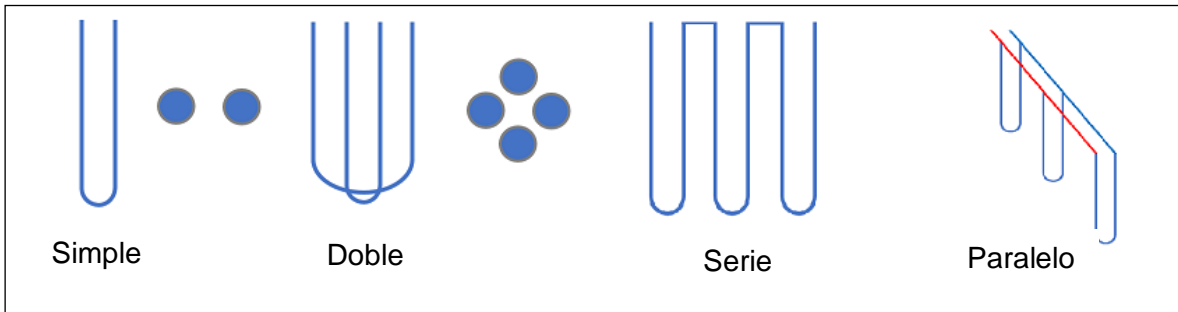
La configuración de intercambiadores simples dispuestos de manera recta es la configuración más sencilla para los ICGH, como se puede ver en la figura 2.11 también se tienen diversos arreglos que podrían aumentar la complejidad del sistema, como lo son el arreglo simple, en paralelo o serpentín.



**Figura 2.11 Disposiciones rectas simple, paralelo y tipo serpentín respectivamente [18].**

### 2.5.1.3 Intercambiador de calor tipo U.

En construcción este es el más simple entre las configuraciones de ICGV, como se puede apreciar en la figura 2.12 se trata de un tipo de intercambiador de calor con disposición vertical, el cual es ampliamente usado en diversas aplicaciones de calentamiento y enfriamiento. Es versátil y puede contemplar una configuración simple, doble, en serie y paralelo.



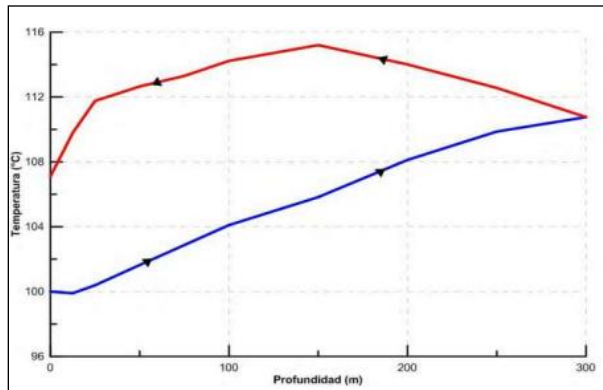
**Figura 2.12 Configuraciones simple, doble, serie y paralelo (figura propia).**

Este en su configuración simple consta de una tubería larga, la cual presenta una curvatura con forma de U (curva de 180°) a la mitad de su longitud, de allí su nombre y una de sus principales características es el poco espacio que este implementa con respecto al área usada desde la superficie.

El resto de las configuraciones son derivaciones del arreglo base simple, es decir en el arreglo doble se puede apreciar que dentro de la misma perforación se coloca una segunda tubería en U. En el arreglo en serie, la salida de un intercambiador U es la entrada de otra, lo que involucra diversas perforaciones según la cantidad de ICGU. En el caso del arreglo en paralelo todas las entradas de las tuberías en U son conectadas entre sí al igual que las salidas.

A diferencia de los ICGH los ICGV tienen la capacidad de ofrecer mejores coeficientes de rendimiento en el sentido de que proporcionan un entorno de transferencia que no fluctúa en función de las condiciones meteorológicas, es decir, la temperatura del subsuelo en bajas profundidades pueden considerarse constante después de cierta profundidad, entorno a los 15 m comúnmente dependiendo la región de implementación; proporcionando los ICGV cubrir más área del

intercambiador con una diferencia de temperatura mayor que un ICGH con una diferencia menor y con una mayor extensión de espiras o metros.



**Figura 2.13 Curva de comportamiento térmico para aplicación de calentamiento en ICG tipo U [15].**

Como se puede observar que en la gráfica profundidad-temperatura de un ICGVU de la figura 2.13, el perfil que se genera en modo calentamiento resulta similar al de tubo coaxial (figura 2.9), sin embargo, en este último por la doble interacción, la curva de calentamiento tiende a ser más estable y lograr una mayor temperatura de salida. Si bien la temperatura alcanzada puede ser mayor, la fabricación puede resultar un elemento decisivo en el seleccionamiento.

### **Materiales empleados**

Otro factor a considerar son los materiales empleados en el ICGV tipo U y aunque los materiales dependen en gran medida de la aplicación (esta va en función de la profundidad) entre los más comunes para su fabricación en aplicaciones de baja entalpía, se encuentra el polietileno de alta densidad y polipropileno por su bajo coste y características como flexibilidad, impermeabilidad y resistencia a la corrosión.

### Fluidos transportadores

Estos pueden ser diversos mientras cumplan características como:

- Impedir la formación de hielo que pueda obstruir los conductos (fluidos anticongelantes), este punto es destacado principalmente en zonas donde la aplicación del ICG esta acotada a procesos de absorción de calor.
- Impedir la corrosión del ICG.
- Generar un nulo o bajo impacto ambiental en el entorno que rodea el ICG (subsuelo, mantos acuíferos y reservas).

Entre los principales fluidos de trabajo podemos encontrar los descritos en la siguiente tabla (ver tabla 2.2):

**Tabla 2.2 Fluidos transportadores o medios de transferencia térmica [19].**

MEDIO	CONCENTRACIÓN	PROTECCIÓN CONTRA EL HIELO	OBSERVACIONES
Agua		0°C	• Más barato
Etilenglicol	20 a 33%	-10,4 a -19,3°C	• Tóxico • Precisa inhibidores de la corrosión
Propilenglicol	25 a 35%	-10,1 a -17,5°C	• No tóxico • No corrosivo • No inflamable • Muy viscoso • Más caro
Etanol	20 a 30%	-10,5 a -20,5°C	• Tóxico • Inflamable • Muy viscoso
Otros	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Metanol</li> <li>• Cloruros: sódico, cálcico, magnésico, potásico</li> <li>• Carbonatos: sódico, potásico</li> </ul>		

### Factores que intervienen en el funcionamiento de ICGV tipo U

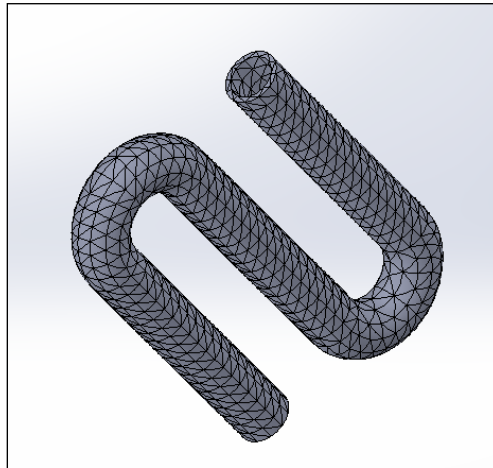
Algunos de los factores más relevantes en el funcionamiento de los ICGU son los siguientes:

- **Profundidad del ICG**, como ya se ha mencionado este es un factor determinante tanto en las propiedades del subsuelo como en el comportamiento que tendrá finalmente el ICG, haciendo de este parámetro incluso la distinción entre ICGV y ICGH.

- **Material del ICG** (coeficiente de transferencia de calor), este factor interviene directamente recordando que las propiedades térmicas del material propician un buen entorno de transferencia de calor estando los materiales delimitados por la aplicación y el costo total del proyecto.
- **Fluido transportador** (densidad, calor específico, coeficientes térmicos y viscosidad), la capacidad de transferir calor dependerá en gran medida del coeficiente de convección de transferencia de calor y propiedades térmicas del fluido transportador, logrando variar dichas propiedades con alguno de los fluidos más empleados, ver tabla 2.2.
- **Velocidad del fluido transportador y flujo másico**, estas propiedades asociadas al transporte y correlacionadas por la densidad, serán proporcionales a la potencia disipada o captada en el ICG.
- **Propiedades térmicas del subsuelo** (densidad, difusividad y calor específico), antes de la implementación del ICG se hacen ensayos de respuesta térmica que determinan las propiedades del subsuelo y en base a estas se efectúan las estimaciones de transferencia de calor.
- **Uso de material de relleno en la perforación**, el material de relleno como su nombre lo indica, se emplea para cubrir la perforación una vez que el ICG esté en su posición final, al igual que las características térmicas del subsuelo estas también juegan un rol importante a la hora de transferir calor hacia el subsuelo y estos materiales suelen variar, desde recubrimiento de la misma tierra hasta el empleo de lechada.
- **Configuración del intercambiador** (simple o doble, disposición serie y paralelo), aún son investigadas las características propias de cada configuración, pero se estima que según la configuración empleada se tengan comparativos de transferencia de calor como lo es en el caso de la profundidad, números de tubos para la configuración simple y doble, así como el número de ICG para la disposición serie-paralelo.

## 2.6 Análisis CFD.

Generalmente en la resolución de diversos problemas aplicando software CFD se suele utilizar el método de volumen finito, esto implica la discretización de una región del fluido cuyo comportamiento es de interés, a esta región se le conoce propiamente como volumen finito (ver figura 2.14) y el objetivo de la metodología CFD, consiste en analizar este conjunto de volúmenes proyectados (malla-mesh) obteniendo resultados simultáneamente.



**Figura 2.14** Conjunto de volúmenes finitos “malla-mesh”.

En la región fluido-dinámica de la malla a resolver, cada volumen busca resolver las ecuaciones de conservación de la masa y cantidad de movimiento asociadas en las ecuaciones de Navier-Stoke.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \rho = 0$$

**Ecuación General de continuidad.**

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

**Ecuación diferencial de continuidad.**

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \bar{u} \cdot (\nabla \bar{u}) = -\frac{1}{\rho} \nabla P + \nu \nabla^2 \bar{u} + g \pm F$$

### Ecuación general de Navier-Stokes

Donde:

$\bar{u}$  es un vector que representa la velocidad con componentes X, Y, Z asociados a  $\bar{u} = (u, v, w) = (x, y, z)$  como la velocidad del fluido.

$P$  es la presión en la instancia  $\bar{u} = (u, v, w)$  como valor constante.

$\nabla = \frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y}, \frac{\partial}{\partial z}$  considerado volumen.

$\nu$  es la viscosidad cinemática.

$g$  es la fuerza que corresponde a la gravedad.

$F$  es propio de las fuerzas externas que puedan ejercer un cambio en el fluido.

$\frac{\partial \bar{u}}{\partial t}$  es el término asociado a las variaciones con respecto al tiempo.

Desarrollando sus 3 componentes se tendría un sistema de 3 ecuaciones conformado de la siguiente manera:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{u \partial u}{\partial x} + \frac{u \partial u}{\partial y} + \frac{u \partial u}{\partial z} = -\frac{\partial P}{\rho \partial x} + \nu \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) + g(x) \pm F$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{u \partial v}{\partial x} + \frac{u \partial v}{\partial y} + \frac{u \partial v}{\partial z} = -\frac{\partial P}{\rho \partial y} + \nu \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) + g(y) \pm F$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \frac{u \partial w}{\partial x} + \frac{u \partial w}{\partial y} + \frac{u \partial w}{\partial z} = -\frac{\partial P}{\rho \partial z} + \nu \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) + g(z) \pm F$$

### Descomposición vectorial de la ecuación general de Navier-Stoke.

Este conjunto de ecuaciones será resuelto en cada volumen establecido en la retícula de la malla, teniendo consideraciones particulares según el fenómeno a analizar, de la misma manera la resolución implica la interacción entre sólidos y fluidos, por lo cual es necesario incluir distintos modelos en la simulación, por ejemplo, ya se mencionó que en las zonas con condiciones de fluidos es posible la resolución de las propiedades mediante las ecuaciones de Navier-Stoke, sin embargo, en zonas sólidas el comportamiento es distinto, por lo cual se ven implementados distintos modelos, como lo puede ser la conducción de calor. Cabe mencionar que dependiendo de la plataforma de resolución CFD (ANSYS, COMSOL, ALGOR, SolidWorks simulation, Flow simulation, entre otros) en algunos es posible la importación de modelos de comportamientos de distintos fenómenos mediante la entrada de ecuaciones como lo podría ser la ley de Fourier que es empleada en el análisis de conducción térmica.

$$q = -k \frac{dT}{dx}$$

donde:

$q$  es el calor transferido o ganado.

$k$  es el coeficiente de conductividad térmica.

$dT$  representa la variación de la temperatura.

$dx$  la variación del espesor de la pared.

El siguiente modelo es empleado por la plataforma SolidWorks Flow simulation en la resolución de conducción de calor en zonas sólidas:

$$\frac{\partial \rho e}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \lambda_i \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) + Q_H$$

Donde:

$e$  es la energía interna específica.

$Q_H$  es la velocidad de emisión o absorción de calor por unidad de volumen.

$\lambda_i$  son los valores del tensor de conductividad térmica.

En ese sentido los sistemas de ecuaciones a resolver pueden volverse bastante complejos viéndose forzosamente necesarios los métodos numéricos para la resolución de perfiles de presión, térmicos, dinámicos entre otros.

### **2.6.1 Proceso de simulación CFD**

Las simulaciones CFD desarrollan cierta metodología que recurre al recurso computacional para su programación y resolución, es por este motivo que el desarrollo de la simulación se ve establecido en etapas de preprocesamiento, procesamiento y postprocesamiento.

#### **Preprocesamiento:**

En esta etapa se abarca tanto el proceso de diseño como los principales parámetros de la simulación, es decir en el análisis CFD es necesario inicializar todas aquellas condiciones que influyan en el modelo final y sus resultados, tales como condiciones de borde, frontera y restricciones externas. Entre algunos ejemplos podemos mencionar cargas térmicas, presiones, establecer coeficientes, valores iniciales, cargas de radiación entre otros ejemplos. Para el caso del ICG podríamos emplear condiciones de flujo másico del fluido de transporte, cargas térmicas, establecer las entradas y salidas del modelo, variar la malla, establecer la temporalidad del estudio, diseñar el propio ICG, entre otros aspectos.

**Procesamiento:**

Esta etapa suele ser la más crítica en lo que respecta al gasto computacional debido al proceso iterativo que tiene que evaluar la computadora según los parámetros establecidos en la etapa de preprocesamiento. La duración de una simulación depende de varios factores, uno de los más destacables puede ser el tamaño de la malla empleada debido a la cantidad de volúmenes a resolver según el método empleado, dentro de este aspecto es común explorar la convergencia de las mallas a partir de la variación de las mismas en el resultado que se considere aceptable (análisis de independencia de malla), otro aspecto suele ser la temporalidad del estudio, es decir, si este es estacionario suele ser asociado a menores tiempos de cálculo, en cambio si el estudio se comporta transitorio se asocia a mayores tiempos de cálculo debido a que este varía con el tiempo y a su vez su duración es asociada al tiempo de simulación.

