

La investigación reportada en esta tesis es parte de los programas de investigación del CICESE (Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California).

La investigación fue financiada por el CONACYT (Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología).

Todo el material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México). El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo o titular de los Derechos Autor.

**Centro de Investigación Científica y de Educación
Superior de Ensenada, Baja California**



**Maestría en Ciencias
en Ciencias de la Tierra
con orientación en Geología**

**Modelación, evaluación y estimación del potencial geotérmico
para la generación de energía eléctrica en la Cuenca de
Wagner**

Tesis
para cubrir parcialmente los requisitos necesarios para obtener el grado de
Maestro en Ciencias

Presenta:

Óscar López Villagómez

Ensenada, Baja California, México
2023

Tesis defendida por
Óscar López Villagómez

y aprobada por el siguiente Comité

Dr. Efraín Gómez Arias
Director de tesis

Dr. Antonio González Fernández

Dr. Carlos Francisco Flores Luna

Dr. Benjamín Barón Sevilla



Dr. Diego Ruiz Aguilar
Coordinador del Posgrado en Ciencias de la Tierra

Dra. Ana Denise Re Araujo
Directora de Estudios de Posgrado

Resumen de la tesis que presenta **Óscar López Villagómez** como requisito parcial para la obtención del grado de Maestro en Ciencias en Ciencias de la Tierra con orientación en Geología.

Modelación, evaluación y estimación del potencial geotérmico para la generación de energía eléctrica en la Cuenca de Wagner

Resumen aprobado por:

Dr. Efraín Gómez Arias
Director de tesis

Se desarrolló un modelo 2D de una tubería en forma de "U" (sistema geotérmico de ciclo cerrado), que utiliza agua como fluido de trabajo para estimar la cantidad de calor (energía) que se puede aprovechar en la Cuenca de Wagner. El código numérico fue escrito en lenguaje MATLAB. La ecuación de transferencia de calor conductivo-convectivo se discretizó por el Método de Volumen Finito (MVF) y, para resolver el sistema de ecuaciones no lineales se utilizó el algoritmo TDMA. Los parámetros utilizados para el estudio fueron la profundidad [Z] (300, 350 y 400m), longitud horizontal [L] (500, 600, 700, 800, 900 y 1000 m), flujo de calor [\dot{q}] (0.5, 1, 1.5 y 2 W/m²), diámetro de tubería [ϕ] (0.075, 0.15 y 0.225 m) y velocidad [V] (0.5, 1, 1.5, 2, 2.5, 3, 3.5, 4, 4.5, 5, 5.5 y 6 m/s). Lo que nos da un total de 2592 configuraciones. Se encontró que para obtener los valores de calor y temperatura más altos se tiene que hacer uso de la profundidad en 400 m, la longitud horizontal en 1000 m y un flujo de calor de 2 W/m². El diámetro de la tubería y la velocidad del fluido se comportan de manera inversa para el calor y temperatura. Debido a la densidad del fluido un diámetro pequeño y una velocidad baja generan una temperatura alta pero un calor bajo, por el contrario, el calor será alto con un diámetro ancho y una velocidad alta. Ya que no se puede tener un calor y una temperatura alta se encontraron los valores óptimos, que es en donde los perfiles de calor y temperatura se intersectan. Así se encontró que el diámetro de tubería óptimo es de 0.15 m (6") y la velocidad óptima es de 2 m/s. La temperatura y calor óptimos en la salida de modelo son 157 °C y 21.6 MW. Mientras que al final de la tubería horizontal son 183.3 °C y 25.1 MW.

Palabras clave: Cuenca Wagner, Sistema Geotérmico de ciclo cerrado, Flujo de calor, Transferencia de calor, Modelado numérico 2D.

Abstract of the thesis presented by **Óscar López Villagómez** as a partial requirement to obtain the Master of Science degree in Earth science with orientation in Geology.

Modelation, evaluation and estimation of the geothermal potential for the generation of electric energy on the Wagner Basin

Abstract approved by:

Dr. Efraín Gómez Arias
Thesis Director

In this work, we develop a 2D model of a “U” shape pipe (close loop geothermal system), water was used as a working fluid to estimate the amount of heat (energy) that can be harnessed from the Wagner Basin. The numerical model was written in MATLAB. The conductive-convective equation for heat transfer discretization was made by the Finite Volume Method (FVM), and the Tri-Diagonal Matrix Algorithm (TDMA) was used to solve the linear equation system. The parameters used in the model were depth [Z] (300, 350, and 400 m), horizontal length [L] (500, 600, 700, 800, 900, and 1000 m), heat flux [\dot{q}] (0.5, 1, 1.5, 2 W/m²), pipe diameter [ϕ] (0.075, 0.15 and 0.225 m) and velocity [V] (0.5, 1, 1.5, 2, 2.5, 3, 3.5, 4, 4.5, 5, 5.5, and 6 m/s). That makes 2592 configurations. To obtain the higher values of heat and temperature we must use a depth of 400 m, a horizontal length of 1000 m, and a heat flux of 2 W/m². The pipe diameter and the fluid velocity have an inverse-like behavior for heat and temperature. Because of the density, a small diameter and a low velocity make a high temperature but the heat is low, instead with a wider diameter and a high velocity the heat is high and the temperature is low. We cannot have the higher temperature and the higher heat at the same time, thus we looked at the intersection of the heat and temperature profiles and got the optimal values. We found that the optimal pipe diameter is 0.15 m (6”) and the optimal velocity is 2 m/s. Thus the optimal temperature and heat for the outlet are 157°C and 21.6 MW, and for the end of the horizontal pipe are 183.3°C and 25.1 MW.

Keywords: Wagner Basing, Close-loop geothermal system, Heat flux, Heat exchange, 2D numerical model

Dedicatoria

A la termodinámica...

Porque en esta casa obedecemos las leyes de la termodinámica.

Agradecimientos

Al Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California (CICESE) por la oportunidad y el apoyo para estudiar una maestría en Ciencias de la Tierra.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por brindarme apoyo económico para la realizar mis estudios de maestría. No. De becario: 995140.

Al financiamiento del siguiente proyecto: Campaña Intensiva de Exploración Geotérmica de las Cuencas Wagner, Consag, Delfín, Guaymas y Alarcón del Sistema de Rifts del Golfo de California. (CeMIE-Geo) P03.

A Andrea por tanto amor y apoyo en todo aspecto nuestras vidas.

A mi familia, principalmente mis padres Óscar López Gorosave y Sonia Patricia Villagómez Padilla (Puly) porque sin ellos no hubiera llegado tan lejos (y lo que me falta). También a mis hermanos Mario, Gema, Paty y Abril por existir.

A mis amigos Tomito, Carlos Parra, Charles, César, Martín, Gloria y Wicho que no me ayudaron en la tesis, pero si hacen mi vida más amena.

A mis compañeros de Ciencias de Tierra, ya que con todo y pandemia se atrevieron a venir a Ensenada por lo que pudimos entablar una amistad.

Los profesores de Ciencias de la Tierra que compartieron su conocimiento conmigo.

Al Dr. Efraín Gómez Arias que me dio la oportunidad de tener esta aventura, que no hubiera tenido éxito sin todo su conocimiento y paciencia.

A los miembros de mi comité Dr. Carlos Francisco Flores Luna, Dr. Antonio González Fernández y Dr. Benjamín Barón Sevilla por todos los aportes que hicieron para este trabajo.

Tabla de contenido

	Página
Resumen en español.....	ii
Resumen en inglés.....	iii
Dedicatoria	iv
Agradecimientos.....	v
Lista de figuras.....	ix
Lista de tablas	xv
Capítulo 1. Introducción.....	1
1.1 Justificación.....	3
1.2 Hipótesis.....	3
1.3 Objetivos	4
1.3.1 Objetivo general.....	4
1.3.2 Objetivos específicos.....	4
Capítulo 2. Área de estudio	5
2.1 Antecedentes	5
2.1.1 Golfo de California.....	5
2.1.2 Cuenca de Wagner	6
2.1.3 Batimetría.....	7
2.1.4 Flujo de calor	7
Capítulo 3. Metodología.....	10
3.1 Sistemas geotérmicos de ciclo cerrado.....	10
3.2 Transferencia de calor conductivo-convectivo	10

3.3	Ecuaciones de conservación.....	11
3.3.1	Ecuación de masa.....	11
3.3.2	Ecuación de momentum	11
3.3.3	Ecuación de energía	12
3.4	Transferencia de calor.....	12
3.5	Propiedades térmicas iniciales.....	13
3.5.1	Gradiente de temperatura.....	13
3.6	Ecuaciones de estado del agua dentro de la tubería.....	14
3.6.1	Densidad.....	14
3.6.2	Presión.....	14
3.6.3	Capacidad calorífica.....	15
3.7	Variables físicas para la temperatura.....	15
3.8	Modelado	16
3.8.1	Fronteras	19
3.8.2	Ejemplo de malla y campo de velocidades iniciales.....	20
3.8.3	Corrección del campo de velocidades (paredes de la tubería).....	20
3.8.4	Esquemas de discretización	21
3.8.5	Esquema Up-Wind.....	21
3.8.5.1	Región 1.....	23
3.8.5.2	Región 2.....	23
3.8.5.3	Región 3.....	24
3.8.5.4	Región 4.....	25
3.8.5.5	Región 5.....	26
3.8.5.6	Región 6.....	26
3.8.5.7	Región 7.....	27
3.8.5.8	Región 8.....	28
3.8.5.9	Región 9.....	28

3.8.5.10	Coeficientes.....	29
3.9	MTDA: solución numérica del sistema de ecuaciones no lineales.....	30
3.10	Diagrama de flujo.....	32
3.11	Estimación del calor disponible.....	34
Capítulo 4. Resultados y discusiones.....		35
4.1	Validación del código numérico.....	35
4.2	Comportamiento de la temperatura y calor en el modelo.....	37
4.2.1	Profundidad.....	39
4.2.2	Longitud horizontal de la tubería.....	40
4.2.3	Flujo de calor (q).....	41
4.2.4	Diámetro de tubería (ϕ).....	42
4.2.5	Velocidad.....	43
Capítulo 5. Conclusiones.....		47
Literatura citada.....		49
Anexos.....		52

