

Análisis Térmico De Un Intercambiador Geotérmico En Serpentín Para Uso De Climatización
Aplicando Técnicas De Cfd

José Arturo García Martínez

Trabajo De Grado En La Modalidad De Investigación Para Optar Al Título De Ingeniero De
Petróleos

Director

Germán González Silva.

Doctor en Ingeniería Química.

Codirectora

Natalia Prieto Jiménez.

Doctora en Ingeniería Química.

Universidad Industrial De Santander

Facultad De Ingenierías FísicoQuímicas

Escuela De Ingeniería De Petróleos

Ingeniería De Petroleos

Bucaramanga

2026

Dedicatoria

Dedico este trabajo a Dios que ha sido el mayor promotor de mis sueños y metas en la vida y de la forma de irlos cumpliendo uno a uno debido a su gracia y bondad conmigo, a mis padres por su apoyo y mis hermanos por todo los alientos dado, a todas las personas que me han apoyado durante mi proceso para poderme graduar como profesional. Desde las personas de comedores hasta mis docentes y la escuela de petróleos.y todas las personas que me dieron un trabajo para llegar al final del mes .

A mi pareja Ana María Pita, que me ha brindado su apoyo y respaldo durante mis estudios, y a patricia y manuel, que me han creído en mí y siento su amor a mi lado, y a mis amigos Yury y Camilo, Karen, liz y todas las personas que conocí por el alma mater por su acompañamiento durante mi carrera, por ayudarme.

Agradezco a todas las personas que han dado así sea un apoyo moral y incondicional en mi lucha por mi grado, a todos ellos por ser un motivo para seguir luchando por mi sueño de ser profesional y seguir avanzando día a día.

Agradecimientos

Agradezco a Dios y a mis padres por todo lo que me han pasado hasta el día de hoy, por lo que me ha tenido que pasar y por las experiencias que tuve que aprender para llegar hasta esta culminación de esta etapa de mi vida, a mi familia y a Ana maría pita mi pareja que han sido un apoyo incondicional y han creído en mí, para culminar esta etapa de mi vida. A todos los docentes de petróleo por sus enseñanzas y dedicación a mi aprendizaje, y a mi director Germán González y su esposa la ingeniera Natalia Prieto por su dedicación y ayuda durante mi tesis.

A todas las personas que me han dado una mano para poder culminar mi proceso profesional.

Tabla de contenido

Introducción	12
1.Objetivos	16
1.1 Objetivo general.....	16
1.2 Objetivos específicos	16
2.Justificación	17
3.Marco teórico y antecedentes.....	18
3.1 Geotermia.....	18
3.2 Geotermia en el mundo.	21
3.3 Geotermia En Colombia.	26
3.4 Geotermia De Baja Entalpia	29
3.5 Bombas De Calor Geotérmicas (GSHP).....	30
3.6 Proyectos De Baja Entalpia en el Mundo.	34
3.6.1Sistema de calefacción distrital geotérmico en Reikiavik, Islandia.....	34
3.6.2 Calefacción distrital geotérmica en China	35
3.7 Proyectos de Baja Entalpía en Colombia.....	36
3.8 Principio De Transferencia De Calor Y Disipación De Calor.....	38
3.9 Fundamentos de la Dinámica de Fluidos Computacional.	39
3.10 Numero de Reynolds aplicado en ANSYS Fluent.....	43
3.11 Modelo de turbulencia	44
3.12 Cálculo del coeficiente convectivo ambiente hamb	46
3.13 Conceptos de radiación enfocados en CFD.	47
3.14 Concepto para la distancia mínima para que exista intercambio térmico.....	51

3.15 Cálculo de la difusividad térmica del suelo	51
3.16 Definición de la perturbación térmica adimensional	52
3.17 Aplicación de la función error complementaria.....	52
3.18 Criterio para considerar la frontera no perturbada.....	53
3.19 Despeje de la distancia mínima.....	54
3.20 CFD Enfocado En Sistemas De Bombas De Calor Geotérmico (GSHP).....	55
4. Metodología	58
4.1 Geometría y materiales.	60
4.2 Condiciones de la simulación	63
4.3 Procesos de flujo del agua y la transferencia de calor realizada al entorno.....	68
4.4 Desarrollo numerico para determinar la distancia de la frontera termica	70
5 Resultados.....	72
5.1 Resultados del experimento	72
5.2 Validación del modelo.	74
5.3 Comparación de los resultados de la simulación vs el experimento.....	94
5.4 Análisis de los resultados.....	98
6. Conclusiones.....	102
7. Recomendaciones	103
Referencias Bibliograficas	105

Lista de figuras

Figura 1 Sistema Geotérmico.....	19
Figura 2 Usos de la energía geotérmica según rango de temperatura.....	21
Figura 3 Comparación de uso directo de la energía geotérmica en PJ/ Yr desde 1995-2020.....	24
Figura 4. Porcentajes de las fuentes de energía en el consumo final de energía para calefacción y refrigeración, 2019.....	25
Figura 5 Mapa de áreas geotérmicas en Colombia.	28
Figura 6 Principio de funcionamiento de una bomba de calor	31
Figura 7 Diagrama de funcionamiento de una bomba de calor geotérmica (sistema abierto).....	32
Figura 8 Sistemas Cerrados Con Intercambiador De Calor.....	33
Figura 9 Reykjavík, Islandia en invierno.....	34
Figura 10 Instalación de calefacción geotérmica en Xiongxin, provincia de Hebei.....	35
Figura 11 Uso de calefacción geotérmica en Hacienda La Quinta.....	36
Figura 12 Proyecto piloto de cuarto frío con bomba de calor geotérmica desarrollado en Gran Sabana por SAGG SAS G.....	37
Figura 13 Volumen de control de finito en el espacio.	39
Figura 14 Geometría del pilote	56
Figura 15 Geometría del Intercambiador de calor helicoidal	57
Figura 16 Geometria de la simulación	59
Figura 17 Diagrama del modelo en la literatura	62
Figura 18 Variación anual de temperatura del suelo en dos profundidades	65

Figura 19 Comportamiento del suelo al inicio del experimento.....	66
Figura 20 Comportamiento de Temperaturas de varios puntos durante la simulación.....	73
Figura 21. Residuales de la simulación 1-1800.	74
Figura 22 Diagrama de balance de masa durante la simulación 1800.....	75
Figura 23 Temperaturas del contorno a las 50 iteraciones	77
Figura 24 Temperaturas del serpentín a las 50 iteraciones	79
Figura 25 Temperaturas de los planos a las 50 iteraciones.....	80
Figura 26 Temperaturas del contorno a las 500 iteraciones	81
Figura 27 Temperaturas del serpentín a las 500 iteraciones	82
Figura 28 Temperaturas de los planos a las 500 iteraciones.....	83
Figura 29 Temperaturas del contorno a las 1000 iteraciones	84
Figura 30 Temperaturas del serpentín a las 1000 iteraciones	85
Figura 31 Temperaturas de los planos a las 1000 iteraciones.....	86
Figura 32 Temperaturas del contorno a las 1500 iteraciones	87
Figura 33 Temperaturas del serpentín a las 1500 iteraciones	88
Figura 34 Temperaturas de los planos a las 1500 iteraciones.....	89
Figura 35 Temperaturas del contorno a las 1800 iteraciones	90
Figura 36 Temperaturas del serpentín a las 1800 iteraciones	91
Figura 37 Temperaturas de los planos a las 1800 iteraciones.....	92
Figura 38. Comparación de perfiles térmicos profundidad vs temperatura en la entrada del serpentín hasta la profundidad de 3 metros.....	95

Figura 39. Comparación de perfiles térmicos de experimento vs temperatura en la salida del serpentín.....	96
Figura 40. Comparación de perfiles térmicos profundada vs temperatura en el contorno	97

Lista De Tablas

Tabla 1 La energía geotérmica en el mundo	22
Tabla 2 Consumo de la energía geotérmica en calefacción y refrigeración en el mundo	23
Tabla 3. Áreas Geológicas En Colombia Con El Potencial Energético	26
Tabla 4 Aplicaciones Potenciales Dependiendo De La Temperatura Con El Flujo Geotérmico .	29
Tabla 5 Características bomba de calor geotérmico Ecoforest utilizada en cuarto frio.....	37
Tabla 6. Clasificación de los Régimen de Flujo-	44
Tabla 7 Diferenciacion de modelos de radiacion utilizaads por Ansys Fluent.....	50
Tabla 8 Condiciones de la Geometría de GSHP	61
Tabla 9 Valores de la conductividad térmica y condiciones de la simulación	62
Tabla 10 Métodos y controles de solución en Ansys Fluent.	68
Tabla 11 Resultados de los valores del experimento	72
Tabla 12 Balance de masa a 1800 iteración.....	75
Tabla 13 Resultados de los valores de la simulación.....	76
Tabla 14.Comparación de resultados en la entrada del serpentín.	98
Tabla 15. Comparación de resultados en la tubería a la salida	99
Tabla 16. Comparación de resultados en el contorno del suelo.....	100

Abreviaturas

CFD	Flujo Dinámico Computacional
CAD	Diseño asistido por computadora.
CHT	Transferencia de calor conjugada
Cp.	Calor específico
k	Conductividad térmica
LES/DES	Large/Detached Eddy Simulation
GHP,	Geothermal Heat Pump (Bombas Geotérmicas de calor)
GSHP	Ground Source Heat Pump (Bomba De Calor Geotérmica)
GHE	Ground Heat Exchanger (intercambiador de calor con el suelo)
MESH	Mallado (Grid)
NEA	Nevado del Ruíz
RANS	Reynolds-Averaged Navier–Stokes (promediadas de Reynolds) — marco habitual para turbulencia en Fluent (coherente con $k-\epsilon$).

Resumen

Título: Análisis Térmico De Un Intercambiador Geotérmico En Serpentin Para Uso De Climatización Aplicando Técnicas De CFD*

Autores: Jose Arturo Garcia Martinez**

Palabras Clave: serpentín, Bomba de calor, Conductividad térmica, CFD.

Descripción:

Se evaluará el desempeño térmico de un intercambiador geotérmico tipo serpentín helicoidal enterrado para la aplicación de climatización mediante CFD en ANSYS Fluent 2022 R2, donde por medio de un análisis transitorio de transferencia de calor conjugada (CHT) donde se realiza una transferencia (agua-tubería- pared- contorno). Se replica la configuración de referencia reportada por Martins, (2015): en el cual se desarrolló por un serpentín de cobre con las dimensiones estipuladas en “*análise teórica e experimental do comportamento de um trocador de calor geotérmico*” basado en las condiciones en las cuales se realizaron el experimento, se simula para por recrear de idéntica por medio del software.

Por lo cual se va a recrear la inyección de agua a una temperatura de 55 °C a una tasa de 2 litros por minuto, el cual el régimen hidrodinámico turbulento inducido por curvatura ; por ello se emplea un modelo RANS($k - \omega SST$) y ($k - \varepsilon$ realizable) con funciones de pared acordes al objetivo para poder llegar a la simulación de la temperatura en las profundidades de 0.3-1.5-3 metros donde se podrá en las cuales por medio del enmallado con capas internas para poder recrear el gradiente térmico convectivo ; el cobre y el suelo con llama no estructurada refinada en torno al tubo y a la interfaz suelo-serpentin se verificara la temperatura de pared.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Físico-Químicas. Escuela de Ingeniería de Petróleos. Ingeniería de Petróleos. Director: Germán González Silva. Doctor en Ingeniería Química.. Codirector: Natalia Prieto Jiménez. Doctora en Ingeniería Química.

Abstract

Title: Thermal Analysis of a Geothermal Coil Heat Exchanger for Climatization Using CFD Techniques*

Authors: Jose Arturo Garcia Martinez**

Keywords: helical coil, heat pump, thermal conductivity, CFD.

Description:

This study evaluates the thermal performance of a buried helical-coil geothermal heat exchanger for space conditioning using computational fluid dynamics (CFD) in ANSYS Fluent 2022 R2. A transient conjugate heat-transfer (CHT) analysis is carried out to resolve the coupled energy transport across the fluid, pipe wall, surrounding soil, and external domain boundary. To ensure comparability with prior work, the numerical model reproduces the reference configuration reported by Martins,(2015), consisting of a copper helical coil with geometric parameters taken from “Análise teórica e experimental do comportamento de um trocador de calor geotérmico”. Boundary conditions and operating parameters are prescribed to match, as closely as possible, the experimental conditions described in that study, enabling a like-for-like simulation and validation.

Accordingly, the simulation prescribes water injection at 55 °C with a flow rate of 2 L min⁻¹. The hydrodynamic regime is expected to be turbulent due to curvature effects; therefore, Reynolds-averaged closures—specifically the ($k - \omega SST$) and the realizable $k - \varepsilon$ models—are employed with wall-function treatments appropriate to the target near-wall resolution. The analysis resolves the temperature field at burial depths of 0.3, 1.5, and 3.0 m. To capture near-wall convective thermal gradients in the fluid, an inflation-layer mesh is used, while the copper coil and surrounding soil are discretized with an unstructured grid refined around the tube and the soil–coil interface. Monitoring the bulk-water temperature rise (Δt), the heat-transfer rate ($\dot{q}$), and the wall temperature.

* Bachelor Thesis

**Faculty of physical-chemical engineering. School of petroleum engineering Petroleum engineering. Director: Germán González Silva. Ph.D in chemical engineering. Codirector: Natalia Prieto Jiménez. Ph.D in chemical engineering.

Introducción

El debido aumento de la demanda de sistemas energéticos que sean eficientes y ecoamigables para la climatización se ha generado el desarrollo de tecnologías que impulsaron la geotermia, la cual se aprovecha de la energía almacenada en el subsuelo para procesos de calefacción y refrigeración. La climatización geotérmica utiliza una técnica de intercambio calor el cual es proporcionado por la tierra la cual aprovecha genera grandes ventajas frente a métodos convencionales de calefacción debido a su “eficiencia energética y reducción impacto ambiental” según Palacio-Villa et al.,(2020).Esta tecnología posee múltiples aplicaciones que van desde la calefacción de viviendas en zonas frías hasta el acondicionamiento de espacios habitados por ingenieros y personal de campo, así como el mantenimiento de condiciones óptimas para cultivos en invernaderos y aprovechamientos en campos petroleros que estén cerca de gradientes geotérmicos donde se puedan aprovechar de dicho recurso (Martins,2015) en su tesis de maestría “análise teórica e experimental do comportamento de um trocador de calor geotérmico” como se hace el aprovechamiento del serpentín geotérmico en un terreno y aprovechamiento para el calentamiento del terreno.

El desarrollo de los sistemas geotérmicos en los puntos específicos que le permiten aprovechar significativamente los procesos de climatización. En regiones con temperatura extremas, los intercambiadores de calor geotérmico proporcionan una alternativa viable y sostenible, manteniendo una temperatura confortable en los espacios habitables y permitiendo, por ejemplo, la calefacción eficiente de habitaciones de personal de campo petrolero o en zonas rurales como se explica en Ramírez, (2022) que nos enseña que los aprovechamientos de la geotermia en

viviendas con condiciones ambientales de temperaturas mayores a los 30°. Además, en el sector agrícola, su uso en invernaderos contribuye a la mejora de la producción, ya que permite el control térmico con un control constante e independiente de los cambios climáticos externos.

Por lo cual se realiza la simulación mediante el flujo dinámico computacional (CFD) que en su significado en inglés “Computational Fluid Dynamics”, el cual se encarga de analizar y optimizar los sistemas sin la necesidad de costosos prototipos físicos o pruebas a escalas experimentales mientras que por el proceso de simulación se realiza la geometría que se desea simular y realizando la validación y calibración de las condiciones para realizar la aplicación de las técnicas de CFD permite predecir con gran exactitud el comportamiento térmico de los intercambiadores de calor, como los serpentines geotérmicos, optimizando su diseño y eficiencia antes de su implementación real. Ya que como dice (Pamplona et al., 2021):

[Las tecnologías de la información por medio de simulaciones y CFD (Computational Fluid Dynamics) son herramientas que ayudan entender estos procesos (transferencia de calor, transporte de especies, flujos multifásicos y reacciones electroquímicas) y como afectan en el diseño de los componentes],(p-45).

Para lo cual este proyecto se enfoca en estudiar el comportamiento térmico del serpentín geotérmico y su potencial para mejorar el proceso de climatización en diferentes contextos. A través de simulación CFD, se analizarán distintas configuraciones de malla y su rendimiento, con el objetivo de maximizar la eficiencia y el aprovechamiento de la energía geotérmica. Este proyecto no solo se dará un marco teórico sólido para el diseño de intercambiadores geotérmicos más eficientes, sino que también sentará las bases para su implementación práctica en aplicaciones

de calefacción y refrigeración sostenibles para hacer proyectos de inversión para campos petroleros, así como para viviendas rurales que puedan aprovechar la energía geotérmica.

1.Objetivos

1.1 Objetivo general

Analizar el comportamiento térmico de un intercambiador de calor agua suelo y la variación de la temperatura en el reservorio utilizando las técnicas de dinámica fluidos computacional (CFD)

1.2 Objetivos específicos

1. Definir las propiedades fisicoquímicas de los fluidos y los materiales a ser utilizados.
2. Realizar la selección del tipo de intercambiador, su dimensionamiento y construcción, utilizando herramientas de diseño asistido por computador (CAD).
3. Definir los modelos apropiados para describir el comportamiento fluido-dinámico y térmico del intercambiador de calor en el suelo.
4. Comparación de la temperatura obtenida en la simulación con datos reportados en la literatura.

2. Justificación

El aumento de los porcentajes de la matriz energética y la necesidad de aumentar la participación de las energías renovables que sean amigables con el ambiente, han impulsado el interés en la energía geotérmica como una alternativa viable. Este recurso contribuye a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero y favorece una transición energética. En la actualidad, se desarrollan proyectos que han tenido estudios de geotermia en Colombia.

Como se sabe, la geotermia es una de las energías renovables; sin embargo, para su óptimo aprovechamiento resulta fundamental comprender y caracterizar el comportamiento fluidodinámico del recurso, así como de sus condiciones térmicas.

Por lo tanto, se propone el simular un modelo de intercambiador geotérmico en serpentín, orientado a mejorar la implementación de la energía geotérmica en zonas de interés social ya sea para utilizarlo como programa en beneficio de las comunidades en el marco de la responsabilidad social empresarial (RSE) de cual se gestiona para el cumplimiento de indicadores de reducción de consumo energético y promover prácticas más sostenibles con el entorno. Para el modelamiento del prototipo se seleccionó un software especializado, capaz de representar con precisión los complejos procesos de transferencia de calor y flujos en condiciones geotérmicas.

Para optimizar la exploración de los yacimientos geotérmicos, resulta esencial comprender en profundidad el comportamiento fluidodinámico y las condiciones térmicas del subsuelo. En este contexto, se plantea que, a partir de un prototipo físico, sea posible recrear numéricamente un intercambiador geotérmico en serpentín, con el fin de mejorar el aprovechamiento de la energía calorífica proveniente del subsuelo y de su transferencia mediante una bomba de calor. Para

lograrlo será fundamental el desarrollo de un modelo computacional que a través de simuladores especializados reproduciendo el proceso de transferencia de calor y dinámica de fluidos en condiciones geotérmicas, permitiendo así una representación precisa y exacta del comportamiento real del sistema.

3.Marco teórico y antecedentes

3.1 Geotermia.

A lo largo de la historia, el aprovechamiento de las fuentes de energía ha sido un índice de desarrollo humano debido a que este permite una mejor esperanza de vida. En el transcurso del tiempo las energías fueron utilizadas sin saber sus composiciones o el fundamento físico que hay en ellas lo cual genera un pensamiento imaginario dando explicaciones fantásticas a sucesos naturales, tal es el caso para la geotermia, cuya aplicación se remonta a la antigua Roma, donde las fuentes termales eran empleadas para baños públicos y sistemas de calefacción.

Desde la industrialización, la humanidad ha buscado ampliar la matriz energética mundial, aprovechando las condiciones geográficas y geológicas disponibles en cada región. De esta manera, las sociedades intentan utilizar de forma eficiente sus recursos naturales para garantizar una mejor calidad de vida. Como resultado, en la actualidad existen diversas fuentes de energía, entre las que se destacan los combustibles fósiles (gas, petróleo y carbón), la energía nuclear y un conjunto de energías renovables, dentro de las cuales se incluyen la energía hidroeléctrica, la energía térmica, la biomasa, la energía solar y eólica, así como los biocombustibles.

En el proceso de desarrollo humano se ha buscado ampliar la matriz energética mundial, aprovechando las condiciones geográficas y geológicas disponibles en cada región. De esta

manera, las sociedades intentan utilizar de forma eficiente los recursos naturales para garantizar una mejor calidad de vida. Como resultado, en la actualidad existen diversas fuentes de energía.

Dentro de las energías renovables, la geotermia aprovecha el calor almacenado en el interior de la Tierra, el cual se transmite hacia la superficie por conducción térmica a través de la corteza terrestre. Este recurso, al utilizar el calor interno del planeta, se considera inagotable y, por tanto, se clasifica como una fuente renovable. Según Llopis Trillos , Guillermo y Rodrigo Angulo , Vicente (2015), la “energía geotérmica es la energía almacenada en forma de calor por debajo de la superficie sólida de la Tierra”.

Figura 1

Sistema Geotérmico



Nota. La figura muestra el sistema geotérmico en cada una de las etapas,(Zapata & Cárdenas, 2019)

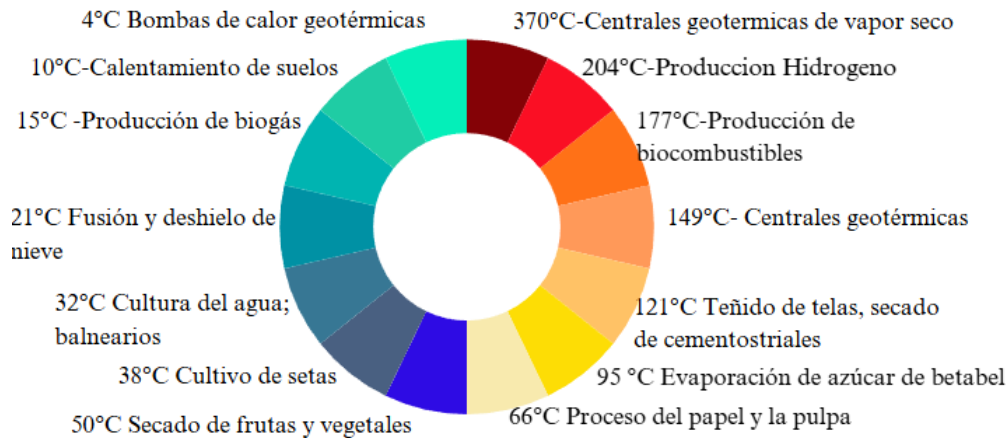
La geodinámica y la convección térmica de la Tierra, se determinó que, al adentrarse en el interior terrestre, la presión geológica genera un incremento en las condiciones térmicas de las rocas. A esta variación se le denomina gradiente térmico basado en Bernal,(2010).

En un yacimiento geotérmico se distinguen cinco componentes claves, como aclara Zapata & Cárdenas (2019, p. 20), que son los siguientes: zona de recarga, fuentes de calor, reservorio, capa sello y zona de descarga. (1) La zona de recarga se ubica en la superficie, allí el agua de lluvia penetra por la corteza y desciende hasta el reservorio. La fuente de calor (2) es la energía térmica aportada por magma o rocas a muy altas temperaturas, que calientan el agua. El reservorio (3) es el volumen de roca donde el fluido se almacena y circula, elevando su temperatura. Sobre él se dispone la capa sello (4), un estrato de baja permeabilidad que confina el calor y los fluidos. Finalmente, la zona de descarga (5) corresponde a los puntos por donde el sistema libera los fluidos hacia la superficie, por ejemplo, manantiales termales, fumarolas y suelos calientes con vapor, cerrando así el ciclo hidrotermal. Según IRENA (2023) y como se visualiza en la **figura 1**.

Los proyectos geotérmicos se pueden clasificar según la temperatura; aquellos con temperatura superior a 200 °C se consideran recursos de alta entalpía, caracterizados por un elevado potencial energético. A medida que la temperatura disminuye, se clasifican como de media entalpía (100-200 °C) o de baja entalpía (menos de 100 °C). Cada una de estas categorías determina las actividades o aplicaciones económicas más adecuadas del recurso, dependiendo de la temperatura, como se observa en la **figura 2**.

Figura 2

Usos de la energía geotérmica según rango de temperatura.