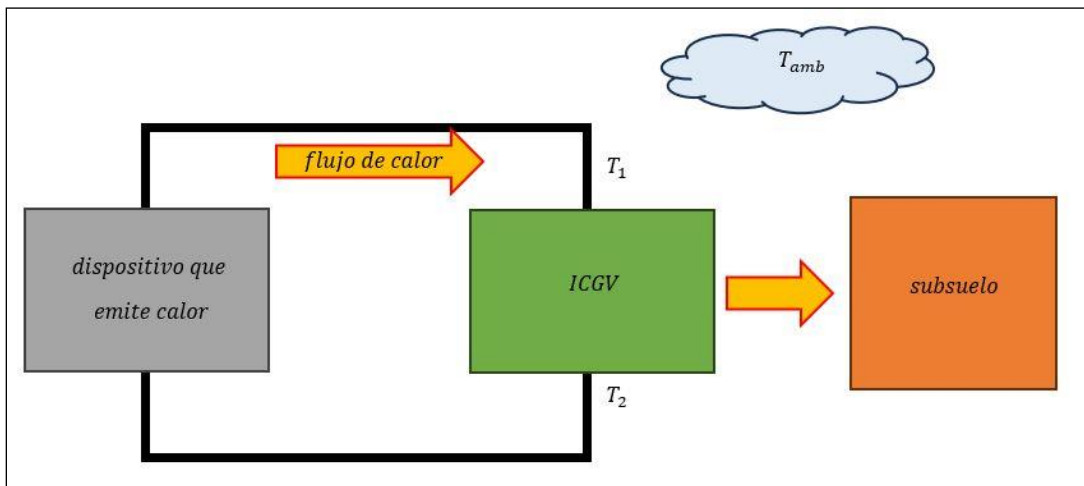
**Postprocesamiento:**

En esta instancia de la simulación es cuando podemos visualizar y evaluar los resultados obtenidos, en este punto de la simulación podemos recolectar datos de interés y dependiendo la plataforma inclusive exportar gráficas con información pertinente, evaluando los resultados comparados a métodos analíticos o experimentales pudiendo realizar correcciones en el preprocesamiento en caso de detectar alguna anomalía o error que podría ser consecuencia de un mal parámetro de entrada en la etapa de preprocesamiento. Asociado al estudio del ICG este permitirá observar los perfiles térmicos y evaluar la transferencia de calor mediante la utilización de planos de visualización que permitirán proyectar contornos con temperaturas máximas y mínima

## Capítulo 3 MODELADO Y SIMULACIÓN.

### 3.1 Descripción del sistema.

Teniendo lo anterior en cuenta el ICGV puede considerarse un subsistema que puede ser acoplado a diferentes aplicaciones (ver figura 3.1), satisfaciendo diferencias de temperatura con gradientes de flujo de calor significativamente mayores a los logrados desde el dispositivo que capta o emite calor hacia el medio ambiente (ver figura 2.6 y 2.7).



**Figura 3.1 Esquema de flujo de calor para un dispositivo emisor de calor (figura propia).**

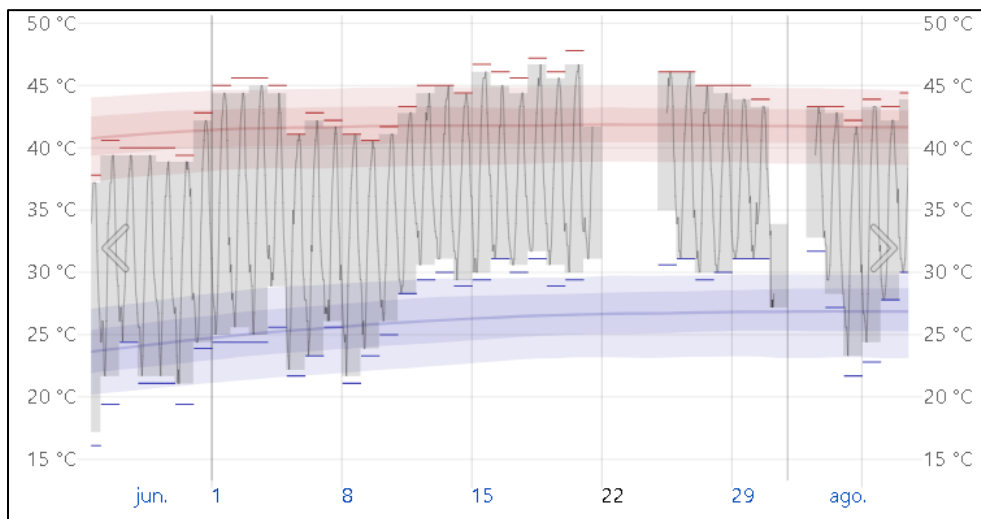
Donde:

$$T_1 > T_2 \text{ \& } T_{amb} > T_{subsuelo}$$

$T_1$  temperatura a la entrada del ICGV

$T_2$  temperatura de salida del ICGV.

Se han considerado las temperaturas del subsuelo de la ciudad de Mexicali como valor de referencia debido a que en la región se presenta clima muy cálido; a manera de ejemplo, lugar donde las temperaturas en la temporada de verano pueden oscilar entre los 40°C - 50°C en el ambiente, motivo por el cual es de interés el encontrar mejores condiciones de disipación térmica, en la figura 3.2 se muestra el histórico de temperaturas representando valores mínimos (azul) y máximos (rojo), siendo los valores intermedios los reportados en función del horario.



**Figura 3.2 Histórico de temperaturas del ambiente en Mexicali, Baja California[20].**

Para la siguiente simulación se empleará un ICVU vertical con una profundidad efectiva de 24 m, se considerará como principales mecanismos de transferencia de calor la conducción y la convección entre el medio y la tubería. Se estableció que la curvatura “U” a la mitad del trayecto de la tubería se considerará despreciable por tanto la longitud total del intercambiador será ligeramente mayor a los 24 m. Se ha considerado un solo medio de disipación (únicamente tierra del entorno como relleno del ICG).

### 3.2 Propiedades del sistema.

Una aplicación requiere disipar calor, el cual se transfiere al fluido de transporte con una temperatura a la entrada del ICVU de 35.52 °C.

Las condiciones del agua se especifican a continuación en la tabla 3.1:

**Tabla 3.1 Condiciones del flujo del agua como fluido transportador.**

<i>Parámetro</i>	<i>Valor</i>	<i>Unidad</i>
<i>Densidad</i>	995	$kg/m^3$
<i>Flujo másico</i>	0.04975	$kg/s$
<i>Flujo volumétrico</i>	3	LPM
<i>Velocidad</i>	0.01854	$m/s$
<i>Viscosidad dinámica</i>	0.000769	$Ns/m^2$
<i>CP</i>	4.178	$kJ/kg^{\circ}K$

En la tabla 3.2 se definen algunas de las características empleadas del subsuelo:

**Tabla 3.2 Propiedades del subsuelo.**

<i>Parámetro</i>	<i>Valor</i>	<i>Unidad</i>
<i>Difusividad</i>	$3.36 \times 10^{-7}$	$m^2/s$
<i>Conductividad</i>	0.78	$W/mK$
<i>Densidad</i>	2,700	$kg/m^3$

La tabla 3.3 describe las propiedades de la tubería:

**Tabla 3.3 Propiedades de la tubería.**

<i>Parámetro</i>	<i>Valor</i>	<i>Unidad</i>
<i>Conductividad térmica</i>	16.3	$W/mK$
<i>Densidad</i>	7,900	$kg/m^3$
<i>Cp</i>	0.5	$kJ/kg^{\circ}K$

### 3.3 Condiciones iniciales

Se considera que las temperaturas del subsuelo varían en función de la profundidad, estas temperaturas fueron determinadas de manera experimental y alimentarán posteriormente el software bajo una condición inicial.

La tabla 3.3 describe el comportamiento gráfico-térmico del subsuelo en función de la profundidad (**Ver figura también figura 2.4**).

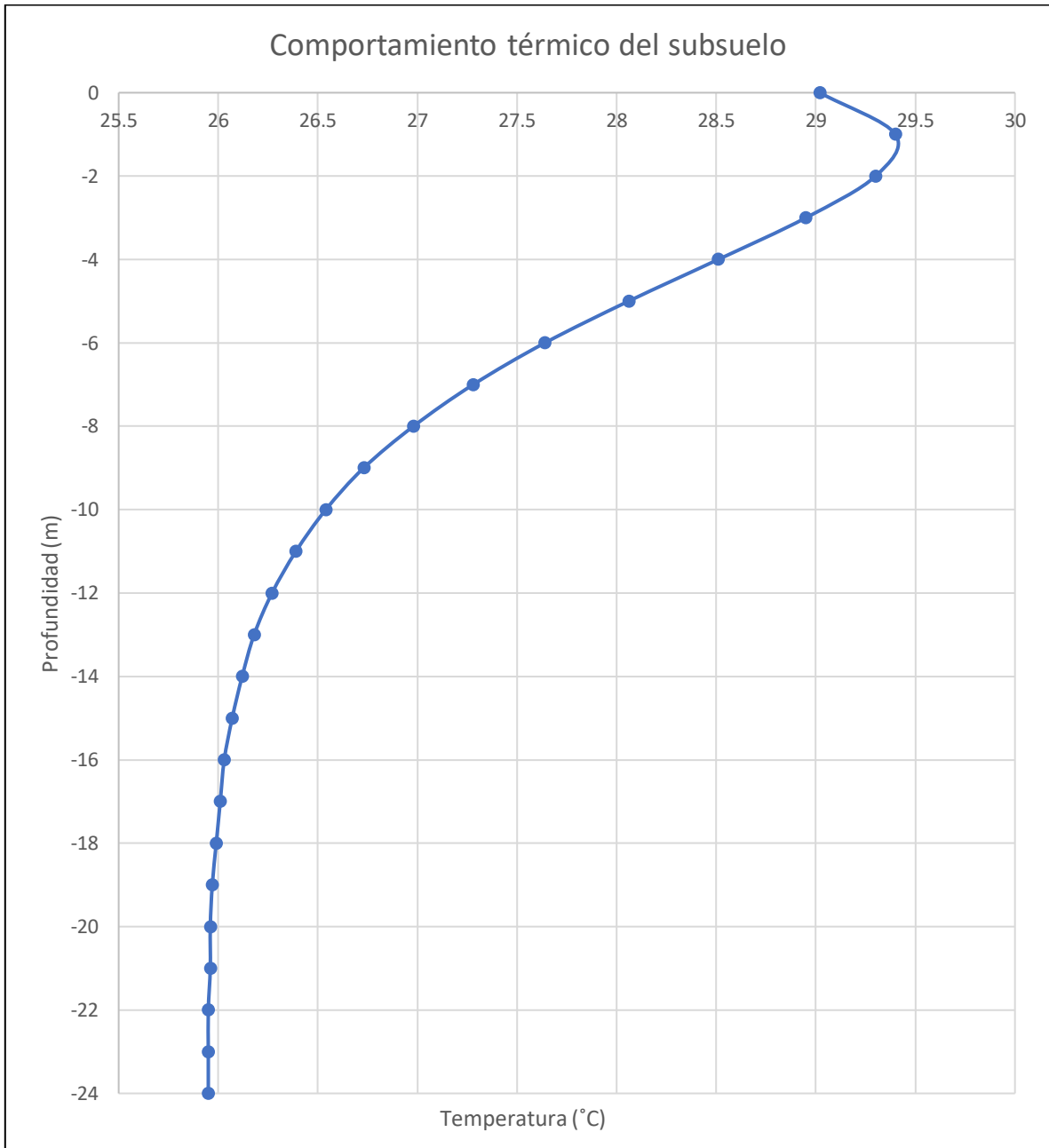


Figura 3.3 Gráfico de comportamiento térmico del subsuelo.

La tabla 3.4 muestra las dimensiones del ICG tipo U:

**Tabla 3.4 Parámetros geométricos del ICG**

<i>Elemento</i>	<i>Parámetro</i>	<i>Dimensión (m)</i>
<i>Tubería del ICG</i>	a) Diámetro interno.	0.0586
	b) Diámetro externo.	0.0603
	c) Longitud recta (profundidad).	24
	d) Radio de la U (respecto al centro de la tubería).	0.11985
	e) Longitud total del tubo en u.	24.11985
	f) espesor del tubo.	0.00085
<i>Medio de disipación</i>	g) Diámetro a evaluar.	2
	h) Profundidad a evaluar.	25
	i) Longitud a partir de los 24 m de profundidad.	1

### 3.4 Modelado de componentes del ICGU.

Para el modelado de las piezas que componen el ICGU se optó por la utilización del software SolidWorks.

De acuerdo a la figura 3.4 se elaboran los componentes que constituyen el ICGU, el cual consta de la tubería del ICG y el subsuelo.

#### 3.4.1. Modelado de la tubería.

Para el modelado de la tubería se selecciona una nueva pieza y se crea el plano de trabajo (en este caso el alzado) para posteriormente comenzar con el dibujo del perfil del tubo (ver figura 3.4).

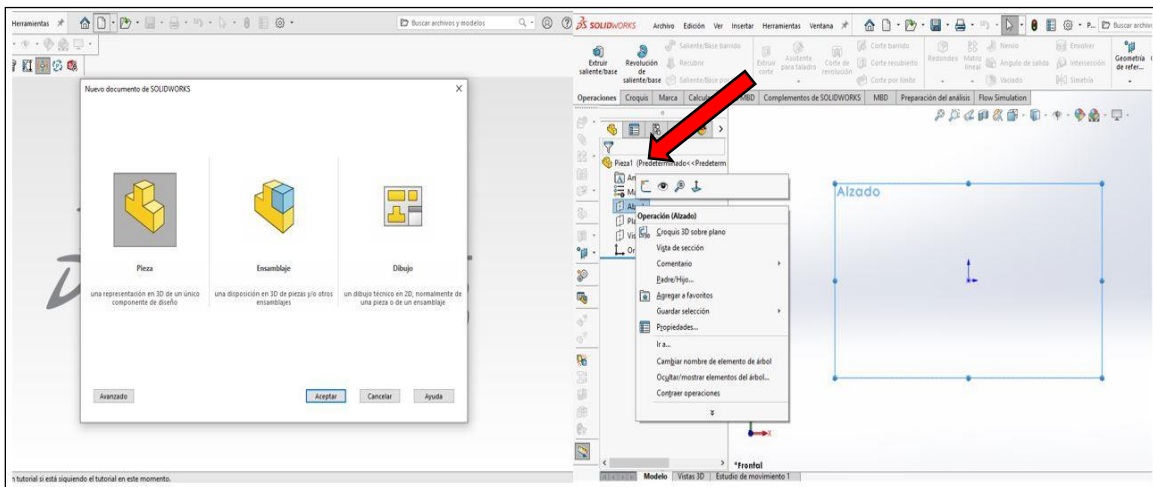
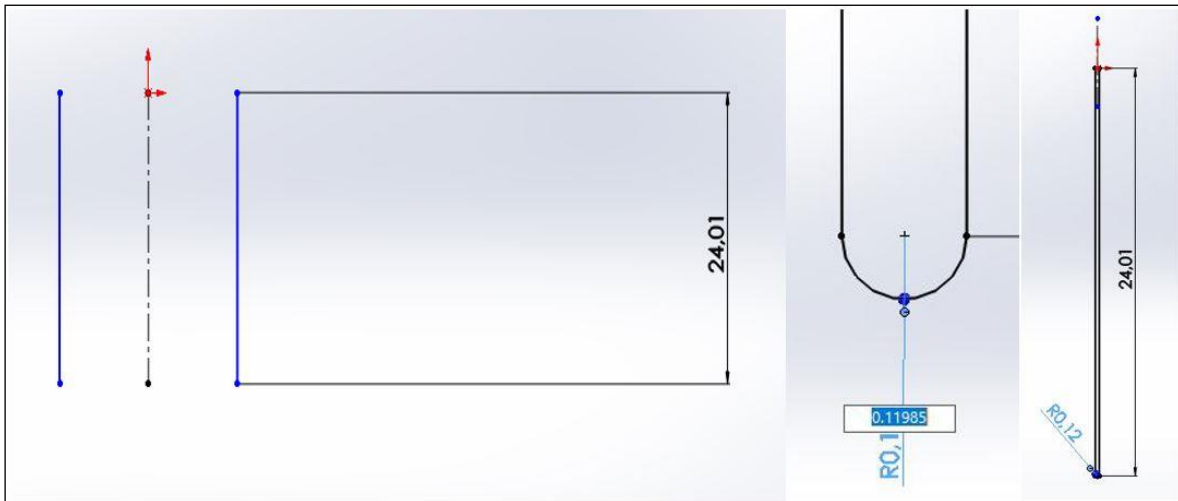


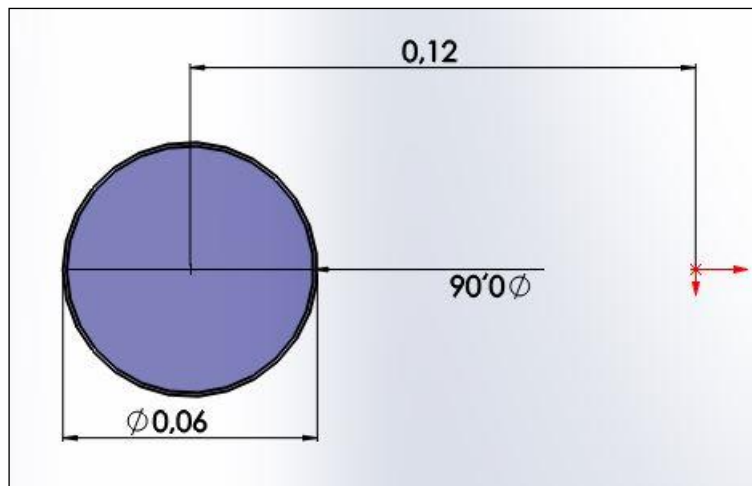
Figura 3.4 Interfaz de SolidWorks para modelado.