Lista de figuras

Figura	Página
1. Ejemplos de sistemas de ciclo cerrado y abierto. (a) es un sistema abierto y por lo tanto el fluido de trabajo tiene contacto con el medio. (b) es un ciclo cerrado y el fluido de trabajo no tiene contacto directo con el medio.	2
2. Localización y batimetría de la Cuenca Wagner.	5
3. Mapa de la zona de estudio que incluye batimetría, colecta de datos de flujos de calor (Prol-Ledesma et al., 2013; Neumann et al., 2017; y Peña-Domínguez et al., 2022), localización de pozos (PEMEX), colecta de datos de conductividad, temperatura y profundidad (CTD por sus siglas en ingles) y en líneas punteadas la Falla de Wagner.....	7
4. Modelo conceptual de un sistema geotérmico de ciclo cerrado en la Cuenca de Wagner.....	10
5. Campo inicial de temperaturas para un flujo de calor de 2 W/m^2 . La línea blanca representa el fondo marino.....	14
6. Ejemplo de una malla de 2D con las nueve regiones donde se discretiza la ecuación de transferencia de calor difusivo-convectivo.	18
7. En esta figura se puede apreciar el centro de un volumen de control “P”, las cuatro caras (paredes) del volumen de control en letras minúsculas y los nodos vecinos en letras mayúsculas. Las δ representan la distancia entre nodos y Δ la longitud de la pared de volumen de control.	19
8. Malla numérica en 2D. Las cuatro fronteras cardinales están representadas de color rojo donde se puede apreciar que no forman parte de la malla.....	19
9. Ejemplo de las mallas utilizadas para el modelo con una escala arbitraria.....	20
10. Ejemplo de vectores de velocidad en direcciones x-y con escala arbitraria.....	20
11. Representación gráfica de cómo se desplaza el valor de la temperatura según la dirección del flujo.	21
12. Ejemplo de matriz tridiagonal.	30
13. Ejemplo de cómo se soluciona el algoritmo de matriz tridiagonal (TDMA) en una malla 2D. (a), (b) y (c) representan las ecuaciones 63 y 64, mientras que (d), (e) y (f) son una representación de las ecuaciones 65 y 66.....	31
14. Ejemplo de cómo se calcula la temperatura utilizando el algoritmo de matriz tridiagonal (TDMA) en una malla 2D. (a), (b) y (c) representan la ecuación 67, mientras que (d), (e) y (f) son una representación de la ecuación 68.	32
15. Diagrama de flujo del código numérico en lenguaje MATLAB que resuelve la transferencia de calor conductivo-convectivo en 2D en un sistema geotérmico de ciclo cerrado.	34

16. Perfil de temperaturas en un intercambiador de calor en U en el pozo LP-2 de campo geotérmico Cerritos Colorados (antes La Primavera, Jalisco). Los triángulos naranjas y rombos grises, son los casos uno y dos reportados por Saucedo-Velázquez et al., 2022. Los círculos rojos y asteriscos negros, son los resultados de los modelos obtenidos utilizando el código numérico desarrollado en el presente trabajo. 36
17. Comportamiento de la temperatura a lo largo de la tubería considerando doce velocidades. La profundidad (Z), el flujo de calor q y diámetro de la tubería (ϕ) son constantes. Las líneas punteadas azules indican la profundidad de la tubería (descenso del fluido) mientras que las líneas punteadas rojas indican la profundidad donde comienza el ascenso del fluido. La distancia entre ambas líneas corresponde al inicio y el final de la tubería horizontal con longitudes de: (a) 500 m, (b) 600 m, (c) 700 m, (d) 800 m, (e) 900 m y (f) 1000 m..... 38
18. Comparación de los perfiles de temperatura con las 3 configuraciones de profundidad. La longitud horizontal (L), el flujo de calor q , diámetro de la tubería (ϕ) y velocidad (V) son constantes. 39
19. Comparación de los perfiles de calor y temperatura vs. profundidad. (a) Son los valores en la salida de la tubería y (b) son al final de la tubería horizontal. La longitud horizontal (L), el flujo de calor q , diámetro de la tubería (ϕ) y velocidad (V) son constantes. 39
20. Comparación de los perfiles de temperatura con las seis configuraciones de longitudes horizontales. La profundidad (Z), el flujo de calor q , diámetro de la tubería (ϕ) y velocidad (V) son constantes. 40
21. Comparación de los perfiles de calor y temperatura contra la longitud horizontal. (a) Son los valores en la salida de la tubería y (b) son al final de la tubería horizontal. La profundidad (Z), el flujo de calor q , diámetro de la tubería (ϕ) y velocidad (V) son constantes. 41
22. Comparación de los perfiles de temperatura con las cuatro configuraciones de flujo de calor. La profundidad (Z), la longitud horizontal (L), diámetro de la tubería (ϕ) y velocidad (V) son constantes. 41
23. Comparación de los perfiles de calor y temperatura vs. flujo de calor. (a) Son los valores en la salida de la tubería y (b) son al final de la tubería horizontal. La profundidad (Z), la longitud horizontal (L), diámetro de la tubería (ϕ) y velocidad (V) son constantes. 42
24. Comparación de los perfiles de temperatura con las tres configuraciones de diámetros. La profundidad (Z), longitud horizontal (L), el flujo de calor q y velocidad (V) son constantes... 42
25. Comparación de los perfiles de calor y temperatura vs. el diámetro de la tubería. (a) Son los valores en la salida de la tubería y (b) son al final de la tubería horizontal. La profundidad (Z), longitud horizontal (L), el flujo de calor q y velocidad (V) son constantes..... 43
26. Perfiles de temperatura para cada una de las velocidades consideradas. La profundidad (Z), longitud horizontal (L), flujo de calor q y diámetro de la tubería (ϕ) son constantes. 43
27. Comparación de los perfiles de calor y temperatura vs. las velocidades. (a) Son los valores en la salida de la tubería y (b) son al final de la tubería horizontal. La profundidad (Z), longitud horizontal (L), flujo de calor q y diámetro de la tubería (ϕ) son constantes..... 44

28. Graficas de barra que representan la frecuencia de las 216 velocidades optimas. (a) Son los valores a la salida de la tubería y (b) son al final de la tubería horizontal..... 45
29. Comparación de temperatura vs. calor en la distancia con 3 velocidades distintas. (a) 1 m/s, (b) 2m/s y (c) 3 m/s. La profundidad (Z), longitud horizontal (L), flujo de calor q y diámetro de la tubería (ϕ) son constantes..... 45
30. Comparación de temperatura vs. densidad (ρ) en una sola configuración donde la profundidad (Z)=400 m, la longitud horizontal (L)=1000 m, flujo de calor (q)= 2 W/m², diámetro (ϕ)=0.15 m y velocidad (V)=2 m/s..... 46
31. Comportamiento de la temperatura a lo largo de la tubería considerando doce velocidades. La profundidad (Z), el flujo de calor q y diámetro de la tubería (ϕ) son constantes. Las líneas punteadas azules indican la profundidad de la tubería (descenso del fluido) mientras que las líneas punteadas rojas indican la profundidad donde comienza el ascenso del fluido. La distancia entre ambas líneas corresponde al inicio y el final de la tubería horizontal con longitudes de: (a) 500 m, (b) 600 m, (c) 700 m, (d) 800 m, (e) 900 m y (f) 1000 m..... 52
32. Comportamiento de la temperatura a lo largo de la tubería considerando doce velocidades. La profundidad (Z), el flujo de calor q y diámetro de la tubería (ϕ) son constantes. Las líneas punteadas azules indican la profundidad de la tubería (descenso del fluido) mientras que las líneas punteadas rojas indican la profundidad donde comienza el ascenso del fluido. La distancia entre ambas líneas corresponde al inicio y el final de la tubería horizontal con longitudes de: (a) 500 m, (b) 600 m, (c) 700 m, (d) 800 m, (e) 900 m y (f) 1000 m..... 52
33. Comportamiento de la temperatura a lo largo de la tubería considerando doce velocidades. La profundidad (Z), el flujo de calor q y diámetro de la tubería (ϕ) son constantes. Las líneas punteadas azules indican la profundidad de la tubería (descenso del fluido) mientras que las líneas punteadas rojas indican la profundidad donde comienza el ascenso del fluido. La distancia entre ambas líneas corresponde al inicio y el final de la tubería horizontal con longitudes de: (a) 500 m, (b) 600 m, (c) 700 m, (d) 800 m, (e) 900 m y (f) 1000 m..... 53
34. Comportamiento de la temperatura a lo largo de la tubería considerando doce velocidades. La profundidad (Z), el flujo de calor q y diámetro de la tubería (ϕ) son constantes. Las líneas punteadas azules indican la profundidad de la tubería (descenso del fluido) mientras que las líneas punteadas rojas indican la profundidad donde comienza el ascenso del fluido. La distancia entre ambas líneas corresponde al inicio y el final de la tubería horizontal con longitudes de: (a) 500 m, (b) 600 m, (c) 700 m, (d) 800 m, (e) 900 m y (f) 1000 m..... 53
35. Comportamiento de la temperatura a lo largo de la tubería considerando doce velocidades. La profundidad (Z), el flujo de calor q y diámetro de la tubería (ϕ) son constantes. Las líneas punteadas azules indican la profundidad de la tubería (descenso del fluido) mientras que las líneas punteadas rojas indican la profundidad donde comienza el ascenso del fluido. La distancia entre ambas líneas corresponde al inicio y el final de la tubería horizontal con longitudes de: (a) 500 m, (b) 600 m, (c) 700 m, (d) 800 m, (e) 900 m y (f) 1000 m..... 54
36. Comportamiento de la temperatura a lo largo de la tubería considerando doce velocidades. La profundidad (Z), el flujo de calor q y diámetro de la tubería (ϕ) son constantes. Las líneas punteadas azules indican la profundidad de la tubería (descenso del fluido) mientras que las líneas punteadas rojas indican la profundidad donde comienza el ascenso del fluido. La

- distancia entre ambas líneas corresponde al inicio y el final de la tubería horizontal con longitudes de: (a) 500 m, (b) 600 m, (c) 700 m, (d) 800 m, (e) 900 m y (f) 1000 m..... 54
37. Comportamiento de la temperatura a lo largo de la tubería considerando doce velocidades. La profundidad (Z), el flujo de calor q y diámetro de la tubería (ϕ) son constantes. Las líneas punteadas azules indican la profundidad de la tubería (descenso del fluido) mientras que las líneas punteadas rojas indican la profundidad donde comienza el ascenso del fluido. La distancia entre ambas líneas corresponde al inicio y el final de la tubería horizontal con longitudes de: (a) 500 m, (b) 600 m, (c) 700 m, (d) 800 m, (e) 900 m y (f) 1000 m..... 55
38. Comparación de la temperatura (T) y el calor (Q) a la salida del sistema geotérmico de ciclo cerrado considerando las doce velocidades. La profundidad (z), el flujo de calor q y diámetro de la tubería (ϕ) son constantes y la longitud horizontal es de (a) 500 m, (b) 600 m, (c) 700 m, (d) 800 m, (e) 900 m y (f) 1000 m. Las líneas punteadas rojas y azules representan el inicio y el final de la tubería horizontal..... 80
39. Comparación de la temperatura (T) y el calor (Q) a la salida del sistema geotérmico de ciclo cerrado considerando las doce velocidades. La profundidad (z), el flujo de calor q y diámetro de la tubería (ϕ) son constantes y la longitud horizontal es de (a) 500 m, (b) 600 m, (c) 700 m, (d) 800 m, (e) 900 m y (f) 1000 m. Las líneas punteadas rojas y azules representan el inicio y el final de la tubería horizontal..... 81
40. Comparación de la temperatura (T) y el calor (Q) a la salida del sistema geotérmico de ciclo cerrado considerando las doce velocidades. La profundidad (z), el flujo de calor q y diámetro de la tubería (ϕ) son constantes y la longitud horizontal es de (a) 500 m, (b) 600 m, (c) 700 m, (d) 800 m, (e) 900 m y (f) 1000 m. Las líneas punteadas rojas y azules representan el inicio y el final de la tubería horizontal..... 81
41. Comparación de la temperatura (T) y el calor (Q) a la salida del sistema geotérmico de ciclo cerrado considerando las doce velocidades. La profundidad (z), el flujo de calor q y diámetro de la tubería (ϕ) son constantes y la longitud horizontal es de (a) 500 m, (b) 600 m, (c) 700 m, (d) 800 m, (e) 900 m y (f) 1000 m. Las líneas punteadas rojas y azules representan el inicio y el final de la tubería horizontal..... 82
42. Comparación de la temperatura (T) y el calor (Q) a la salida del sistema geotérmico de ciclo cerrado considerando las doce velocidades. La profundidad (z), el flujo de calor q y diámetro de la tubería (ϕ) son constantes y la longitud horizontal es de (a) 500 m, (b) 600 m, (c) 700 m, (d) 800 m, (e) 900 m y (f) 1000 m. Las líneas punteadas rojas y azules representan el inicio y el final de la tubería horizontal..... 82
43. Comparación de la temperatura (T) y el calor (Q) a la salida del sistema geotérmico de ciclo cerrado considerando las doce velocidades. La profundidad (z), el flujo de calor q y diámetro de la tubería (ϕ) son constantes y la longitud horizontal es de (a) 500 m, (b) 600 m, (c) 700 m, (d) 800 m, (e) 900 m y (f) 1000 m. Las líneas punteadas rojas y azules representan el inicio y el final de la tubería horizontal..... 83
44. Comparación de la temperatura (T) y el calor (Q) a la salida del sistema geotérmico de ciclo cerrado considerando las doce velocidades. La profundidad (z), el flujo de calor q y diámetro de la tubería (ϕ) son constantes y la longitud horizontal es de (a) 500 m, (b) 600 m, (c) 700 m, (d) 800 m, (e) 900 m y (f) 1000 m. Las líneas punteadas rojas y azules representan el inicio y el final de la tubería horizontal..... 83