Nota. La figura del uso de la energía geotérmica según el rango de la temperatura, (Zapata & Cárdenas, 2019)

3.2 Geotermia en el mundo.

La geotermia se reconoce como una fuente de energía limpia y renovable, utilizada en diferentes aplicaciones como la generación de electricidad y el suministro de calor. Su importancia ha aumentado debido a los intereses del cambio climático y reducción de la huella de carbono, dónde los países y las empresas energéticas tratan de aprovechar para generar nuevas formas de aprovechar la energía y ampliar su perfil energético como empresa, En este marco, el organismo internacional como International Renewable Energy Agency (IRENA) destacan que “la tecnología de la energía geotérmica ha evolucionado más allá de su enfoque en el mercado eléctrico para abarcar una gama más amplia de aplicaciones dentro del sector energético, incluyendo la calefacción y la refrigeración sostenibles” (IRENA, 2023) Esto posiciona a la geotermia como una

alternativa renovable, rentable e independiente, como un papel estratégico en la transición energética global, como se visualiza en la **tabla 1**

Tabla 1

La energía geotérmica en el mundo

POTENCIA GEOTÉRMICA EN 30 PAÍSES			
Capacidad total instalada (MW)		Generación total (GWh)	
16.211,384		96.556,324	
Top 5 países por capacidad instalada (MW)		Top 5 países por generación (GWh)	
País	MW instalados	País	GWh generados
Estados Unidos	3.889,101	Estados Unidos	18.702,200
Indonesia	2.334,700	Indonesia	16.592,407
Filipinas	1.951,760	Filipinas	11.670,000
Turquía	1.717,290	Turquía	10.840,000
Nueva Zelanda	1.054,800	Nueva Zelanda	7.820,000

Nota. Información adaptada de Geothermal Energy Database | International Geothermal Association,(2023)

El aprovechamiento de la energía geotérmica se concentra principalmente en dos sectores, la generación de electricidad y la provisión de calefacción y refrigeración. Según el informe de IRENA, (2023), la capacidad eléctrica geotérmica creció a una tasa anual del 3,5%, alcanzado aproximadamente 15,96 Gigavatios eléctricos (GW_e) en 2021. En paralelo, el uso geotérmico para

calefacción y refrigeración registró un crecimiento más acelerado, con un 9% anual entre 2015 y 2020, alcanzando alrededor de 107 Gigavatios térmicos (GW_{th}). Igual que la capacidad total instalada de electricidad renovable se concentra principalmente en la hidroeléctrica (1230,0 MW- 40,1%) seguido de la solar (849,95 MW- 27,7%), seguido por eólica (824,9 MW-26,9%) con participaciones menores en la bioenergía (143,4MW- 4,7%) y la geotermia con un (16MW -0,5%) y de ultimo la energía marítima con un (0,5 MW -0.02%).

En el artículo Direct utilization of geothermal energy 2020 Worldwide Review de Lund & Toth (2021), se presentan los resultados reportados en el World Geothermal Congress realizado cada cinco años entre 1995 y 2020 en países como Italia, Japón, Turquía, Indonesia y Australia. En dicho congreso se documentaron los avances globales en la utilización directa de la energía geotérmica, especialmente en proyectos de baja entalpia, inicialmente, solo 28 de los 113 países participantes reportaban este tipo de proyectos, sin embargo, para finales de 2020 las cifras ascendieron a 88 países. Este crecimiento presento una capacidad instalada de 173.303,2 MW, lo que corresponde a un incremento de 52% con respecto a periodos anteriores..

Tabla 2

Consumo de la energía geotérmica en calefacción y refrigeración en el mundo

Calefacción y Refrigeración geotérmica em 88 países	
Capacidad total instalada (MWt)	Producción total (TJ/año)
173.303,21	1.476.312,02

Top 5 países por capacidad instalada (MWt)		Top 5 países por producción (TJ/año)	
País	MWt instalados	País	TJ/años producidos
China	100.219,80	China	828.882,00
Estados Unidos	20.712,54	Estados Unidos	152.809,50
Suecia	7.280,00	Turquía	85.000,00
Alemania	5.381,30	Suecia	67.680,00
Turquía	5.113,35	Islandia	35.615,00

Nota. Información adaptada de (Geothermal Energy Database | International Geothermal Association, 2023)

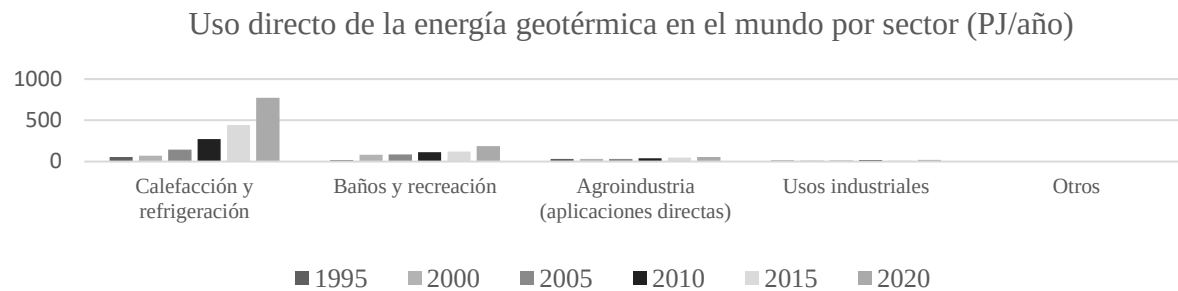
La **figura 3** evidencia el incremento en el uso de bombas de calor, las cuales representan el principal mecanismo de aprovechamiento de la energía geotérmica de baja entalpía en diversas actividades previamente descritas. Este aumento, medido en PetaJulios por año (PJ/año), confirma la tendencia de crecimiento continuo de este recurso renovable, el cual se consolida como un elemento clave en los procesos de transición energética a nivel mundial.

La Asociación Geotérmica Internacional registra la producción geotérmica de 30 países, evidencia un crecimiento sostenido del uso de esta energía para calefacción y refrigeración, lo que reduce la dependencia de redes eléctricas y de combustibles fósiles. Destacan China, que, pese a su alto consumo de carbón, ha incrementado de forma notable sus inversiones de climatización geotérmica. En este ámbito, los proyectos de baja y media entalpía muestran mayor pliegue que

los de alta entalpía, reflejando su idoneidad para la aplicación térmica directa y rápida adopción en distintos países.

Figura 3

Comparación de uso directo de la energía geotérmica en PJ/ Yr desde 1995-2020

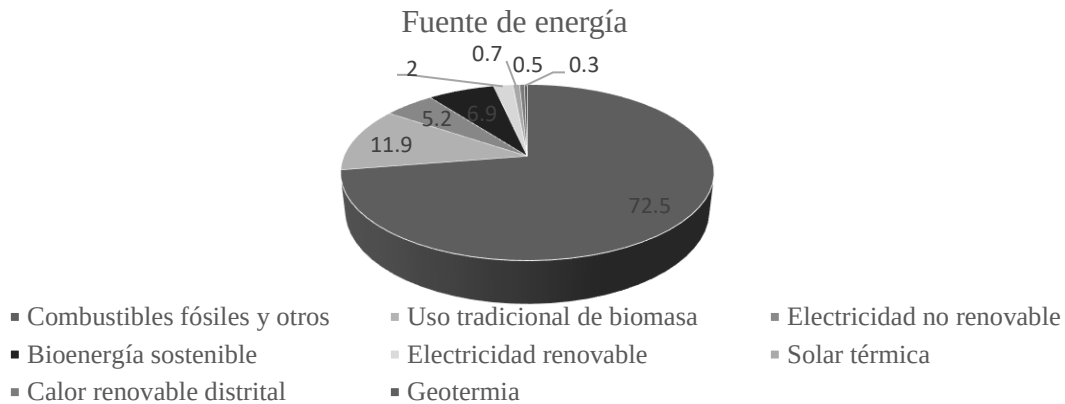


Nota. La figura muestra la comparación de uso de la energía geotérmica en diferentes industrias (Lund & Toth, 2021)

Aun así, la matriz térmica global sigue dominada por fuentes emisoras: alrededor del 10,4% de la energía para la calefacción y refrigeración proviene de recursos renovables, donde la geotermia aportó el 0,3%. Se prevé un aumento progresivo del papel de la geotermia en procesos industriales, cocción, climatización de espacios y calefacción de agua caliente sanitaria, con un avance particular en sistemas de calefacción urbana, cada vez más comunes en Europa y China. Como se visualiza en las **figuras 3 y 4**.

Figura 4.

Porcentajes de las fuentes de energía en el consumo final de energía para calefacción y refrigeración, 2019



Nota. Información de los porcentajes de fuentes de energías, adaptada de IRENA, (2023)

3.3 Geotermia En Colombia.

En Colombia se han venido desarrollando estudios para identificar el potencial de la energía geotérmica en distintas regiones del país, actualmente se reconocen 21 áreas geotérmicas con una potencia estimada de 1170,23 MWe. Entre ellas, el departamento del Huila destaca como la zona con mayor capacidad con 12,1 MWe, seguido de otras regiones con aportes significativos. A continuación, se presentan las principales áreas geotérmicas identificadas en el territorio nacional.

Tabla 3.

Áreas Geológicas En Colombia Con El Potencial Energético

Área Geotérmica	Potencial (MWe)
A.G Del Volcán Azufral	81.9
A.G Complejo Volcánico Chiles-Cerro Negro	23.8
A.G Del Volcán Cumbal	15.7

A.G Del Volcán Sibundoy	9.8
A.G De Los Volcanes Galeras - Morazurco	29.8
A.G De Los Volcanes Doña Juana-Las Animas	37.8
A.G De Los Volcanes De Sotará - Sucubún	17.4
A.G De La Caldera De Paletará	118
A.G De La Caldera De Gabriel López	24.8
A.G Del Volcán De Santa Rosa	137.2
A.G Del Volcán Del Huila	0.1
A.G De Villamaría Termales	38.5
A.G De Nereidas Botero Londoño	100.7
A.G De La Laguna Otún	0.1
A.G Del Volcán Cerro Machín	129.9
A.G Del Volcán Nevado Del Tolima	82.7
A.G De Hacienda Granates	67.2
A.G Del Volcán Cerro Bravo	79.7
A.G De Paipa	21.5
A.G De San Diego	141.9
A.G De Iza	12.1

Nota. Información de las áreas geológicas de Colombia Adaptado de Potencial Geotérmico en Colombia SGC, (2024)

La **tabla 3** muestra, a nivel geográfico, las zonas de Colombia con mayor potencial geotérmico de alta entalpía y donde se pueden realizar proyectos de geotermia, el desarrollo nacional comenzó en Nariño con El Chiles-Cerro Negro, Azufral y Tufiño; el primero es el más avanzado por tratarse de un proyecto binacional con Ecuador orientado a generación eléctrica a partir de alta entalpía.

De acuerdo con la (Geothermal Energy Database | International Geothermal Association, 2023), específicamente en el área de calefacción y refrigeración, donde su mayor sector de inversión está en el sector residencial. Como referente, puede ser Islandia, donde se utilizan bombas de calor para la climatización de viviendas y edificios. Según Jimenez & Jesfts, (2017).

Figura 5

Mapa de áreas geotérmicas en Colombia.



Nota. Mapa donde se muestra las áreas geotérmicas de Colombia, tomada de Potencial Geotérmico en Colombia SGC, (2024)

3.4 Geotermia De Baja Entalpia

A nivel mundial se ha evidenciado un incremento en el uso de la geotermia de baja entalpia, la cual se enfoca en diversos tipos de proyectos. Algunos de ellos se presentan en la **tabla 4**, que ejemplifica las principales aplicaciones de esta tecnología dependiendo de la temperatura.

Tabla 4

Aplicaciones Potenciales Dependiendo De La Temperatura Con El Flujo Geotérmico

Rango de temperatura (°C)	Categoría	Aplicaciones
10 – 50	Calefacción y refrigeración de espacios	Derretimiento de nieve, deshielo, bombas de calor de fuente terrestre
50 – 100	Calefacción y refrigeración de espacios	Calefacción de espacios, refrigeración por absorción
10 – 100	Baños y recreación	Piscinas y balnearios (SPAs)
10 – 150	Sector agroindustrial	Calefacción de invernaderos, acuicultura, calentamiento de suelos.
50 – 150	Sector agroindustrial	Secado de pulpa de remolacha, secado de granos y pescado.
50 – 200	Sector industrial	Procesos de biogás, secado de carbón, secado de cemento.

Nota. Informacion de las aplicaciones industriales dependindo de la temperatura, Adaptada de ESMAP, (2022)

El reporte técnico 2021/2022 “Direct Utilization of Geothermal Resources” presenta los rangos de temperatura asociados a las distintas aplicaciones de la geotermia en la industria. Dicho

informe permite identificar los tipos de proyectos posibles según las disposiciones térmicas disponibles, lo que facilita clasificar las opciones de aprovechamientos en función de su rango de temperatura. Entre las principales aplicaciones se encuentran las bombas de calor geotérmicas (GHP, Geothermal Heat Pump) y el almacenamiento de energía térmica subterránea (UTS); los sistemas de calefacción y refrigeración, como el derretimiento de nieve y la refrigeración de suelos cubiertos, así como la climatización de baños y piscinas. En el sector agroindustrial, la geotermia se aplica en la calefacción de estanques de acuicultura y en el secado de cultivos agrícolas. Finalmente, en el ámbito de los procesos industriales, destacan el ciclo binario y ciclo flash como método de generación eléctrica a partir de recursos geotérmicos.

3.5 Bombas De Calor Geotérmicas (GSHP)

Según Cadena Escalante & Gamboa Villalba, (2018):

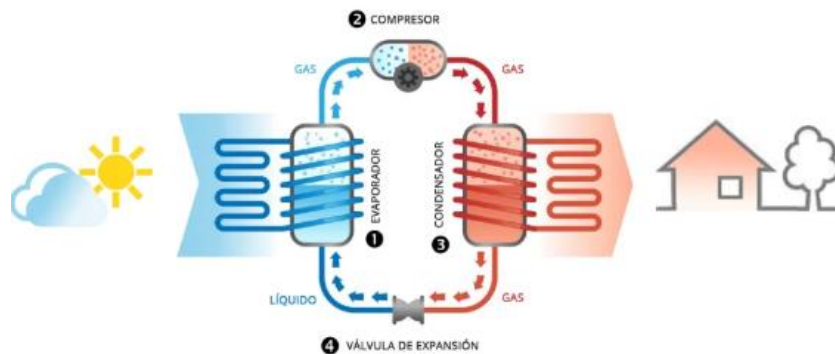
[Las bombas de calor geotérmico son bombas que disponen de un fluido refrigerante para aprovechar la energía geotérmica tanto para introducir calor (calefacción) como para extraerlo (refrigeración) en edificios... De otra manera se dice que esta es reversible, pues garantiza los dos procesos mediante el mismo método].(pp-35-37)

En consecuencia, estas bombas pueden sustraer energía del entorno, ya sea del agua subterráneas o directamente del suelo, la bomba de calor geotérmica (Geothermal Heat Pump, GHT), es derivado del ciclo ideal de Carnot, según Martins, (2015, p. 20) está conformada por cuatro componentes principales: evaporador, compresor, condensador y válvula de expansión. Este sistema corresponde a un ciclo de refrigeración por compresión de vapor, el cual resulta

fundamental para enfriar espacios y mantener la temperatura controlada en múltiples aplicaciones. En esencia, el principio de funcionamiento es el mismo, como se muestra en la siguiente **figura**.

Figura 6

Principio de funcionamiento de una bomba de calor



Nota. Información del principio físico del funcionamiento de la bomba de calor Adaptado de Cadena & Gamboa, (2018)

Esto nos orienta a que las bombas de calor geotérmicas están diseñadas para aprovechar el calor de la tierra a lo que aprovechando el calor de la tierra con un circuito ya sea abierto o cerrado y dependiendo su geometría de instalación a esto se le denomina (Ground Heat Exchanger, GHE) (Ji & Dong, 2023)

Para estos circuitos de baja entalpía que se pueden separar dependiendo de los sistemas que utilice, según Ramírez, (2022) que cita de hay dos ciclo principales para los sistemas geotérmicos someros(abiertos, cerrados).

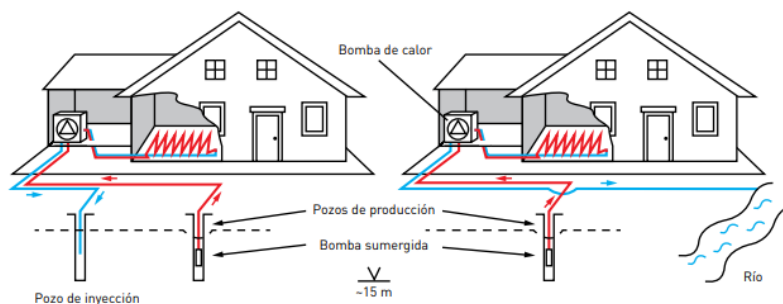
[Los sistemas abiertos] basados en el uso de aguas subterráneas, que suponen la captación de agua de un acuífero para su aprovechamiento. En este caso, el agua subterránea es el

medio de transporte del calor” ...los sistemas cerrados “cuyo fundamento es el empleo de un fluido –básicamente, agua con algún aditivo, para extraer el calor de los materiales existentes a poca profundidad en el subsuelo. Implican la instalación de un intercambiador en el terreno para el aprovechamiento energético, cuya pared separa el fluido termoportador de la roca y del agua subterránea..](pag-80)

En los sistemas abiertos, como se ve en la **figura 7**, la fuente de calor corresponde al agua subterránea que interactúa con las instalaciones de tubería. En este esquema, el calor del acuífero es transferido para su aprovechamiento energético. Aunque existen diversas variantes de sistemas abiertos, todos comparten el mismo principio de funcionamiento.

Figura 7

Diagrama de funcionamiento de una bomba de calor geotérmica (sistema abierto)



Nota. Figura del funcionamiento de un bomba de calor geotérmico en sistema abierto, tomado de Guzmán Sánchez et al., (2011)

Mientras los sistemas cerrados:

[Se basan en el empleo de intercambiadores enterrados, con un fluido termoportador en su interior que cede la energía del subsuelo a la bomba y viceversa. Por tanto, es el fluido que circula

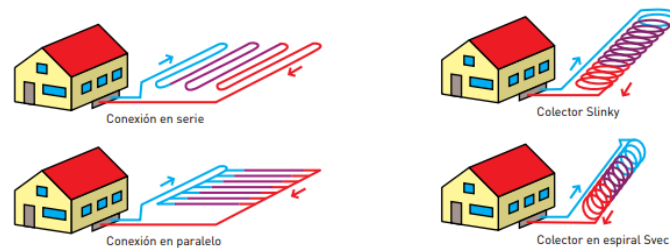
por el intercambiador en circuito cerrado el que se lleva a la bomba de calor”] expresado por Guzman Sanchez et al., (2011.pag 45).

Estos aprovechan el calor que almacena el terreno dos formas, en los sistemas cerrados, el fluido de intercambio térmico circula adentro del circuito hermético conformado por tuberías enterradas. La **figura 8** muestra algunas de las configuraciones más comunes de instalaciones, donde se evidencia que no existe un contacto directo con el acuífero, a diferencia de los sistemas abiertos. De acuerdo con Guzman Sanchez et al.,(2011),

[los sistemas cerrados ofrecen la posibilidad de aprovechar el calor acumulado en los materiales de los niveles más externos de la corteza terrestre, en las situaciones en que la impermeabilidad del terreno o la profundidad de los niveles no permite explotar la energía de las aguas del subsuelo].(pag-55)

Figura 8

Sistemas Cerrados Con Intercambiador De Calor



Nota. Información de los sistemas cerrados con intercambiador de calor en sistemas cerrados tomado de Guzman Sanchez et al., (2011)

3.6 Proyectos De Baja Entalpia en el Mundo.

3.6.1 Sistema de calefacción distrital geotérmico en Reikiavik, Islandia

Este sistema de calefacción urbana inicia en 1924 en la escuela Laugaskóli de Reykjavík constituyendo el punto de partida para su posterior expansión en todo el país, una vez identificado el alto potencial geotérmico disponible. Actualmente, es considerado uno de los sistemas más sofisticados del mundo, al emplear recursos geotérmicos de temperatura media y alta, con una capacidad instalada cerca de 2 GW.

El contexto climático de Islandia esta caracterizado por veranos cortos e inviernos fríos y largos, nevado y ventosos, con temperatura que oscila entre -8°C y 17°C ha favorecido la consolidación de este modelo energético. Según la Agencia Nacional de Energía de Islandia (NEA), se estima que el país ha logrado un ahorro equivalente al 7% del PIB anual en comparación con el uso de combustibles fósiles para calefacción. En consecuencia, cerca del 90% de la energía destinada a la calefacción doméstica en Islandia proviene de la geotermia (ESMAP, 2022)

Figura 9

Reykjavík, Islandia en invierno



Nota. figura de la ciudad la cual funciona con el sistema geotérmico debido a su sistema de calefacción para la ciudad tomado de (Energy Sector Management Assistance Program, 2022)

3.6.2 Calefacción distrital geotérmica en China

Este tipo de proyecto ocupa un lugar destacado en las políticas energéticas del país, ya que contribuye a los ambiciosos objetivos de reducción de la huella de carbono y a la mejor calidad del aire. Empresas estatales y privadas han impulsado conjuntamente la expansión de la calefacción urbana geotérmica, con especial desarrollo en ciudades como Dalian, en el noreste del país, donde se ha logrado disminuir el consumo de carbón.

Actualmente, operan sistemas de calefacción urbana en diversas provincias del norte de China. La empresa Sinopec es el principal desarrollador, con una participación del 35% del mercado. En 2021, la superficie que fue calentada alcanzó los 60 millones de metros cuadrados beneficiando a unos 2,3 millones de personas. Ese mismo año, se estima que se evitaron 1,3 millones de toneladas de consumo de carbón, lo que generó una significativa reducción en las emisiones de gases de efecto invernadero ESMAP, (2022).

Figura 10

Instalación de calefacción geotérmica en Xiongxian, provincia de Hebei



Nota. Figura del sistema de calefacción geotérmica en la ciudad de China utilizando el sistema cerrado.tomado de Sinopec en el Ciaxin global

3.7 Proyectos de Baja Entalpía en Colombia.

En Colombia se desarrollan actualmente diversos proyectos de baja entalpía en regiones como la Cundiboyacense, el Eje cafetero y el Choco, entre otras. Sin embargo, al tratarse en su mayoría de iniciativas privadas, aun no existe una cuantificación precisa del número total de proyectos implementados según Moreno-Rendón et al., (2020)

Un ejemplo de aplicación de la geotermia de baja entalpía en Colombia se encuentra en la Hacienda La Quinta, ubicada cerca del Nevado del Ruiz. Este proyecto es liderado por la empresa SAGG. SAS, cuya misión se centra en la instalación de bombas de calor para el aprovechamiento geotérmico en sectores estratégicos. En la dicha Hacienda se han implementado estas tecnologías, como se muestra en la **figura 11** aprovechando la ubicación y las condiciones del entorno para el desarrollo del proyecto.

Figura 11

Uso de calefacción geotérmica en Hacienda La Quinta



Nota. Figura del uso de la calefacción aplicada en la hacienda la Quinta,tomada de Palacio-Villa et al.,(2020)

Otro proyecto relevante es la instalación que se desarrolló en el Parque Industrial La Gran Sabana, en el municipio de Tocancipá. Por medio de una bomba de calor geotérmica construida por la empresa SAGG Alternative Resources, en su área de geotérmica y de la empresa Ecofest, se implementó un sistema para climatizar un cuarto frío. El propósito principal consiste en realizar un intercambio de calor entre el cuarto frío y los pozos geotérmicos, las características del modelo de la bomba se encuentra en la **tabla 5** y la muestra de la bomba en el proyecto en la **figura 12**.

Tabla 5

Características bomba de calor geotérmico Ecoforest utilizada en cuarto frío

Maquinaria	Capacidad	Marca	Modelo –	Vendedor	Función
Bomba Calor	12 kW	Ecoforest	ecoGeoB3 5-	SAGG	Temperatura de
Geotérmica			22 kW HTR	S.A.S	congelación de – 10
			EH		°C

Nota. Información adaptado de Geotermia en la Región Central, (2020)

Figura 12

Proyecto piloto de cuarto frío con bomba de calor geotérmica desarrollado en Gran Sabana por SAGG SAS G



Nota. Proyecto piloto del cuarto frío ,tomado de Geotermia en la Region Central, (2020)

3.8 Principio De Transferencia De Calor Y Disipación De Calor.

El fundamento térmico de la geotermia se basa en la transferencia de energía en forma de calor, presente en fluidos, suelos y acuíferos que conforman los sistemas. Según Cengel & Ghajar, (2007), “el calor es la energía que se transfiere entre sistemas debido a una diferencia de temperatura, y puede transmitirse por conducción, convección o radiación”

La conducción ocurre por contacto directo entre cuerpos con distinta temperatura y depende de la conductividad térmica (k) del material. Metales como el cobre o la plata son excelentes conductores, mientras que materiales como la madera o el aire son aislantes. En el subsuelo, esta propiedad es clave para aprovechar el calor almacenado en rocas y suelo.

La convección combina la conducción con el movimiento de fluidos y se puede ser natural, cuando al flujo se genera por diferencias de densidad, o forzada, cuando interviene ventiladores o bombas. Su rapidez se describe mediante la ley de enfriamiento de Newton, donde influye el coeficiente de transferencia de calor.

La radiación corresponde a la transferencia de energía mediante ondas electromagnéticas. No requiere un medio material y se rige por la ley de Stefan-Boltzmann, según la cual la energía emitida por una superficie depende de su temperatura absoluta y su emisividad.

En la geotermia de baja entalpía, el calor del subsuelo se aprovecha principalmente por conducción. A profundidades de 2 a 5 metros, la temperatura se mantiene relativamente estable durante el año, lo que permite instalar intercambiadores de calor enterrados. Sin embargo, la eficiencia del sistema depende de las propiedades térmicas del terreno. Estudios como los de Pleitavino et al, (2019) y Martins, (2015) han demostrado que la composición del suelo, la humedad

y la presencia de rocas condicionan la capacidad de transferencia de calor y por tanto el rendimiento del sistema geotérmico.

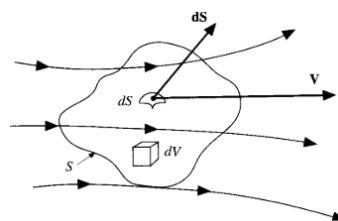
3.9 Fundamentos de la Dinámica de Fluidos Computacional.