Para el modelado del tubo y siguiendo las dimensiones establecidas (ver figura 3.5), se dibujan 2 líneas verticales con una dimensión de 24.01 m simétricas, después se dibuja una media circunferencia en la parte inferior relacionándolo tangencialmente con las líneas previas acotándolo a un radio de 0.11985 m.



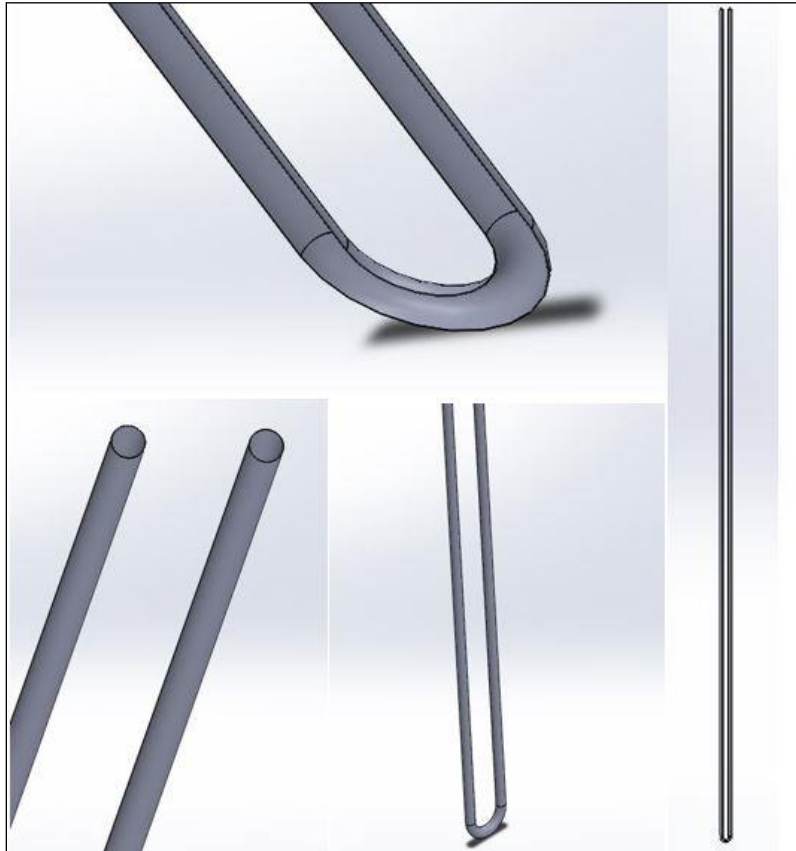
**Figura 3.5 Dimensiones del perfil de la tubería U.**

Posteriormente se realiza el perfil circular de la tubería en un plano perpendicular al alzado (ver tabla 7), se realizan 2 círculos concéntricos con medidas de 0.0586m y 0.0603, estos estarán espaciados con respecto al origen con una longitud equivalente al radio de la U cuidando que los círculos tengan como centro el comienzo del perfil dibujado en la figura 3.6.



**Figura 3.6 Perfil de la sección transversal de la tubería.**

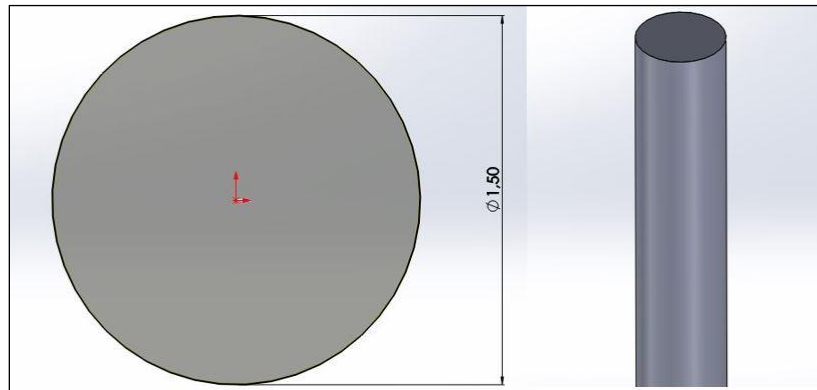
Finalmente, con ambos perfiles se realizó una extrusión con la función de barrido en donde el perfil de la figura 3.7 sigue la trayectoria de la figura 3.6 generando así la geometría final de la tubería.



**Figura 3.7 Vista de corte y tubería terminada.**

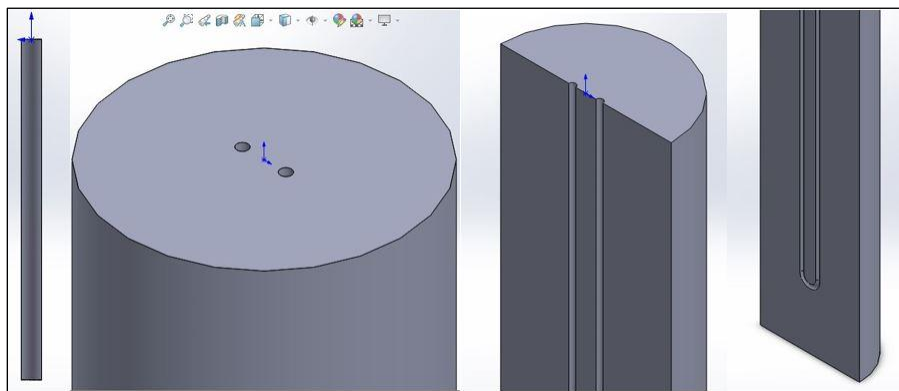
### 3.4.2. Modelado del subsuelo.

Para el subsuelo se inició por determinar un volumen para analizarlo, posteriormente en la simulación este volumen debe ser lo suficientemente grande como para que el perfil térmico en estado de equilibrio del tiempo  $t$  no se vea afectado por concentraciones de calor, imitando de esta manera el cómo se disipa el calor en un medio que tiende prácticamente al infinito en su volumen. Teniendo lo anterior en cuenta se realizó una extrusión circular evaluando un diámetro de 1.5 m, la extrusión tiene una longitud de 25 m (ver figura 3.8).



**Figura 3.8 Extrusión de cilindro (subsuelo).**

Finalmente se hizo un corte barrido similar a la operación de la figura 3.7. donde el perfil es determinado por el diámetro exterior de la tubería y la trayectoria que sigue es la U del intercambiador (ver figura 3.9).

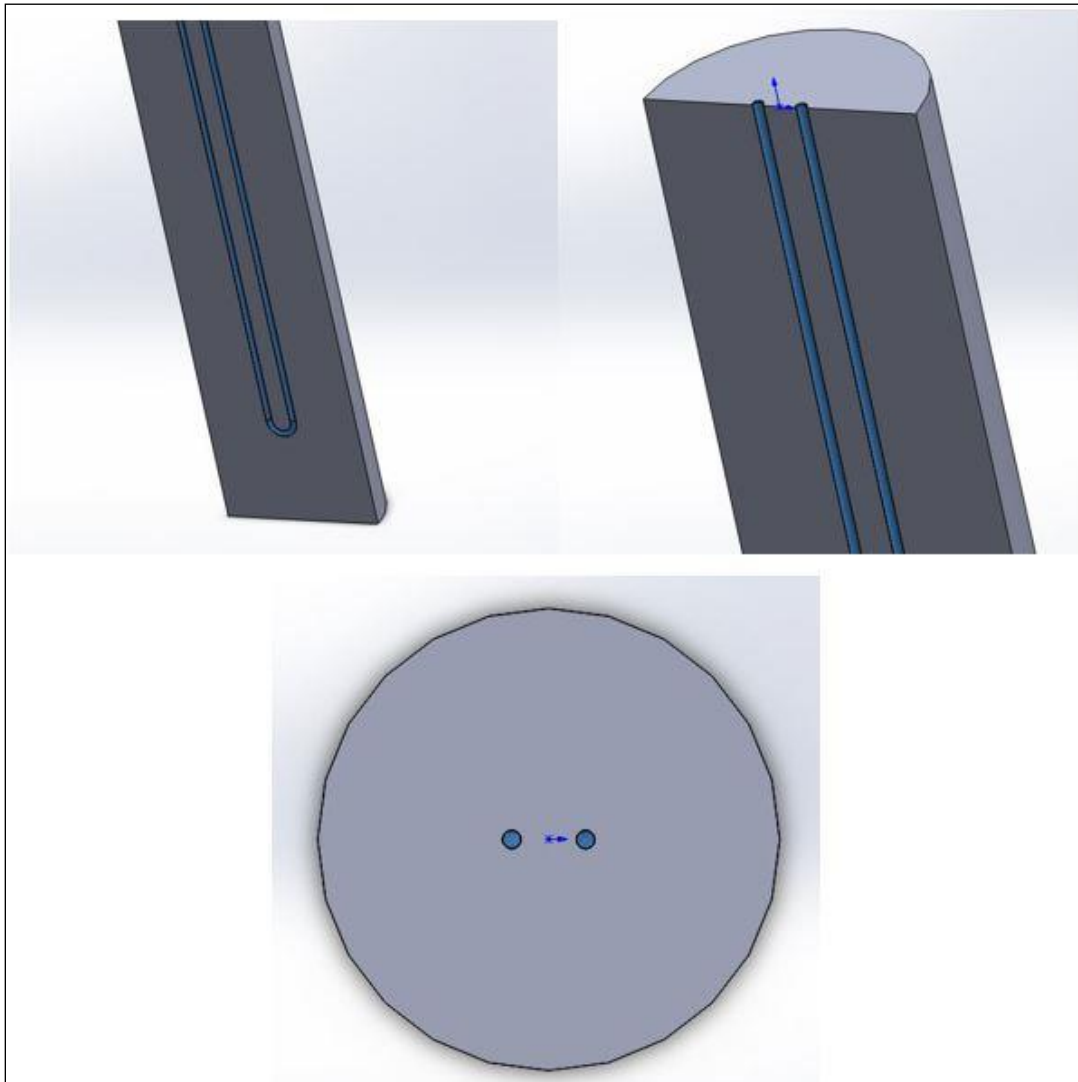


**Figura 3.9 Modelo del subsuelo.**

### 3.5 Ensamble.

El modelo empleado consta del ensamble de la tubería y el subsuelo del apartado 3.3, para esto fue necesario un nuevo archivo de ensamble (ver figura 3.5) y establecer relaciones de posición tangenciales y concéntricas, en la figura 3.10 se muestra el ensamble final.

Por facilidad al momento de proyectar vistas de contornos de resultados, se optó por seleccionar como punto de referencia el eje de coordenadas y el centro del subsuelo, el tubo se posicionará de manera concéntrica en la ranura del subsuelo.



**Figura 3.10 Ensamble del ICGU (en azul la tubería).**

### 3.6 Simulación.

Se utilizó el software SolidWorks para la presente simulación, SolidWorks cuenta con 2 módulos para la resolución de simulaciones, sin embargo estos módulos difieren en cuanto al método de resolución y aplicación, el primer módulo (Simulation) permite resolver problemas que involucran análisis estructurales y térmicos mediante la resolución de ecuaciones que emplean el método de elementos finitos (FEA), en cambio el segundo módulo (Flow Simulation) se utiliza para la resolución de problemas que involucren el flujo de fluidos en base a la dinámica de fluidos computacional (CFD).

Para el presente estudio se emplea el módulo Flow Simulation. Se es posible utilizar este software en la aplicación de ICGU en condiciones de baja entalpía, debido a que se considera que el fluido transportador no presenta cambio de fase.

Se inicia la configuración base de la simulación, para eso se habilita el complemento Flow simulation y se inicia el Wizard ubicado en la pantalla principal del programa (ver figura 3.11).

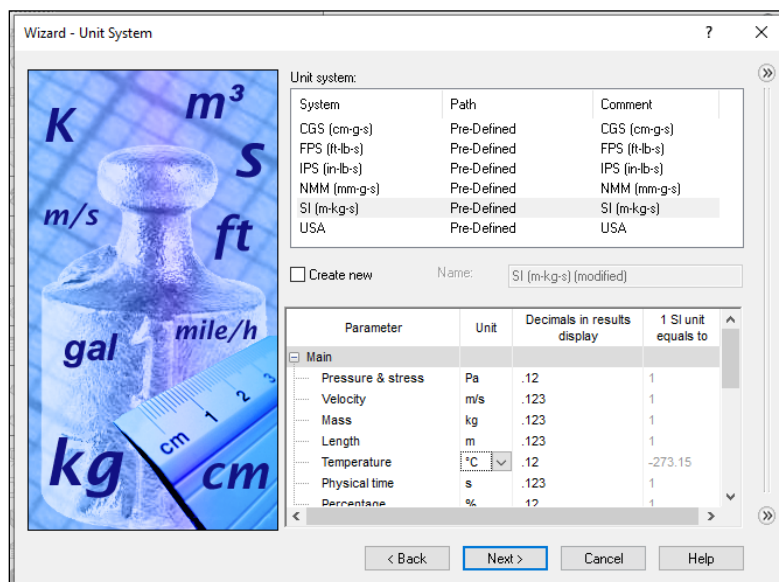


Figura 3.11 Wizard.

En la siguiente pantalla se nos presenta el tipo de estudio que se aplicará, en este caso se distingue que se usará el análisis de flujo interno ya que los datos de interés están referidos en tanto a la porción de espacio contenida dentro del ICGU razón por la que se excluyen las cavidades sin condiciones de flujo, también se define la temporalidad del estudio la cual es de 12,000 s y se consideran los efectos de gravedad en la dirección Z (ver figura 3.12).