45. Comparación de la temperatura (T) y el calor (Q) a la salida del sistema geotérmico de ciclo cerrado considerando las doce velocidades. La profundidad (z), el flujo de calor q y diámetro de la tubería (ϕ) son constantes y la longitud horizontal es de (a) 500 m, (b) 600 m, (c) 700 m, (d) 800 m, (e) 900 m y (f) 1000 m. Las líneas punteadas rojas y azules representan el inicio y el final de la tubería horizontal. 84
46. Comparación de la temperatura (T) y el calor (Q) al final de la tubería horizontal del sistema geotérmico de ciclo cerrado considerando las doce velocidades. La profundidad (z), el flujo de calor q y diámetro de la tubería (ϕ) son constantes y la longitud horizontal es de (a) 500 m, (b) 600 m, (c) 700 m, (d) 800 m, (e) 900 m y (f) 1000 m. Las líneas punteadas rojas y azules representan el inicio y el final de la tubería horizontal. 85
47. Comparación de la temperatura (T) y el calor (Q) al final de la tubería horizontal del sistema geotérmico de ciclo cerrado considerando las doce velocidades. La profundidad (z), el flujo de calor q y diámetro de la tubería (ϕ) son constantes y la longitud horizontal es de (a) 500 m, (b) 600 m, (c) 700 m, (d) 800 m, (e) 900 m y (f) 1000 m. Las líneas punteadas rojas y azules representan el inicio y el final de la tubería horizontal. 86
48. Comparación de la temperatura (T) y el calor (Q) al final de la tubería horizontal del sistema geotérmico de ciclo cerrado considerando las doce velocidades. La profundidad (z), el flujo de calor q y diámetro de la tubería (ϕ) son constantes y la longitud horizontal es de (a) 500m, (b) 600m, (c) 700m, (d) 800m, (e) 900m y (f) 1000m. Las líneas punteadas rojas y azules representan el inicio y el final de la tubería horizontal. 86
49. Comparación de la temperatura (T) y el calor (Q) al final de la tubería horizontal del sistema geotérmico de ciclo cerrado considerando las doce velocidades. La profundidad (z), el flujo de calor q y diámetro de la tubería (ϕ) son constantes y la longitud horizontal es de (a) 500 m, (b) 600 m, (c) 700 m, (d) 800 m, (e) 900 m y (f) 1000 m. Las líneas punteadas rojas y azules representan el inicio y el final de la tubería horizontal. 87
50. Comparación de la temperatura (T) y el calor (Q) al final de la tubería horizontal del sistema geotérmico de ciclo cerrado considerando las doce velocidades. La profundidad (z), el flujo de calor q y diámetro de la tubería (ϕ) son constantes y la longitud horizontal es de (a) 500 m, (b) 600 m, (c) 700 m, (d) 800 m, (e) 900 m y (f) 1000 m. Las líneas punteadas rojas y azules representan el inicio y el final de la tubería horizontal. 87
51. Comparación de la temperatura (T) y el calor (Q) al final de la tubería horizontal del sistema geotérmico de ciclo cerrado considerando las doce velocidades. La profundidad (z), el flujo de calor q y diámetro de la tubería (ϕ) son constantes y la longitud horizontal es de (a) 500 m, (b) 600 m, (c) 700 m, (d) 800 m, (e) 900 m y (f) 1000 m. Las líneas punteadas rojas y azules representan el inicio y el final de la tubería horizontal. 88
52. Comparación de la temperatura (T) y el calor (Q) al final de la tubería horizontal del sistema geotérmico de ciclo cerrado considerando las doce velocidades. La profundidad (z), el flujo de calor q y diámetro de la tubería (ϕ) son constantes y la longitud horizontal es de (a) 500 m, (b) 600 m, (c) 700 m, (d) 800 m, (e) 900 m y (f) 1000 m. Las líneas punteadas rojas y azules representan el inicio y el final de la tubería horizontal. 88
53. Comparación de la temperatura (T) y el calor (Q) al final de la tubería horizontal del sistema geotérmico de ciclo cerrado considerando las doce velocidades. La profundidad (z), el flujo de calor q y diámetro de la tubería (ϕ) son constantes y la longitud horizontal es de (a) 500 m, (b)

600 m, (c) 700 m, (d) 800 m, (e) 900 m y (f) 1000 m. Las líneas punteadas rojas y azules representan el inicio y el final de la tubería horizontal. 89

Lista de tablas

Tabla	Página
1. Datos de flujo de calor (q) y profundidad reportados por Prol-Ledesma et al., 2013; Neumann et al., 2017; y Peña-Domínguez et al., 2022.	8
2. Propiedades térmicas del medio y tubería (Fallah et al., 2021) ¹ (Barragán-Cárdenas, 2019) ² (Kim, 1975) ³ (Sun et al., 2018) ⁴	13
3. Configuraciones para el modelado numérico del sistema geotérmico de ciclo cerrado.....	16
4. Valor de los parámetros F y D de la ecuación discretizada de transferencia de calor difusivo-convectivo.	21
5. Temperaturas en las caras (paredes) del volumen de control con el esquema de discretización Up-Wind con dirección oeste-este norte-sur.....	22
6. Coeficientes resultantes de la discretización de las nueve ecuaciones.	29
7. Continuación de la tabla anterior con los dos coeficientes faltantes*	29
8. Propiedades térmicas utilizadas en la validación del modelo.	35
9. Temperaturas simuladas. Resultados para 300 m de profundidad (valor de la longitud de la tubería de descenso y de la de ascenso) donde L es la longitud horizontal (m), LT es la longitud total (m), ϕ es el diámetro de la tubería (m), V es la velocidad del fluido (m/s), q es el flujo de calor (W/m ²) y los datos del centro son las temperaturas de salida.	56
10. Temperaturas simuladas. Resultados para 350 m de profundidad (valor de la longitud de la tubería de descenso y de la de ascenso) donde L es la longitud horizontal (m), LT es la longitud total (m), ϕ es el diámetro de la tubería (m), V es la velocidad del fluido (m/s), q es el flujo de calor (W/m ²) y los datos del centro son las temperaturas de salida.	58
11. Temperaturas simuladas. Resultados para 400 m de profundidad (valor de la longitud de la tubería de descenso y de la de ascenso) donde L es la longitud horizontal (m), LT es la longitud total (m), ϕ es el diámetro de la tubería (m), V es la velocidad del fluido (m/s), q es el flujo de calor (W/m ²) y los datos del centro son las temperaturas de salida.	60
12. Temperaturas simuladas. Resultados para 300 m de profundidad (valor de la longitud de la tubería de descenso y de la de ascenso) donde L es la longitud horizontal (m), LT es la longitud total (m), ϕ es el diámetro de la tubería (m), V es la velocidad del fluido (m/s), q es el flujo de calor (W/m ²) y los datos del centro son las temperaturas al final de la tubería horizontal.	62
13. Temperaturas simuladas. Resultados para 350 m de profundidad (valor de la longitud de la tubería de descenso y de la de ascenso) donde L es la longitud horizontal (m), LT es la longitud total (m), ϕ es el diámetro de la tubería (m), V es la velocidad del fluido (m/s), q es el flujo de calor (W/m ²) y los datos del centro son las temperaturas al final de la tubería horizontal.	64

14. Temperaturas simuladas. Resultados para 400 m de profundidad (valor de la longitud de la tubería de descenso y de la de ascenso) donde L es la longitud horizontal (m), LT es la longitud total (m), ϕ es el diámetro de la tubería (m), V es la velocidad del fluido (m/s), q es el flujo de calor (W/m^2) y los datos del centro son las temperaturas al final de la tubería horizontal. ... 66
15. Valores de calor (Q) estimados. Resultados para 300 m de profundidad donde L es la longitud horizontal (m), LT es la longitud total (m), ϕ es el diámetro de la tubería (m), V es la velocidad del fluido (m/s), q es flujo de calor (W/m^2) y los datos del centro son los valores de calor (MW) finales. 68
16. Valores de calor (Q) estimados. Resultados para 350 m de profundidad donde L es la longitud horizontal (m), LT es la longitud total (m), ϕ es el diámetro de la tubería (m), V es la velocidad del fluido (m/s), q es flujo de calor (W/m^2) y los datos del centro son los valores de calor (MW) finales. 70
17. Valores de calor (Q) estimados. Resultados para 400 m de profundidad donde L es la longitud horizontal (m), LT es la longitud total (m), ϕ es el diámetro de la tubería (m), V es la velocidad del fluido (m/s), q es flujo de calor (W/m^2) y los datos del centro son los valores de calor (MW) finales. 72
18. Valores de calor (Q) estimados. Resultados para 300 m de profundidad donde L es la longitud horizontal (m), LT es la longitud total (m), ϕ es el diámetro de la tubería (m), V es la velocidad del fluido (m/s), q es flujo de calor (W/m^2) y los datos del centro son los valores de calor (MW) al final de la tubería horizontal. 74
19. Valores de calor (Q) estimados. Resultados para 350 m de profundidad donde L es la longitud horizontal (m), LT es la longitud total (m), ϕ es el diámetro de la tubería (m), V es la velocidad del fluido (m/s), q es flujo de calor (W/m^2) y los datos del centro son los valores de calor (MW) al final de la tubería horizontal. 76
20. Valores de calor (Q) estimados. Resultados para 400 m de profundidad donde L es la longitud horizontal (m), LT es la longitud total (m), ϕ es el diámetro de la tubería (m), V es la velocidad del fluido (m/s), q es flujo de calor (W/m^2) y los datos del centro son los valores de calor (MW) al final de la tubería horizontal. 78

Capítulo 1. Introducción

La energía geotermal se encuentra disponible en cualquier zona geográfica de la Tierra; sin embargo, no todas las zonas tienen el potencial para poder generar electricidad. El gradiente de calor promedio entre la superficie y el fondo de la corteza suele ser de $31.1\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{km}$ y el flujo de calor promedio es de $1.2 \times 10^{-6}\text{ cal}/\text{cm}^2$ el cual equivale aproximadamente a $0.05\text{ W}/\text{m}^2$. Por lo tanto, para considerar que una zona tiene un potencial geotérmico alto, debe tener un gradiente de temperatura y un flujo de calor algunas veces mayor que el promedio. Se considera que las zonas de límites de falla son importantes para el aumento del gradiente de temperatura (DiPippo, 2016).