En ANSYS Fluent, el análisis se desarrolla mediante la dinámica de fluidos computacional (CFD -Computational Fluid Dynamics), disciplina que aplica los principios fundamentales de la física y la termodinámica a problemas de flujo y transferencia de calor. El software resuelve de manera numérica las ecuaciones de conservación de la masa, la cantidad de movimiento y la de energía, lo que permite modelar con precisión los fenómenos presentes en los sistemas geotérmicos.

Las ecuaciones de Navier-Stokes constituyen el fundamento de la dinámica de fluidos, al describir mediante ecuaciones diferenciales parciales el movimiento de un fluido dinámico viscoso. A partir de ellas se derivan otras formulaciones esenciales, como las leyes de conservación de la masa y la cantidad de movimiento. Estas ecuaciones han sido ampliamente documentadas en la literatura especializada (Wendt & Anderson, 2009) y (Löhner, 2008)

Figura 13

Volumen de control de finito en el espacio.



Nota. figura de volumen de control de finito en el espacio, tomado de (Wendt & Anderson, 2009)

En la **figura 13** se representa el modelo de volumen de control, el cual se define por un contorno finito y fijo en el espacio. En la superficie de control, la velocidad de flujo se denota mediante el vector $\vec{V}$, mientras que el área diferencial se expresa como $\overrightarrow{dS}$ y el volumen elemental como dV .

Al aplicar a este volumen de control el principio físico fundamental de conservación de la masa, se establece que la cantidad de masa que entra debe ser igual a la que sale, garantizando así que la masa total se mantenga constante durante el recorrido del fluido.

$$\nabla * v = 0 \quad (1)$$

Donde:

∇ : operador diferencial espacial

$\vec{v}$ = vector velocidad del fluido

$\nabla * v$ = divergencia de la velocidad.

Otra formulación fundamental corresponde a la ecuación de conservación del momentum, la cual se deriva de la segunda ley de Newton aplicada a los fluidos. Esta ecuación establece que la variación de movimiento depende de la densidad de fluidos, la presión, la viscosidad dinámica y las fuerzas externas, como la gravedad. Su forma diferencial se expresa como:

$$\rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + v * \nabla v \right) = -\nabla p + \mu \nabla^2 v + \rho g \quad (2)$$

Donde:

ρ = densidad del fluido (Kg/m^3)

$\frac{\partial v}{\partial t}$ = cambio de la velocidad con respecto al tiempo.

v = vector de velocidad (m/s)

$v * \nabla v$ = aceleración convectiva.

P = presión (Pa)

∇p = gradiente de presión

μ = viscosidad dinámica (Pa*s)

$\nabla^2 v$ = laplaciano de la velocidad

g = aceleración de la gravedad.

Otra de las ecuaciones fundamentales del modelo es la ecuación de conservación de la energía, la cual se basa en la primera ley de la termodinámica aplicada a un fluido en movimiento. Esta formulación permite comparar el comportamiento del sistema simulado con el modelo físico experimental. En su forma general se expresa como:

$$\begin{aligned}
& \underbrace{\frac{\partial}{\partial t} \left[\rho \left(e + \frac{V^2}{2} \right) \right] + \nabla \cdot \left[\rho \left(e + \frac{V^2}{2} \vec{V} \right) \right]}_{\text{acumulacion temporal de eneriga dentro del volumen de control}} \\
&= \rho \dot{q} + \underbrace{\frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right)}_{\text{transferenfica de calor por conduccion}} \\
&\quad - \underbrace{\frac{\partial (up)}{\partial x} - \frac{\partial (vp)}{\partial y} - \frac{\partial (wp)}{\partial z}}_{\text{trabajo de la presion}} + \underbrace{\frac{\partial (u\tau_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial (u\tau_{yx})}{\partial y} + \frac{\partial (u\tau_{zx})}{\partial z}}_{\text{trabajo de esfuerzos viscosos}} \\
&\quad + \underbrace{\frac{\partial (v\tau_{xy})}{\partial x} + \frac{\partial (v\tau_{yy})}{\partial y} + \frac{\partial (v\tau_{zy})}{\partial z}}_{\text{trabajo de esfuerzos viscosos}} \\
&\quad + \underbrace{\frac{\partial (w\tau_{xz})}{\partial x} + \frac{\partial (w\tau_{yx})}{\partial y} + \frac{\partial (w\tau_{zz})}{\partial z}}_{\text{trabajo de esfuerzos viscosos}} + \rho \vec{f} \cdot \vec{V}
\end{aligned} \tag{3}$$

Donde

ρ = densidad del fluido.

e =energía interna específica.

$\frac{V^2}{2}$ =energía cinética específica.

$\vec{V}$ =vector velocidad.

$\rho \left(e + \frac{V^2}{2} \right)$ = energía total por unidad de volumen.

$\dot{q}$ = caudal.

k = conductividad térmica.

T = temperatura.

p = presión.

τ_{ii} =componentes del tensor de esfuerzos viscosos.

$\vec{f}$ = fuerza de cuerpo por unidad de masa

En esta ecuación. El término del lado izquierdo representa la tasa de cambio de la energía total, compuesta por la energía interna y la energía cinética, respecto al tiempo, junto con el flujo convectivo de energía a través de las fronteras del volumen de control. Esta formulación resulta fundamental para el análisis de situaciones complejas en el ámbito de la ingeniería térmica y la dinámica de fluidos.

3.10 Numero de Reynolds aplicado en ANSYS Fluent

En la mecánica de fluidos, el comportamiento del fluido dentro del serpentín de calor helicoidal se determina mediante el cálculo del número Reynolds (Re), con el fin de definir el régimen de flujo y las ecuaciones de turbulencias a emplear en la simulación numérica desarrollada en ANSYS.

$$Re = \frac{\rho V D_i}{\mu} = \frac{\text{fuerza inercial}}{\text{fuerza viscosas}} \quad (4)$$

Lo cual nos dice (Cengel & Cimbala, 2006/2006) “es el número adimensional que indica la relación entre las fuerzas inerciales y las fuerzas viscosas que actúan sobre un fluido en movimiento”, las fuerzas inerciales son las que tienden a mantener el movimiento del fluido y las fuerzas viscosas son las que tienden a amortiguar el movimiento, donde:

V =la velocidad media del flujo

D_i =el diámetro interno del tubo

μ =la viscosidad dinámica del fluido.

Tabla 6.

Clasificación de los Régimen de Flujo-

Flujo Laminar	Re<2000
Flujo Transitorio	2000<Re<4000
Flujo Turbulento	Re>4000

Nota.Tabla muestra la clasificación de los regímenes de flujo em relación al numero de Reynolds

Adaptado de Cengel & Cimbala, (2006)

3.11 Modelo de turbulencia

En el desarrollo de la simulación se seleccionó un modelo de turbulencia basado en las ecuaciones de Navier-Stokes promediadas de Reynolds (RANS), el cual permite describir con precisión el comportamiento de flujos internos en tuberías y el intercambiador de calor asociados. Para la simulación que va a realizar se utilizó el modelo $k - \epsilon$ realizable ampliamente empleado en la simulación como nos aclara en Ji & Dong, (2023)para las aplicaciones de transferencia de calor en intercambiadores debido a su balance entre precisión y costo computacional.

El modelo $k - \epsilon$ emplea dos ecuaciones de transporte, una para la energía cinética turbulenta (k) y otra para su tasa de disipación de la turbulencia en el dominio computacional, capturado los efectos de remolinos y gradientes de velocidad característicos en flujos internos, ecuación 5 y 6 son el modelo $k - \epsilon$ y el modelo $k - \epsilon$ realizable.

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \epsilon - Y_M + S_k \quad (5)$$

$$\frac{\partial(\rho \epsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \epsilon u_j)}{\partial x_j} \quad (6)$$

$$= \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + \rho C_1 S_\epsilon - \rho C_2 \frac{\epsilon^2}{k + \sqrt{\nu \epsilon}} + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} C_{3\epsilon} G_b + S_\epsilon$$

Donde:

ρ es la densidad;

u_j las componentes de velocidad;

x_j las coordenadas;

μ_t la viscosidad dinámica, turbulenta;

σ_k el número de Prandtl turbulento para k ;

G_k producción de k por esfuerzo cortante medio;

G_b producción por flotación/boyancia;

ϵ : la tasa de disipación de k ;

Y_M : término de dilatación (flujos compresibles);

$S_{k,\epsilon}$ termino fuente por la literatura, mientras en la ecuación 5 el termino ϵ es la tasa de disipación de k , los términos C_1, C_2 , constantes empíricas de $k - \epsilon$ realizable., los datos constantes serían los siguientes $C_{1\epsilon} = 1.44, C_2 = 1.9, \sigma_k = 1.0, \sigma_\epsilon = 1.2$

Una de las principales ventajas del modelo $k - \epsilon$ realizable es su capacidad de predecir con mayor fidelidad flujos de presentan curvaturas; separación de capa limites o rotaciones,

condiciones que se manifiestan en el serpentín helicoidal debido a la geometría curvas de las tuberías. Además, este modelo ofrece una mayor estabilidad numérica y tiempo de convergencias razonables frente a modelos más complejos, como los de simulación de grandes escalas (LES- Large Eddy Simulation)

En el caso del terreno circundante, se asumió un régimen principalmente conductivo, por lo que la turbulencia se resolvió únicamente en la región interna del tubo de cobre y en el flujo de agua, mientras que en el medio sólido se modela el transporte de calor sin términos turbulentos.

De esta forma, la implementación del modelo $k - \epsilon$ realizable en ANSYS Fluent permite capturar adecuadamente los fenómenos de convección forzada en el interior del serpentín y su interacción térmica con el suelo, garantizando resultados confiables en el análisis de la eficiencia del sistema geotérmico simulado.

3.12 Cálculo del coeficiente convectivo ambiente h_{amb}

En los sistemas experimentales se encuentran expuestos al ambiente, por lo que existen pérdidas de calor desde la superficie del suelo hacia el aire circundante, estas pérdidas ocurren principalmente por convección natural dado que estas no están reportadas en el experimento, pero se puede observar la temperatura del ambiente y la temperatura del suelo, el sistema opera al aire libre el cual la diferencia de temperatura entre la superficie del suelo y el aire es moderada.

En consecuencia, el coeficiente convectivo ambiente h_{amb} se calcula empleando correlaciones clásicas de convección natural, ampliamente aceptada en la literatura de transferencia de calor, se realiza con la aproximación de Boussinesq es la cual emplea en ANSYS Fluent para modelar fenómenos fundamentales de convección natural cuando las variaciones de la

temperatura son moderadas, esta aproximación se permite considerar considerando el ambiente como un flujo incompresible ya que esta esparcido por el ambiente.

En el desarrollo de la transferencia de calor donde el aire actúa como fluido circundante como es el caso de la interacción térmica suelo-ambiente, la convección es natural y esta genera un diferencial de densidad provocadas por gradientes térmicos. El aire calentado en el contacto con la superficie adquiere menor densidad y asciende, mientras que el aire más frío desciende. Este mecanismo de transferencia de calor debido a la diferencia de densidad es el que se modela mediante la aproximación de Boussinesq.

$$\rho = \rho_o(\beta(T - T_o)) \quad (7)$$

Donde:

ρ_o es la densidad de referencia,

β es el coeficiente de expansión térmica,

T es la temperatura local,

T_o es la temperatura de referencia.,

En la simulación con Ansys es donde se utiliza para poder desarrollar el medio de radiación ejercido por el ambiente en la cara del suelo por medio del sol.

3.13 Conceptos de radiación enfocados en CFD.

Este capítulo está basado desde la información recopilada en la página de (Ayuda de Ansys, 2025) y el su manual oficial “User’s Guide, Release 2025-R1” (ANSYS INC, 2025) donde se toma para comprender los modelos de transferencia de calor en el simulador en Ansys Fluent 2021 R1.

En la descripción de los modelos de radiación en el cual nos aclara los diferentes métodos para la transferencia de calor por dicho medio, ya que es un mecanismo fundamental en los sistemas térmicos donde existen temperaturas y gradientes térmicos que participan radiativamente del medio como son gases de combustión, hornos, intercambiadores, efectos del ambiente etc.

En la simulación hay diferentes tipos de modelos numéricos que tratan de modelar el efecto de radiación, los cuales son modelo Rosseland, Modelo P-1(Primer orden de Armónicos esféricos), Modelo ordenadas discretas (DO), modelo Surface to Surface (S2S), Modelo discreto de transferencia de radiación (DTRM), modelo de Monte Carlo, de todos estos se basan en implementar diversos modelos para poder resolver la Ecuación de transferencia radiativa (RTE),

$$\frac{dI(\vec{r}, \vec{s})}{ds} + (a + \sigma_s)I(\vec{r}, \vec{s}) = an^2 \frac{\sigma T^4}{\pi} + \frac{\sigma_s}{4\pi} \int_0^{4\pi} I(\vec{r}, \vec{s}') \Phi(\vec{s}, \vec{s}') d\Omega' \quad (8)$$

Donde:

$\vec{r}$ es el vector de posición,

$\vec{s}$ es el vector de dirección,

$\vec{s}'$ es el vector de dirección de dispersión,

s es la longitud de camino,

a es el coeficiente de absorción,

σ_s es el coeficiente de dispersión, σ es la constante de Stefan-Boltzmann,

I es la intensidad de radiación, que depende de la posición $\vec{r}$ y la dirección $\vec{s}$,

T es la temperatura local,

Φ es la función de fase,

Ω' es el ángulo sólido.

Toda esta ecuación se varía dependiendo del modelo en el cual se modifica, y dependiendo de el podemos realizar las diferentes ventajas y desventajas dependiendo de los modelos.

El modelo P-1(primer orden Armónico esférico) es un aproximación simplificada de la RTE (8) esta caracterizado por similar a una ecuación de difusión adicional en aplicarse en medios participantes lo cual funciona bien en cámaras cerradas, mientras el modelo Discretas ordinales (OD) es un modelo que resuelve la ecuación de transferencia radiactiva en múltiples direcciones discretizadas, es decir resuelve la RTE (8) de manera angular el cual puede modelar medios participantes, superficies semitransparentes y reflexiones especulares y difusa es muy utilizada para aplicaciones de la radiación solar e ingeniería térmica avanzada.

El modelo Rosseland es una aproximación difusiva de la radiación válida para medios ópticamente gruesos (alta absorción), donde ese asume comportamiento similar a conducción térmica, solo valido cuando el medio es altamente participante. No es adecuado para las superficies abiertas o medios ópticamente delgados, las aplicaciones son dadas de procesos de combustión densa y materiales semitransparente a alta temperatura. El modelo Surface to Surface se considera únicamente entre superficies, asumiendo que el medio no participante (Transparente) el cual está basado en factores de vista, y no modela la absorción o emisión en el volumen, donde sus aplicaciones más el sistema donde solo las paredes intercambian radiación, por lo cual los intercambiadores cerrados sin gases absorbentes especializándose en análisis térmico estructural.

Mientras el modelo discreto de transferencia de radiación (DTRM), el cual el modelo basado en trazado de rayos discretos desde superficies emisoras, la características son buenas para

medios no participantes o levemente participantes, no resuelve completamente la RTE volumétrico, en los modelos más utilizados en hornos industriales simples y análisis con radiación dominante superficial, y otro modelo es el método Monte Carlo en Radiación el cual tiene un enfoque estadístico probabilístico para resolver la Ecuación de transferencia radiativa (RTE)(8) mediante el seguimiento de millones de “paquetes de energías” (rayos fotónicos) en este se método trata de resolver la ecuación diferencial directamente, genera rayos aleatorios desde superficies emisoras y se calcula interacciones probabilísticas en los cuales se enfocan en la absorción, reflexión y transmisión y se repite el proceso hasta alcanzar convergencia estadística.

Toda la información tomada está basada desde la página principal de Ansys Fluent y de su manual de operación de Ansys.

Tabla 7

Diferenciación de modelos de radiación utilizados por Ansys Fluent

Modelo	Medio participante	Coste computacional	Precisión	Empleado en
Rosseland	Si (ópticamente grueso)	Bajo	Media	Combustión densa
P-1	Si	Medio	Media	Hornos cerrados
DO	Si	Alto	Alta	Combustión, solar
S2S	No	Bajo	Alta (superficial)	Cavidades cerradas
DTRM	Limitado	Medio	Media-alta	Hornos Simples
Monte Carlos	Si	Muy alto	Muy alta	Materiales reflexivos

Nota. Información de los diferentes modelos de radiación que se utilizan en Ansys Adaptado de (Ayuda de Ansys, 2025)

3.14 Concepto para la distancia mínima para que exista intercambio térmico

Para establecer la distancia adecuada entre el serpentín geotérmico y la frontera exterior del dominio de suelo, se realizó una estimación de la propagación transitoria del calor durante el tiempo total de simulación. Este cálculo permite evitar que la condición de temperatura constante impuesta en el contorno exterior afecte artificialmente la transferencia de calor entre el serpentín y el terreno

3.15 Cálculo de la difusividad térmica del suelo

Para empezar a calcular la longitud necesitamos utilizar la ecuación de la difusividad térmica α que indica que tan rápido se propaga el calor en el suelo,

$$\alpha = \frac{k_s}{(\rho_s * Cp_s)} \quad (9)$$

Donde:

α es la difusividad térmica del suelo,

k_s es la conductividad térmica,

ρ_s es la densidad del suelo,

Cp_s es la capacidad calorífica ,3.16 Longitud característica de difusión térmica

Una vez determinada la difusividad térmica se estima la distancia característica alcanzada por la perturbación térmica durante el tiempo físico considerado en la simulación. Esta longitud no corresponde todavía a la ubicación definitiva de la frontera, pero permite identificar la escala espacial principal del fenómeno transitorio

$$L_c = \sqrt{\alpha t} \quad (10)$$

Donde

L_c es la longitud característica de difusión ,

α es la difusividad térmica del suelo,

t es el tiempo físico total durante el experimento

3.16 Definición de la perturbación térmica adimensional

Para cuantificar el efecto térmico que llega a una posición determinada del suelo. Se define una temperatura adimensional. Esta relación compara el cambio de temperatura local con la diferencia total existente entre la fuente térmica y la condición inicial del terreno

$$\theta(x, t_s) = \frac{T(x, t_s) - T_i}{T_s - T_i} \quad (11)$$

Donde

$\theta(x, t_s)$ es la perturbación térmica adimensional,

$T(x, t_s)$ es la temperatura del suelo en la posición x y en el tiempo t ,

T_i representa la temperatura inicial no perturbada del suelo

T_s es la temperatura característica de la fuente térmica

θ es el valor que indica que fracción de la perturbación inicial ha alcanzado al punto analizado,

3.17 Aplicación de la función error complementaria

Bajo la aproximación de conducción transitoria en un medio homogéneo y suficientemente extenso, la distribución de temperatura puede representarse mediante la función error

complementaria. Esta función describe la reducción progresiva de la perturbación térmica al aumentar la distancia respecto de la fuente:

$$\theta(x, t_s) = \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{\alpha t_s}}\right) \quad (12)$$

Donde

$\theta(x, t_s)$ es la perturbación térmica adimensional.

erfc es la función error complementaria .

x representa la distancia del suelo.

t_s es la tiempo del experimento al que fue realizado.

α es la difusividad térmica del suelo.

Esta se puede utilizar para establecer la posición donde la influencia térmica del serpentín se reduce hasta un nivel suficientemente pequeño.

3.18 Criterio para considerar la frontera no perturbada

Se define un valor máximo admisible de perturbación en la frontera exterior, representado por ε . Este parámetro debe seleccionarse antes del cálculo y expresa la fracción de la variación térmica que se acepta en el límite del dominio. Una frontera más estricta corresponde a un valor menor de ε y, en consecuencia, requiere una mayor distancia respecto del serpentín:

$$\theta(x, t_s) = \varepsilon \quad (13)$$

$$erfc\left(\frac{x_f}{2\sqrt{\alpha t_s}}\right) = \varepsilon \quad (14)$$

Donde

$\theta(x, t_s)$ es la perturbación térmica adimensional.

$erfc$ es la función error complementaria .

x representa la distancia del suelo.

t_s es la tiempo del experimento al que fue realizado.

α es la difusividad térmica del suelo.

Al sustituir el criterio anterior en la solución basada en la función error complementaria, se obtiene la ecuación que relaciona la distancia de la frontera con las propiedades del suelo, el tiempo físico y la perturbación admisible

3.19 Despeje de la distancia mínima

Para obtener directamente la distancia mínima desde la superficie exterior del serpentín hasta la frontera térmica, se aplica la función inversa de erfc y se despeja x_f

$$erfc^{-1}(\varepsilon) = \frac{x_f}{2\sqrt{\alpha t_s}} \quad (15)$$

$$x_f = 2 erfc^{-1}(\varepsilon) \sqrt{\alpha t_s} \quad (16)$$

Donde

$erfc^{-1}(\varepsilon)$ es la perturbación térmica adimensional.

x_f es la función error complementaria .

α representa la distancia del suelo.

t_s es la tiempo del experimento al que fue realizado.

α es la difusividad térmica del suelo.

La distancia x_f se mide desde la superficie exterior del intercambiador hasta el límite del dominio. Esta definición es importante porque la propagación del calor comienza en la región de contacto entre el serpentín y el suelo, y no necesariamente en el eje central de la geometría

3.20 CFD Enfocado En Sistemas De Bombas De Calor Geotérmico (GSHP)

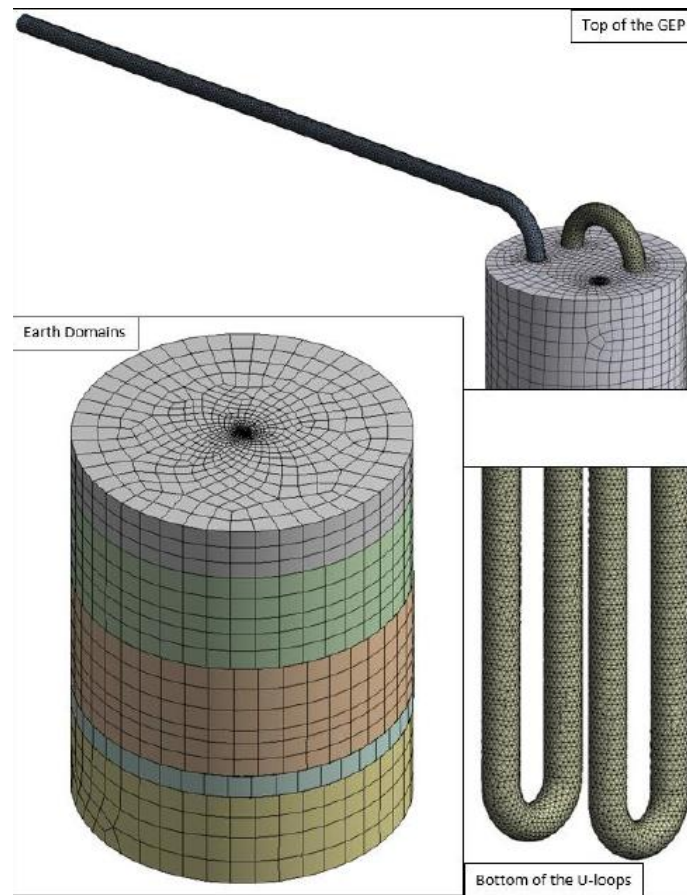
La dinámica de flujo computacional (CFD) es una herramienta que permite simular numéricamente cómo se comporta el fluido y como intercambia calor y masa al moverse por geometrías reales, por lo tanto, permite brindarle a la industria geotérmica uno de los ejemplos que se explican el libro de Ji & Dong, (2023) “Computational Fluid Dynamics - Recent Advances, New Perspectives and Applications”, en su capítulo 6 “CFD Applications in Ground Source Heat Pump System” y en la tesis de Thompson III, (2013) “Numerical Analysis of Thermal Behavior and Fluid Flow in Geothermal Energy Piles” donde usando como el fluido de estudio el agua en componentes de bombas de calor geotérmicas (GSHP) en la tesis con una tubería embebida y en el libro con un intercambiador tipo U y Helicoidal, en ambos textos el objetivo es predecir el desempeño térmico acoplado (flujo en la tubería + conducción en el suelo/ estructura) y dar criterios de diseño para la optimización o comprobar su funcionamiento en diferentes condiciones

En la tesis, el modelo 3D representa agua circulando por tuberías HDPE dentro de los pilotes de cimentación de una edificación y esta asume propiedades del agua constantes y flujo

turbulento, por lo que se emplea un modelo $k - \epsilon$ y la ecuación de energía. Se analizan configuraciones (longitud y numero de bucles), mostrando que aumentar los lazos reduce la temperatura media del fluido (mejora el intercambio) y modifica la resistencia térmica de la pila, mientras la conducción a través de la pila y el suelo gobierna la extracción/inyección de calor.