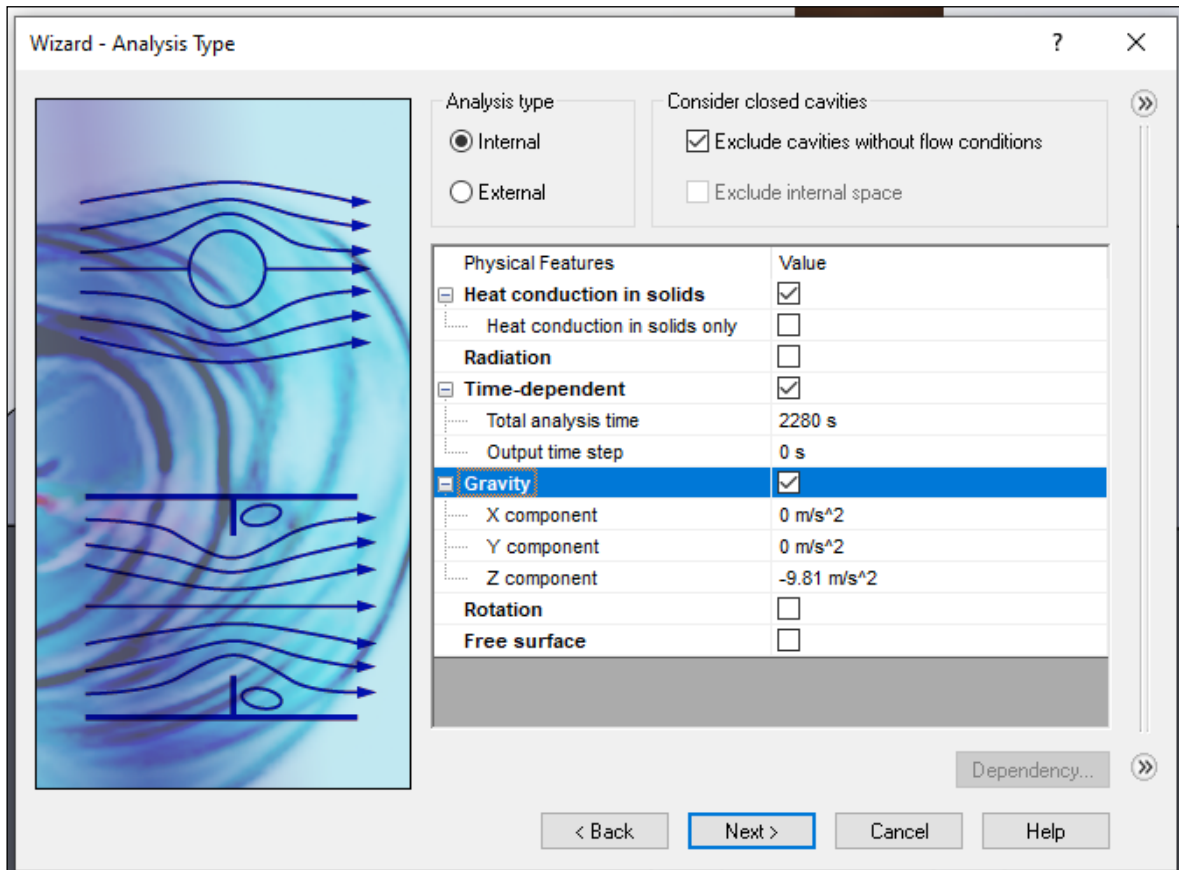
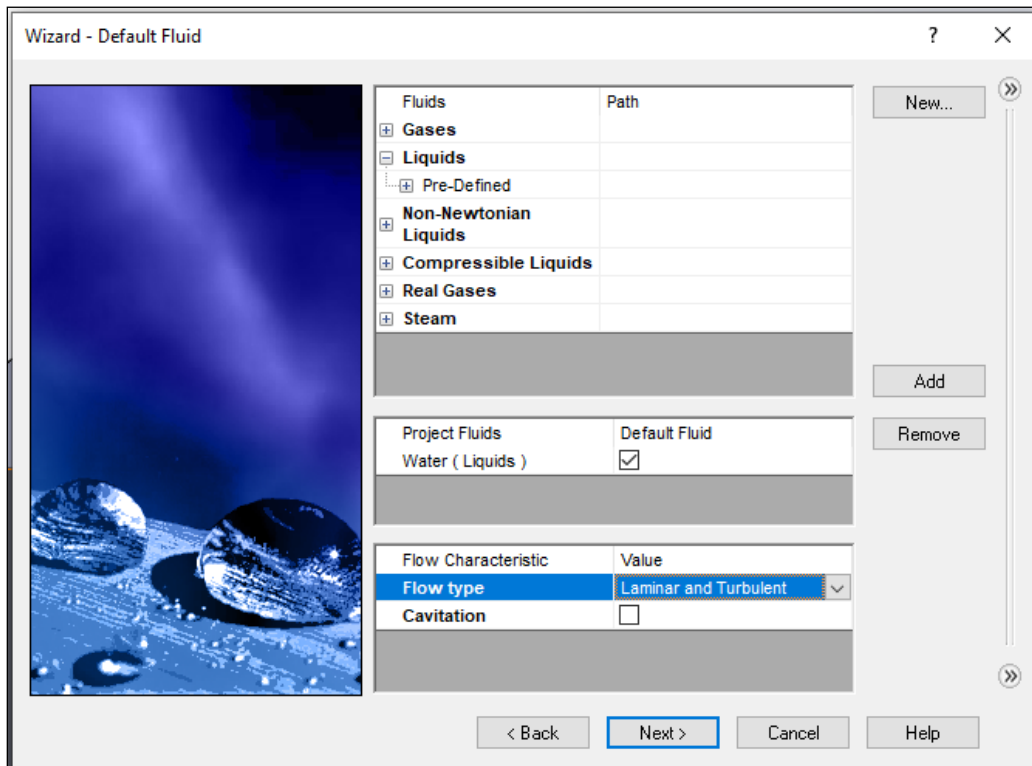


Figura 3.12 Tipo de análisis.

Se definen las características del fluido transportador, en este caso agua la cual viene cargada de forma predefinida en la base de datos de SolidWorks, el software nos da la opción de seleccionar el cómo consideraremos el flujo (laminar o turbulento) por lo que se procede a calcular el número de Reynolds:

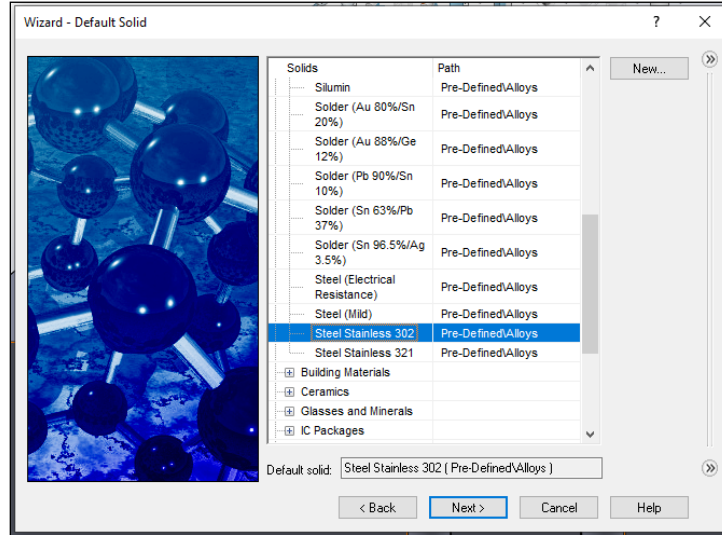
$$Re = \frac{\rho VD}{\mu} = \frac{(995\text{Kg} \cdot \text{m}^{-3})(0.01854\text{m} \cdot \text{s}^{-1})(0.0586\text{m})}{0.000769\text{Ns} \cdot \text{m}^2} = 1405$$

Por lo cual se determina que el flujo del agua se comporta de manera laminar, finalmente se desprecian los efectos de la cavitación ( ver figura 3.13).



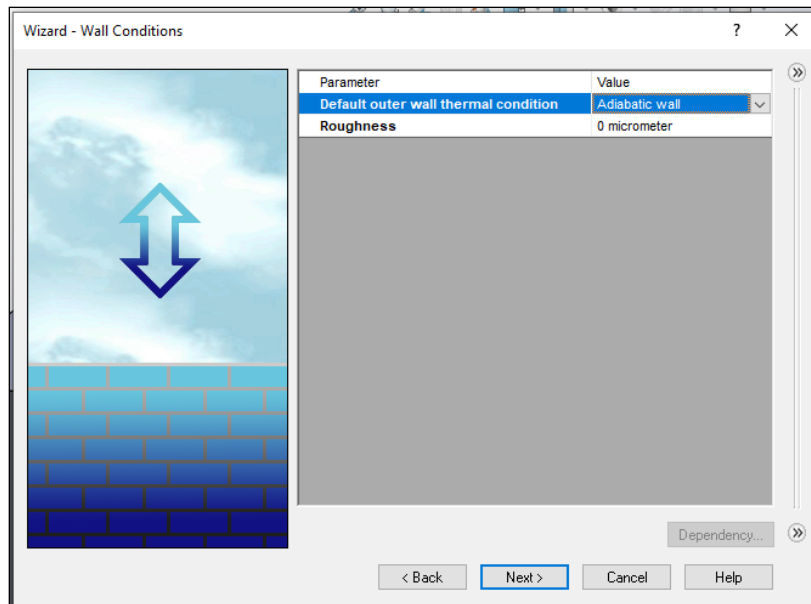
**Figura 3.13 Selección del fluido y comportamiento.**

Se selecciona el material predefinido de los componentes sólidos, en este caso se selecciona el material de la tubería el cual comercialmente se conoce como acero inoxidable 302 (ver figura 3.14).



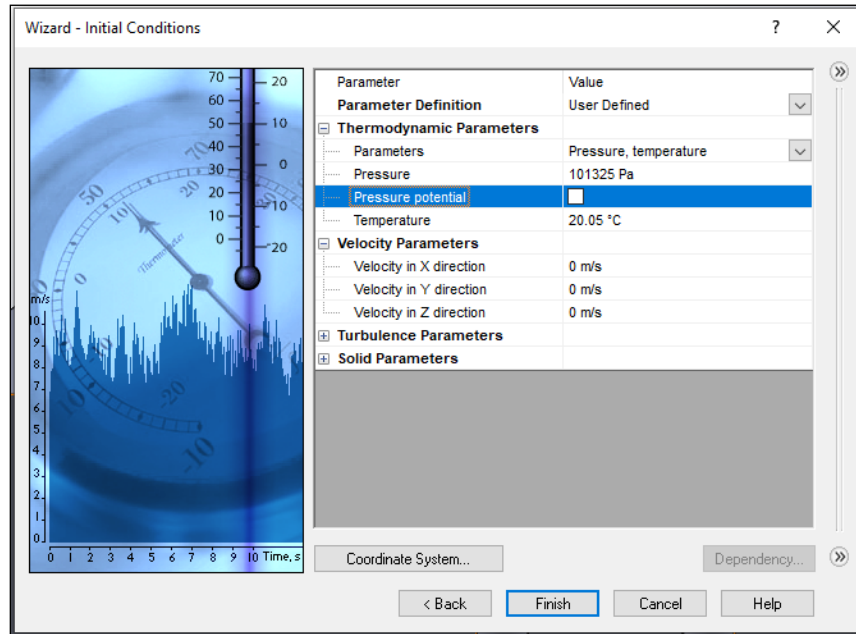
**Figura 3.14 Selección de material sólido.**

En la figura 3.15 se seleccionó que la pared externa del modelo (subsuelo) se comporte de manera adiabática, dado que el calor se difundirá dentro del volumen de tierra establecido.



**Figura 3.15 Condición de la pared.**

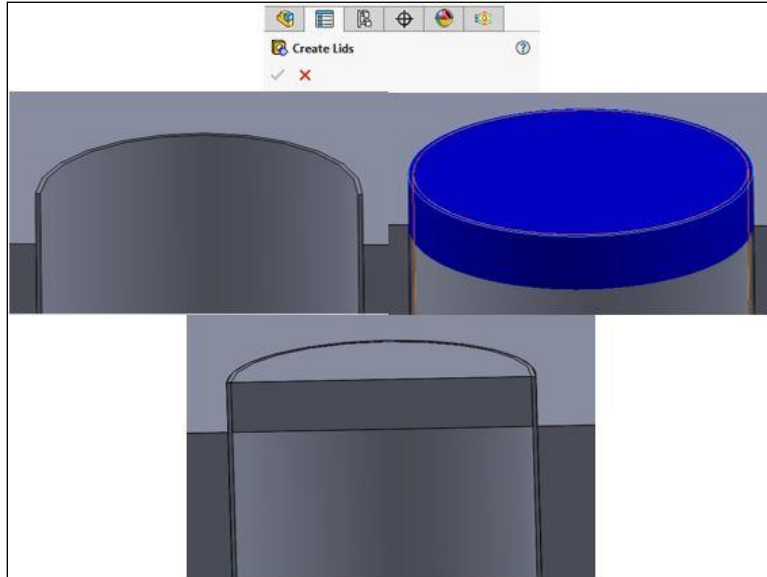
Finalmente, se nos da la opción de poner una presión y temperatura inicial al modelo, pero estas serán definidas puntualmente en secciones posteriores de la simulación (ver figura 3.16).



**Figura 3.16 Condiciones iniciales.**

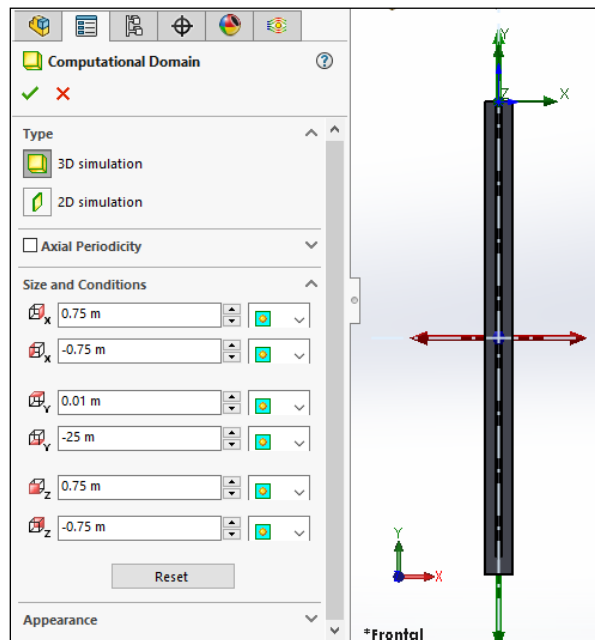
Como referencia los parámetros introducidos en el asesor Wizard son modificables dentro de la interfaz de SolidWorks, sin embargo, es de gran utilidad definir los parámetros generales de la simulación.

Una vez realizada la configuración simple fue necesario acotar el dominio computacional, éste restringirá el volumen total que empleará el mallado para el proceso CFD, particularmente en SolidWorks Flow simulation es necesario delimitar la región del fluido, debido a esto será necesario usar la herramienta “create lids” esta nos permitirá crear “tapas” en el modelo que para que contengan el fluido tanto a la entrada como a la salida del ICGV como lo muestra la figura 3.17.



**Figura 3.17 Lids.**

Una vez cerrado el dominio el software recalcula el dominio computacional, no obstante, se puede definir de manera manual ingresando valores con referencia en las coordenadas cartesianas como lo es en este caso se darán valores que ocupen el volumen en X (0.75,-0.75), Y (.01,-25) y Z (0.75, -0.75) como se puede observar en la figura 3.18.



**Figura 3.18 Dominio computacional.**

Una vez establecido el dominio computacional, en la figura 3.19 se definió la región donde circulará el fluido, en este caso se selecciona un extremo del tubo el cual hará la función de entrada del agua.