Para que un campo geotermal se considere aprovechable, debe requiere cumplir varias características geológicas, geofísicas y geoquímicas. Primero se necesita una recarga de agua, en tierra puede ser la lluvia (agua meteórica o pluvial) y en el océano la misma agua de mar. Este fluido se infiltra por las fracturas de la corteza hasta llegar a una profundidad donde la temperatura es alta y calienta el fluido. Estas capas permeables permiten el movimiento del agua la cual asciende al bajar su densidad por el calentamiento (celdas convectivas). Si el fluido se encuentra con una falla asciende por ésta y llega a la superficie en algún modo de emanación hidrotermal, como una fumarola o aguas hidrotermales (DiPippo, 2016).

Los recursos hidrotermales se pueden clasificar en tres categorías dependiendo de su temperatura: sistemas de baja temperatura ($<90\text{ }^{\circ}\text{C}$), de temperatura media ($90\text{-}150\text{ }^{\circ}\text{C}$) y alta temperatura ($>150\text{ }^{\circ}\text{C}$). Se considera que los sistemas de alta temperatura son los más apropiados para la generación de energía eléctrica. En los sistemas geotérmicos de mediana a alta temperatura y baja o nula saturación de fluidos se tienen dos formas para aprovechar el recurso hidrotermal. La primera involucra a los sistemas geotermales de ciclo abierto o también conocidos como sistemas geotérmicos mejorados (EGS por sus siglas en inglés); este consiste en inyectar agua fría al reservorio, ésta fluye y se calienta en los poros y fracturas para posteriormente ser recuperada mediante otro pozo de producción. El segundo sistema es el sistema geotermal de ciclo o circuito cerrado. En este sistema, el fluido es inyectado a través de un pozo y circula sin tener contacto directo con el reservorio hidrotermal, entonces el fluido es recuperado en la superficie con mayor temperatura, donde es aprovechado para la generación de energía eléctrica. Las ventajas de este último sistema son que no hay contacto directo entre el fluido inyectado y el reservorio hidrotermal, no hay contaminación del agua del reservorio (en caso de existir) y la permeabilidad del reservorio es despreciable, por lo que el costo de producción se puede ver reducido (Xu et al., 2020). Por

lo tanto, estos sistemas de circuito cerrado pueden ser una opción para aprovechar el recurso geotérmico marino.

Los sistemas geotermiales de ciclo cerrado se pueden dividir en tres tipos: coaxial, cables múltiples y en forma de U, siendo el más utilizado el coaxial (Xu et al., 2020). En particular, el presente trabajo se enfoca a los sistemas de ciclo cerrado que operan con tubería en forma de “U”, que consiste en dos pozos verticales unidos por un pozo horizontal en el fondo. Uno de los pozos verticales servirá para la entrada del fluido, que se calentará indirectamente mediante conducción, por lo tanto, una vez la tubería está bajo tierra, el fluido ganará temperatura a medida que se transporte a mayor profundidad. En la sección de salida de la tubería se puede poner una capa térmicamente aislante para evitar grandes pérdidas de temperatura (Figura 1) (Fallah et al., 2021).

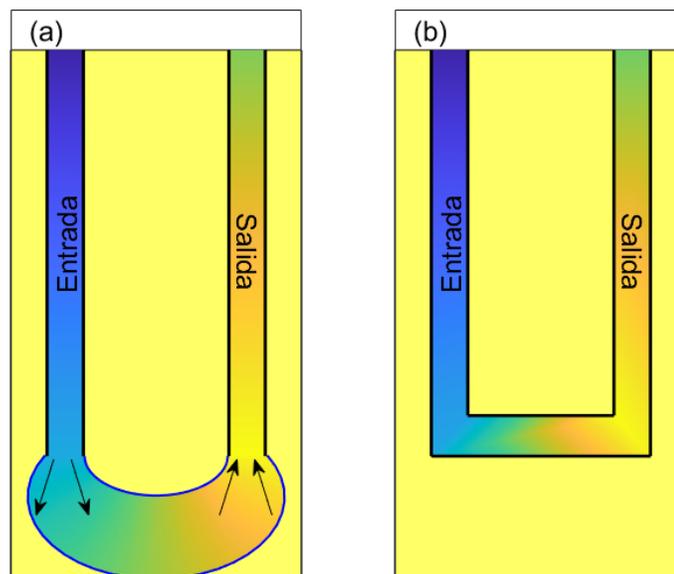


Figura 1. Ejemplos de sistemas de ciclo cerrado y abierto. (a) es un sistema abierto y por lo tanto el fluido de trabajo tiene contacto con el medio. (b) es un ciclo cerrado y el fluido de trabajo no tiene contacto directo con el medio.

En México, sólo los recursos geotérmicos de alta entalpía son utilizados para generación de energía eléctrica, sin embargo, la mayoría de los recursos disponibles en el país son de mediana a baja entalpía (Espinoza-Ojeda et al., 2017). En la actualidad existen cinco campos geotermiales en México. Cuatro operados por la Comisión Federal de Electricidad: Cerro Prieto, BC., (570 MW); Los Azufres, Michoacán (247.5 MW), Los Humeros, Puebla (94.8 MW), y Las Tres Vírgenes, BCS., (10 MW). Uno operado por el Grupo Dragón de la iniciativa privada conocido como Domo San Pedro, Nayarit (25.5 MW). Juntos tienen una capacidad de generación de 947.8 MW (Romo-Jones et al., 2020). El campo de Cerro Prieto es el más antiguo y de mayor capacidad en todo el país. Se encuentra al norte de la península de Baja California en

el Valle de Mexicali. En el año 2007 se registró su mejor rendimiento el cual fue 740 MW y actualmente tiene una capacidad de 570 MW. Estos campos geotérmicos generan solamente el 1.2% de la capacidad eléctrica instalada en México (Gutiérrez-Negrin, 2019).

Las fuentes potenciales de energía no tradicional en México incluyen sistemas geotérmicos submarinos localizados en la costa del Pacífico. Se calcula un potencial termal de $1123 \text{ MW}_t/\text{km}^3$ y una temperatura promedio de $350 \text{ }^\circ\text{C}$. Estos sistemas se encuentran a profundidades someras, entre 20 y 50 m y en aguas profundas a más de 2000 m. El Golfo de California tiene una gran cantidad de actividad hidrotermal submarina (Suárez-Arriaga, 2004).

1.1 Justificación

No existen muchas propuestas para la explotación de energía eléctrica en el Golfo de California. Hiriart et al. (2010), propusieron un prototipo de un generador eléctrico submarino para la cuenca de Guaymas, que en uno de sus extremos tendría intercambiador de calor en forma de espiral, que se localizaría justo por encima de una ventila submarina, de tal manera que la ventila transfiera su calor de manera natural al fluido que circula por el interior del espiral produciendo vapor para la generación de electricidad. Algunos trabajos como los de Prol-Ledesma et al. (2013) y Neumann et al. (2017) indican la presencia de flujos de calor altos en la Cuenca Wagner. El hecho de que las profundidades son someras (200 m) es un factor a considerar debido a que facilitaría una posible extracción con instalaciones o plataformas dentro y fuera de costa. Las ventilas submarinas con altos flujos de calor ($>1 \text{ W/m}^2$) hacen de la Cuenca Wagner un área de oportunidad para evaluar y estimar la energía geotérmica marina disponible para la generación de energía eléctrica mediante el uso de sistemas geotérmicos de ciclo cerrado como lo proponen Xu et al. (2020).

1.2 Hipótesis

La Cuenca Wagner es una cuenca sedimentaria somera con un espesor aproximado de $\sim 6 \text{ km}$ (Martín-Barajas et al., 2013), localizada a una profundidad aproximada de 225 m por debajo el nivel del mar, con presencia de ventilas submarinas y flujos de calor anómalos ($>1 \text{ W/m}^2$) (Neumann et al., 2017; Prol-Ledesma et al., 2013). Con estas condiciones geológicas y térmicas, la Cuenca de Wagner puede ser

propicia (y en el mediano y largo plazo comercialmente atractivo) para el uso de sistemas geotérmicos marinos de ciclo (circuito) cerrado para la generación de energía eléctrica.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

Modelar, evaluar y estimar el potencial geotérmico disponible la para generación de energía eléctrica en puntos estratégicos de la Cuenca Wagner del Golfo de California con presencia de altos flujos de calor.

1.3.2 Objetivos específicos

- Establecer un modelo de sistema geotérmico de ciclo cerrado en un ambiente marino.
- Modelar el campo de temperaturas conductivo-convectivo en puntos estratégicos de la Cuenca Wagner.
- Con base a la información geológica, geofísica y térmica de la zona de estudio (disponible en la literatura) evaluar el calor disponible a diferentes profundidades.
- Evaluar escenarios para generación de energía eléctrica utilizando agua como fluido de trabajo.

Capítulo 2. Área de estudio

La Cuenca de Wagner se localiza en el Golfo de California, México, alrededor de los 31 °N de latitud y -114.2 °W de longitud (Figura 2). Según Suárez-Arriaga et al. (2014) el potencial geotérmico mínimo de esta zona es de $350 \text{ MW}_T/\text{km}^3$, lo cual es equivalente a 8100 MW_e , con una temperatura promedio de 350°C .

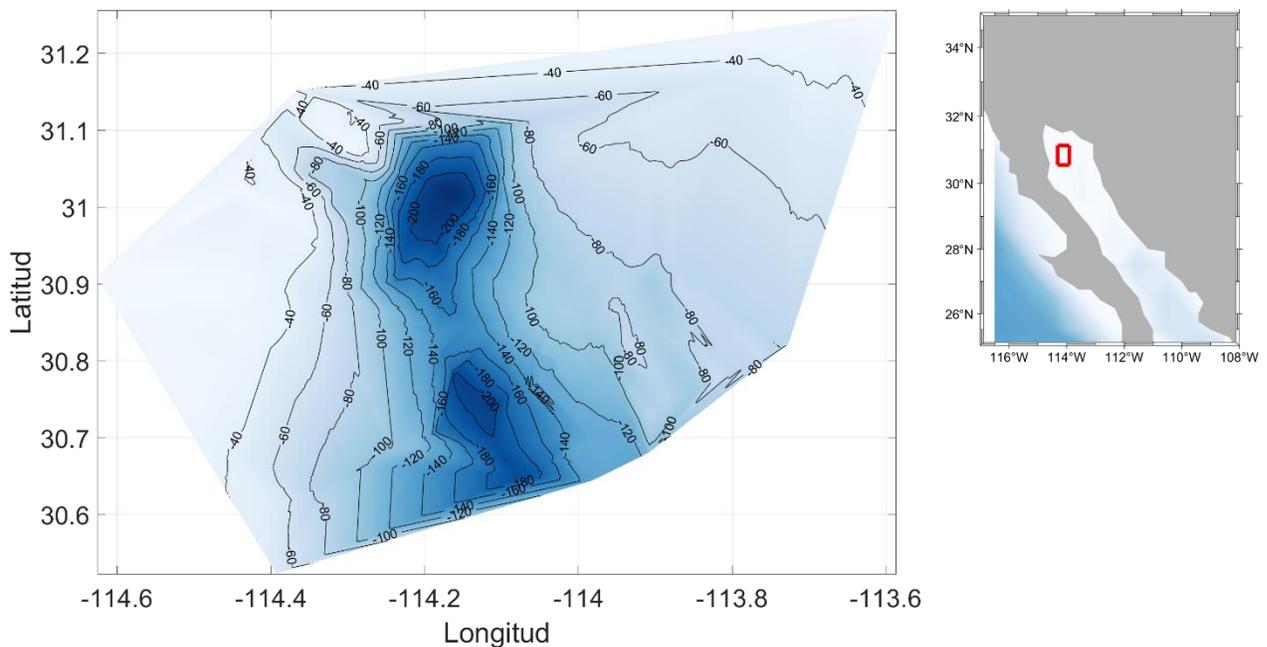


Figura 2. Localización y batimetría de la Cuenca Wagner.