Figura 14

Geometría del pilote

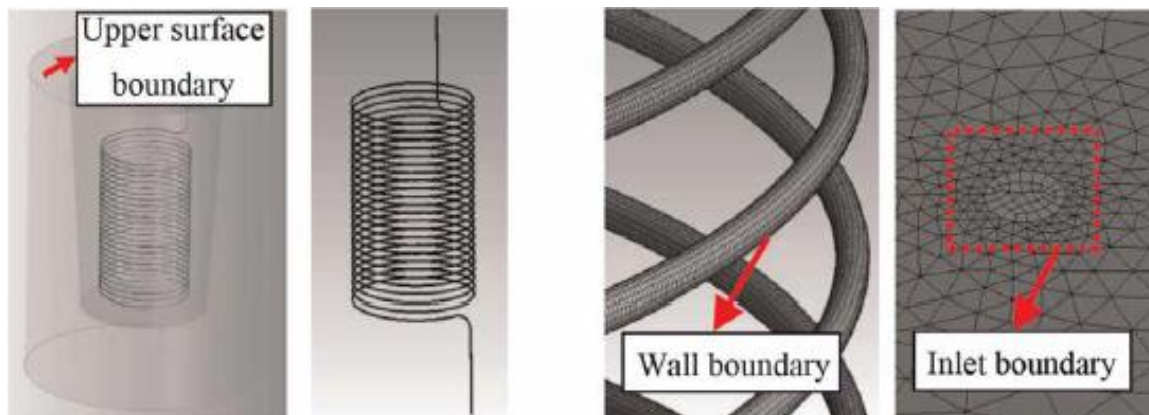


Nota Figura del modelo en Ansys del pilote, tomado de (Thompson III, 2013)

Mientras en el libro de Ji & Dong,(2023) se formula un modelo 3D para un intercambiador helicoidal enterrado, donde el suelo se trata como un medio poroso con equilibrio térmico, el agua turbulenta en la tubería $k - \epsilon$ y condiciones simplificadas en el contorno lejano. Se valida con experimento y se estudia sobre todo la influencia de la temperatura de entrada del agua (factor principal) y la geometría helicoidal, destacando su mayor área y eficiencia de intercambio frente a configuraciones tradicionales.

Figura 15

Geometría del Intercambiador de calor helicoidal



Nota. Adaptado de Ji & Dong,(2023)

En conjunto, la tesis sobre pilas energéticas y la sección del libro sobre intercambiadores helicoidales muestran que el CFD aporta un marco cuantitativo y validable para diseñar intercambiadores geotérmicos, lo que permite resolver la transferencia de calor conjugada(fluido-pared-suelo) en 3D, se realiza validación con ensayos y busca con bajo riesgo la influencia de la geometría ya sea en (diámetro, numero de lazos, pasos helicoidales. Grosor de la tubería), o en los

materiales (tubería PVC, cobre, aluminio) o tipificación de suelo, uniforme o haciéndolo variable. O mejor en las condiciones de operación (caudal. Temperatura de entrada). Con ello, CFD reduce la incertidumbre del dimensionamiento (longitud / profundidad/ área, separación y disposición), anticipando una interferencia térmica y calcular las perdidas debido a las cargas y lo cual proporciona una optimización en la cual se podrá ubicar unas condiciones óptimas para poder maximizar el intercambio térmico con consumo de bombeo razonable; en síntesis, evita sobredimensionamientos o bajo rendimientos y acelera decisiones de ingeniería más eficientes y confiables.

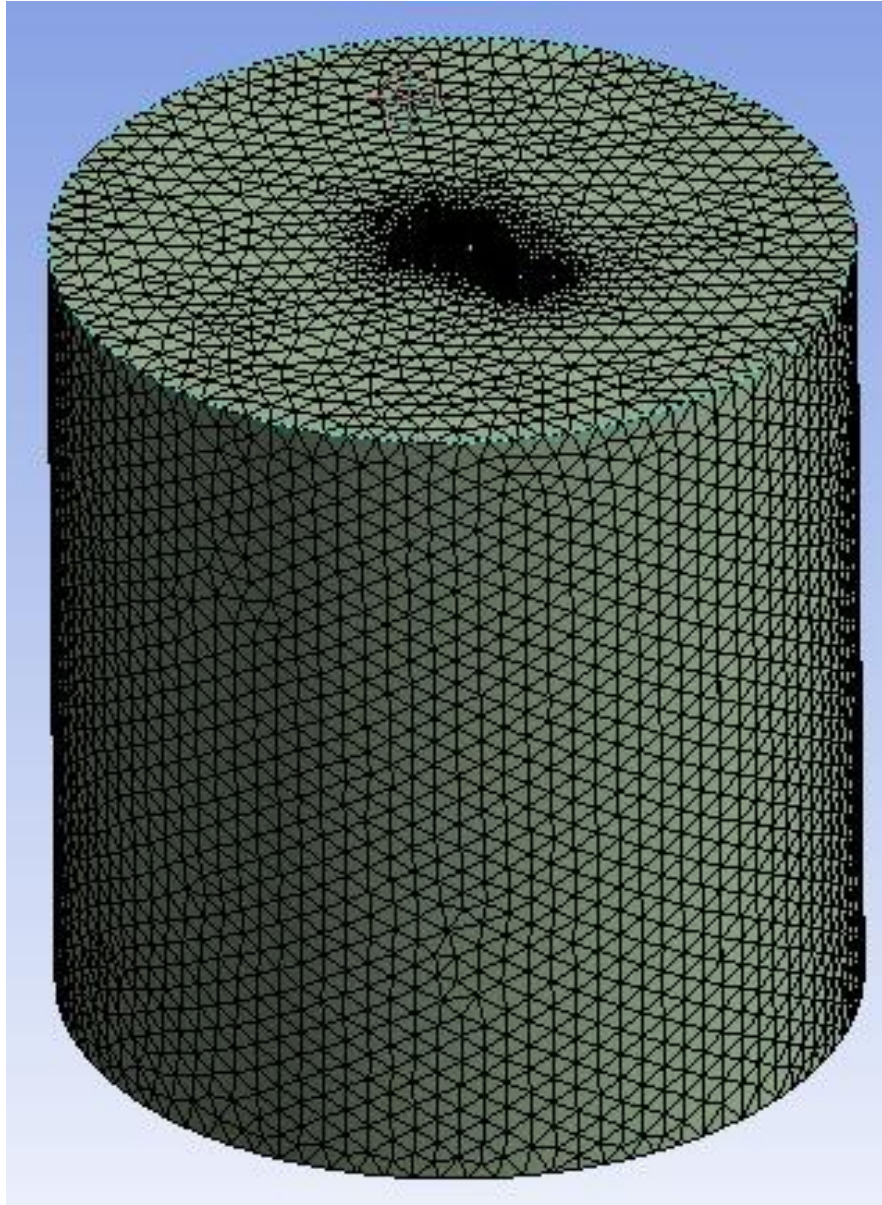
4. Metodología

En esta sección se describe el procedimiento seguido para desarrollar la simulación del serpentín geotérmico (GHSP). Tal como se expuso previamente, el sistema seleccionado corresponde a un **serpentín vertical** acoplado a una **bomba de calor**. El proceso metodológico comprende desde la definición de la geometría hasta la obtención de los resultados, incluyendo etapas intermedias como el mallado y la configuración de las condiciones de contorno.

La primera etapa de la simulación consiste en construir la geometría del modelo mediante la herramienta **SpaceClaim**. En esta etapa se definen las condiciones de entrada y salida del fluido, así como los puntos de referencia del flujo. Una vez establecida la geometría, se procede a generar un **mallado básico** que servirá como base para la configuración del serpentín

Figura 16

Geometria de la simulación



Nota.Figura muestra el mesh de la geometría del suelo y el intercambiaor,Adaptado de ANSYS

2021-R2

En la segunda etapa se definen los **parámetros de entrada** y las **condiciones de contorno** del modelo, incluyendo las propiedades de las tuberías, la temperatura de inyección y las características térmicas del terreno. Asimismo, se establece la **tasa de inyección másica** a través de la tubería de cobre, con el objetivo de garantizar el cumplimiento de las leyes de la termodinámica y de los principios de conservación de masa y energía. Finalmente, se lleva a cabo el análisis de los resultados, buscando coherencia con los hallazgos reportados en la tesis “Análise teórica e experimental do comportamento de um trocador de calor geotérmico”(Martins, 2015)-

En la tercera parte se realizará un análisis de la temperatura en diferentes áreas de la simulación donde se pueden visualizar el análisis de resultados donde se comparará la data generada con los resultados de la simulación y si se genera la convergencia de la temperatura y se cumple la transferencia de masa.

4.1 Geometría y materiales.

En el primer paso de la simulación se realiza el diseño tridimensional del modelo utilizando ANSYS Geometry, basado en herramientas de diseño asistido por computador (CAD). Posteriormente, se efectúa la discretización del dominio mediante el módulo MESH, donde se genera el enmallado correspondiente. En la **figura 16** se presenta la geometría obtenida de acuerdo con la literatura (Martins, 2015), mientras que las dimensiones del modelo se detallan en la siguiente **tabla**.

Tabla 8

Condiciones de la Geometría de GSHP

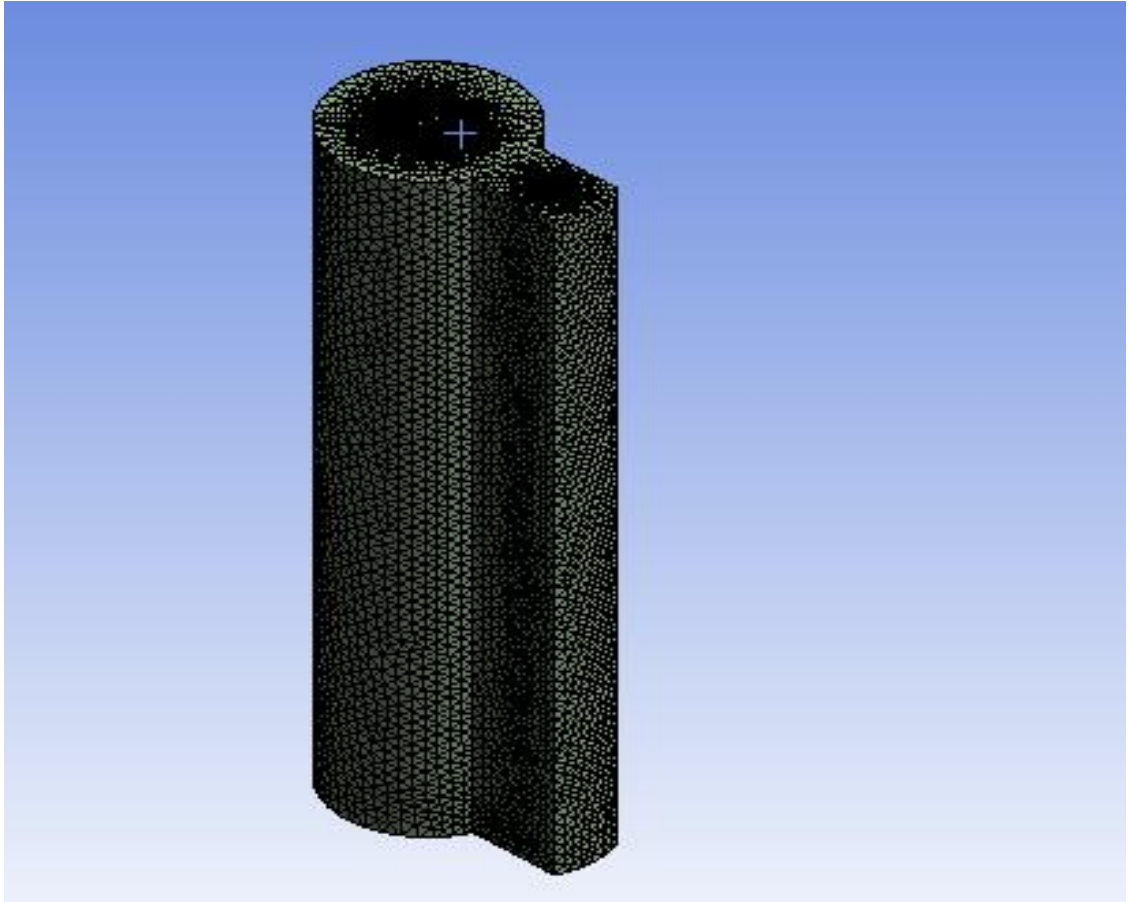
Descripcion	Valores
Diámetro externo del tubo	9,52 mm
Diámetro interno del tubo	7,92 mm
Comprensión del serpentín	3 m
Total, de helicoides	30 unidades
Distancia entre el centro del serpentín y la sonda de medición	400 mm (40 cm)
Distancia entre el centro del serpentín y el tubo de salida	600 mm (60 cm)
Distancia minima para realizar el contorno (geometría)	2 metros
Área del terreno	16 m ²
Profundidad del terreno	3,4 m

Nota Informacion de la experimento el cual se adaptado de (Martins, 2015)

Asimismo, en el desarrollo del módulo de “MODEL” se requiere para poder hacer el desarrollo de la transferencia de calor la conductividad térmica promedio de los elementos, Además de las demás propiedades termodinámicas que se requieren utilizadas en la simulación se presentan en la **tabla 9**.

Figura 17

Diagrama del modelo en la literatura



Nota. Figura tomada de las indicaciones de (Martins, 2015) y diseñada ANSYS 2021-R2

Tabla 9

Valores de la conductividad térmica y condiciones de la simulación

Agua (water liquid)-Valores	
Densidad 60°C	998.2 kg /m ³

Cp. (poder calorífico)	4182
k-Conductividad térmica del agua	0.6
Temperatura del agua	55.33 °C (328.48K)
Caudal de operación	2L/min*100horas(360000s)
Caudal masico	0.033 kg/s
Coeficiente de expansión térmica β (1/K)	0.6
Cobre (Copper)- Valores	
Densidad	8978 kg /m ³
Cp. (poder calorífico)	3812
k-Conductividad térmica de la tubería.	410 W/m K
Terreno (Soil) valores	
Densidad	1900 kg /m ³
Cp. (poder calorífico)	901
k-Conductividad térmica del suelo.	1.39W/m K
Diametro exterior aproximado del serpentín	0.27 m

Nota Adaptado de (Martins, 2015)

4.2 Condiciones de la simulación

En el desarrollo de la simulación se tomaron ciertas condiciones para que la simulación se pudiera desarrollar de manera más acertada para aproximarse al experimento por lo cual se realiza investigación y se asume los siguientes datos.

1. Coeficiente convectivo h ambiental.
2. Coeficiente de la radiación ambiental.
3. . El número de Reynolds.
4. Longitud del contorno de la simulacion.

Para la simulación el número de Reynolds se calcula las siguientes condiciones, $\rho = 998 \text{ kg/m}^3$, $V = 2 \text{ litros/min} = 0.68 \text{ m/s}$, $D_1 = 16 \text{ mm} = 0.016 \text{ m}$, $\mu = 1.0 * 10^{-3} \text{ Pa} * \text{s}$, en lo cual se determina el número de Reynolds aproximado de $Re \approx 9.6 * 10^3$ este valor indica que el régimen de flujo se encuentra claramente en turbulento. En consecuencia, en ANSYS Fluent se modelo el flujo como turbulento, empleando un modelo de turbulencias apropiados para flujo interno con curvatura, siendo esta condición fundamental para una correcta predicción en la transferencia de calor por convección en el interior del serpentín helicoidal.

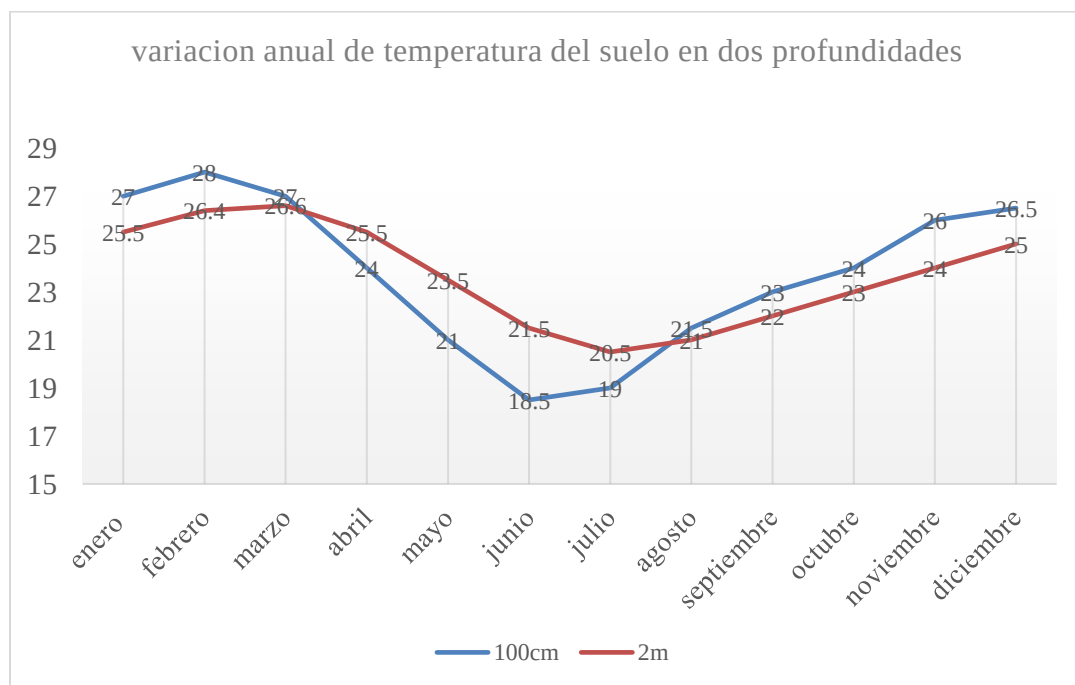
En la determinación del Coeficiente convectivo h ambiental se determina por medio de la ecuación de Boussinesq ecuación 7 donde por medio del análisis se determina el valor de 0.6 (1/K) para que la simulación se pudiera realizar la simulación se anexa las temperaturas del ambiente y de la profundidad que están dadas en la **tabla 10** para poder completar la simulación adicionando los valores del Setup para poder realizar la simulación de manera más optima y así poder llegar a una mejor simulación.

Para este proceso se debe realizar es el cálculo del coeficiente convectivo del ambiente h_{amb} lo que seria (aire- superficie del suelo/ tubería expuesta), que se realiza en el experimento, en lo cual se toma la temperatura en lo cual se tomaría la temperatura de la **figura 18**, para tomar

las temperaturas de marzo y la de agosto siendo para un promedio para **marzo de 26.8°C** y para agosto de 21.3 °C esos meses son los que están más estables térmicamente a nivel del suelo con su profundidad de 100 m.

Figura 18

Variación anual de temperatura del suelo en dos profundidades



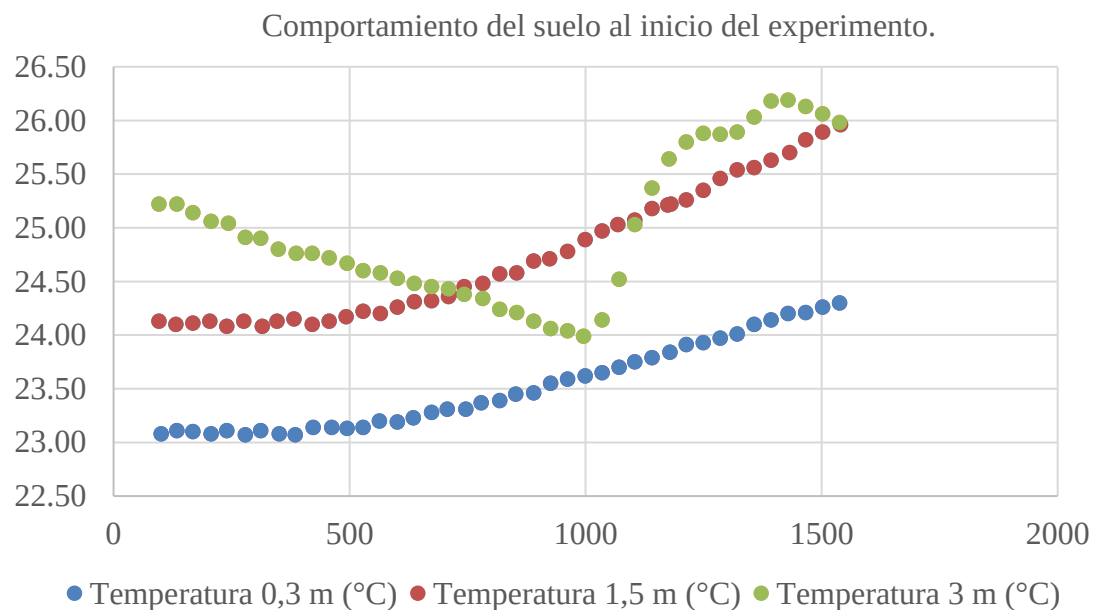
Nota.informacion de la variación anual de la temperatura del suelo a dos profundidades en la ciudad de Sao Leopoldo, Adaptado de Martins, (2015)

En térmico sacado de la literatura donde diferentes profundidades se tomaría la temperatura promedio en donde los valores de las temperaturas a la profundidad a la cual se tiene al final del serpentín.

Adicional que se configura las temperaturas internas del modelo a partir de la **figura 19** donde se toma el calor de la parte superior y inferior y se anexa en la simulación para poder poner la temperatura T_i donde comenzaría la temperatura inicial y después se deja simular hasta llegar a la temperaturas deseadas, donde nos muestra los minutos que se tomaron la medición a la temperatura del suelo durante un tiempo estimado de 1580 minutos (26 horas 20 minutos), para tomar la temperatura de la superficie y la del fondo de la simulación para poderlo simular dado para la de arriba en $24.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ y la de abajo en $26\text{ }^{\circ}\text{C}$

Figura 19

Comportamiento del suelo al inicio del experimento.



Nota. Información del comportamiento del suelo al inicio del experimento, Adaptado de Martins, (2015)

Adicional se determina que el modelo que se selecciona por para realizar la simulación en condiciones de radiación es el modelo Discretas ordinales (OD) el cual permite que se realice la simulación para efectos del ambiente del sol y con la temperatura del ambiente como un referente de la interacción por dicho medio de transferencia de calor a la geometría que se encuentra en la parte superior de la geometría. luego que se da los valores para el Inflow con la temperatura del agua y el caudal anteriormente escritos y el Outflow con una presión 0 Pa gauge.

Para poder realizar la verificación de la simulación se estima una frontera a 40 cm del centro del serpentín donde se estima la temperatura a la pared del contorno por medio del proceso de convección, conducción y radiación. el cual se visualizará dependiendo de las alturas para poderlas observar las temperaturas alcanzadas durante el proceso en el cual se itero a 1500 veces tratando de llegar a una convergencia de datos.

Las condiciones de la pared interna (agua-cobre) se realizó por medio de Couple Wall (CHT), igualmente que las condiciones de la pared exterior del tubo (cobre-suelo) con un borde de frontera infinito. La frontera del dominio de suelo es la temperatura far-field ya que se usa gran extensión o que el terreno sigue con la disipación de calor.

En el flujo interno que se realizan con RANS, y $k - \omega SST$ donde su desarrollo robusto en curvaturas / pared y $k - \varepsilon$ realizable como ya se ha explicado anteriormente, para lo cual adicional la sección de energía para hacer la activación CHT activación (solido- fluido) y con las propiedades ya anexadas del agua para poder realizar las condiciones de transferencia de calor y que se necesitan para el acoplamiento de presión y velocidad contra la transferencia de calor con respecto al tiempo que se necesita calcular que son las 100 horas de simulación.

Tabla 10

Métodos y controles de solución en Ansys Fluent.

Métodos y controles de solución	
Esquema de acoplamiento velocidad-presión	Couple
Gradiente	Least Squares Cell Based
Discretización espacial de presión	Simple Order
Discretización espacial de momento	Second Order Upwind
Discretización espacial de la energía	Second Order Upwind
Taza de disipación específica	Second Order Upwind
Energía	Second Order Upwind
Ordenadas Discretas	Second Order Upwind

Nota. Información de métodos y control de solución en Ansys Fluent 2022 R2

4.3 Procesos de flujo del agua y la transferencia de calor realizada al entorno.

En la pestaña del software de Ansys de Setup es clave para configurar la física del problema antes de realizar las iteraciones, en esta área se definen condiciones y ecuaciones las cuales se desarrollarán la simulación y que valores estarán preestablecidos para que el software comience a iterar.

Después de generar el volumen de control por donde el flujo se simulará, las condiciones a las cuales se presentan la literatura son de 2 litros/min siendo un flujo volumétrico, pero en la cual Ansys Fluent utiliza el flujo es masico donde el cambio que se debe realizar es de 0.033 Kg/s.

Los cálculos realizados para comprender el flujo masico es.

$$Q_v = 2 \frac{\text{Litro}}{\text{min}} = 2 \times 10^{-3} \frac{\text{m}^3}{\text{min}} = \frac{2 \times 10^{-3} \text{m}^3}{60} \frac{\text{m}^3}{\text{s}} = 3.333 \times 10^{-5} \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

Con esto tenemos el caudal en $\frac{\text{m}^3}{\text{s}}$ ahora debemos usar la densidad aproximada 60°C es

$\rho = 983.2 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}$, y el diámetro interior del tubo $D=7.92\text{mm}$ que nos da 0.00792 m .

$$\dot{m} = \rho Q_v = 983.2 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} * 3.333 \times 10^{-5} \frac{\text{m}^3}{\text{s}} = 0.0328 \approx 0.033 \frac{\text{Kg}}{\text{s}}$$

Con esto ya podemos calcular la velocidad media equivalente y el número de Reynolds intensidad de turbulencia.

$$A = \frac{\pi D^2}{4} = \frac{\pi * (0.00792)^2}{4} = 4.927 \times 10^{-2} \text{m}^2$$

$$V = \frac{Q_v}{A} = \frac{3.333 \times 10^{-5} \frac{\text{m}^3}{\text{s}}}{4.927 \times 10^{-2} \text{m}^2} = 0.677 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Para calcular el número de Reynolds e intensidad de turbulencia se realiza de la siguiente manera encontrando el número de Reynolds que nos da .

$$\text{Re} = \frac{\rho V D}{\mu} = \frac{983.2 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} * 0.677 \frac{\text{m}}{\text{s}} * 0.00792 \text{ m}}{4.66 \times 10^{-4}} \approx 1.13 \times 10^4 = 11300$$

$$I \approx 0.16 \text{Re}^{-\frac{1}{8}} \approx 0.16 (1.13 \times 10^4)^{-\frac{1}{8}} \approx 5\%$$

Estos datos nos informan que tenemos un fluido en turbulento como se clasifica que por encima $\text{Re} > 4000$ se encuentra en régimen turbulento ya que su valor es 11300, y se clasifica la intensidad de turbulencia I en el cual se estima a partir del número del Reynolds con el 5%.