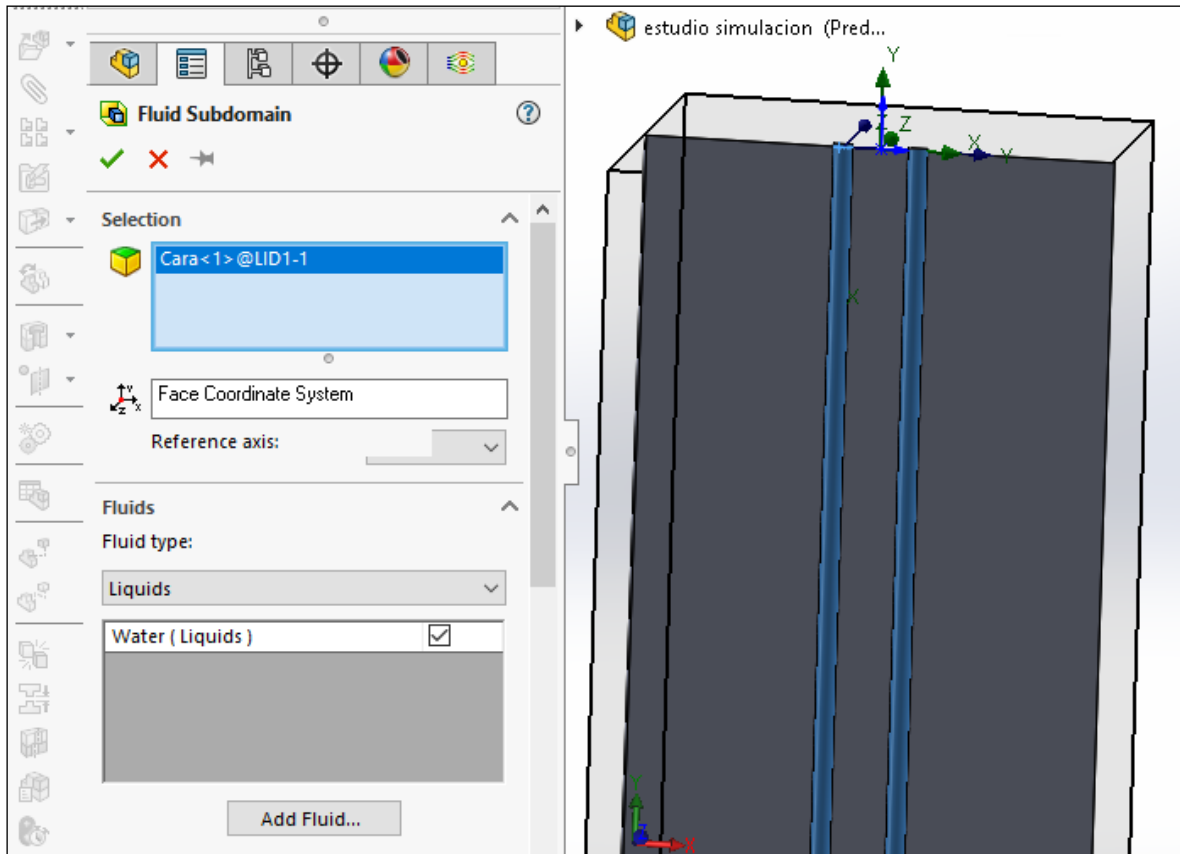
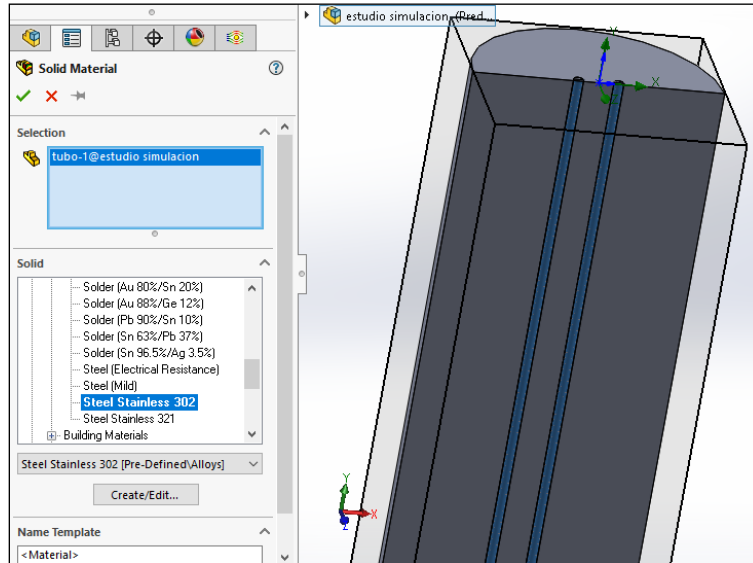


Figura 3.19 Límites del fluido transportador.

A continuación, se definieron los materiales tanto del ICGU como del subsuelo, las propiedades térmicas de cada uno fueron definidas en el apartado 3.2, seleccionando para cada región el material de interés (ver figura 3.20).



**Figura 3.20 Selección del material de la tubería.**

Para el subsuelo fue necesario crear un material específico que sea representativo de las propiedades térmicas del mismo, estas fueron definidas en la sección 3.2 (ver figura 3.21 y 3.22).

Items	Item Properties	Tables and Curves
Property	Value	
Name	subsuelo	
Comments	sin porosidad	
Density	2700 kg/m <sup>3</sup>	
Specific heat	857.74 J/(kg*K)	
Conductivity type	Isotropic	
Thermal conductivity	0.78 W/(m*K)	
Electrical conductivity	Dielectric	

**Figura 3.21 Alta del material del subsuelo.**

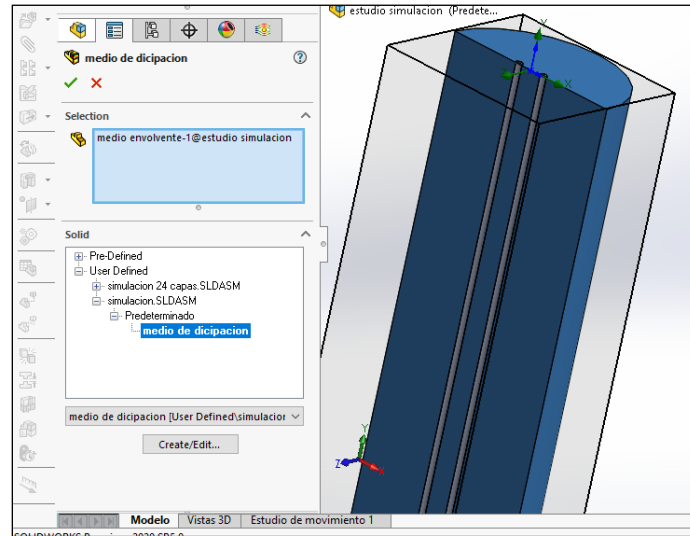


Figura 3.22 Selección del material para el subsuelo.

Posteriormente se seleccionó la entrada del ICGU y en esta se establece el flujo másico correspondiente a la sección 3.2, se consideró un flujo completamente desarrollado y se estableció la temperatura de entrada a 35.52 °C.

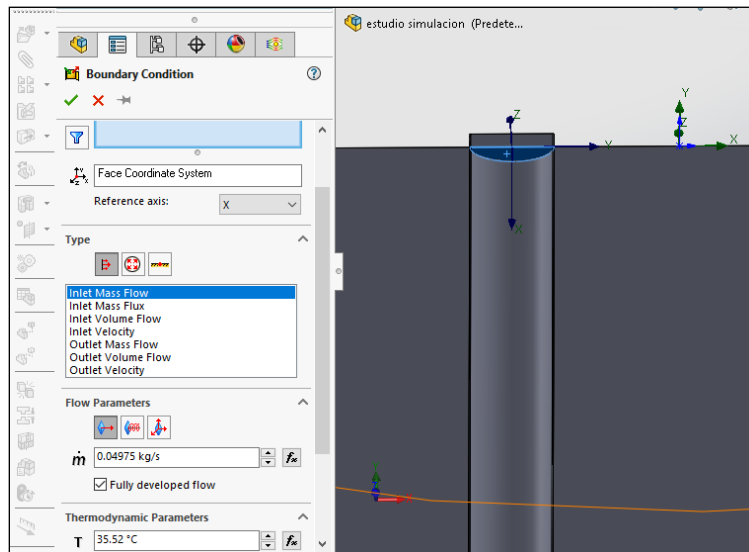


Figura 3.23 Condición de frontera a la entrada del ICGU.

De la misma manera se seleccionó la salida del fluido.

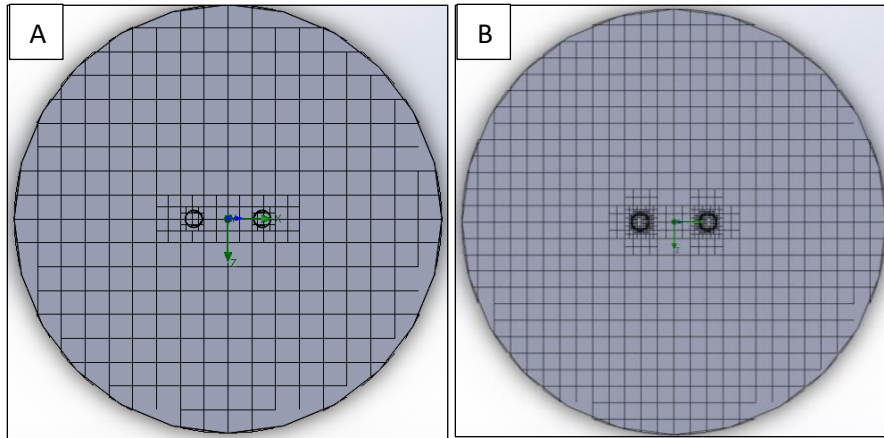
A continuación, se estableció el perfil térmico inicial del subsuelo con una condición inicial en la que los valores de la temperatura serán orientados en el eje Y como lo indica la escala del programa y el ingreso de los datos correspondientes como lo muestra la figura 3.3.

También se consideró que en el instante 0 de la simulación la temperatura del agua y el tubo del ICGU son las mismas que en la entrada ( $35.52^{\circ}\text{C}$ ), en la realidad esta temperatura puede ser inferior, pero se considera de esta manera por la nula razón de transferencia de calor en el instante 0.

### **3.7 Convergencia de la simulación.**

El número de elementos de la simulación va relacionado directamente con la geometría de la perforación del ICGV, para este caso la malla que el software emplea por defecto no satisface las condiciones de distribución de elementos que la tubería requería, por tal motivo fue necesario insertar una malla local en la pared del tubo y variar la cantidad de elementos.

La figura 3.24 es una representación gráfica de la cantidad de elementos distribuidos en la cara superior del ICGU, esta nos muestra la perspectiva del cómo se distribuyen los elementos en torno a la superficie de una sección circular y que el software los distribuye en forma de celdas cuadradas, adaptando las celdas según sea el nivel de refinación.



**Figura 3.24 Refinación de malla.**

Es de notarse que la distribución de elementos no se da de la manera más adecuada en la figura 4.1A (malla por defecto). Teniéndose en cuenta que debería haber una distribución más densa en la región tubular del ICG, la tabla 3.5 muestra la cantidad de elementos utilizados en la figura 4.1 tanto para la malla predeterminada (4.1A) y la convergente (4.1B).

**Tabla 3.5 Comparativo de número de elementos malla por defecto y refinada.**

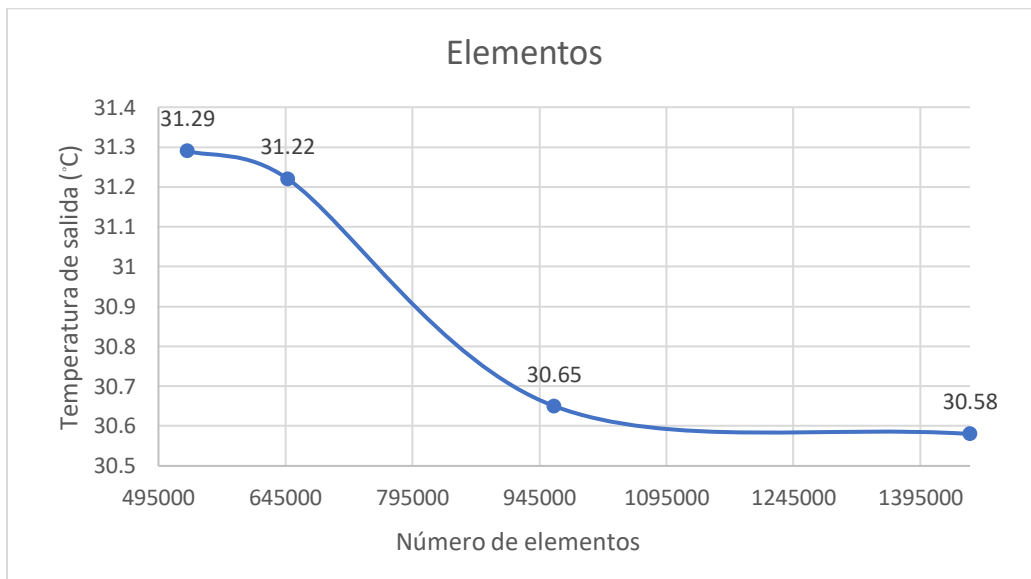
<b>Número de elementos</b>				
Malla	Fluido	Sólido	Total	Fluido en contacto con sólidos
4.1 A	32,524	198,022	230,546	27,888
4.1 B	342,906	1,110,798	1,453,704	228,675

La proporción de elementos de fluido que tienen contacto con la pared sólida es del 85.74% para la figura 4.1A y del 66% para la figura 4.1B, esto nos indica que en la malla sin refinar el software desarrolla la solución en mayor proporción en la pared del fluido, excluyendo en cierta medida la cavidad interna del ICG, por tal motivo la malla fue refinada al punto en que la cantidad de elementos distribuida es lo suficientemente considerable en la pared por la convergencia entre los elementos fluido-sólido, pero no tan despreciable en los elementos constituidos únicamente por fluido, dejando un margen del 34% en dichos elementos.

### 3.8 Independencia de malla

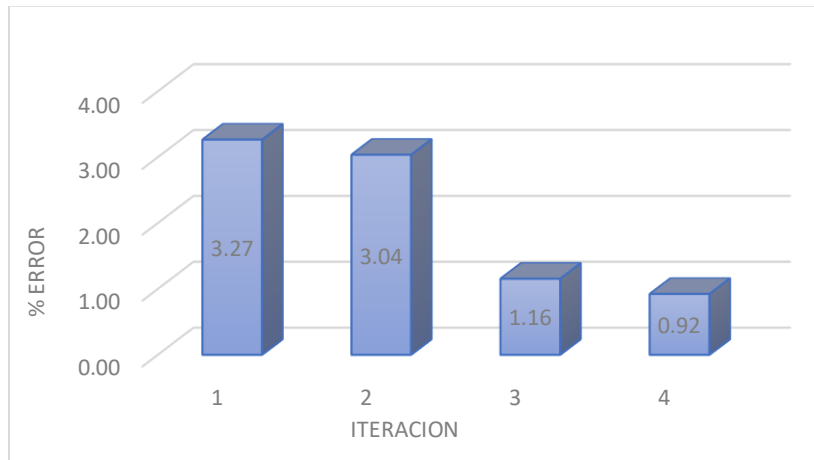
Otro aspecto que se tomó en cuenta es la independencia de malla, tomando un valor inicial obtenido como referencia en la temperatura de salida del intercambiador promedio de 30.29 °C, la determinación de la cantidad de elementos utilizados se dio a partir de iteraciones que refinaban la malla local en la pared del tubo, con lo cual se realizó un historial de iteraciones en el cual el número de elementos totales y la temperatura de salida del intercambiador fueron la referencia del valor indicativo de elementos.