2.1 Antecedentes

2.1.1 Golfo de California

Se estima que la formación del Golfo de California inicio con la subducción de la placa del Farallón bajo la placa de Norteamérica. El volcanismo relacionado con este movimiento se generó entre los 24-8 Ma. Se considera que la placa del Pacífico entró en contacto con la zona norte de Baja California hace 25 Ma. (Stock y Hodges, 1989).

La apertura del golfo comenzó aproximadamente hace 12 Ma en el mioceno, lo que generó un cambio de régimen tectónico, que pasó a ser del tipo transformante. También se generaron zonas de expansión de suelo oceánico en lo que hoy en día es el Golfo de California (Aragón-Arreola y Martin-Barajas, 2007).

Esta apertura dio lugar a una serie de cuencas transtensionales dentro del golfo. En el sur, estas cuencas se encuentran conectadas por fallas transformante, mientras que en el norte no se conectan adecuadamente (Contreras-Pérez et al., 2012) (Figura 2). Actualmente el norte del Golfo de California está constituido por fallas de tipo transformante con dirección NW-SE (Aragón-Arreola y Martin-Barajas, 2007) (Figura 2).

2.1.2 Cuenca de Wagner

La cuenca de Wagner es una cuenca de tipo pull apart, y es la que se encuentra más al norte del Golfo de California. Es una cuenca activa y es la menos profunda de las cuencas al norte del golfo, la cual tiene una profundidad máxima de aproximadamente 225 m.

Esta cuenca está gobernada por la falla de Wagner, que es una falla lístrica con dirección NNW-SSE y es una ramificación de la falla de Cerro Prieto que se localiza en la zona este de la cuenca (Figura 2) (Aragón-Arreola y Martin-Barajas, 2007; Helenes et al., 2009; Vázquez-Figueroa et al., 2009; Neumann et al., 2017).

Los datos sísmicos indican que la cuenca tiene una capa de sedimentos de aproximadamente 7-8 km de espesor. Los sedimentos de la Cuenca de Wagner así como de la región norte del Golfo de California provienen del Río Colorado que se encuentra al norte (Aragón-Arreola y Martin-Barajas, 2007; Helenes et al., 2009; Vázquez-Figueroa et al., 2009; Neumann et al., 2017).

Se estima que la salinidad y temperatura superficial del agua varían en función de la radiación y la humedad. El intervalo de la temperatura superficial del mar en esta zona varía en el transcurso del año, con 8.25 °C en diciembre (mes de invierno más frío) y 32.58 °C en agosto (mes de verano más caliente). La salinidad respectivamente es de 35.28 (partes por mil) en octubre y hasta 41.00 (partes por mil) en julio (Vázquez-Figueroa et al., 2009).

El aporte de agua dulce de Río Colorado no se considera significativo en la actualidad. En las fechas cercanas a los equinoccios se registra una inversión en el gradiente superficial de temperatura, a diferencia de la salinidad que mantiene su gradiente estable a lo largo del año (Vázquez-Figueroa et al., 2009).

2.1.3 Batimetría

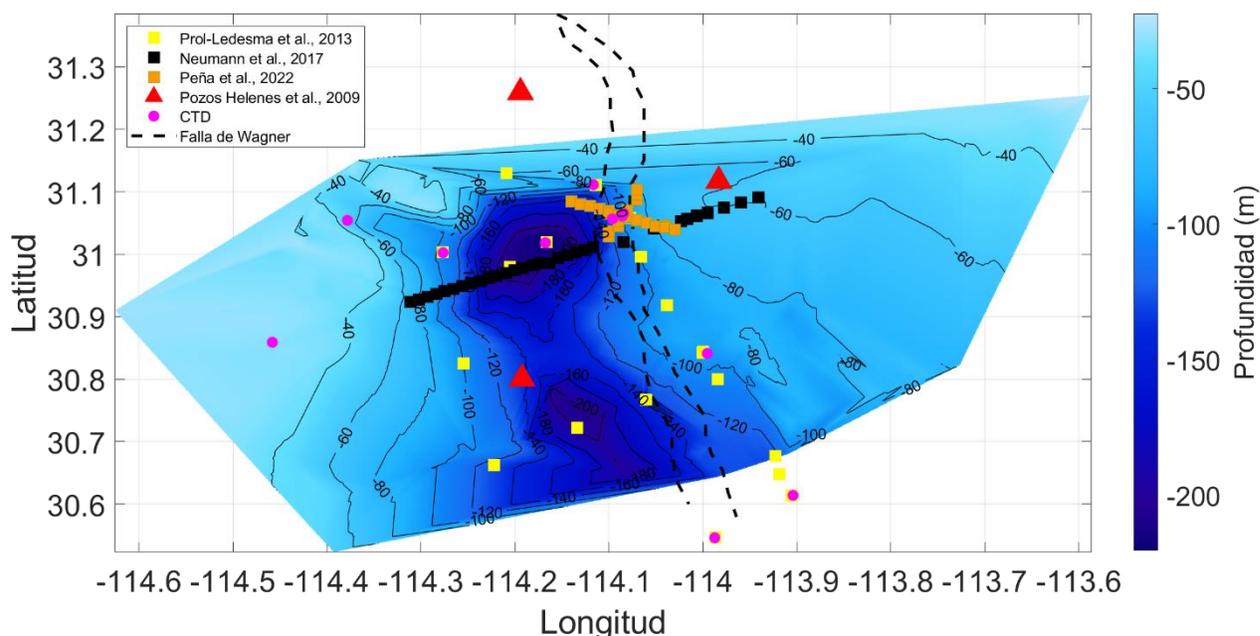


Figura 3. Mapa de la zona de estudio que incluye batimetría, colecta de datos de flujos de calor (Prol-Ledesma et al., 2013; Neumann et al., 2017; y Peña-Domínguez et al., 2022), localización de pozos (PEMEX), colecta de datos de conductividad, temperatura y profundidad (CTD por sus siglas en inglés) y en líneas punteadas la Falla de Wagner.

2.1.4 Flujo de calor

Canet et al. (2010) reportaron la presencia de emanaciones en forma de burbujas en la zona de la falla de Wagner, las cuales indicaron la existencia de gases debajo de los sedimentos de la cuenca, lo cual puede ser un indicador de altos flujos de calor (anomalías geotérmicas). En la última década, se han realizado algunas investigaciones para poder estimar el flujo de calor en esta cuenca y sus alrededores (Figura 3). En el año 2013, Prol Ledesma y colaboradores reportaron un flujo de calor promedio de 1.875 W/m^2 , con un rango de valores que van desde los 0.016 W/m^2 hasta los 15.436 W/m^2 (Tabla 1). Unos años después, Neumann et al. (2017) obtuvieron un valor promedio de 0.15 W/m^2 con un rango de $0.083\text{-}1.581 \text{ W/m}^2$ (Tabla 1). Ambos autores coincidieron en que al flanco este de la cuenca es la zona con mayor flujo de calor y lo asocian a la falla de Wagner. Con esta información Peña-Domínguez et al. (2022) realizaron un estudio en esta zona la cual denominaron “Devil’s Hole” de la cual estimaron un flujo de calor promedio de 3.788 W/m^2 con un intervalo de $0.295\text{-}10.894 \text{ W/m}^2$ (Tabla 1).

Tabla 1. Datos de flujo de calor (\dot{q}) y profundidad reportados por Prol-Ledesma et al., 2013; Neumann et al., 2017; y Peña-Domínguez et al., 2022.

Estación	Latitud	Longitud	Profundidad (m)	\dot{q} (W/m ²)
1	30.5467833	-113.986733	178	0.016
2	31.1108833	-114.1137	123	2.907
3	31.0619333	-114.086383	98	7.115
4	31.13	-114.208883	116	0.892
5	31.00305	-114.276933	97	1.216
6	30.98	-114.205283	214	0.042
7	31.02	-114.166383	213	0.027
8	30.825	-114.25445	98	0.229
9	30.6628	-114.221983	102	0.163
10	30.7218333	-114.133583	193	0.310
11	30.7672333	-114.060483	129	0.533
12	30.7998833	-113.98405	95	1.369
13	30.8441833	-113.9998	84	1.206
13A	30.84415	-113.9997	83	1.121
14	31.0616833	-114.085317	91	15.436
15	31.0589167	-114.077133	82	1.450
16	30.9958667	-114.065983	95	0.621
17	30.918	-114.038067	91	0.859
18	30.8419833	-114.000083	88	2.053
19	30.6772333	-113.922733	116	0.416
20	30.6484	-113.9184	123	0.709
21	30.6137333	-113.905383	115	2.559
HF007P05	30.9234	-114.3112	66	0.326
HF007P04	30.9277	-114.3022	76	0.223
HF007P03	30.932	-114.2929	85	0.201
HF007P02	30.9364	-114.2835	92	0.237
HF007P01	30.9405	-114.2747	102	0.151
HF006P08	30.9448	-114.2653	113	0.182
HF006P07	30.9488	-114.2557	127	0.123
HF006P06	30.9535	-114.2468	138	0.121
HF006P05	30.9572	-114.2373	163	0.106
HF006P04	30.9617	-114.2279	190	0.097
HF006P03	30.9656	-114.2197	197	0.087
HF006P02	30.97	-114.2093	202	0.086
HF006P01	30.9742	-114.2004	206	0.083
HF005P12	30.9784	-114.1916	208	0.086
HF005P11	30.9825	-114.1811	208	0.094
HF005P10	30.9862	-114.1731	207	0.099
HF005P09	30.986	-114.163	200	0.093
HF005P08	30.9945	-114.1539	202	0.111
HF005P07	30.9992	-114.1442	200	0.388
HF005P06	31.0034	-114.1349	191	0.440
HF005P05	31.0072	-114.1259	180	