4.4 Desarrollo numerico para determinar la distancia de la frontera termica

Para determinar la distancia adecuada entre el serpentín geotérmico y la frontera exterior del dominio de suelo, se emplean las propiedades térmicas definidas para el terreno y el tiempo físico total de simulación.

En la **tabla 9** se denota las propiedades del terreno como la conductividad térmica, densidad del suelo , calor específico del suelo , tiempo total de simulación y diámetro exterior aproximado del serpentín, el cálculo se desarrolla usando una aproximación de conducción térmica transitoria en un medio semiinfinito. Como criterio de diseño se considera que la frontera exterior puede tratarse como practicamente no perturbada cuando la variación térmica que alcanza dicha frontera igual o inferior al 1% de la perturbación generada por el serpentín.

La difusión térmica se expresa en unidades de metro cuadrado sobre segundo por lo que el tiempo de simulación se convierte de horas a segundos y dan 360000 segundos y hay si se puede utilizar la ecuación (9).

$$\alpha = \frac{1.39}{(1900)(901)}$$

Entonces,

$$\alpha = 8.12 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$$

La longitud características de difusión permite estimar la escala espacial en la cual se propaga el calor durante el tiempo de simulación . se calcula mediante la ecuación (10).

$$L_c = \sqrt{(8.12 \times 10^{-7})(360000)}$$

$$L_c = \sqrt{0.29232} \approx 0.541 \text{ m}$$

Este resultado indica que la escala característica de difusión térmica durante las 100 horas de simulación es aproximadamente 0.54 m. Sin embargo, esta longitud no debe utilizarse directamente como distancia de la frontera, ya que en esa zona todavía existe una perturbación térmica importante.

El criterio para considerar la frontera no perturbada, es para estimar la distancia en la cual la influencia del serpentín sea reducida. Se emplea la solución de conducción transitoria en un medio infinito que sería la ecuación (11) y (12) quedando de la siguiente manera.

$$\frac{T(x, t) - T_i}{T_s - T_i} = 0.01 \quad \therefore 0.01 = \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{\alpha t}}\right)$$

Aplicando la función error complementaria inversa a ambos lados de la ecuación:

$$\operatorname{erfc}^{-1}(0.01) = \frac{x}{2\sqrt{\alpha t}}$$

Donde el valor correspondiente es:

$$\operatorname{erfc}^{-1}(0.01) \approx 1.821386$$

Por lo tanto:

$$\frac{x}{2\sqrt{\alpha t}} = 1.821386$$

$$x = 2(1.821386)\sqrt{\alpha t} \quad \therefore$$

$$\sqrt{\alpha t} \approx 0.54065 \text{ m}$$

Entonces la distancia que se desea para poder hacer bien la geometría sería:

$$x = 2(1.821386)(0.54065) \approx 1.97 \text{ m}$$

La distancia calculada corresponde aproximadamente a 1.97 m desde la superficie exterior del serpentín hasta la frontera térmica, bajo el criterio adoptado del 1 %.

5 Resultados.

5.1 Resultados del experimento

En el desarrollo del experimento se ve visualiza los diferentes puntos donde se tomaron las respectivas temperaturas que se muestran en la **figura 20 y 21** y **tabla 11** las cuales son las temperaturas que se lograron durante el experimento y desde ahí se llega a igual la simulación para llegar a la verificación del experimento.

Tabla 11

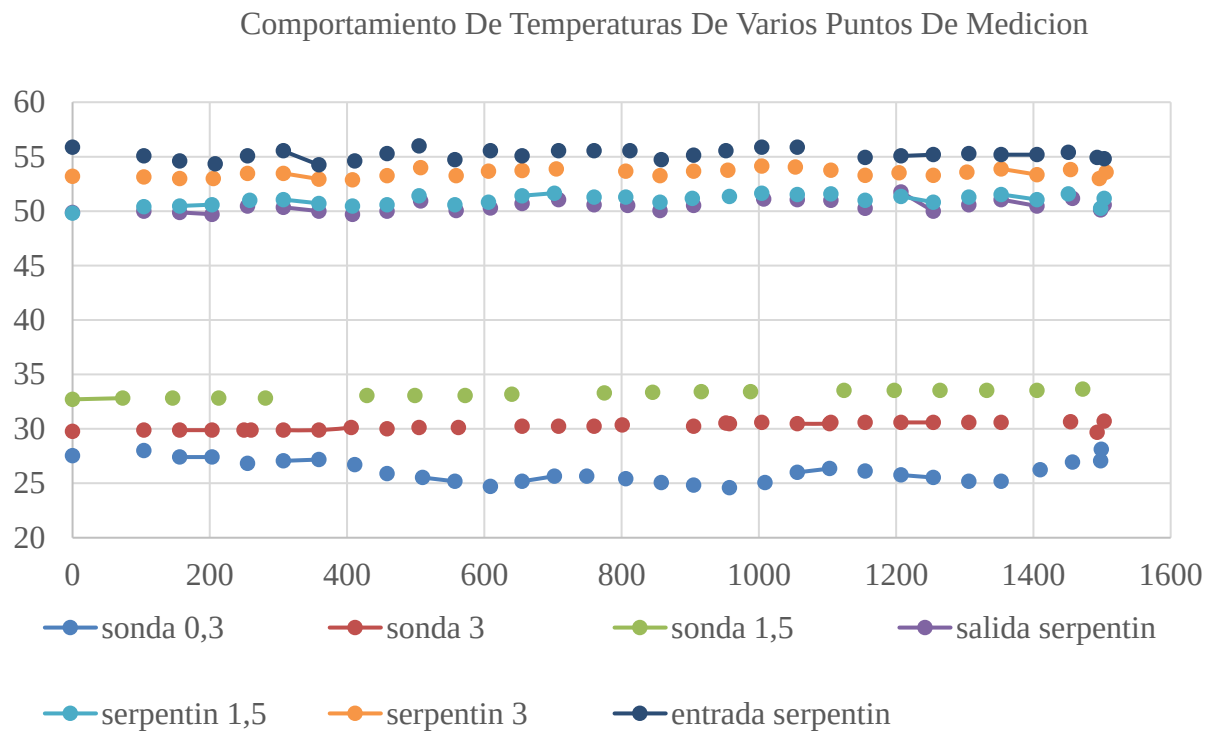
Resultados de los valores del experimento

Media de medición con variación de 2 litros por minuto								
Entrada del serpentín	Serpentín a 3m	Serpentín a 1,5m	Serpentín salida	Sonda a 3m	Sonda 1,5 m	Sonda a 0,3m	Variación l/m	Disipación de potencial, w
55,33	51,1	53,6	50,6	30,1	33,2	26	2	656
328.48	324.25	326.75	323.75	303.25	306.35	299.15		

Nota. Informacion de los resultados del experimento adaptado de Martins, (2015)

Figura 20

Comportamiento de Temperaturas de varios puntos durante la simulación



Nota. Datos de la temperatura durante el experimento hecho por Martins, (2015)

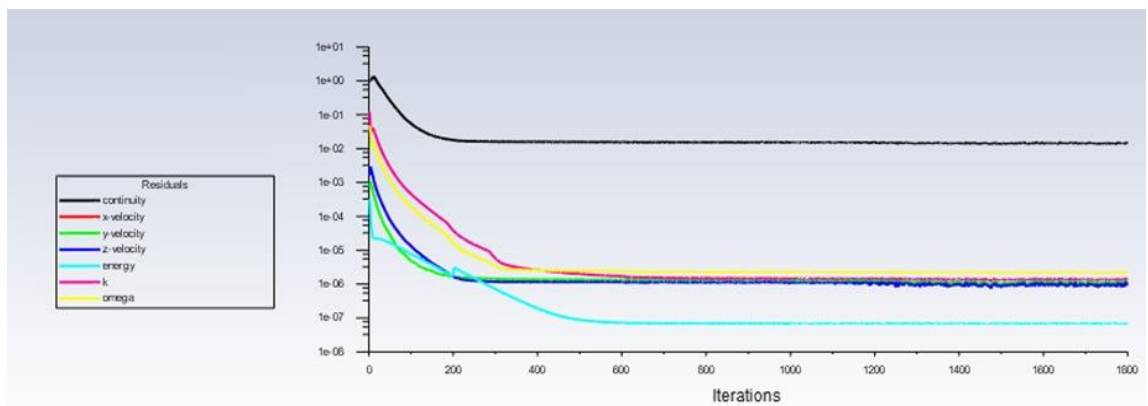
Ya con esto se puede llegar a comparar la simulación y verificar que tan aproximado esta la simulación con los datos del experimento, los datos que se va buscar durante la simulación son los que se presentaron anteriormente, es decir, la temperatura de entrada y salida del serpentín y las temperaturas en el serpentín y en las sondas que se encuentran a 40 centímetros del serpentín. Ya que este será la temperatura aproximada que se reportó durante su inyección experimental.

5.2 Validación del modelo.

En el desarrollo de la simulación se realizó con 1500 iteraciones con los parámetros que se mostraron en las **tablas 8,9 y 10**, llegando a la temperatura de contorno a 40 cm y comparando con la información que se brindó en la literatura y se realiza el análisis respectivo para la comparación de los datos arrojados por Ansys Fluent con respecto, para esto se muestra en la **figura 21** en la cual trata de los residuales de la simulación, los cuales muestran que las ecuaciones están siendo resueltas de forma consistente. Aunque esto no valida la exactitud del experimento, sino que las ecuaciones están siendo desarrolladas dentro de un parámetro real para las ecuaciones que se utilizaron y explicaron anteriormente,

Figura 21.

Residuales de la simulación 1-1800.



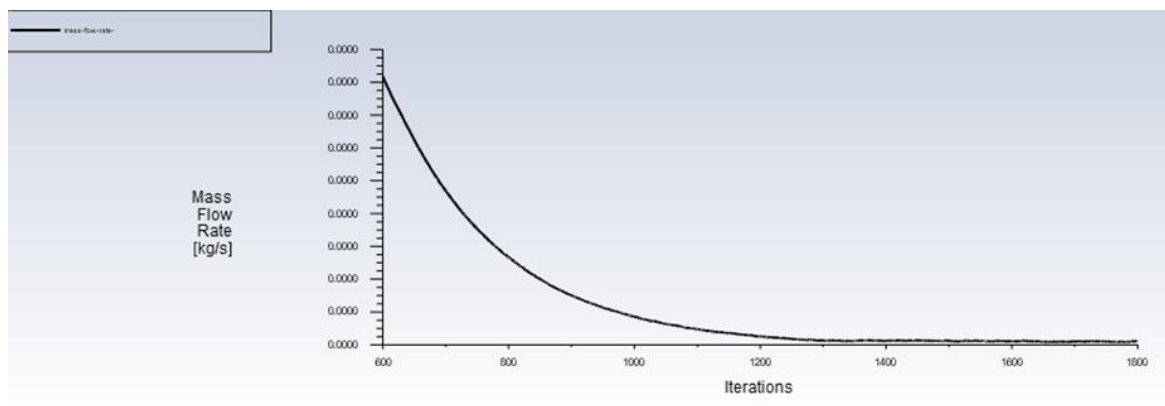
Nota. Residuales de la simulación donde los datos convergen en Ansys Fluent 2022 R2

En este paso se realiza para poder comprobar si la simulación estuvo correcta es por medio del balance de masa, el cual nos confluencia si mantiene la masa de entrada como la de salida del fluido es decir en el (Inflow y Outflow), lo cual nos muestra un balance de masa que nos da en la

figura 22 y tabla 12, en la cual nos muestra en las dos siguientes los resultados donde se ve el principio de conservación de la masa, es decir la masa que entra es igual a la masa que sale donde el delta de la masa nos está dando en 1.043081e-7 es decir que es muy pequeño el diferencia de masa entre una iteración a la otra es decir que se va igualando hasta llegar a un valor mínimo pero los se acercan a 0.

Figura 22

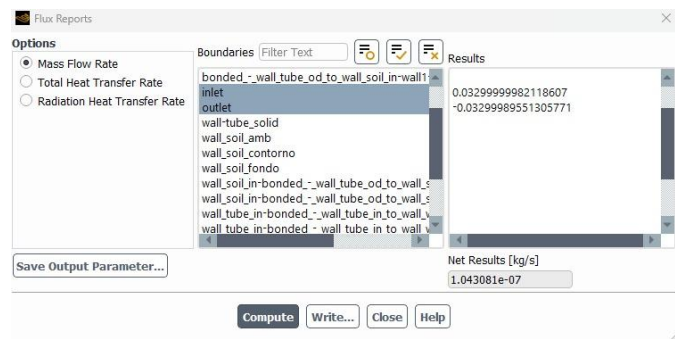
Diagrama de balance de masa durante la simulación 1800



Nota. Informacion del balance de masa tomado de Ansys Fluent 2022 R2

Tabla 12

Balance de masa a 1800 iteración



Nota. Tabla del balance de masa tomada de Ansys Fluent 2022 R2

En lo anterior se muestra las condiciones en las cuales se configuro la simulación asumiendo los valores con que se configuro corresponde a que la simulación se está convergiendo hasta la iteración 1500, y los datos que salen a la final son los siguientes.

Tabla 13

Resultados de los valores de la simulación

Media de medición con variación de 2 litros por minuto								
Entrada								
Iteraciones	del serpentín	Serpentín a 3m	Serpentín a 1,5m	Serpentín salida	Contorno a 3m	Contorno 1,5 m	Contorno 0,3m	Variación l/m
50	55.33	26	30	26	23	24	26	2
500	55.33	23	42	42	24	27	26	
1000	55.33	40	50	52	25	29	26	
1500	55.33	52	53	53	27	31	26	
1800	55.33	51	53	53	30	33	26	

Nota. Informacion de las temperaturas registradas en cada una de las iteraciones en Ansys Fluent

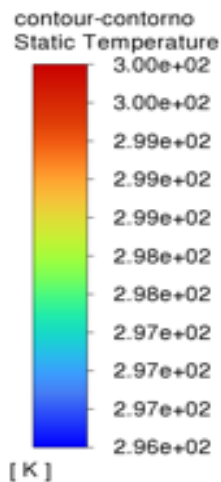
Esto muestra que las se hizo una configuración de la simulación a lo más rígido a de la realidad asumiendo condiciones de radiación y poniendo las condiciones que el Martins, (2015) en su experimento nos dejó especificada, lo que se asumió fueron la temperatura del ambiente de

26°C (299.15K) y los valores de la radiación y se asumió una geometría más compacta para que el fluido entregara más energía al sistema.

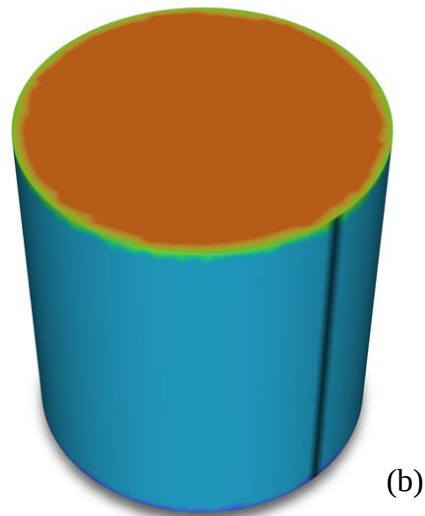
En las siguientes **figuras** expone los resultados durante la simulación en cada una de sus iteraciones que se fueron reportadas durante el tiempo por lo cual se toma los datos de ANSYS y se registra en la **tabla** y sus **figuras** del intercambio de calor durante todo el proceso de la simulación, se anexa cada una de las imágenes durante el proceso desde 20 iteraciones hasta las 1800 iteraciones respectivamente con un periodo total de simulación de 200 horas de simulación.

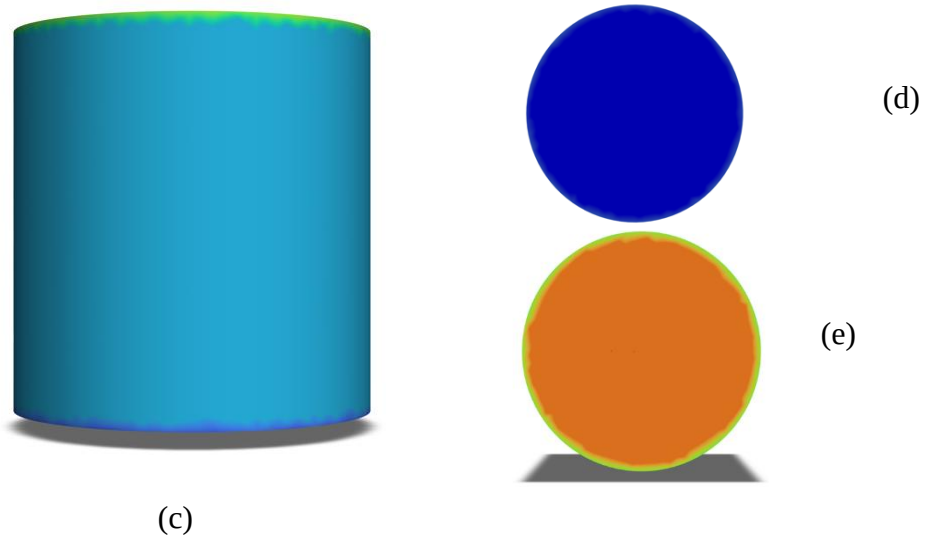
Figura 23

Temperaturas del contorno a las 50 iteraciones



(a)

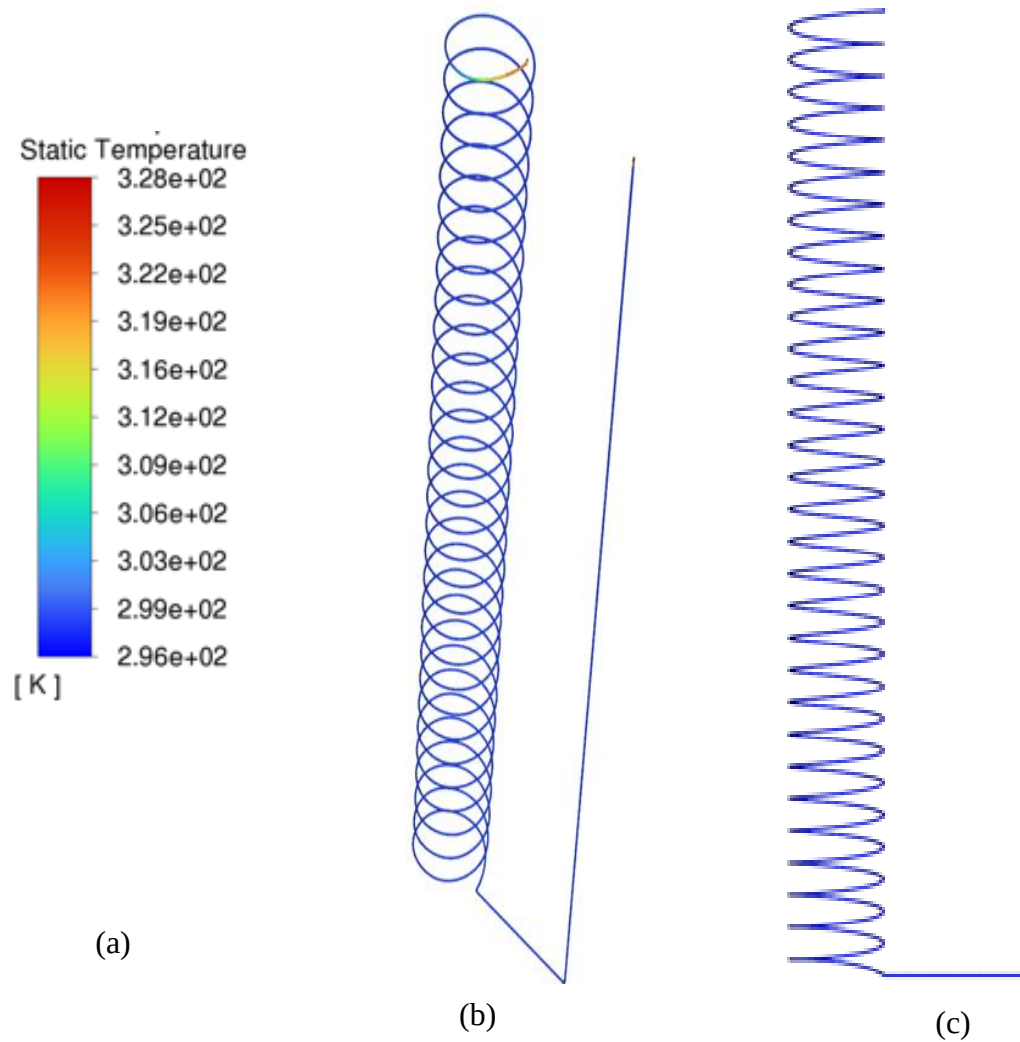




Nota. Adaptado de ANSYS Fluent, (a) escala de temperaturas (b) isométrica del contorno, (c) lateral del contorno (d) visión del fondo del contorno (e) visión superior del contorno.

Figura 24

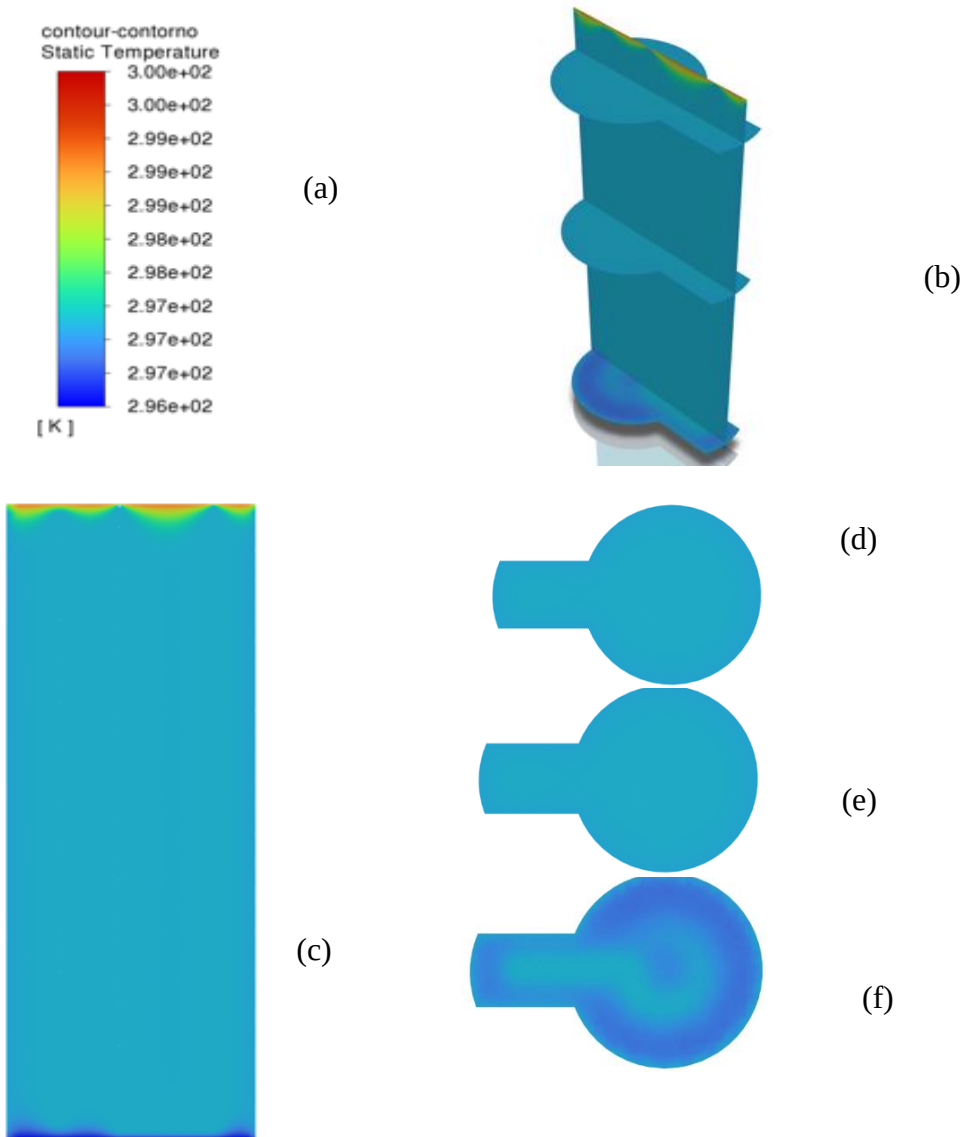
Temperaturas del serpentín a las 50 iteraciones



Nota. Adaptado de ANSYS Fluent, (a) escala de temperaturas (b) isométrica del serpentín, (c) lateral del serpentín.