La siguiente figura 3.25 muestra la relación entre el número de elementos y la temperatura de salida hasta la convergencia.



**Figura 3.25 Independencia de malla.**

Se puede observar que el dominio total de elementos en las iteraciones realizadas (puntos) es de 924,175 elementos en todo el dominio la temperatura tiende a fluctuar en hasta 1°C con respecto a la temperatura de referencia, de esta manera en torno a la tercer iteración los valores se estabilizan por debajo de los 30.65 °C y ya se considerándose admisibles, pero no es hasta la cuarta iteración que el porcentaje de error se encuentra por debajo del 1%, sin embargo, hasta ese punto el gasto computacional se incrementa considerablemente por lo cual efectuar simulaciones a partir de los 945,000 elementos no supondría una variación considerable en el resultado obtenido y como consecuencia el error obtenido sería admisible estando por debajo del 2%.

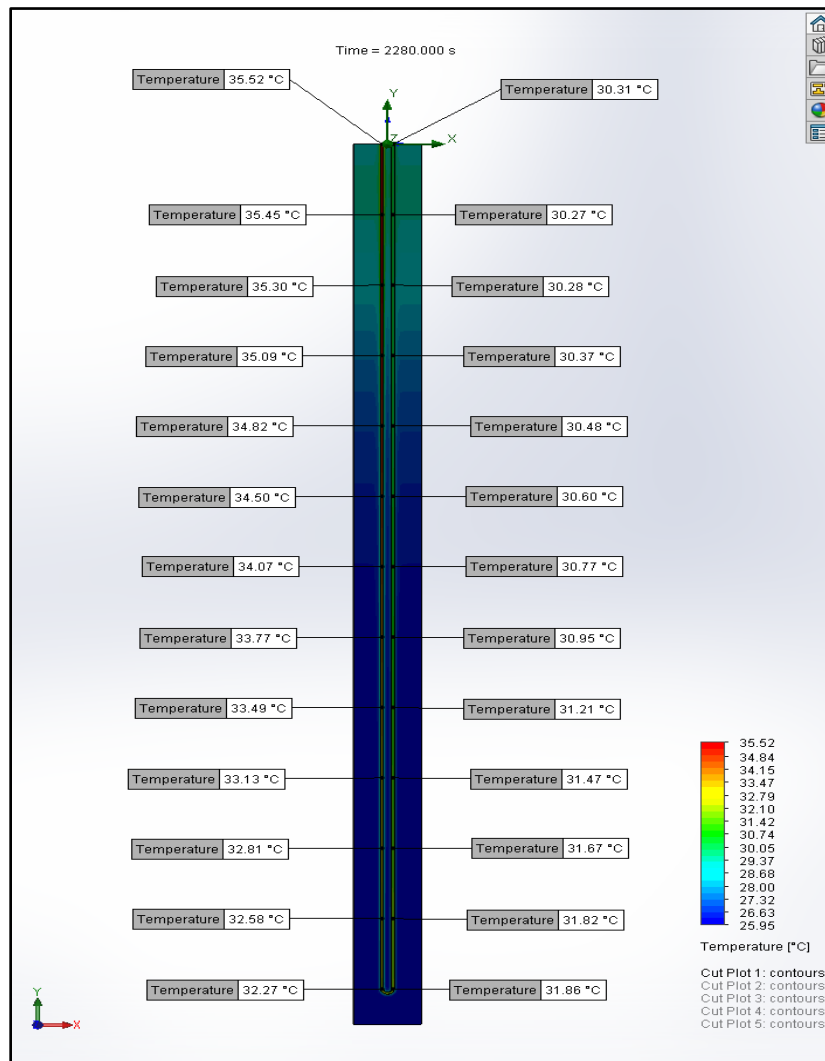


**Figura 3.26 Porcentaje de error correspondiente a las simulaciones.**

## Capítulo 4 RESULTADOS.

### 4.1 Instante $t= 2,280$ segundos.

En la siguiente figura se puede observar el perfil térmico desarrollado por el ICGU, junto con las mediciones puntuales obtenidas en la simulación durante el instante  $t=2,280$  segundos, obteniendo una diferencia de temperatura entre la entrada y la salida del fluido de  $5.21^{\circ}\text{C}$ .



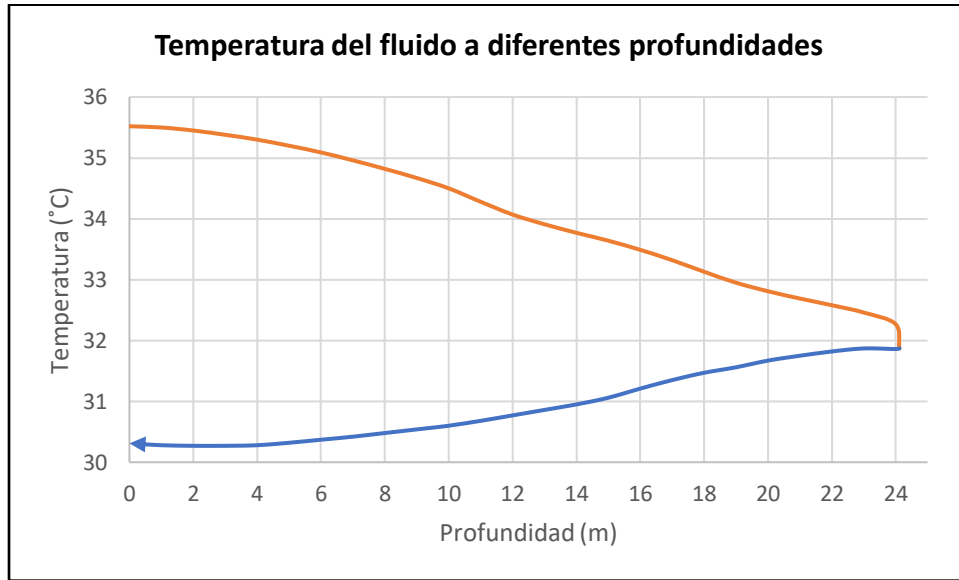
**Figura 4.1** Lecturas puntuales tomadas en el ICGU con distancia vertical entre lecturas de 2 metros cuando  $t=2,280$  s.

En la figura 4.1 se observó que la mayor proporción de la disipación térmica se presentó en la primera sección del ICGU (línea de entrada de agua), a su vez en esta primera sección es posible ver como la temperatura desciende  $3.25^{\circ}\text{C}$  con respecto a la diferencia entre la entrada y salida del ICGU, lo que equivale a una reducción de la temperatura del 62.38%, mientras que en la sección media (denominada “U” en la sección más profunda) se obtuvo una diferencia de temperatura de  $0.41^{\circ}\text{C}$ , equivalente a una disminución del 7.86%. Finalmente, en la segunda sección se presenta una disminución en la temperatura de  $1.55^{\circ}\text{C}$  lo que corresponde a un decremento del 29.75% de la temperatura en el ICGU.

De esta manera se observó que la manera en la que disminuye la temperatura en el perfil térmico del subsuelo influye significativamente en el comportamiento del ICGU, ya que en la primera sección del ICGU se experimenta una mayor disipación térmica debido a que la temperatura del subsuelo disminuye gradualmente hasta tomar su valor mínimo en la profundidad máxima del intercambiador ( $26.36^{\circ}\text{C}$ ), además la temperatura del fluido es máxima en la entrada del ICGU ( $35.52^{\circ}\text{C}$ ) lo que contribuye a que la diferencia de temperatura en esta sección sea mayor.

En la segunda sección el comportamiento es distinto debido a que las temperaturas del subsuelo aumentan a medida que se aproximan a la superficie, dado que la temperatura del fluido ya ha disminuido en la primera sección y sigue siendo superior a la temperatura del subsuelo, la diferencia de temperatura en la segunda sección se reduce aún más conforme el fluido se va acercando a la superficie. Esta disminución en el  $\Delta T$  resulta en una menor disipación térmica en esta sección.

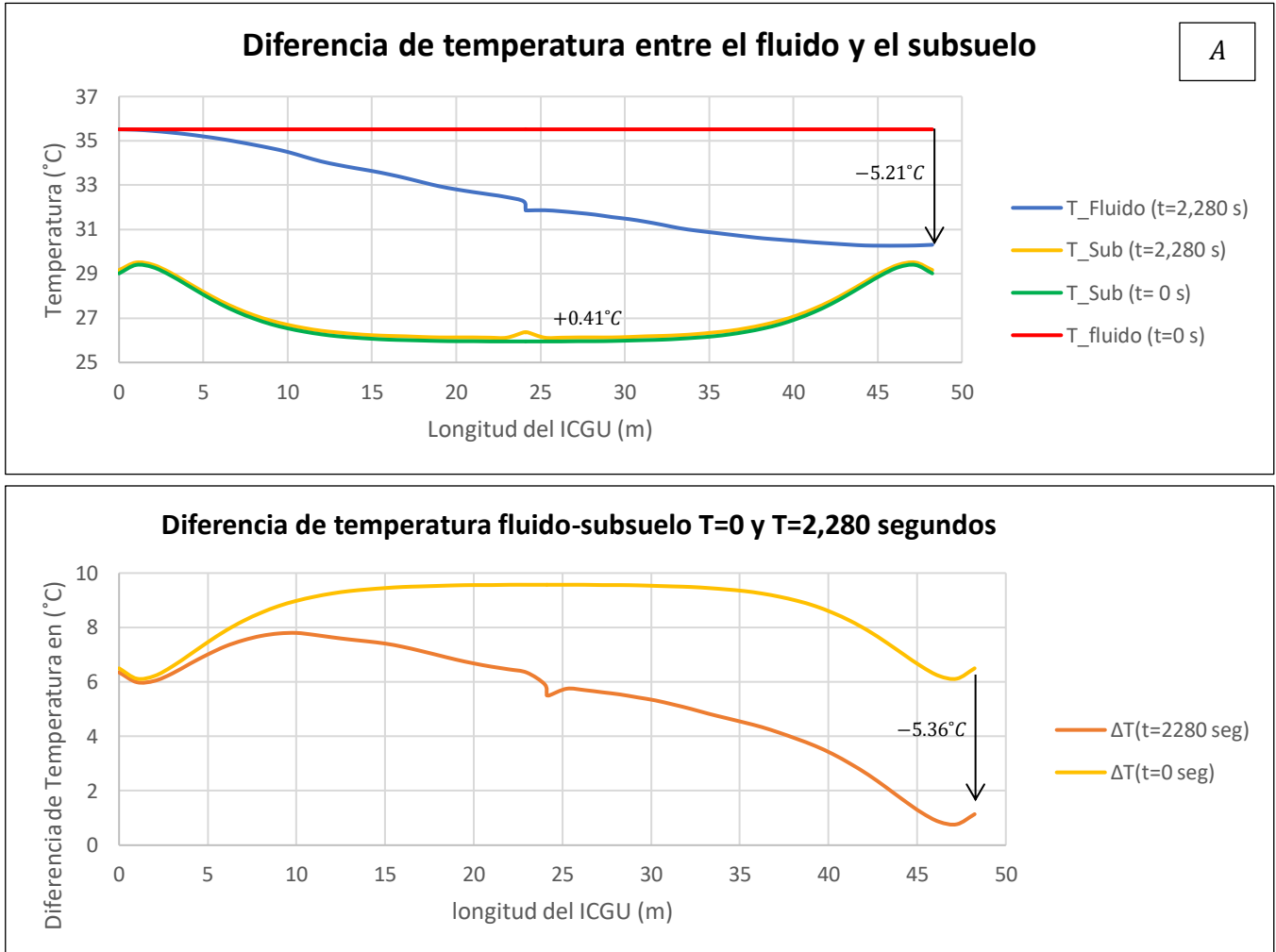
En la siguiente figura se muestra la gráfica del comportamiento térmico del fluido en el ICGU cuando se tiene el tiempo  $t=2,280$  segundos:



**Figura 4.2 Comportamiento térmico del fluido en función de la profundidad en  $t=2,280$  s.**

En la figura 4.2 la profundidad máxima del ICGU contempla la longitud de la “U”, lo que le confiere un valor máximo de 24.12 m; la línea color anaranjado representa el fluido en la primera sección donde este entra a una temperatura constante de  $35.52^{\circ}\text{C}$  y disminuye en promedio  $0.151^{\circ}\text{C}$  por cada metro recorrido, mientras que la línea azul representa el fluido en la segunda sección, donde el intercambiador continua descendiendo su temperatura desde los  $31.86^{\circ}\text{C}$  hasta los  $30.31^{\circ}\text{C}$ , disminuyendo en promedio para esta sección  $0.0646^{\circ}\text{C}$  por cada metro recorrido.

Para el ICGU, la transferencia de calor depende de las temperaturas que el subsuelo es capaz de proveer, considerando esto, la figura 4.3 describe la tendencia del comportamiento térmico a lo largo del trayecto del ICGU mediante la interacción entre la temperatura del fluido y la del subsuelo:



**Figura 4.3 Diferencia de temperatura entre el subsuelo y el agua en diferentes instantes.**

La figura 4.3A muestra las temperaturas del fluido y el subsuelo en el instante  $t=0$  y  $t=2,280$  s; se puede apreciar que la temperatura del fluido en la salida del ICGU disminuyó  $5.21^{\circ}\text{C}$  en  $t=2280$  s en comparación con  $t=0$  s, mientras que la temperatura del subsuelo en  $t=0$  s mostró un incremento de  $0.41^{\circ}\text{C}$  en  $t=2,280$  s en la sección media del ICGU. La figura 4.2B muestra los diferenciales de temperatura entre el fluido y el subsuelo. Cuando  $t=0$  s, los diferenciales de temperatura alcanzan valores máximos, oscilando entre  $6.12^{\circ}\text{C}$  y  $9.57^{\circ}\text{C}$ . A medida que avanza el tiempo de simulación, la diferencia de temperatura disminuye, como se observa en  $t=2,280$  s, donde los valores  $\Delta T$  varían entre  $1.14^{\circ}\text{C}$  y  $7.78^{\circ}\text{C}$ . Entre estos tiempos la