Estación	Latitud	Longitud	Profundidad (m)	\dot{q} (W/m ²)
HF005P04	31.0111	-114.1168	160	1.005
HF008P02	31.02	-114.08425	103	
HF004P04	31.0415	-114.0518	75	0.774
HF010P03	31.0445	-114.048	75	1.570
HF004P03	31.0459	-114.0426	70	1.581
HF004P01	31.0533	-114.0233	65	0.981
HF003P01	31.0564	-114.0166	67	0.637
HF008P09	31.0621	-114.0065	62	
HF008P010	31.0662	-113.9951	62	0.913
HF008P011	31.0745	-113.9776	59	
HF008P012	31.0828	-113.9592	58	
HF008P013	31.0912	-113.9406	57	0.602
01HF009P06	31.0844	-114.14	158	0.180
02HF009P05	31.0799	-114.13	160	0.466
03HF009P04	31.0779	-114.12	153	0.559
04HF009P03	31.0731	-114.11	139	0.571
05HF009P02	31.0692	-114.1	127	0.929
06HF009P01	31.0654	-114.1	114	2.037
07HF011P08	31.0618	-114.09	104	4.699
09HF010P06	31.0604	-114.08	92	6.978
11HF010P05	31.0542	-114.07	84.5	3.822
12HF008P07	31.0548	-114.07	80	3.236
13HF010P04	31.0507	-114.06	79	2.432
15HF010P03	31.0446	-114.05	75	1.109
16HF004P03	31.046	-114.04	70	1.462
17HF010P02	31.0429	-114.04	70	0.799
18HF010P01	31.0391	-114.03	68.5	0.293
05HF010P10	31.0282	-114.1	130	2.203
06HF010P09	31.0364	-114.1	117	4.188
07HF011P08	31.0447	-114.09	116	6.756
08HF011P07	31.0531	-114.09	103	4.087
07HF011P08	31.0618	-114.09	104	4.699
11HF011P06	31.07	-114.08	95	2.654
13HF011P04	31.087	-114.07	85	1.145
14HF011P03	31.0951	-114.07	81	0.779
15HF011P02	31.1035	-114.07	76	1.221

Capítulo 3. Metodología

3.1 Sistemas geotérmicos de ciclo cerrado

Los sistemas geotérmicos de ciclo cerrado obtienen el calor de la Tierra mediante conducción entre el medio y el fluido de trabajo (en el presente estudio el fluido es agua), éste último no tiene contacto con el medio y no se toma en cuenta la porosidad del medio (Schulz S.U, 2008).

3.2 Transferencia de calor conductivo-convectivo

Cuando se tiene un fluido estático, la transferencia de calor solo depende de la conducción o difusión. Sin embargo, cuando se tiene un flujo, se tiene que tomar en cuenta la convección (Versteeg y Malalasekera, 2007). Para el análisis del sistema que se propone en este estudio, se considera que el medio tiene un intercambio de calor conductivo por lo tanto no se consideran las velocidades o flujos. El agua dentro de la tubería, por su parte, está en movimiento constante, por lo cual, se tiene que considerar el flujo convectivo, de hecho, la velocidad del fluido es tan alta (>1 m/s) que el fenómeno de conducción de calor puede ser despreciable (Figura 4).

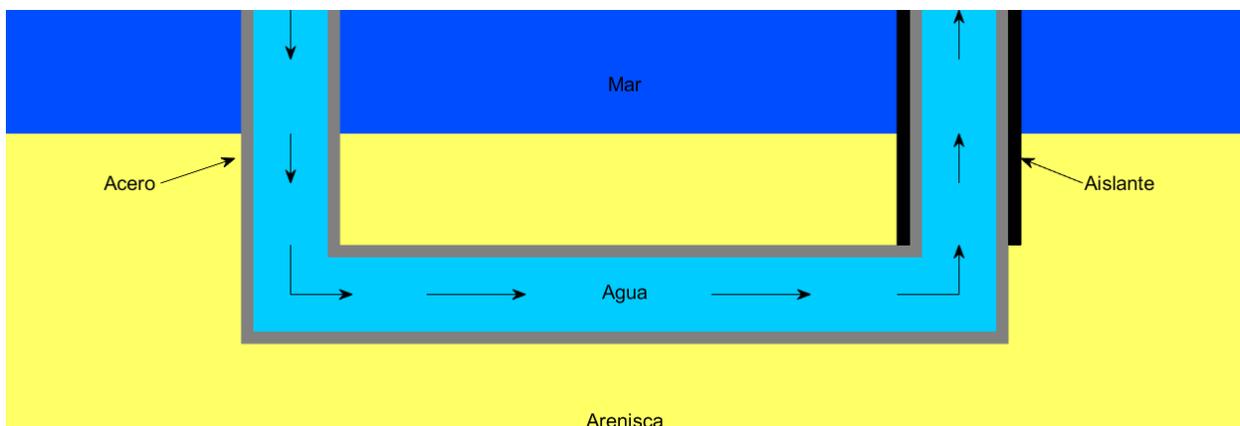


Figura 4. Modelo conceptual de un sistema geotérmico de ciclo cerrado en la Cuenca de Wagner.

3.3 Ecuaciones de conservación

Se utilizan los principios de conservación de masa, momentum y energía. Las ecuaciones gobernantes restantes deberán de respetar las siguientes leyes: Ley de conservación de masa, segunda ley de Newton y la primera ley de la termodinámica (Xamán y Gijón-Rivera, 2015). Las ecuaciones están en dos dimensiones donde “x” es la horizontal y “y” es la vertical.

3.3.1 Ecuación de masa

Describe los cambios de densidad experimentado por una partícula del fluido durante su camino en un campo de velocidades conocidas.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

donde ρ es la densidad del fluido (kg/m^3), t el tiempo (s), u velocidad (m/s) y x la distancia (m). El primer término de la izquierda es la variación de la densidad en el tiempo y el segundo término es el flujo neto de la masa saliendo del volumen de control por las fronteras (ρu_i) (Versteeg y Malalasekera, 2007; Xamán y Gijón-Rivera, 2015).

3.3.2 Ecuación de momentum

Estas ecuaciones describen el movimiento de un volumen en un flujo acelerado en dos dimensiones.

$$\rho \frac{Du}{Dt} = -\frac{\partial P}{\partial x} + \text{div}(\mu \text{ grad } u) + S_{Mx} \quad (2)$$

$$\rho \frac{Dv}{Dt} = -\frac{\partial P}{\partial y} + \text{div}(\mu \text{ grad } y) + S_{My} \quad (3)$$

donde ρ es la densidad del fluido (kg/m^3), t el tiempo (s), u y v son las velocidades en las direcciones x -y (m/s), x y y son las distancias en 2D (m), P es la presión (Pa), μ es la viscosidad (Pa s) y S_{Mx} y S_{My} son los términos de fuente en la horizontal y vertical.

3.3.3 Ecuación de energía

Esta ecuación indica que la cantidad de cambio de energía de una partícula es igual a la cantidad de calor adicionado al elemento más la cantidad de trabajo realizado sobre la partícula.

$$\frac{\partial(\rho T)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u T) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v T) = \frac{\partial}{\partial x}\left(k \frac{\partial T}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(k \frac{\partial T}{\partial y}\right) + S \quad (4)$$

donde ρ son las densidades del medio y del fluido (kg/m^3), T es la temperatura ($^{\circ}\text{C}$), t el tiempo (s), u y v son las velocidades (m/s), x y y son las distancias en 2D (m), k es la conductividad térmica ($\text{W/m}^{\circ}\text{C}$) y S es la fuente o sumidero.

3.4 Transferencia de calor

La transferencia de calor se puede dar por tres mecanismos, la conducción, la convección y la radiación. La conducción es la transferencia de energía de las partículas más energéticas de una sustancia a las adyacentes menos energéticas, como resultado de la interacción de partículas (Cengel y Boles, 2011). Esta se puede evaluar con la Ley de Fourier de conducción de calor:

$$q = -kA \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (5)$$

donde k es la conductividad térmica ($\text{W/m}^{\circ}\text{C}$), A es el área de contacto (m^2), T es la temperatura ($^{\circ}\text{C}$) y x es la distancia (m). La convección es la transferencia de energía entre la superficie sólida y el fluido adyacente que se encuentra en movimiento. La radiación es la transferencia de energía mediante ondas electromagnéticas (Cengel y Boles, 2011).

3.5 Propiedades térmicas iniciales

Las propiedades que se utilizan en el medio y los materiales del modelo son la conductividad térmica (k), densidad (ρ) y capacidad calorífica (C_p) (Tabla 2).

Tabla 2 Propiedades térmicas del medio y tubería (Fallah et al., 2021)¹(Barragán-Cárdenas, 2019)²(Kim, 1975)³(Sun et al., 2018)⁴.

	k (w/m°C)	ρ (kg/m ³)	C_p (J/kg°C)
Agua mar ¹	0.6	1027	4200
Arenisca ²	0.9	2500	920
Acero ³	15.0	7850	460
Agua ¹	0.6	1000	4200
Aislante ⁴	0.31	2140	2000

Otros parámetros por considerar son el flujo de calor (F_c [\dot{q}], el cual se puede obtener de la Ecuación 5), este se utiliza para poder estimar el gradiente de temperatura ($\partial T / \partial z$). La temperatura (T) se encuentra asociada con el gradiente de calor. A la presión (P) se le da un valor inicial según se considere adecuado.

3.5.1 Gradiente de temperatura

Para obtener la temperatura primero se estima el gradiente de temperatura en la columna de agua y en los estratos con la siguiente formula

$$\text{Gradiente} = \frac{F_c}{k} = \frac{\dot{q}}{k} \quad (6)$$

donde F_c (\dot{q}) es el flujo de calor (W/m²) y k es la conductividad térmica (W/m°C).

Como ejemplo, considerando un flujo de calor de 2 W/m², con una temperatura en la superficie del mar de 30 °C y de 15 °C en el fondo (200 m), se obtiene un gradiente de 0.075 °C/m. La temperatura en la superficie de la capa de arenisca (200 m) es de 15 °C y a los 400 m es superior a los 450 °C, lo cual da un gradiente de 2.22 °C/m (Figura 5).

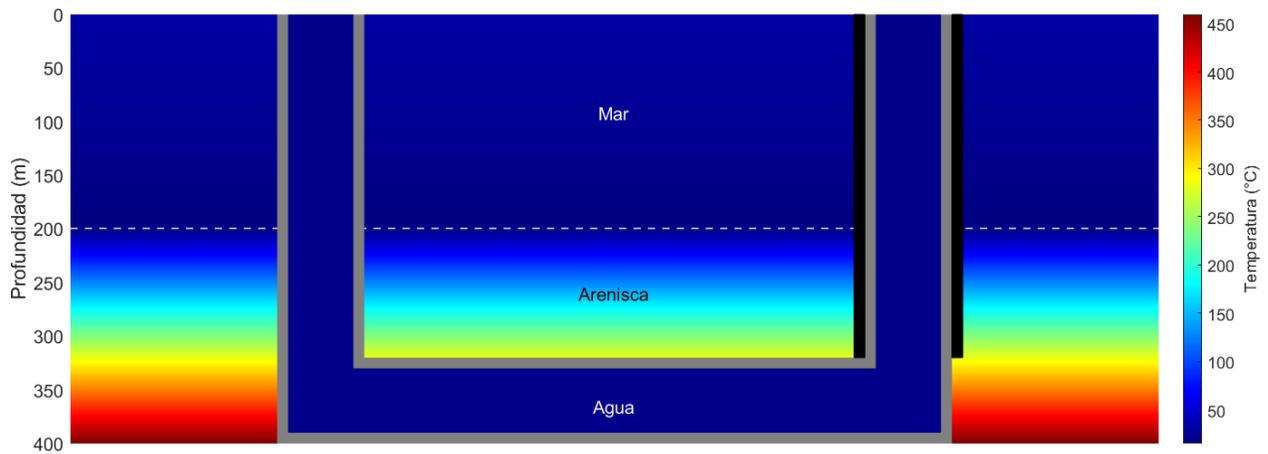


Figura 5 Campo inicial de temperaturas para un flujo de calor de 2 W/m^2 . La línea blanca representa el fondo marino.