Figura 25

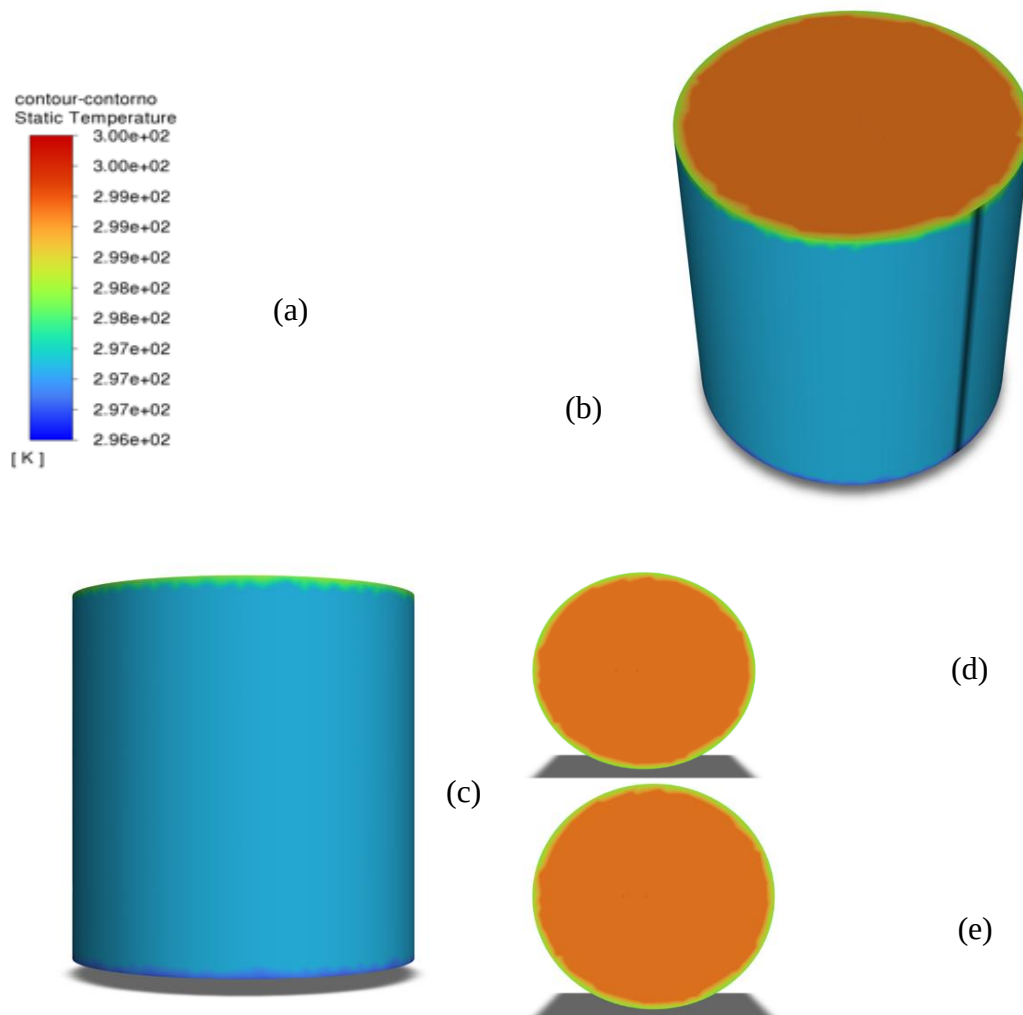
Temperaturas de los planos a las 50 iteraciones



Nota. Adaptado de ANSYS Fluent, (a) escala de temperaturas (b) isométrica de los planos (c) planos lateral (d) plano a 0.3m (e) plano a 1.5m. (f) plano a 3m

Figura 26

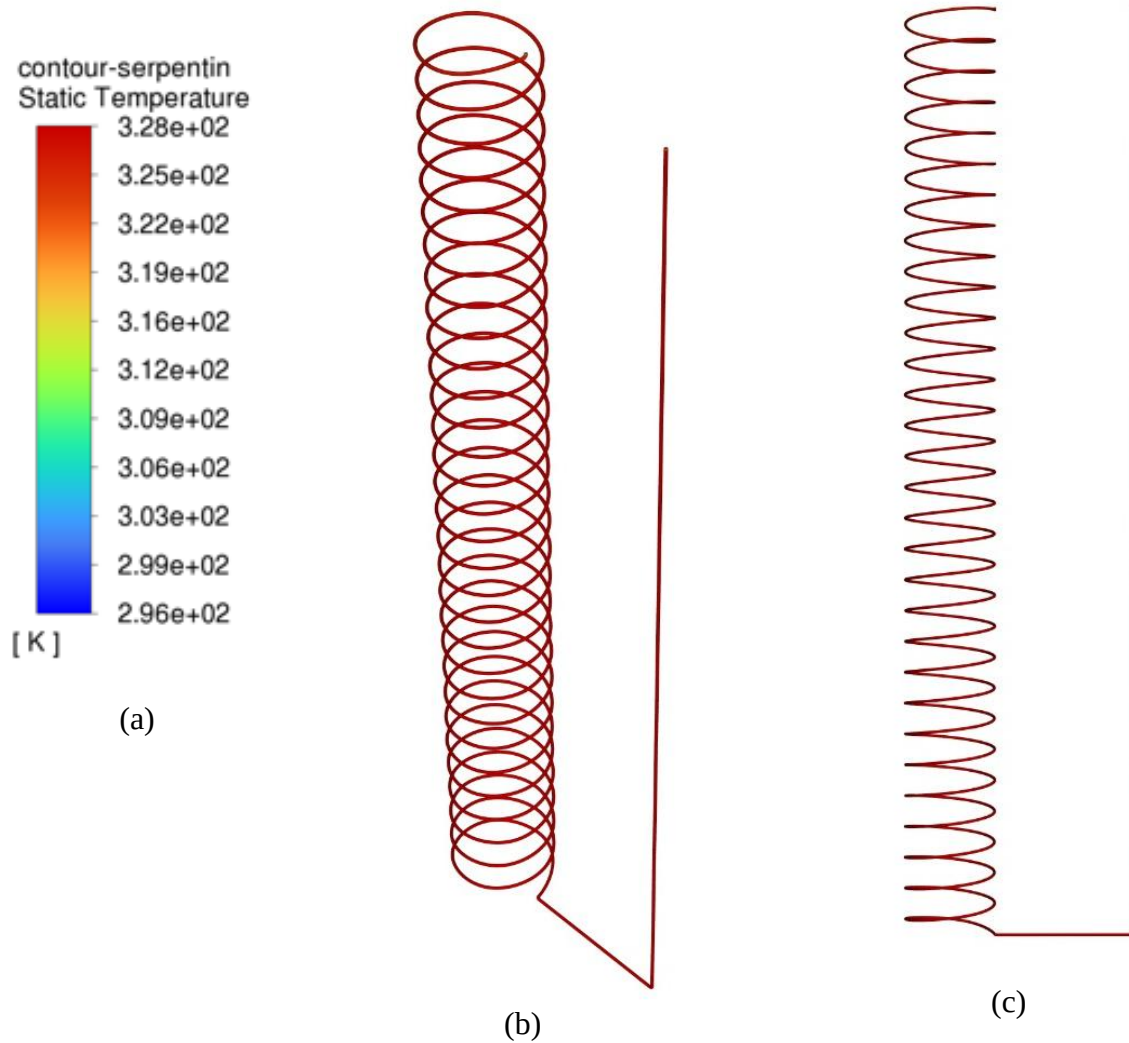
Temperaturas del contorno a las 500 iteraciones



Nota. Adaptado de ANSYS Fluent, (a) escala de temperaturas (b) isométrica del contorno, (c) lateral del contorno (d) visión del fondo del contorno (e) visión superior del contorno.

Figura 27

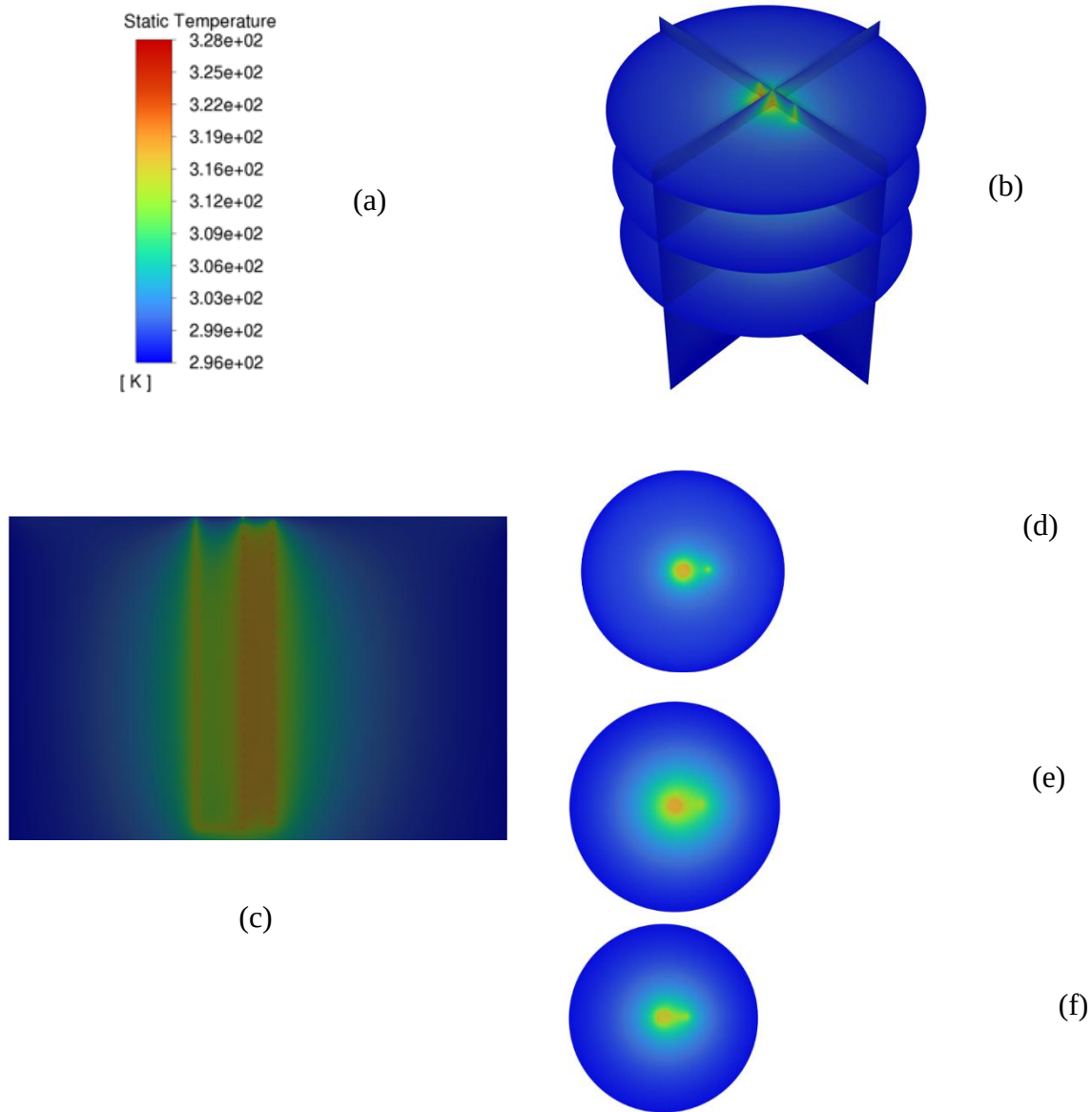
Temperaturas del serpentín a las 500 iteraciones



Nota. Adaptado de ANSYS Fluent, (a) escala de temperaturas (b) isométrica del serpentín, (c) lateral del serpentín.

Figura 28

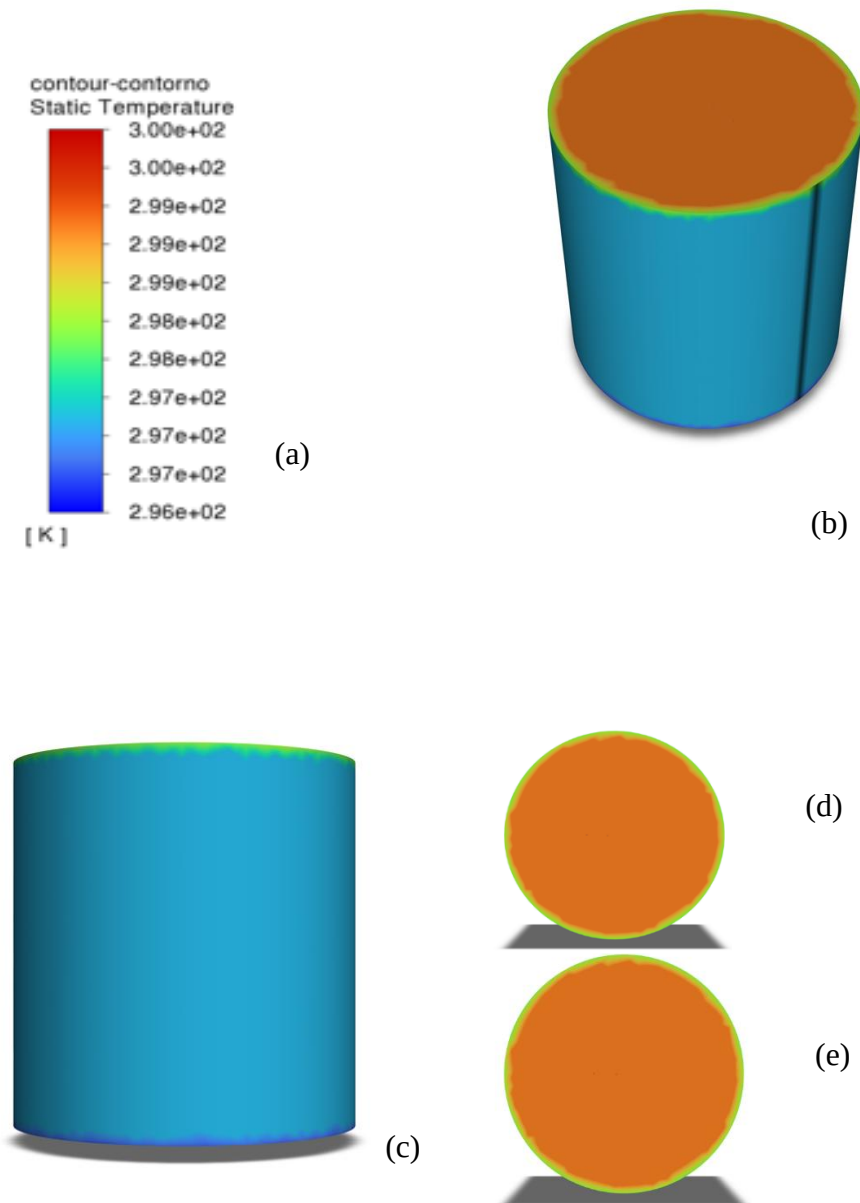
Temperaturas de los planos a las 500 iteraciones



Nota. Adaptado de ANSYS Fluent, (a) escala de temperaturas (b) isométrica de los planos (c) planos lateral (d) plano a 0.3m (e) plano a 1.5m. (f) plano a 3m

Figura 29

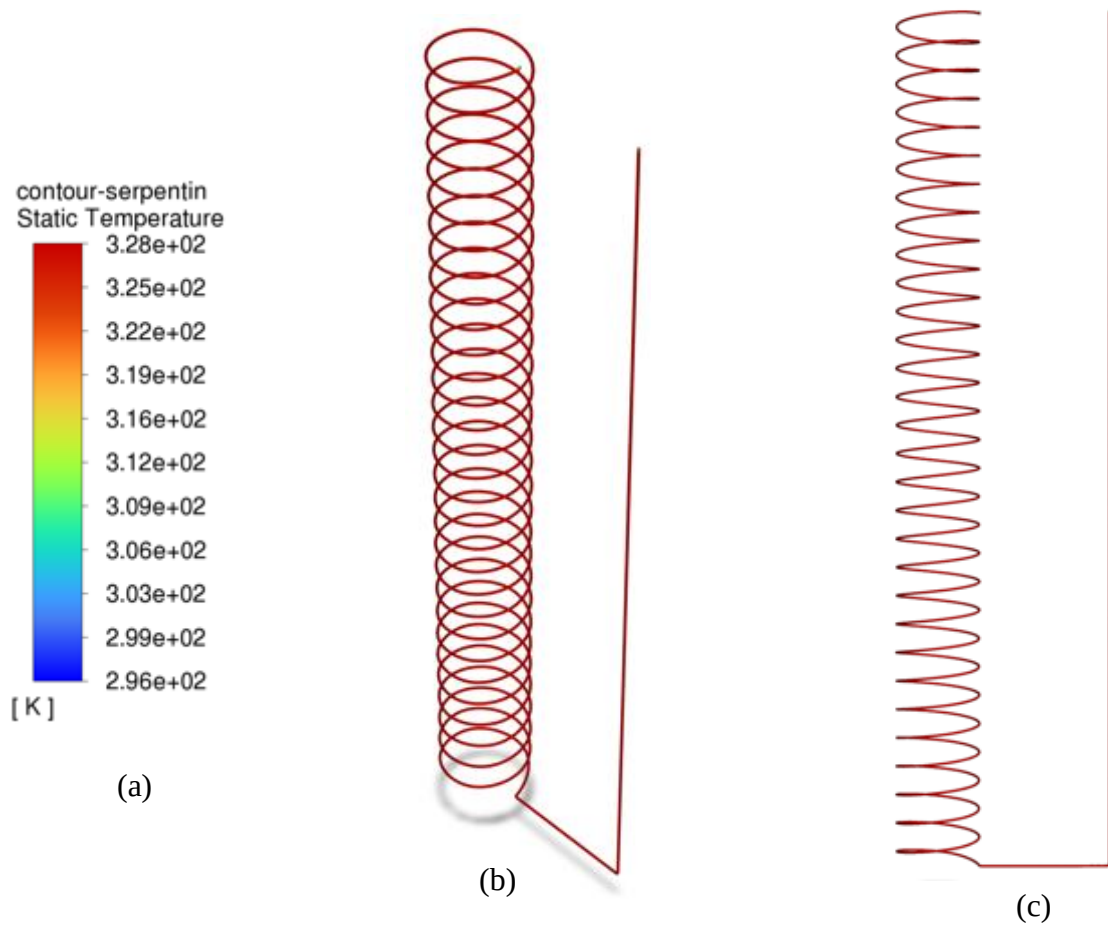
Temperaturas del contorno a las 1000 iteraciones



Nota. Adaptado de ANSYS Fluent, (a) escala de temperaturas (b) isométrica del contorno, (c) lateral del contorno (d) visión del fondo del contorno (e) visión superior del contorno.

Figura 30

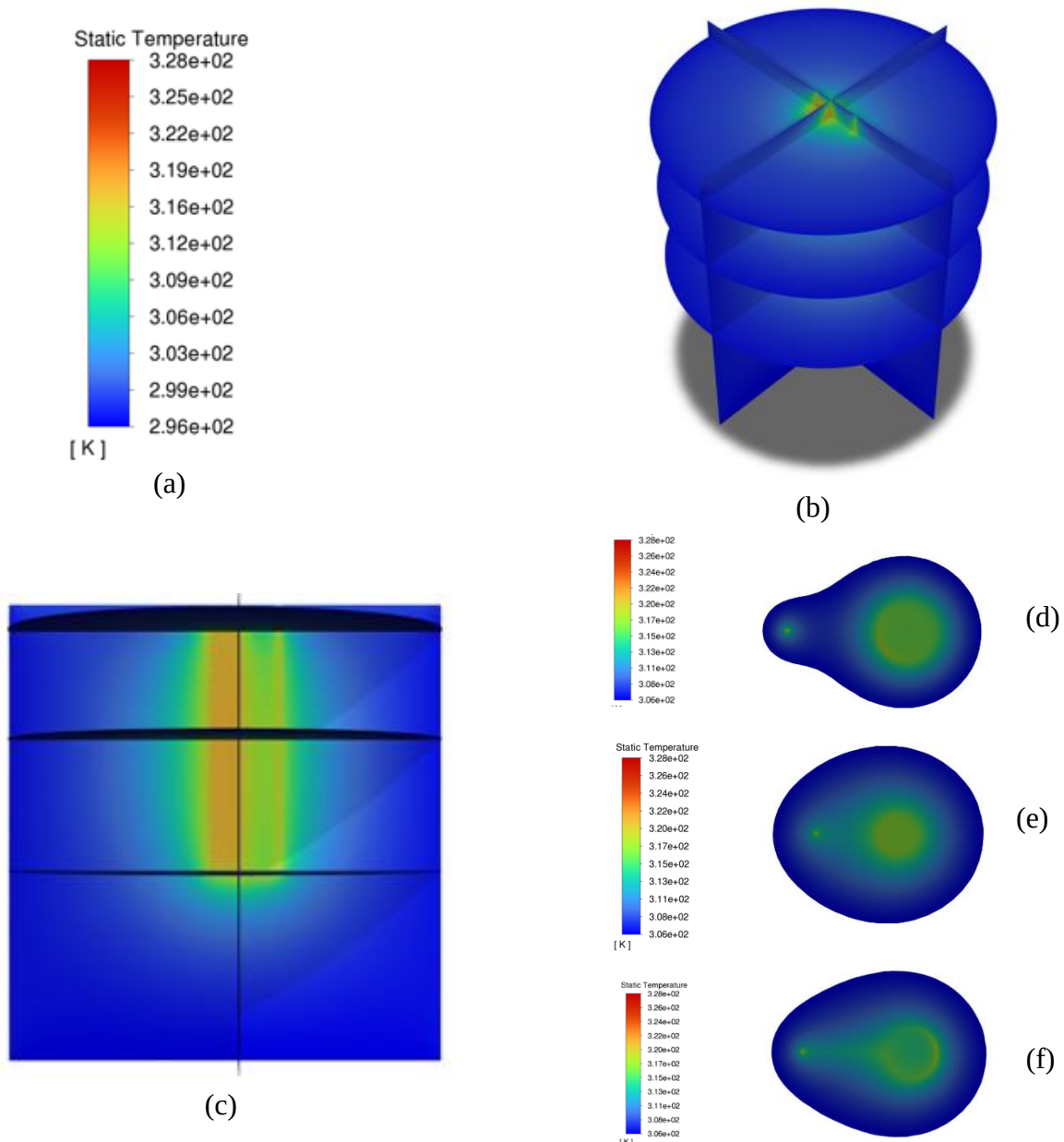
Temperaturas del serpentín a las 1000 iteraciones



Nota. Adaptado de ANSYS Fluent, (a) escala de temperaturas (b) isométrica del serpentín, (c) lateral del serpentín.