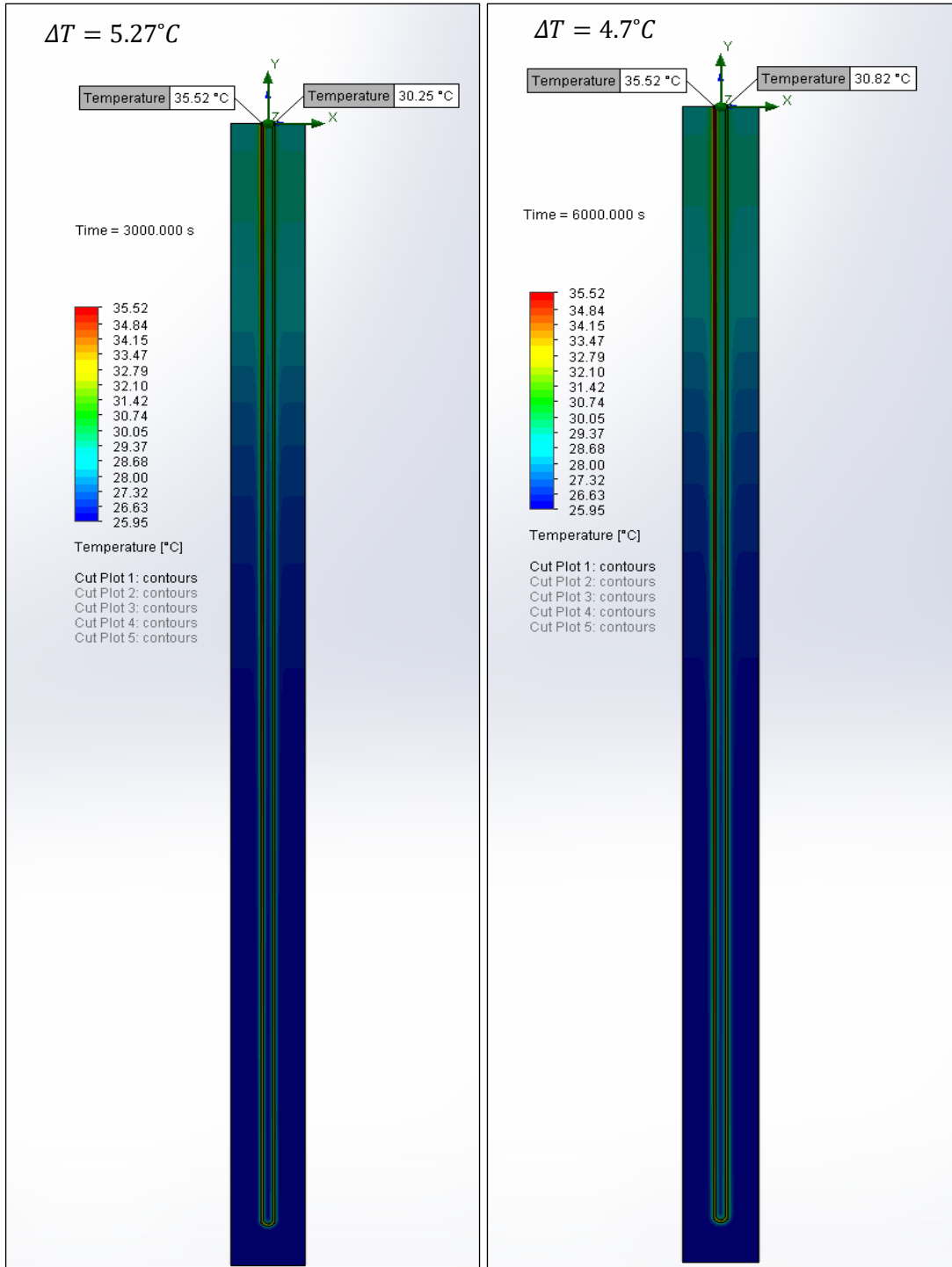
diferencia de temperatura entre  $t=0$  s y  $t=2,280$  s en la salida del fluido disminuye en  $5.36^{\circ}\text{C}$ .

## **4.2 Comportamiento térmico a través del tiempo.**

La figura 4.1. muestra el comportamiento del ICGU cuando  $t=2,280$  s, no obstante, el comportamiento a través del tiempo podría determinar el grado de aplicabilidad en lo que respecta al potencial de disipación de manera continua o intermitente que el ICGU pudiera proporcionar al dispositivo acoplado.

En las figuras 4.1 y 4.4 se puede observar el desarrollo de los perfiles térmicos desde  $t=2,280$  s hasta  $t=12,000$  s, donde a lo largo de la simulación la temperatura en la entrada del fluido permanece constante, a su vez se evidencia una mayor concentración térmica en las regiones cercanas a la pared exterior del tubo del ICGU, efecto que se intensifica con el aumento de la profundidad y la prolongación del tiempo de simulación.

A partir de  $t=3,000$  s y conforme se aumenta el tiempo de simulación hasta  $t= 12,000$  s, la transferencia de calor disminuye gradualmente ( $1,095.39\text{-}843.89\text{W}$ ). Esto se refleja en un mayor incremento de la temperatura en la salida del fluido ( $30.25\text{-}31.46^{\circ}\text{C}$ ) y una reducción en el diferencial de temperatura entre la entrada y la salida del ICGU ( $\Delta T=5.27\text{-}4.06^{\circ}\text{C}$ ), como se muestra en la figura 4.4 con las mediciones puntuales.



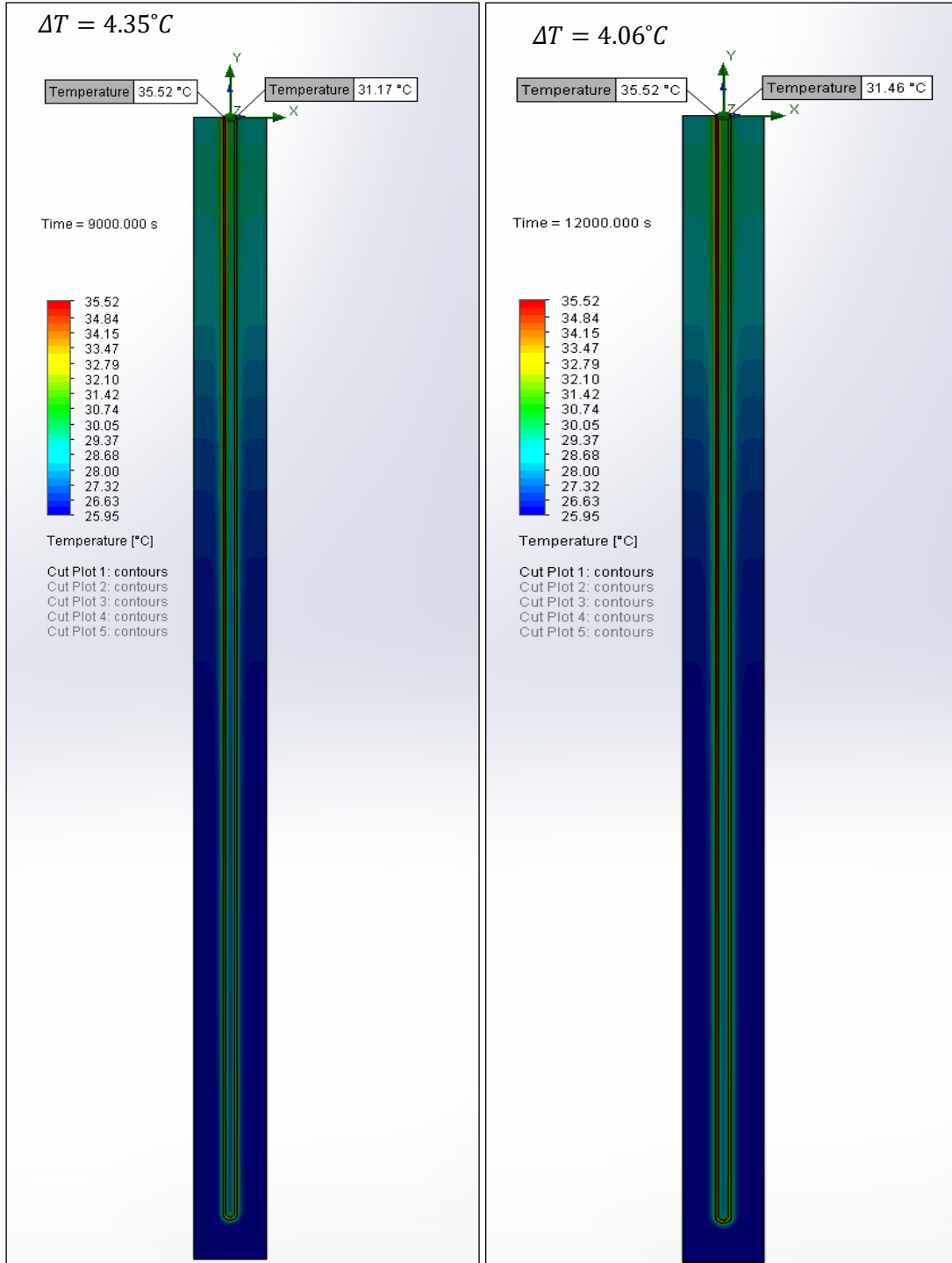
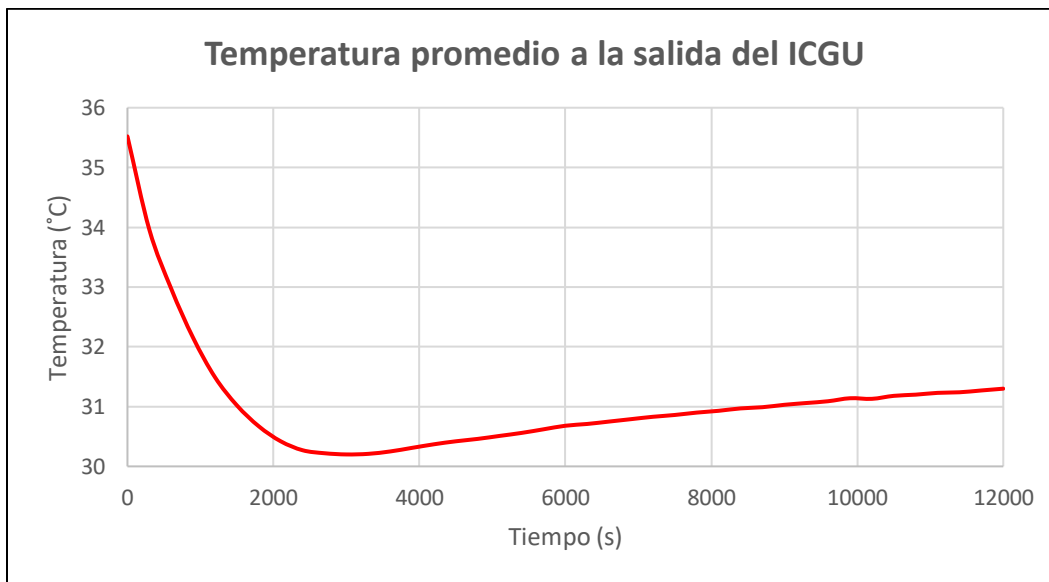


Figura 4.4 Perfiles térmicos y diferencia de temperatura entre la entrada y salida a través del tiempo.

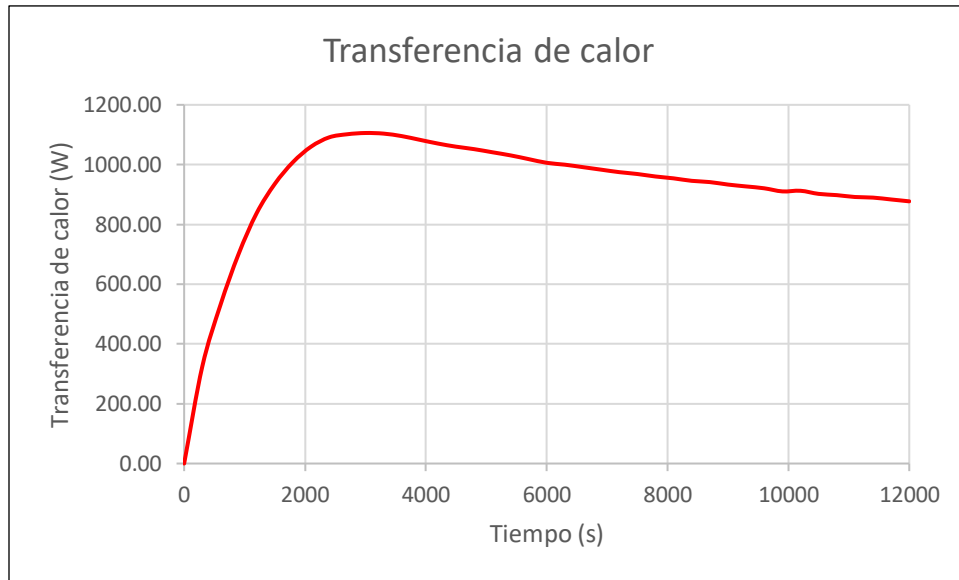
La figura 4.4 muestra que con el avance del tiempo la temperatura del perfil térmico del subsuelo aumenta considerablemente. También se observó que el incremento en la temperatura, junto con la absorción de calor en la segunda sección del ICGU, redujo la capacidad de transferir calor a partir de los 3,000 s. En este punto, la temperatura del fluido en la salida del ICGU aumentó en promedio  $1.34 \times 10^{-4} \text{ }^\circ\text{C}$  por cada segundo transcurrido durante el período de tiempo de  $t=3,000$  a 12,000 segundos. Durante este periodo los valores de temperatura en la salida del fluido variaron desde  $30.25^\circ\text{C}$  ( $t=3,000$  s) hasta  $31.46^\circ\text{C}$  ( $t=12,000$  s).

La figura 4.5 muestra la evolución de las temperaturas en la salida del fluido del ICGU en función del tiempo simulado. Al inicio de la simulación, la temperatura del fluido es de  $35.52^\circ\text{C}$  ( $t= 0$  s). A partir de este momento y hasta los 3,000 s, la temperatura disminuye en promedio de  $1.75 \times 10^{-3} \text{ }^\circ\text{C}$  por cada segundo transcurrido, descendiendo de  $35.52^\circ\text{C}$  ( $t=0$  s) a  $30.25^\circ\text{C}$  ( $t= 3,000$  s).



**Figura 4.5 Temperatura promedio del fluido en la salida del ICGU ( $t=0-12,000$  s).**

Aunque el calor del fluido será eventualmente absorbido por el subsuelo, es importante recordar que el calor rechazado estará relacionado directamente con la diferencia de temperatura entre la entrada y la salida del ICGU. La figura 4.6 muestra la transferencia de calor cuando se evalúa con respecto a estos límites en función del tiempo de la simulación.

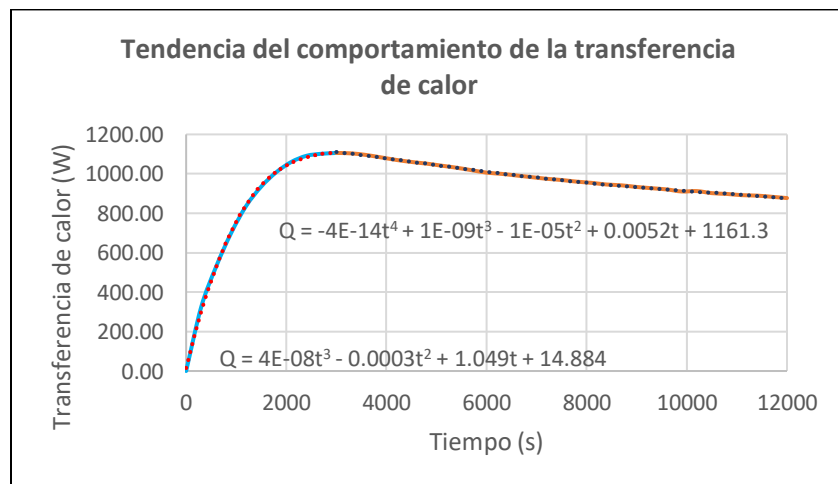


**Figura 4.6 Calor transferido hacia el subsuelo desde  $t=0$  s hasta  $t=12,000$  s.**

La figura 4.6 muestra la transferencia de calor instantánea en el ICGU donde se evalúa la ecuación  $\dot{Q} = \dot{m}C_p\Delta T$ ; la diferencia de temperatura estará dada por la temperatura en la entrada del intercambiador ( $35.52^{\circ}\text{C}$ ) y la temperatura en la salida será establecida por los valores instantáneos de la figura 4.5, es así como la figura 4.6 muestra que la máxima transferencia de calor fue de 1,105.79 W en el instante  $T=3,000$  s y en general el ICGU disipó una mayor cantidad de calor dentro del rango de tiempo 1,800-6,000 s con valores de transferencia de calor por encima de 1kW, también se muestra como la transferencia de calor disminuye a partir de los 3,000 segundos, sin embargo se observa que la disminución en la transferencia de calor no es tan abrupta como el enfriamiento, obteniendo que cuando el ICGU aumentó la transferencia de calor en la primera parte de la simulación lo hizo a razón promedio de 0.37 Watts por cada segundo transcurrido, mientras que cuando disminuyó la transferencia de calor a partir de los 3,000 segundos lo hizo a razón promedio de 0.025 Watts por cada segundo transcurrido.