3.6 Ecuaciones de estado del agua dentro de la tubería

3.6.1 Densidad

Para este parámetro se utilizaron los valores reportados por Cengel y Boles (2011), que se expresa como datos de volumen específico (m^3/kg), por lo que se dividieron entre uno para obtener la inversa, que es igual a la densidad. A partir de estos valores y mediante una regresión polinomial de cuarto orden se obtuvo una ecuación para poder obtener el parámetro deseado:

$$\rho = -1.3 \times 10^{-7} T^4 + 7.9 \times 10^{-5} T^3 - 0.018 T^2 + 0.85 T + 9.9 \times 10^2 \quad (7)$$

donde T corresponde a la temperatura ($^{\circ}\text{C}$).

3.6.2 Presión

Fallah et al. (2021) utilizaron la siguiente ecuación de presión (Pa), que es una función de la temperatura:

$$P = 1.57 \times 10^{-3} T^4 - 2.44 \times 10^{-1} T^3 + 3.3 \times 10^1 T^2 - 1.77 \times 10^3 T + 3.46 \times 10^4 \quad (8)$$

donde T corresponde a la temperatura ($^{\circ}\text{C}$).

3.6.3 Capacidad calorífica

De la misma manera que la ecuación anterior, Fallah et al. (2021) hicieron uso de una ecuación de capacidad de calor (J/kg°C) dependiente de la temperatura:

$$C_p = 1.16 \times 10^{-4} T^3 - 2.35 \times 10^{-2} T^2 + 1.61 T + 4.17 \times 10^3 \quad (9)$$

3.7 Variables físicas para la temperatura

El perfil de temperaturas dentro del sistema geotérmico de ciclo cerrado dependerá de los valores de las siguientes variables: (1) velocidad (m/s; en las direcciones x-y) de las cuales se probaron doce valores [0.5, 1, 1.5, 2, 2.5, 3, 3.5, 4, 4.5, 5, 5.5, 6]; (2) flujo de calor (W/m²) con cuatro valores [0.5, 1, 1.5, 2]; (3) diámetro de la tubería (ϕ ; m) [0.075, 0.15, 0.225]; (4) longitud horizontal (m) [500, 600, 700, 800, 900, 1000] y; (5) longitud vertical o profundidad (m; longitudes equivalentes tanto para la vertical de descenso como la de ascenso) [300, 350, 400]. Para esta última variable, se tiene que tomar en cuenta que en el área de estudio siempre se tienen 200 m de columna de agua, por lo tanto, si tenemos 300 m de profundidad, la capa de sedimentos solamente tendrá un espesor de 100 m.

Los valores de las cinco variables fueron escogidos de acuerdo con los siguientes criterios. Para las velocidades del fluido se consideraron los valores utilizados en otros trabajos, como el de Saucedo-Velázquez et al. (2022) que utiliza velocidades de 4 y 6 m/s, por lo que se seleccionó la velocidad de 6 m/s como la máxima. Para los valores de flujo de calor se consideraron los estudios de Neumann et al. (2017), Peña-Domínguez et al. (2022), y Prol-Ledesma et al. (2013). En la Tabla 1 se encuentran los valores que se consideraron para establecer el intervalo de valores de flujo de calor. Para el diámetro de la tubería se seleccionaron los valores nominales (comerciales) que se utilizan en la industria. Para los valores de longitud horizontal y la profundidad se hicieron corridas del modelo para obtener las configuraciones que nos dieran los valores más altos y que no superaran los 373.95 °C, ya que termodinámicamente si se tiene esa temperatura y una presión adecuada todavía se puede trabajar con agua saturada (líquido), por lo tanto, si superamos esa temperatura tendríamos que considerar agua en estado líquido y gaseoso lo cual complicaría los cálculos. Con los valores de los cinco parámetros, un total de 2592 configuraciones fueron modeladas (Tabla 3).

Tabla 3. Configuraciones para el modelado numérico del sistema geotérmico de ciclo cerrado.

Profundidad vertical [Z] (m)	Longitud horizontal [L] (m)	Diámetro [ϕ] (m)	Flujo de calor [\dot{q}] (W/m ²)	Velocidad [V] (m/s)	Configuraciones
300	500	0.075	0.5	0.5	2592
	600			1	
350	700	0.15	1	1.5	
	800			2	
400	900	0.225	1.5	2.5	
	1000			3	
				4	
				5	
			2	6	

3.8 Modelado

La solución de problemas de mecánica de fluidos (Dinámica de Fluidos Computacional; CFD por sus siglas en inglés) y de transferencia de calor se pueden abordar mediante tres métodos: experimentales, teóricos y computacionales. Los métodos experimentales son los que más se aproximan a la realidad, sin embargo, los fenómenos se tienen que reproducir generalmente a escala y el equipo para esto puede ser costoso. El método teórico o analítico suele tener buenos resultados y generalmente se obtiene una fórmula para estos, su problema radica en que los resultados tienden a ser lineales y se tienen que considerar geometrías y la física del fenómeno simples. Los métodos computacionales son los numéricos, estos no cuentan con los problemas de linealidad y geometrías básicas, el problema con este método puede ser el costo computacional y puede tener errores con las condiciones de fronteras (Xamán and Gijón-Rivera, 2015).

Entre los modelos numéricos se tienen el Método de Diferencias Finitas (MDF), Volumen Finito (MVF) y Elementos Finitos (MEF). Para el Método de Diferencias Finitas se comienza con la ecuación diferencial de una variable ϕ . Esta variable se representa por una serie de nodos dentro de una malla. Estas derivadas se reemplazan por aproximaciones finitas con ayuda de expansiones de series de Taylor. El resultado se presenta como una ecuación algebraica. Este método se puede utilizar para cualquier tipo de malla, sin embargo, tiene problemas con las mallas irregulares. Otros problemas son no se cumple con la

conservación de masa y que es preferible utilizar una geometría simple (Xamán y Gijón-Rivera, 2015). El Método de Elemento Finito se considera una generalización de los métodos de principio variacional y el método de mínimos cuadrados. La manera más sencilla del método es la interpolación lineal de cada elemento. Una de sus ventajas es que puede ser implementado para geometrías complejas (Xamán y Gijón-Rivera, 2015).

El Método de Volumen Finito utiliza la integral de las ecuaciones de conservación. Se genera una malla separada en volúmenes de control, cada uno de estos son resueltos mediante la ecuación de conservación. El centro de cada volumen de control tiene un nodo en donde se almacenan los parámetros escalares (densidad, capacidad calorífica y conductividad térmica), los valores en las paredes de los nodos son los parámetros vectoriales (velocidad y presión). Este método sí es adecuado para mallas con geometrías complejas, es fácil de programar, tiene la ventaja de ser conservativo con las ecuaciones de masa, momentum y energía, y solo tiene problemas en el aumento de dimensiones debido a que se tienen que realizar una mayor cantidad de interpolaciones (Xamán y Gijón-Rivera, 2015). La manera más simple de este modelo es un sistema de pura conducción en estado estable. En este trabajo se utilizarón dos dimensiones, por lo tanto el modelo se definió de la siguiente manera:

$$\frac{d}{dx}\left(k\frac{dT}{dx}\right) + \frac{d}{dy}\left(k\frac{dT}{dy}\right) + S = 0 \quad (10)$$

donde k es la conductividad térmica, T es la temperatura y S es el término fuente o sumidero. Ya que dentro de la tubería se considera un flujo convectivo se tienen que considerar la densidad (kg/m^3), la velocidad horizontal u (m/s) y la velocidad vertical v (m/s), por lo tanto, el problema tiene que cambiar a uno difusivo-convectivo y se representa de la siguiente manera:

$$\frac{d}{dx}(\rho u T) + \frac{d}{dy}(\rho v T) = \frac{d}{dx}k\left(\frac{dT}{dx}\right) + \frac{d}{dy}k\left(\frac{dT}{dy}\right) \quad (11)$$

De los resultados de estas ecuaciones se obtiene una matriz, que se puede considerar una malla de dos dimensiones, que se separa en 9 regiones. Cada región tiene una cierta cantidad de volúmenes de control, que se obtienen de las ecuaciones discretizadas. En este caso se busca la temperatura (T). Las ecuaciones

para la obtención de esta dependerán de las fronteras que tenga. Para este problema se optó por resolver la malla de arriba hacia abajo y de izquierda a derecha (Figura 6).

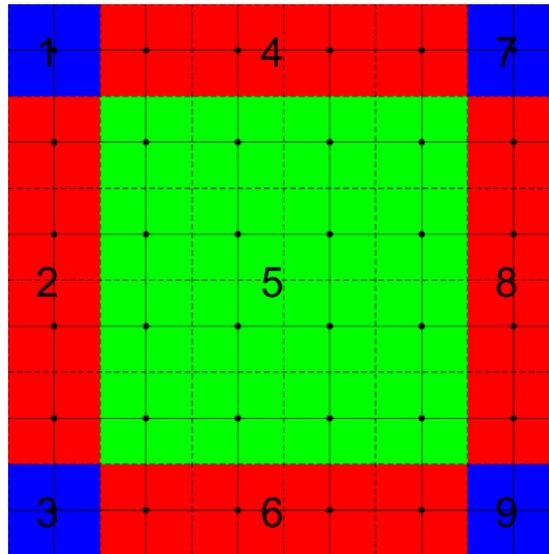


Figura 6. Ejemplo de una malla de 2D con las nueve regiones donde se discretiza la ecuación de transferencia de calor difusivo-convectivo.

Para poder distinguir los nodos vecinos, primero se identifica un nodo central. En la Figura 7 se identificó este nodo como P. Los nodos vecinos son oeste (W), este (E), norte (N) y sur (S). También se identificaron las orientaciones de las caras (paredes) del nodo, oeste (w), este (e), norte (n) y sur (s). Δ se refiere a las distancias entre nodos vecinos y δ son la separación de las paredes del volumen de control. Una vez orientados, la Ecuación 4 se puede arreglar de la siguiente forma:

$$\begin{aligned}
 &(\rho u C_p \delta_x T)_e - (\rho u C_p \delta_x T)_w + (\rho v C_p \delta_y T)_n - (\rho v C_p \delta_y T)_s \\
 &= \left(kA \frac{dT}{dx} \right)_e + \left(kA \frac{dT}{dx} \right)_w + \left(kA \frac{dT}{dy} \right)_n + \left(kA \frac{dT}{dy} \right)_s
 \end{aligned} \tag{12}$$

Si tenemos en cuenta que $F = \rho u C_p \delta$ es un flujo convectivo y que $D = kA \frac{dT}{dy}$ es un flujo difusivo entonces se reemplazan estos términos en las direcciones este, oeste, norte y sur como se puede apreciar en la Tabla 4.