Figura 31

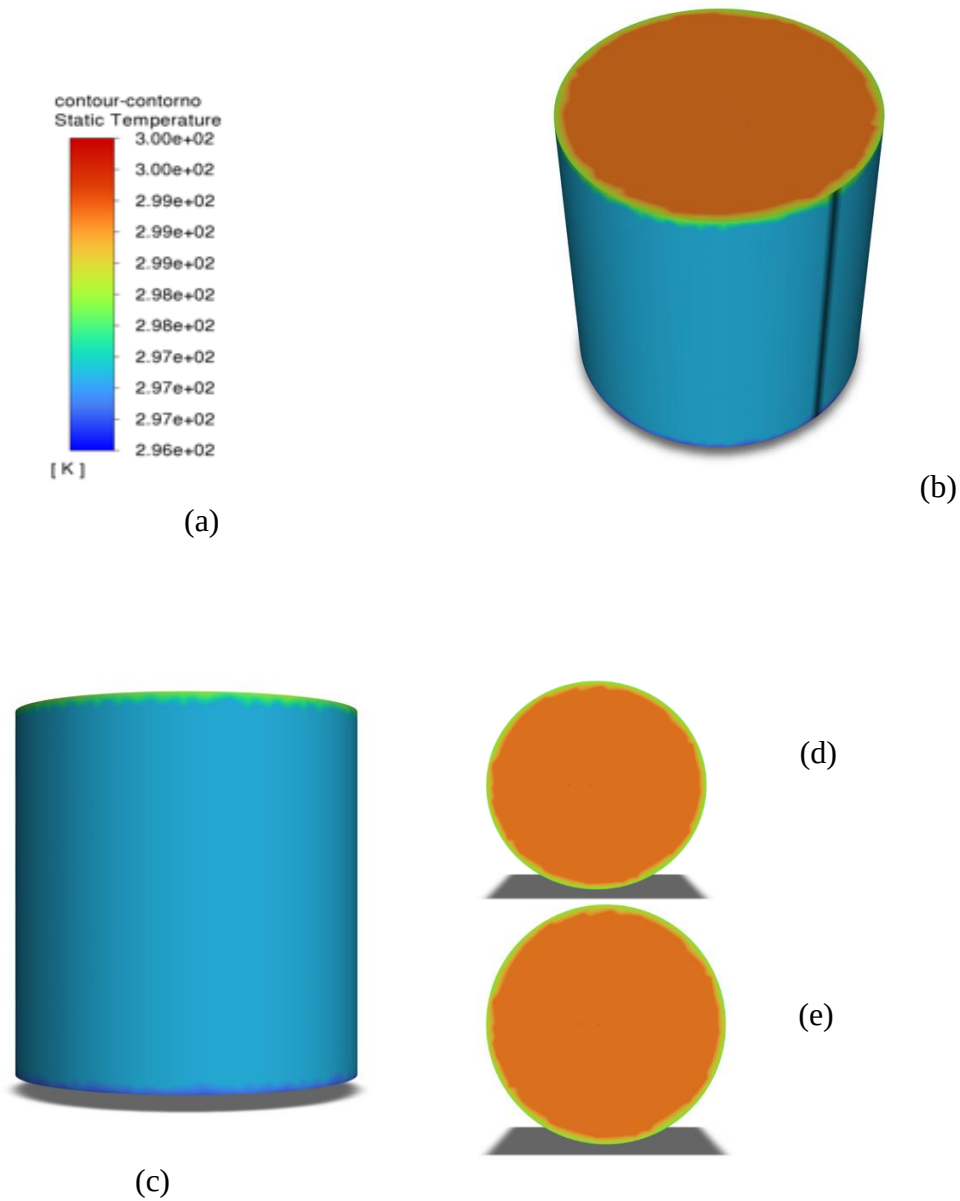
Temperaturas de los planos a las 1000 iteraciones



Nota. Adaptado de ANSYS Fluent, (a) escala de temperaturas (b) isométrica de los planos (c) planos lateral (d) plano a 0.3m (e) plano a 1.5m. (f) plano a 3m

Figura 32

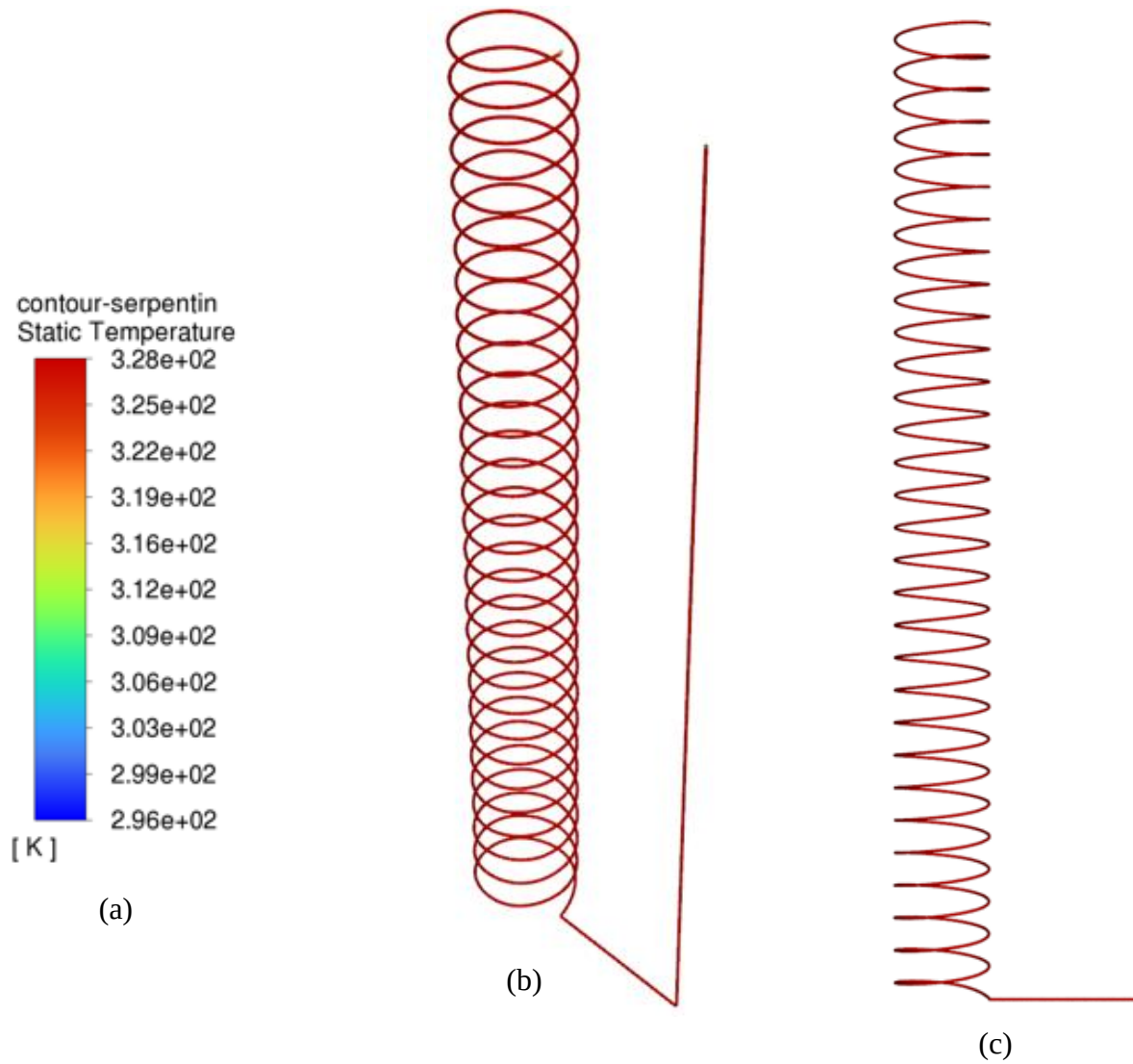
Temperaturas del contorno a las 1500 iteraciones



Nota. Adaptado de ANSYS Fluent, (a) escala de temperaturas (b) isométrica del contorno, (c) lateral del contorno (d) visión del fondo del contorno (e) visión superior del contorno.

Figura 33

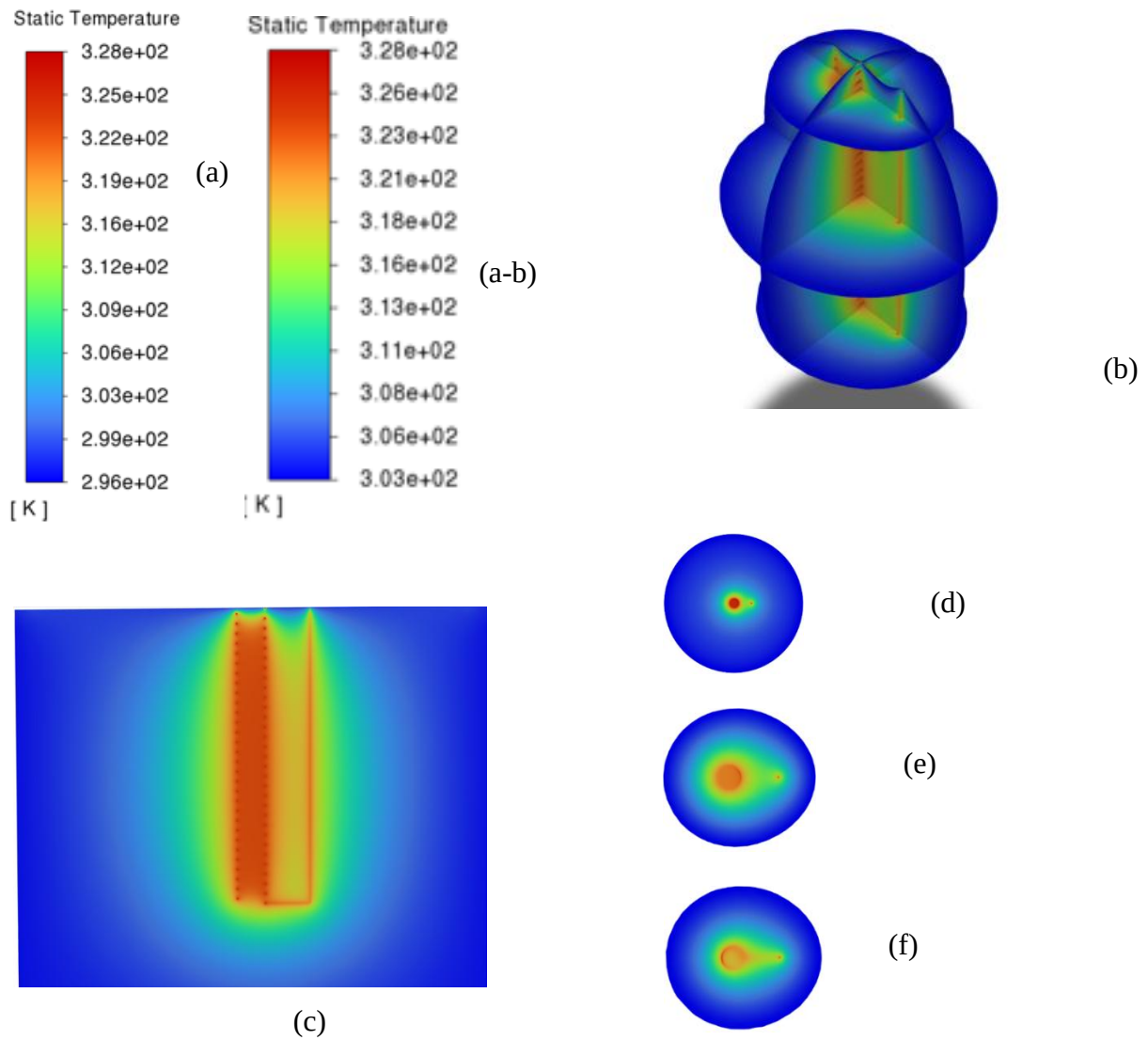
Temperaturas del serpentín a las 1500 iteraciones



Nota. Adaptado de ANSYS Fluent, (a) escala de temperaturas (b) isométrica del serpentín, (c) lateral del serpentín.

Figura 34

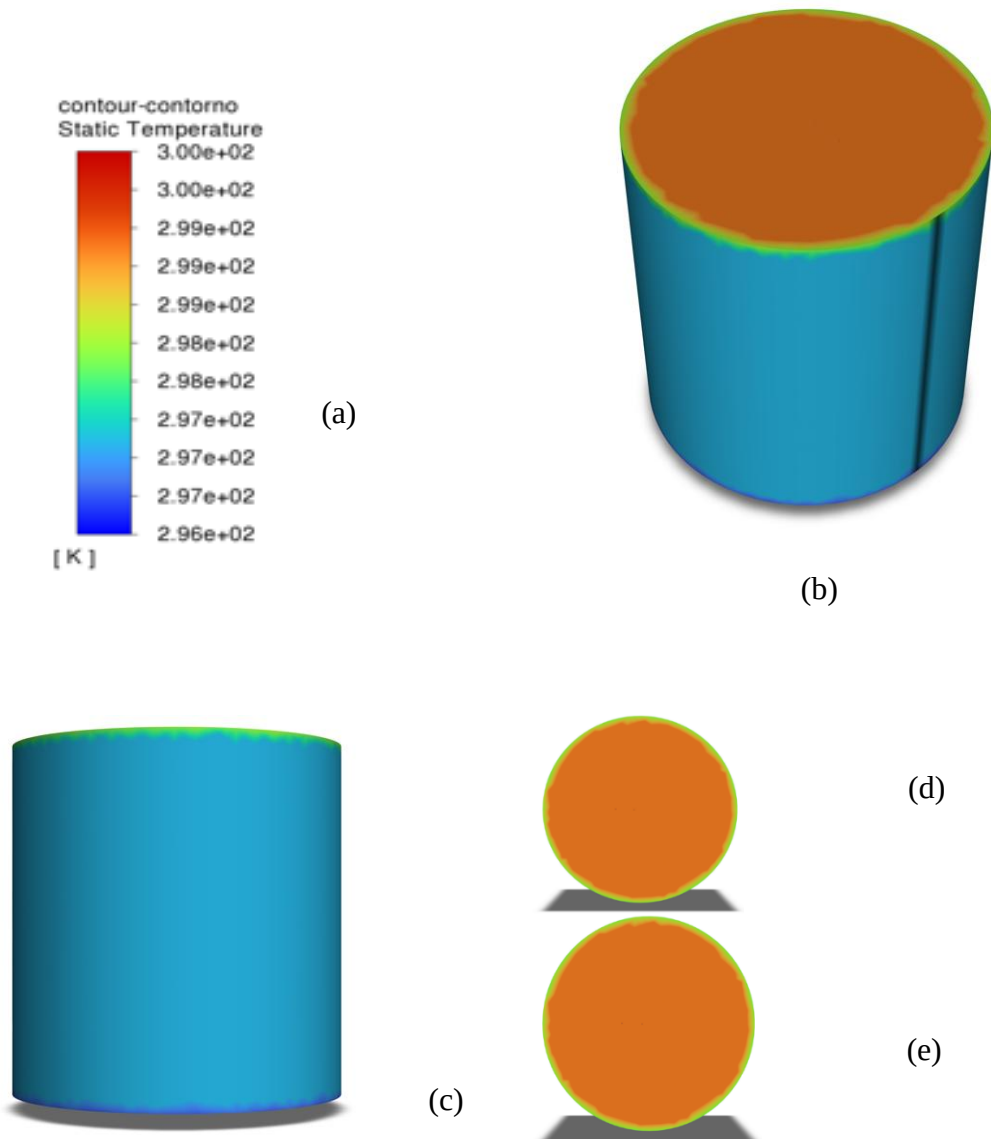
Temperaturas de los planos a las 1500 iteraciones



Nota. Adaptado de ANSYS Fluent, (a) escala de temperaturas (b) isométrica de los planos (c) planos lateral (d) plano a 0.3m (e) plano a 1.5m. (f) plano a 3m

Figura 35

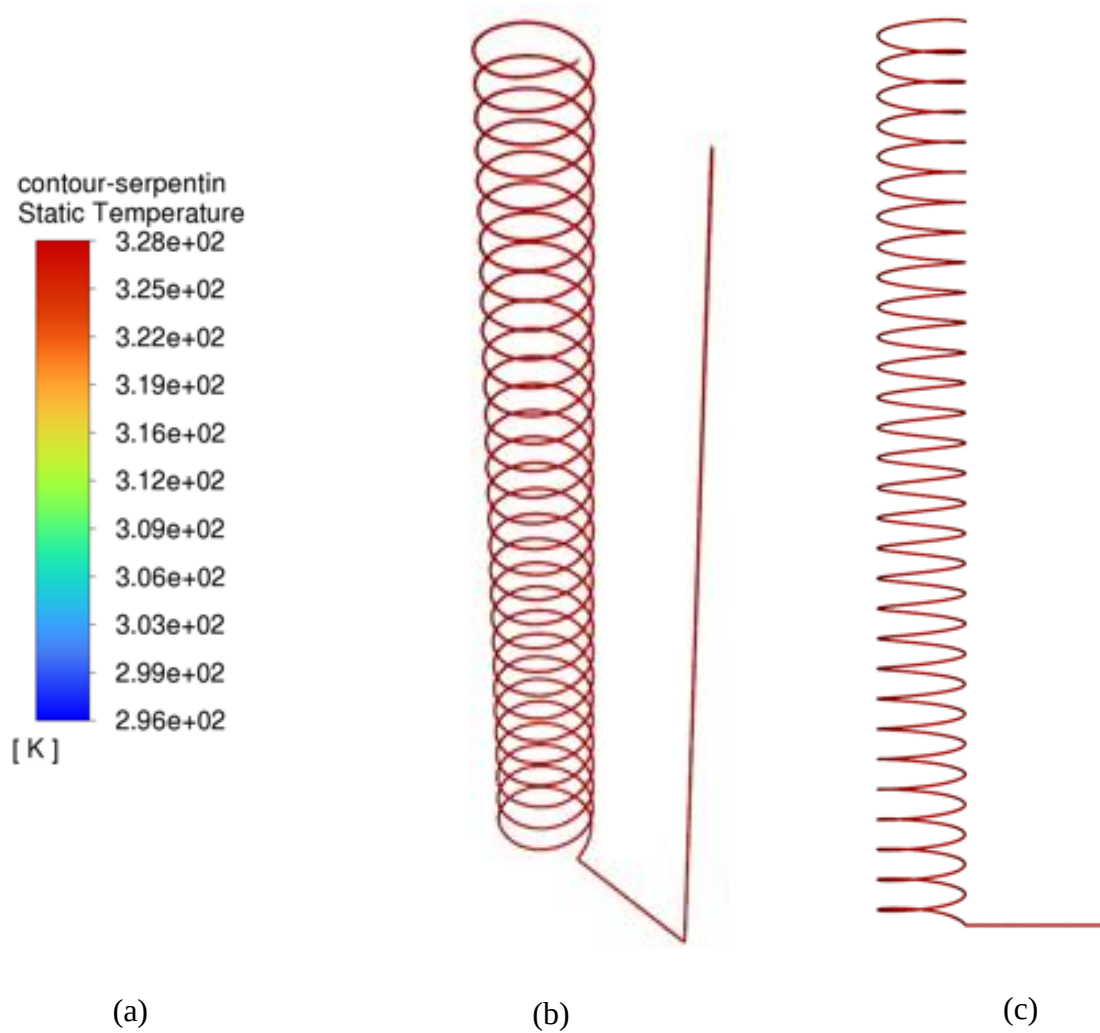
Temperaturas del contorno a las 1800 iteraciones



Nota. Adaptado de ANSYS Fluent, (a) escala de temperaturas (b) isométrica del contorno, (c) lateral del contorno (d) visión del fondo del contorno (e) visión superior del contorno.

Figura 36

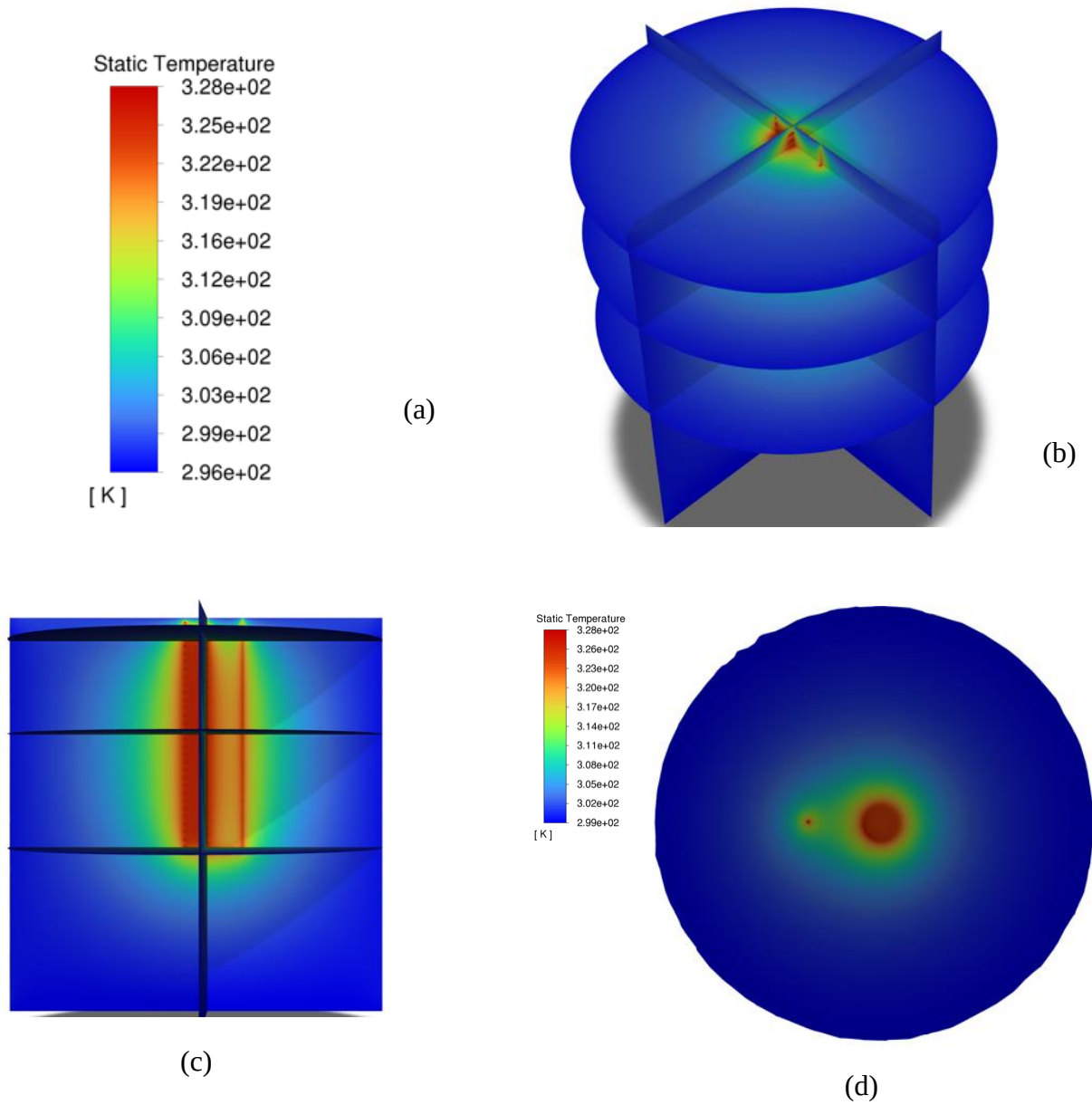
Temperaturas del serpentín a las 1800 iteraciones

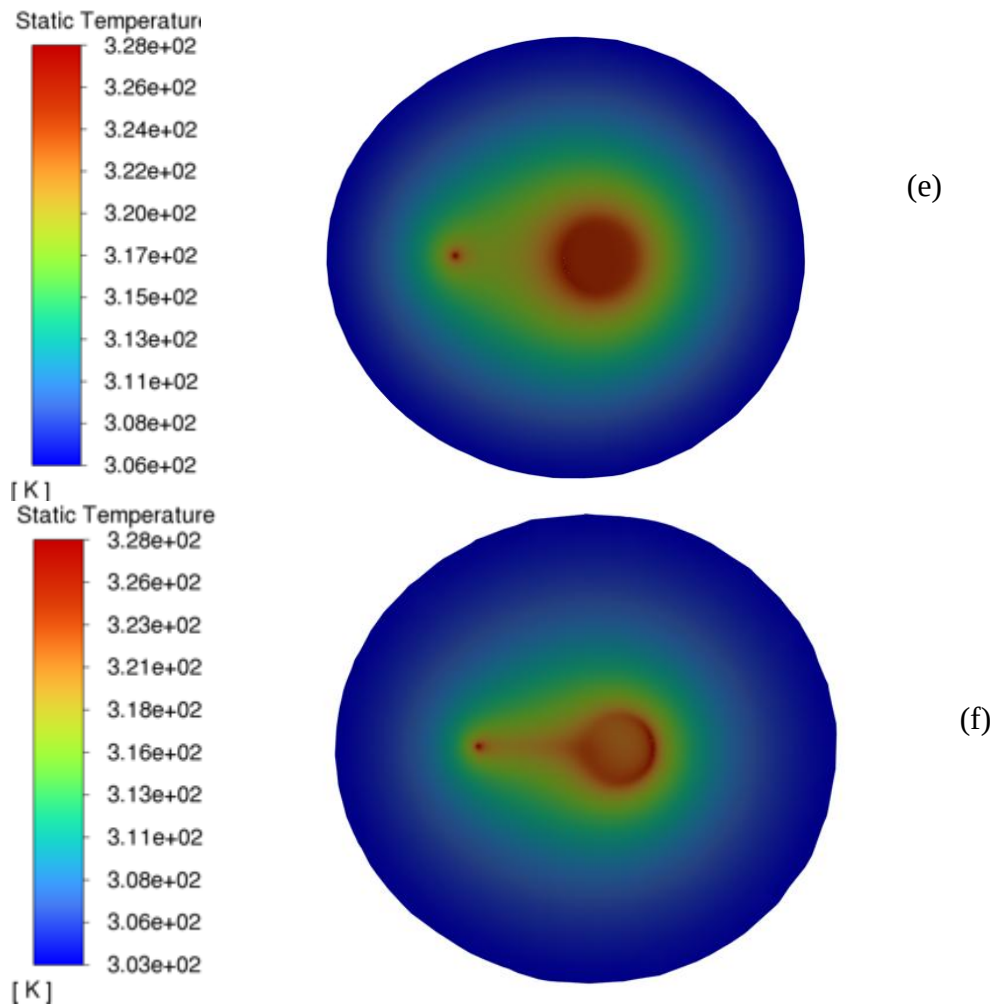


Nota. Adaptado de ANSYS Fluent, (a) escala de temperaturas (b) isométrica del serpentín, (c) lateral del serpentín.