### 4.3 Disipación de calor horaria.

Se estimó la disipación de calor en los 12,000 s que contempla la simulación, con referencia en la figura 4.6 y 4.7 la transferencia de calor se comportó con la tendencia de la función  $\dot{Q} = 4 \times 10^{-8} t^3 - 0.0003 t^2 + 1.049 t + 14.88$  hasta el instante  $T=3,000$  s, mientras que a partir de ese instante la transferencia de calor se comportó conforme la función  $\dot{Q} = -4 \times 10^{-14} t^4 + 1 \times 10^{-9} t^3 - 1 \times 10^{-5} t^2 + 0.0052 t + 1161.3$  ( $3,000 \text{ s} < t < 12,000 \text{ s}$ ), en la primer hora de la simulación (3,600 s) donde es más evidente la variación del calor absorbido por el subsuelo se obtuvieron valores que oscilan entre 0 y 1,105.79 W presentando un valor promedio en la disipación de calor de 0.837 kWh, para la segunda hora se presentaron valores de transferencia de calor en el rango de 974.84 a 1,095.4 W representando un valor promedio en la disipación de calor horaria de 1.031 kWh, en la tercer hora operativa del ICGU es más apreciable ver el descenso en la disipación de calor obteniendo valores que oscilan entre los 974.84 a 897.84 W presentando un valor promedio en la disipación de calor horaria de 0.934 kWh, finalmente a partir de los 10,800 s hasta los 12,000 s la disipación de calor horaria obtuvo un promedio de 0.295 kWh, por tanto evaluando entre el instante inicial de la simulación ( $t=0$  s) hasta  $t=12,000$  s se obtiene una disipación de calor horaria promedio de 0.774 kWh.



**Figura 4.7 Tendencia del comportamiento de la transferencia de calor.**

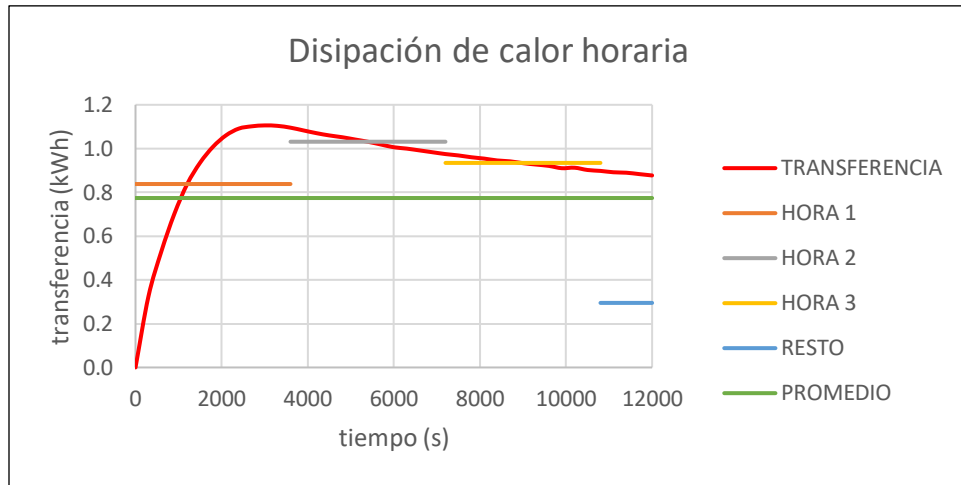


Figura 4.8 Calor transferido al subsuelo.

## **Capítulo 5. CONCLUSIONES.**

### **5.1 Conclusiones**

Actualmente los ICGU son una tecnología relativamente reciente que permite transferir o disipar calor al subsuelo que los rodea. Los ICGU eficientan los procesos de transferencia de calor según la aplicación a la que estos se acoplen, sin embargo, el comportamiento de los mismos sigue siendo objeto de estudio donde la principal problemática es el dimensionamiento y la predicción del comportamiento en base a las características proporcionadas por el subsuelo.

En el presente trabajo se analizó el comportamiento de un ICGU en estado transitorio, considerando agua como fluido de recirculación, la cual ingresa a temperatura constante de 35.52 °C y disipa el calor hacia el subsuelo, donde se considera la variación de la temperatura del subsuelo en el eje “y”, empleando el software de SolidWorks como herramienta para el diseño y simulación del ICGU.

El uso de la herramienta SolidWorks ayudó a modelar con precisión el ICGU desde su etapa de dibujo CAD, hasta la implementación de los supuestos y condiciones iniciales, permitiendo que las dimensiones del ICGU y el perfil térmico del subsuelo se apegaran más a las condiciones reales de operación. Un aspecto relevante durante la resolución de la simulación fue el mallado que SolidWorks proveía por defecto, el cual no satisfacía el porcentaje de error admisible menor al 1% con respecto a la temperatura de salida del fluido (teniendo 3.27% en la primera iteración) por lo que fue se decidió refinar la malla hasta que la variación de la temperatura de salida fue de 0.92%.

Como referencia, durante la simulación el ICGU en el tiempo de operación  $t = 2,280$  s, se obtuvo una diferencia de temperatura entre la entrada y salida del fluido de 5.21°C, correspondiéndole una temperatura de salida de  $T = 30.31^\circ\text{C}$ ; cabe mencionar que este último valor solo difiere en 0.06% con respecto al resultado experimental generado en un estudio previo a este trabajo ( $T = 30.29^\circ\text{C}$ ).

Se concluyó que la mayor cantidad de calor transferido se disipó en la primera sección del intercambiador, donde los perfiles térmicos del fluido y el subsuelo presentan diferencias de temperatura de mayor magnitud ( $7.8^{\circ}\text{C}$ , cuando  $y=0$  m); a medida que el fluido recorre el ICGU hasta el inicio de la sección media ( $y=24$  m), dicha diferencia se reduce a  $5.51^{\circ}\text{C}$ , de esta manera en la primera sección se determinó que se transfiere cerca del 62.38% de la cantidad total de calor (675.52 W en  $t=2,280$  s). En el caso de la segunda sección del intercambiador, las temperaturas tanto del subsuelo como del fluido aumentan de manera paralela, siendo de esta forma la transferencia de calor del 29.75% en esta sección (322.16 W en  $t=2,280$  s), agregando que el calor de la primera sección en cierta medida y dependiendo el periodo de tiempo puede volverse potencialmente absorbido por la segunda sección, afectando aún más la capacidad de enfriamiento en esta última sección, teniendo esto en cuenta se determinó que la transferencia de calor en todo el ICGU instante  $t= 2,280$  s fue de 1.082 kW.

Durante el lapso total de la simulación operativa del ICGU, el dispositivo alcanzó el valor máximo de transferencia de calor en  $t=3,000$  s, el cual fue de 1,105.79 W, conforme se aumentó el tiempo de la simulación hasta los 12,000 s, la concentración térmica en el subsuelo redujo la temperatura en la salida del fluido  $1.21^{\circ}\text{C}$ , transfiriendo finalmente 877.15 W; de acuerdo al comportamiento descrito y considerando que los dispositivos que transfieren calor lo suelen hacer de manera intermitente, el ICGU podría ser operado dentro de los diferentes rangos de tiempo presentados en la simulación, particularmente el rango de tiempo más favorable fue entre los 1,800-6,000 s, donde se puede ver que la transferencia de calor está por encima de 1 kW, considerando un flujo másico de 0.04975 kg/s (flujo volumétrico = 3 Lpm).

Finalmente se obtuvo que durante los 12,000 s de operación, la disipación de calor en la primera hora fue de 0.837 kWh, 1.031 kWh en la segunda hora, 0.934 kWh en la tercera hora y 0.295 kWh para los últimos 20 minutos, resultando en un promedio de disipación de calor horario de 0.774 kWh.

## **5.2. Trabajos futuros.**

Para el caso de la presente simulación las condiciones fueron planteadas en base a valores experimentales, en trabajos futuros se vería interesante realizar un estudio paramétrico donde se hagan variaciones en el flujo másico del fluido (aumentarlo y ver que efecto tiene en el subsuelo). De la misma manera el variar la temperatura en la entrada del ICGU puede ocasionar cambios interesantes, también sería importante ver cómo se comporta el ICGU al variar la distancia entre tuberías, colocar un material aislante entre ellas, o cambiar el material de las propias tuberías, teniendo como enfoque que el calor de la primera sección no sea transferido a la segunda sección, reduciendo la capacidad en la transferencia de calor.

Por último, sería de gran ayuda ver si los softwares ANSYS o COMSOL tienden a disminuir el gasto computacional, reduciendo el tiempo de resolución de los perfiles térmicos, esto debido a que para llegar a un error por debajo del 1%, el incremento en el número de elementos fue considerable (aumento de 530.54%), generando así una comparativa en la cual se determine el software idóneo para la resolución del ICGU.

## Referencias

- [1] J.W. Lund, Geothermal energy focus, *Refocus* 7 (2006) 48–51. [https://doi.org/10.1016/S1471-0846\(06\)70660-6](https://doi.org/10.1016/S1471-0846(06)70660-6).
- [2] S.J. Self, B. V. Reddy, M.A. Rosen, Geothermal heat pump systems: Status review and comparison with other heating options, *Appl Energy* 101 (2013) 341–348. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.01.048>.
- [3] Sushas V. Patankar, *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*, London , 1980. [https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=Y2G1DwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP1&dq=Patankar+Suhas&ots=7TM3aTu9ZI&sig=U8MglQ07cG\\_OG4tDm6XistBLqd0#v=onepage&q=Patankar%20Suhas&f=false](https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=Y2G1DwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP1&dq=Patankar+Suhas&ots=7TM3aTu9ZI&sig=U8MglQ07cG_OG4tDm6XistBLqd0#v=onepage&q=Patankar%20Suhas&f=false) (accessed April 3, 2023).
- [4] D. Bauer, W. Heidemann, H.-J.G. Diersch, Transient 3D analysis of borehole heat exchanger modeling, *Geothermics* 40 (2011) 250–260. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2011.08.001>.
- [5] F. Tang, H. Nowamooz, Factors influencing the performance of shallow Borehole Heat Exchanger, *Energy Convers Manag* 181 (2019) 571–583. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.12.044>.
- [6] D. Pahud, M. Belliardi, P. Caputo, Geocooling potential of borehole heat exchangers' systems applied to low energy office buildings, *Renew Energy* 45 (2012) 197–204. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2012.03.008>.
- [7] T. Arghand, S. Javed, J.-O. Dalenbäck, Combining direct ground cooling with ground-source heat pumps and district heating: Borehole sizing and land area requirements, *Geothermics* 106 (2022) 102565. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2022.102565>.
- [8] D.A. Rodriguez-Alejandro, A. Olivares-Arriaga, J.A. Moctezuma-Hernandez, A. Zaleta-Aguilar, J.A. Alfaro-Ayala, S. Cano-Andrade, Comprehensive analysis of a vertical ground-source heat pump for residential use in Mexico, *Geothermics* 99 (2022) 102300. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2021.102300>.
- [9] Santoyo Edgar, Torres Ignacio, Escenario futuro de explotación de la energía geotérmica: hacia un desarrollo sustentable, *Revista Digital Universitaria UNAM* 11 (2010) 17. [https://www.ru.tic.unam.mx/bitstream/handle/123456789/1812/art95\\_2010.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://www.ru.tic.unam.mx/bitstream/handle/123456789/1812/art95_2010.pdf?sequence=1&isAllowed=y) (accessed May 9, 2023).
- [10] Rios Juan, Análisis de factibilidad para climatización de edificaciones con energía geotérmica de baja entalpia en el ejido "Bonfil" Santa Rosalía B.C.S, UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA, n.d. <https://repositorioinstitucional.uabc.mx/bitstream/20.500.12930/4979/1/PAL017434.pdf> (accessed May 9, 2023).
- [11] Cárcel Francisco, Martínez David, La energía geotérmica de baja entalpía, *3C Tecnología* 4 (2015). <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/67173/C%3a1rcel%3bDavid%20Mart%3adnez%20M%3a1rquez%20%20Geothermal%20energy%20of%20low%20enthalpy.pdf?sequence=1&isAllowed=y> (accessed May 9, 2023).
- [12] E. Rios, R. Ramos, G. Ortiz, G. Moreno, G. Gómez, C. de la fuente, C. Rivera, M. Rodriguez, C. Vega, M. Padilla, S. Madrigal, Mapa de Ruta Tecnológica Usos Directos del Calor Geotérmico, Mexico,

2018. [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/416191/MRT\\_UDCG\\_Final.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/416191/MRT_UDCG_Final.pdf) (accessed July 10, 2023).
- [13] A. Parra, *Distintas aplicaciones de bombas de calor acopladas al terreno en la zona geotérmica de la comarca de Cartagena.*, Universidad Politécnica de Cartagena., 2015. <https://core.ac.uk/download/pdf/60434058.pdf> (accessed June 5, 2023).
- [14] Y. He, M. Jia, X. Li, Z. Yang, R. Song, Performance analysis of coaxial heat exchanger and heat-carrier fluid in medium-deep geothermal energy development, *Renew Energy* 168 (2021) 938–959. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.12.109>.
- [15] J. Rangel, *Diseño termohidráulico de un intercambiador de calor geotérmico para el aprovechamiento de recursos de media entalpía.*, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, 2015. [http://bibliotecavirtual.dgb.umich.mx:8083/xmlui/bitstream/handle/DGB\\_UMICH/5518/FIM-M-2015-1275.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://bibliotecavirtual.dgb.umich.mx:8083/xmlui/bitstream/handle/DGB_UMICH/5518/FIM-M-2015-1275.pdf?sequence=1&isAllowed=y) (accessed June 7, 2023).
- [16] D. Wang, L. Lu, P. Cui, A new analytical solution for horizontal geothermal heat exchangers with vertical spiral coils, *Int J Heat Mass Transf* 100 (2016) 111–120. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.04.001>.
- [17] R. Sangi, D. Müller, Dynamic modelling and simulation of a slinky-coil horizontal ground heat exchanger using Modelica, *Journal of Building Engineering* 16 (2018) 159–168. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2018.01.005>.
- [18] Rosa Rodrigo, *DISEÑO DE INTERCAMBIADOR GEOTÉRMICO HORIZONTAL CERRADO PARA BOMBA DE CALOR GEOTÉRMICA APLICADA EN LA CALEFACCIÓN DE UNA EDIFICACIÓN CON USO DE OFICINA, EN PUERTO MONTT.*, Universidad Austral de Chile, 2009. <http://cybertesis.uach.cl/tesis/uach/2009/bmfcir788d/doc/bmfcir788d.pdf> (accessed June 7, 2023).
- [19] G. Llopis Trillo, C. López Jimeno, Intercambiadores geotérmicos verticales, *Revista Digital Del Cedex* (2009). <http://ingenieriacivil.cedex.es/index.php/ingenieria-civil/article/view/138> (accessed July 2, 2023).
- [20] weather spark, *Datos históricos del tiempo en Mexicali en julio de 2023 (México)* - Weather Spark, (2023). <https://es.weatherspark.com/h/m/2211/2023/7/Tiempo-hist%C3%B3rico-en-julio-de-2023-en-Mexicali-M%C3%A9xico#Figures-Temperature> (accessed November 23, 2024).