Figura 37

Temperaturas de los planos a las 1800 iteraciones





Nota. Adaptado de ANSYS Fluent, (a) escala de temperaturas (b) isométrica de los planos
(c) planos lateral (d) plano a 0.3m (e) plano a 1.5m. (f) plano a 3m

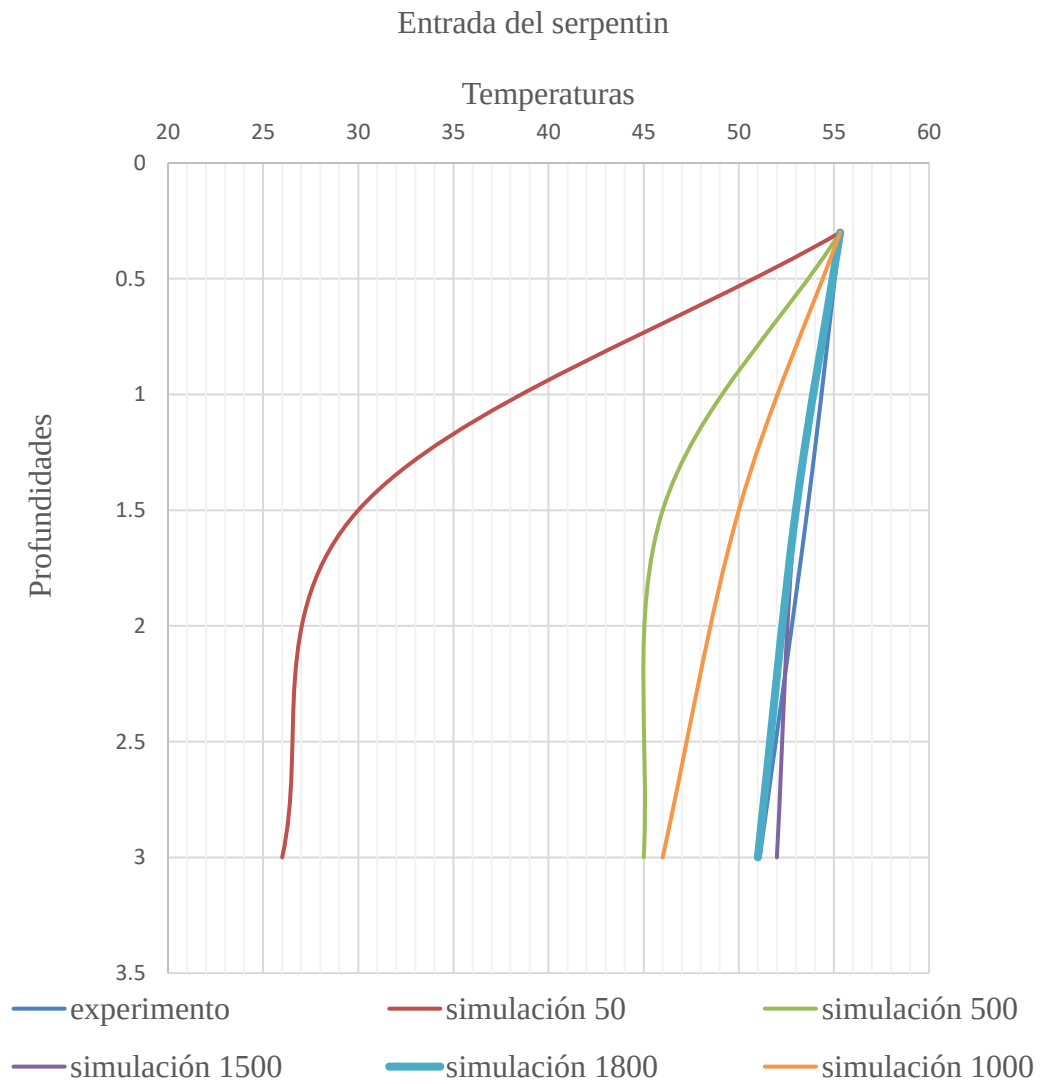
5.3 Comparación de los resultados de la simulación vs el experimento

En el análisis de los resultados se mostrará los perfiles de temperatura de 3 puntos importantes que han tenido resultados durante el experimento y de ahí se buscara comparar dichos resultados con los obtenidos durante la simulación para poder determinar si se llega al objetivo de llegar a la temperatura deseada en el contorno y en el contorno de la tubería, según lo registrado por ANSYS durante su simulación de transferencia de calor.

En dicho caso se presenta la comparación que se realizaron durante la simulación y el experimento y que se mostró anteriormente en las siguientes **figuras** los cuales se reportan en las **tablas 11 y 12** se generan las siguientes graficas donde se evidencia el perfil térmico que debe de tiene las iteraciones en la simulación con respecto al experimento

Figura 38.

Comparación de perfiles térmicos profundidad vs temperatura en la entrada del serpentín hasta la profundidad de 3 metros

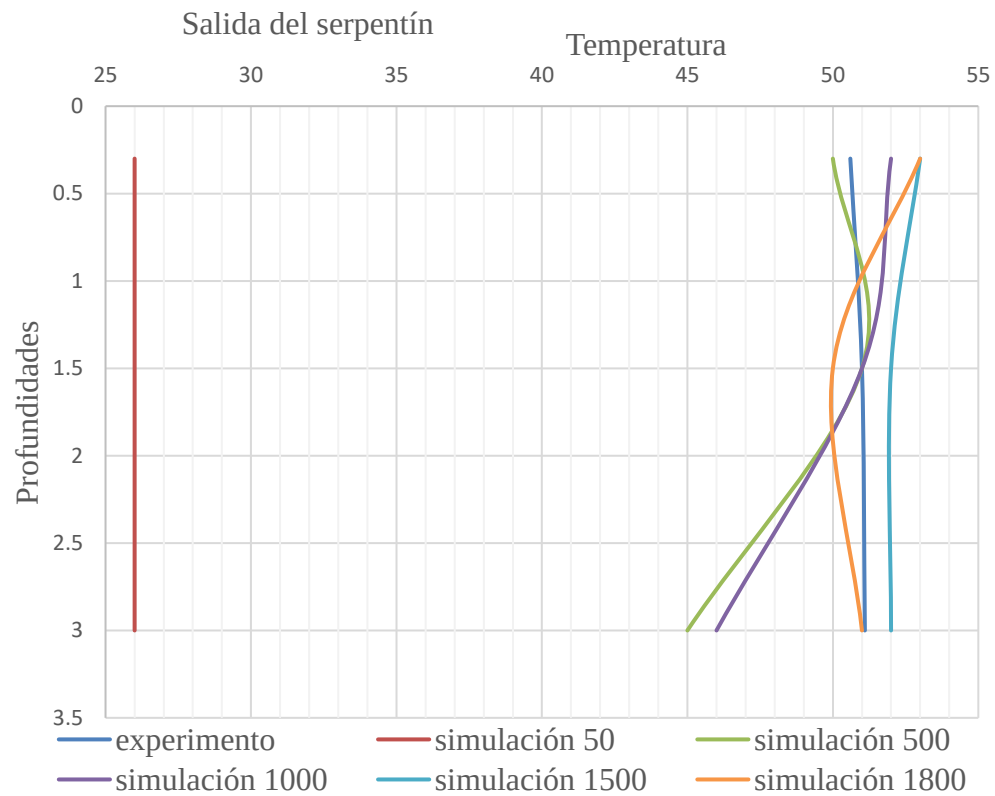


Nota. imagen de los datos experimentales y la simulación de Martins, (2015) y Ansys

Fluent

Figura 39.

Comparación de perfiles térmicos de experimento vs temperatura en la salida del serpentín

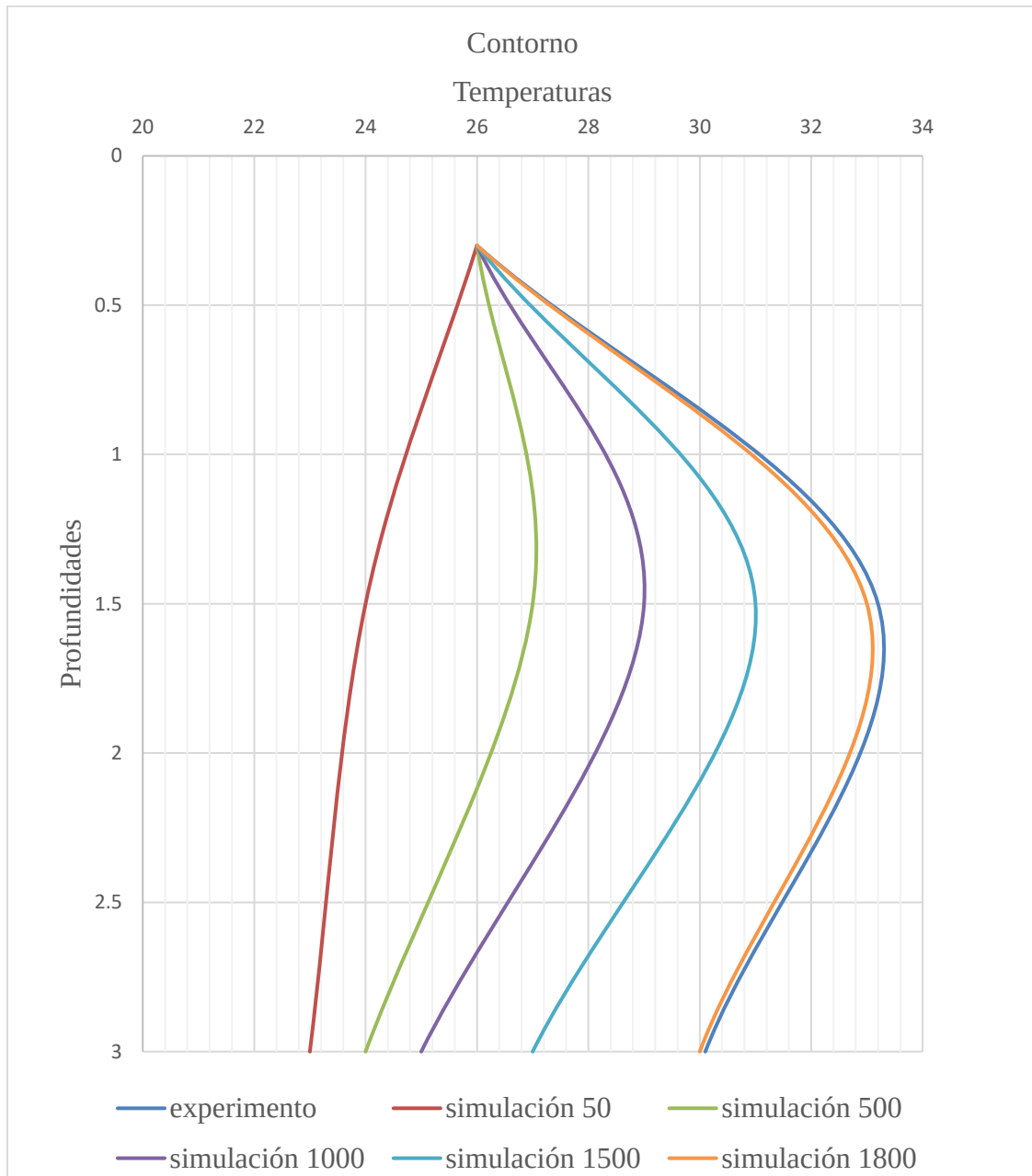


Nota. comparación de la temperaturas de Martins, (2015) y Ansys Fluent durante el simulacion

En las **figuras 38-39** se nota como el perfil térmico se va aproximando a los valores que se ven en el experimento, aunque las iteraciones no tienen que ver con el tiempo con las cuales se hizo el experimento sino con el valor donde las ecuaciones que estan siendo aplicadas en la simulación estan desarrolladas en la simulación generando el cambio de perfil térmico durante las iteraciones

Figura 40.

Comparación de perfiles térmicos profundada vs temperatura en el contorno



Nota. comparación de la temperaturas de Martins, (2015) y Ansys Fluent durante el simulacion

Ya en la **figura 40** es donde comparamos la temperatura del contorno a las temperaturas que se registraron las sondas a 0.3-1.5 y 3 metros respectivamente en el experimento con las temperaturas que se evidencio en la simulación durante el tiempo esto denota que el experimento debe realizarse

5.4 Análisis de los resultados

Hasta las 1800 iteraciones ya se visualiza que toda en la primera parte del contacto del agua con la tubería se empezaba a transmitir el calor por lo cual se realiza unas **tablas** para poder demostrar la diferencia que se encuentra de temperatura y el porcentaje de error que presentan las temperaturas de la simulación con respecto al experimento

Tabla 14.

Comparación de resultados en la entrada del serpentín.

Entrada	Experi	simulación	simulación	simulación	simulación	Simulación
(m)	mento	50	500	1000	1500	1800
entrada	55.33	55,33	55,33	55,33	55,33	55,33
1.5 m	53.6	30	46	50	53	53
3 m	51.1	26	45	46	52	51
ΔT 1.5 m		23.6	7.6	3.6	0.6	0.6
ΔT 3 m		25.1	6.1	5.1	0.6	0.1

%error	44.03%	14.18%	6.72%	1.12%	1.12%
1.5m					
%error	49.12%	11.94%	9.98%	1.76%	0.2%
3 m					

Tabla 15.

Comparación de resultados en la tubería a la salida

Salida	Experi	Simulació	Simulació	Simulació	Simulació	Simulacion
(m)	mento	n 50	n 500	n 1000	n 1500	1800
Salida	50.6	26	50	52	53	53
1.5	51	26	51	51	52	50
3	51.1	26	45	46	52	51
Delta		24.6	0.6	1.4	2.4	2.4
salida						
Delta 1.5		25	0	0	1	1
metros						
Delta 3		25.1	6.1	5.1	0.9	0.1
metros						
Error		48.62%	1.9%	2.77%	4.74%	4.74%
salida						

Error	49.02%	0%	0%	1.96%	1.96%
1.5					
metros					
Error 3	49.12%	11.94%	9.89%	1.76%	0.2%
metros					

Se omite los primeros datos en la **tabla 13** debido a que son los datos de entrada de la simulación y del experimento son los mismo ya que fueron configurados de esa manera para que empezara con una variable , ahora mientras los demás fueron tomados de las imágenes y los resultados que se ven en la **tabla 13 y 14** donde nos muestra los porcentajes de error en la tubería que no sobrepasan el 2% de error en las temperaturas es decir se encuentra alrededor del 2°C de aproximación esto debido a que puede ser que la temperatura del entorno no estaría enfriando la tubería debido a lluvias o que la temperatura ambiente fue menor a los 27°C la cual se configuro y ayudo a bajar la transferencia de calor del agua a la tubería.

Tabla 16.

Comparación de resultados en el contorno del suelo.

contorno	Experi	simulación	simulación	simulación	simulación	Simulación
	mento	200	500	1000	1500	1800
salida	26	26	26	26	26	26
1.5	33.2	26	27	29	31	33

3	30.1	24	24	25	27	30
ΔT 1.5	7.2	6.2	4.2	2.2	0.2	
metros						
ΔT 3	6.1	6.1	6.1	6.1	6.1	
metros						
error 1.5 m	21.69%	18.67%	12.65%	6.63%	0.6%	
error 3m	20.27%	20.27%	16.94%	10.3%	0.33%	

Mientras en la **tabla 16** muestra los resultados de los resultados con respecto al contorno y aquí se muestra que aun la simulación llega los valores que en el experimento se registraron, porque a 3 metros conserva el valor del 0.33% de error el cual puede decir que la transferencia de energía ha llegado a punto de referencia que son los 40 cm y que los datos son tomados directamente de la sección de los planos y no del contorno que se encuentra a 24°C como siempre va a permanecer.

6. Conclusiones

El modelo CFD permitió representar el comportamiento térmico del intercambiador geotérmico, la simulación desarrollada en ansys fluent 2022 R2 reprodujo la transferencia de calor conjugada entre el agua, la tubería de cobre y el suelo. Además, el balance de masa obtenido, del orden de $1,04 \times 10^{-7}$, demuestra que el modelo cumplió adecuadamente el principio de conservación de la masa y presentó consistencia numérica en el flujo interno del serpentín. Las temperaturas calculadas en la tubería mostraron una aproximación aceptable frente al experimento, a las 1800 iteraciones, los errores obtenidos en el serpentín fueron aproximadamente del 1,12 % a 1,5 m y del 0,20 % a 3 m en el tramo de entrada. En el tramo de retorno se presentaron errores del 1,96 % a 1,5 m y del 0,20 % a 3 m. Estos resultados permiten afirmar que el modelo reproduce adecuadamente el perfil térmico dentro de la tubería, aunque en la salida se obtuvo una temperatura de 53 °C frente a los 50,6 °C experimentales, correspondiente a un error aproximado del 4,74 %. La propagación del calor hacia el suelo todavía no fue completamente reproducida por la simulación. En el contorno del terreno, los errores finales fueron aproximadamente del 0,6 % a 1,5 m y del 0,33 % a 3 m, lo cual indica que el campo térmico del suelo todavía alcanzó los valores experimentales. Por tanto, el modelo para dimensionar un sistema real de climatización, se amplió para que el intercambio térmico durante la simulación pudiera llegar al objetivo.

7. Recomendaciones

Se recomienda ampliar el modelo CFD desarrollado mediante la comparación de diferentes materiales para la construcción del serpentín, manteniendo constantes la geometría, el caudal y las condiciones térmicas utilizadas en este trabajo. Se podrían considerar materiales como **cobre, aluminio y PVC**, con el propósito de determinar la influencia de la conductividad térmica de la tubería sobre la temperatura de salida del fluido y la tasa de transferencia de calor hacia el suelo. Esta comparación permitiría establecer si la elevada conductividad térmica del cobre justifica su utilización frente a materiales de menor costo y conductividad. Martins señala que la conductividad del material influye sobre la resistencia térmica del intercambiador, aunque la resistencia térmica dominante del sistema puede encontrarse principalmente en el terreno.

El presente estudio reproduce un serpentín de aproximadamente **3 m de profundidad**; sin embargo, se recomienda desarrollar simulaciones para mayores profundidades y longitudes del intercambiador, con el objetivo de determinar su influencia sobre la cantidad de energía que puede ser transferida al terreno. Martins realizó un análisis teórico de la potencia térmica en función de la profundidad y encontró que, al aumentar la profundidad, aumenta la capacidad total de disipación del intercambiador. Incluso, para representar la demanda térmica del condensador de un equipo de aire acondicionado de 12.000 Btu/h, su modelo determinó una profundidad aproximada de **37,11 m**, bajo las condiciones específicas consideradas

Se recomienda evaluar diferentes caudales de agua en ANSYS Fluent para determinar el efecto de la velocidad del fluido y del número de Reynolds sobre la transferencia de calor. Martins realizó experimentalmente pruebas con caudales de **1,0; 1,6 y 2,7 L/min**, obteniendo potencias

disipadas aproximadas de **493,8; 565,2 y 992,2 W**, respectivamente. Por lo tanto, replicar estas condiciones mediante CFD permitiría ampliar la validación del modelo y establecer un intervalo de operación que maximice la transferencia térmica sin incrementar excesivamente las necesidades de bombeo.

En este trabajo se utiliza principalmente una condición de entrada cercana a **55 °C** para reproducir el experimento de referencia. Como continuación, se recomienda realizar simulaciones utilizando diferentes temperaturas de entrada, por ejemplo 35, 45, 55 y 65 °C, manteniendo inicialmente constante el caudal. Esto permitiría determinar la sensibilidad de la potencia transferida y de la temperatura del terreno ante diferentes cargas térmicas. Esta prueba coincide directamente con una de las recomendaciones para trabajos futuros formuladas por Martins, quien propone estudiar experimentalmente el efecto de variar la temperatura de entrada del intercambiador.

Referencias Bibliograficas

- ANSYS INC. (2025, enero). Workbench User's Guide [Guia tecnica de Ansys]. Ansys, Inc.
https://ansyshelp.ansys.com/public/Views/Secured/corp/v251/en/pdf/Workbench_Users_Guide.pdf
- Ayuda de Ansys. (2025). Transferencia De Calor Y Modelado De Radiación [Overview and Limitations]. Ansys. Overview and Limitations.
https://ansyshelp.ansys.com/public/////Views/Secured/corp/v242/en/flu_th/flu_th_sec_rad_intro.html
- Bernal Salcedo, H. F. (2010). Modelo De Un Pozo Para Extracción De Energia Geotérmica. [Tesis, Universidad de los Andes].
<https://repositorio.uniandes.edu.co/server/api/core/bitstreams/e70d868b-4fe1-45c1-b2a7-cc5e9d7710d7/content>
- Cadena Escalante, V., & Gamboa Villalba, J. A. (2018). Lineamiento Técnicos Y Economicos Para La Implementacion De Un Sistema De Energia Geotermica De Baja Entalpia. Caso De Estudio: Vivienda Unifamiliar En El Municipio De Anapoima-Cundinamarca. [Universidad Piloto de colombia]. <http://polux.unipiloto.edu.co:8080/00004561.pdf>
- Cengel, Y. A., & Cimbala, J. M. (2006). Mecánica de Fluidos: Fundamentos y aplicaciones (Primera). McGraw Hill, interamericana.
https://tic.uis.edu.co/ava/pluginfile.php/94663/mod_resource/content/1/Mecanica%20de%20Fluidos%20Fundamentos%20y%20Aplicaciones%20-

%20Yunus%20Cengel%20y%20John%20Cimbala%20-%20Primera%20Edicion.pdf

(Obra original publicada en 2006, McGraw-Hill Interamericana)

Cengel, Y. A., & Ghajar, A. j. (2007). Transferencia de Calor y Masa, Fundamentos y aplicaciones (Cuarta) [Pdf]. Mc Graw Hill.

https://drive.google.com/file/d/1HhKnZmHRp_JhsCkmscnHOYs4s7Z8Dgc1/view?usp=s haring&usp=embed_facebook (Obra original publicada en 2004, Mc Graw Hill)

Energy Sector Management Assistance Program. (2022). Direct Utilization of Geothermal Resources (Technical Report Technical Report 21/22; p. 116). World Bank Group. https://www.esmap.org/sites/default/files/esmap-files/16103-WB_ESMAP%20Direct%20Use-WEB.pdf

Geothermal Energy Database | International Geothermal Association. (2023). <https://worldgeothermal.org/geothermal-data/geothermal-energy-database>

Guzman Sanchez, jose, Sanz Lopez, L., & Ocaña Robles, L. (2011). Evaluación del potencial de energía geotérmica (informe tecnico Periodo 2010-2020; Plan de Energías Renovables (PER) 2011-2020, p. 236). Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE). https://www.idae.es/sites/default/files/documentos/publicaciones_idae/documentos_11227_e9_geotermia_a_db72b0ac.pdf

IRENA, I. R. energy agency. (2023). Global Geothermal Market and Technology assessment (No. 2023; p. 136). Internacional Renewable energy agency. https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2023/Feb/IRENA_Global_geothermal_market_technology_assessment_2023.pdf

- Ji, G., & Dong, J. (Eds.). (2023). Computational Fluid Dynamics—Recent Advances, New Perspectives and Applications. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.104020>
- Jimenez, E., & Jesfts, A. (2017). Analisis 2D y 3D De Intercambiador De Calor Enterrado Vertical [Jaén: Universidad de Jaén]. <https://crea.ujaen.es/handle/10953.1/17642>
- Llopis Trillos , guillermo, & Rodrigo Angulo , Vicente. (2015). Guia de la Energia Geotérmica. Fundación de la energía de la comunidad del Madrid . <https://www.madrid.org/bvirtual/BVCM005842.pdf>
- Löhner, R. (2008). Applied Computational Fluid Dynamics Techniques: An Introduction Based on Finite Element Methods. John Wiley & Sons.
- Lund, J. W., & Toth, A. N. (2021). Direct utilization of geothermal energy 2020 worldwide review. Geothermics, 90, 101915. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2020.101915>
- Martins, W. M. (2015). Análise teórica e experimental do comportamento de um trocador de calor geotérmico [Universidade do Vale do Rio dos Sinos]. <http://repositorio.jesuita.org.br/handle/UNISINOS/5819>
- Moreno-Rendón, D. A., López-Sánchez, J., & Blessent, D. (2020). Geothermal Energy in Colombia as of 2018. Ingenieria y Universidad, 24. <https://doi.org/10.11144/Javeriana.iyu24.geic>
- Palacio-Villa, M. A., Blessent, D., López-Sánchez, J., Moreno, D., Palacio-Villa, M. A., Blessent, D., López-Sánchez, J., & Moreno, D. (2020). Sistemas geotérmicos mejorados: Revisión y análisis de casos de estudio. Boletín de Geología, 42(1), 101-118. <https://doi.org/10.18273/revbol.v42n1-2020006>

- Pamplona, B. B., Gómez, L., & Cruz, J. (2021). Modelo de Simulación del Transporte de Masa en una Celda de Combustible Regenerativa Unificada [Universidad de Guadalajara]. <https://riudg.udg.mx/bitstream/20.500.12104/90549/1/DCUCEA10081FT.pdf>
- Pleitavino, M. N., Costantini, A. B., & Carro Pérez, M. E. (2019). Estudio comparativo de conductividad térmica de suelo cemento y rocas para uso de geotermia de baja entalpía. Encuentro Internacional de Educación en Ingeniería ACOFI 2019, 1–10. <https://acofipapers.org/index.php/eiei/article/view/191>
- Servicio Geológico Colombiano. (s. f.). Potencial geotérmico de Colombia. <https://www.arcgis.com/apps/dashboards/0186f2c2b6e74866b849025b0bf6fd90>
- Ramírez, Á. D. V. (2022). Diseño de un prototipo geotérmico con intercambiador de calor tierra-aire para la climatización de viviendas con condiciones ambientales de temperatura mayores a 30 °C [Universidad Antonio Nariño]. https://scholar.google.com/scholar?cluster=3068973717411773221&hl=en&oi=scholar&id=gs_cit&t=1740349727941&u=%2Fscholar%3Fq%3Dinfo%3AJbtW-1UvlyoJ%3Ascholar.google.com%2F%26output%3Dcite%26scirp%3D0%26scf%3D1%26hl%3Den
- Thompson III, W. H. (2013). Numerical Analysis of Thermal Behavior and Fluid Flow in Geothermal Energy Piles [University Virginia Tech]. <https://vtechworks.lib.vt.edu/items/ae70ffac-bc58-4cf3-a631-25e544e7cd56>
- Wendt, J. F., & Anderson, J. D. (2009). Computational Fluid Dynamics - An introduction: With contributions by John D. Anderson. Springer.

Zapata, O. P., & Cárdenas, M. A. C. (2019). Geotermia en Colombia. Servicio Geológico Colombiano, Bogota D.C.
[/https://www2.sgc.gov.co/Publicaciones/Cientificas/NoSeriadas/Documents/geotermia-en-colombia.pdf](https://www2.sgc.gov.co/Publicaciones/Cientificas/NoSeriadas/Documents/geotermia-en-colombia.pdf)