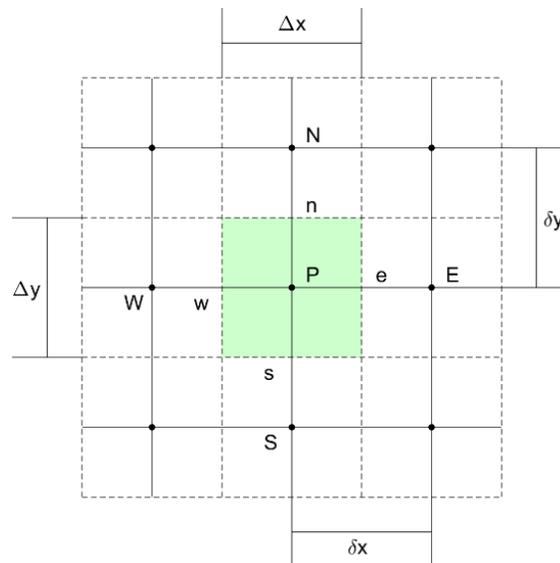


Figura 7. En esta figura se puede apreciar el centro de un volumen de control "P", las cuatro caras (paredes) del volumen de control en letras minúsculas y los nodos vecinos en letras mayúsculas. Las δ representan la distancia entre nodos y Δ la longitud de la pared de volumen de control.

3.8.1 Fronteras

Las fronteras dentro del campo de volúmenes de control tienen que considerarse ya que los parámetros y las propiedades térmicas pueden establecerse de manera particular. En una malla cuadrada se tienen cuatro fronteras, norte, sur, este y oeste. En la Figura 8 se pueden apreciar las fronteras de una malla en 2D.

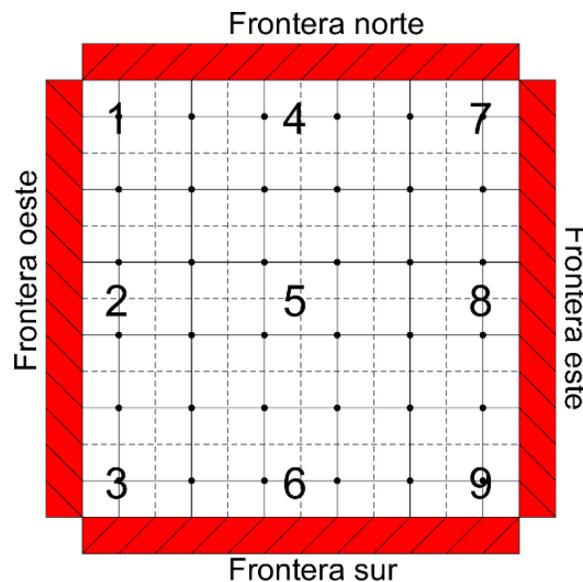


Figura 8. Malla numérica en 2D. Las cuatro fronteras cardinales están representadas de color rojo donde se puede apreciar que no forman parte de la malla.

3.8.2 Ejemplo de malla y campo de velocidades iniciales

Inicialmente se trabajó con una sola malla para la tubería, pero debido a dificultades con las ecuaciones de momentum se optó por simplificar el modelo a tres mallas separadas. Gracias a esto se pudo trabajar con un campo de velocidades con vectores rectos en dirección al flujo del fluido (Figuras 9 y 10).

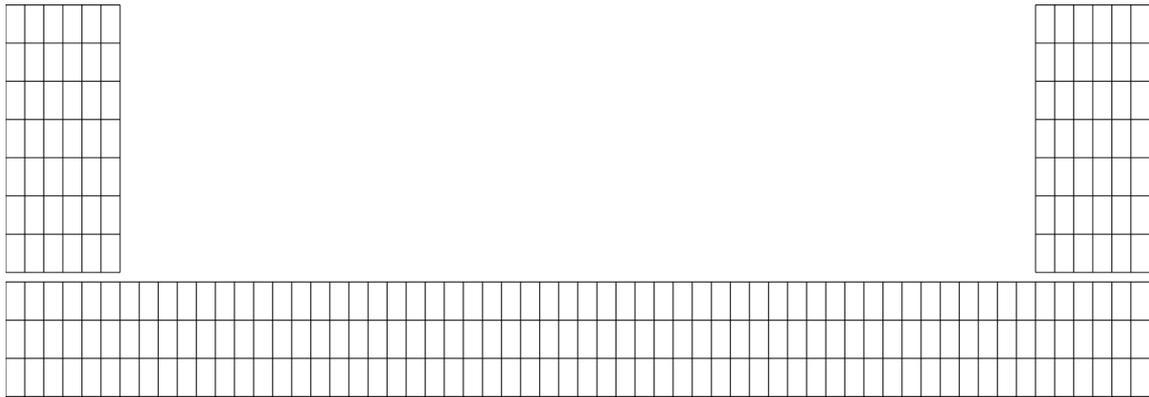


Figura 9. Ejemplo de las mallas utilizadas para el modelo con una escala arbitraria.

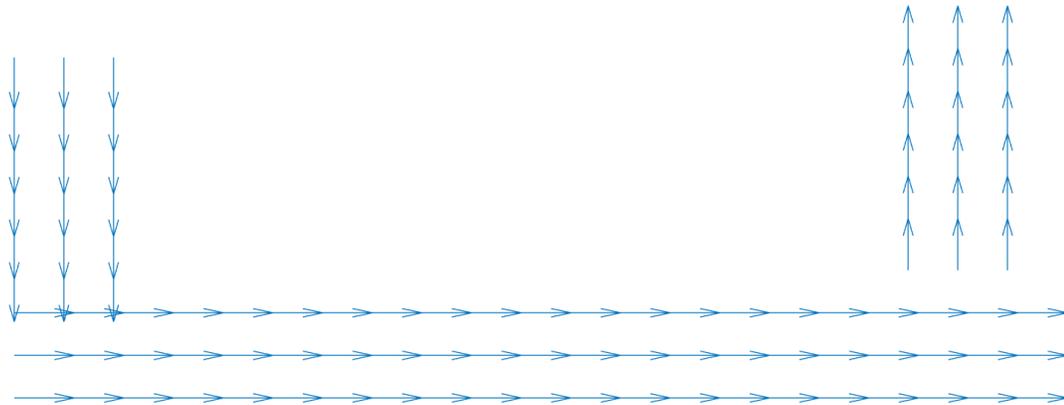


Figura 10 Ejemplo de vectores de velocidad en direcciones x-y con escala arbitraria.

3.8.3 Corrección del campo de velocidades (paredes de la tubería)

$$u_w = \frac{(\rho v A)_n - (\rho v A)_s + (\rho u A)_e}{(\rho A)_w} \quad (13)$$

Tabla 4. Valor de los parámetros F y D de la ecuación discretizada de transferencia de calor difusivo-convectivo.

$F_e = (\rho u C_P \delta_{xe})_e$	$F_w = (\rho u C_P \delta_{xw})_w$	$F_n = (\rho v C_P \delta_{yn})_n$	$F_s = (\rho v C_P \delta_{ys})_s$
$D_e = \frac{k_e}{\delta x_{PE}}$	$D_w = \frac{k_w}{\delta x_{WP}}$	$D_n = \frac{k_n}{\delta y_{PN}}$	$D_s = \frac{k_s}{\delta y_{PS}}$

Una vez remplazados los valores se obtiene la siguiente ecuación general discretizada:

$$\begin{aligned}
 F_e T_e - F_w T_w + F_n T_n - F_s T_s \\
 = D_e (T_E - T_P) - D_w (T_P - T_W) + D_n (T_N - T_P) \\
 - D_s (T_P - T_S)
 \end{aligned} \quad (14)$$

3.8.4 Esquemas de discretización

Se propusieron dos esquemas para resolver este problema, Esquema de diferencias centrales y Esquema Up-Wind. Para conocer el tipo de esquema es más apropiado, se utilizó el número adimensional de Peclet $Pe = F/D$. Un valor de $Pe < 2$ indica que la difusión tiene un papel importante en la solución de las ecuaciones y por lo tanto se aconseja usar el Esquema de diferencias centrales. Por otro lado, si $Pe > 2$ el problema es mayormente convectivo y por lo tanto se aconseja la utilización del Esquema Up-Wind.

3.8.5 Esquema Up-Wind

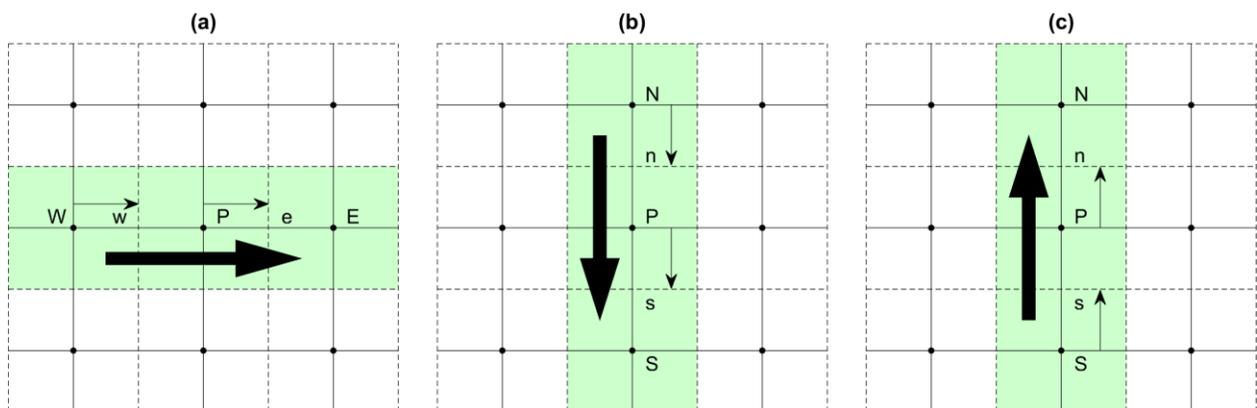


Figura 11. Representación gráfica de cómo se desplaza el valor de la temperatura según la dirección del flujo.

En el presente estudio se obtuvo un $Pe > 2$ en todos los valores dentro de la tubería, por lo cual, se hizo uso de Esquema Up-Wind. Para este esquema se considera la dirección del flujo, ya que se está trabajando en dos dimensiones, las direcciones son horizontales y verticales. Para hacer uso de este esquema se hizo un cambio en las temperaturas de los nodos vecinos como se muestra en la Ecuación 16, utilizando las temperaturas que se muestran en la Figura 11 y Tabla 5.

Tabla 5. Temperaturas en las caras (paredes) del volumen de control con el esquema de discretización Up-Wind con dirección oeste-este norte-sur.

$T_e = T_P$	$T_w = T_W$	$T_n = T_N$	$T_s = T_P$
-------------	-------------	-------------	-------------

con la dirección oeste-este norte-sur la ecuación se ve de la siguiente manera

$$\begin{aligned}
 F_e T_P - F_w T_W + F_n T_N - F_s T_P \\
 = D_e (T_E - T_P) - D_w (T_P - T_W) + D_n (T_N - T_P) \\
 - D_s (T_P - T_S)
 \end{aligned} \tag{15}$$

A continuación, se muestra la discretización para la Ecuación 4 de conducción-convección en estado transitorio en cada región de la malla en 2D (ver Figura 6).

$$\begin{aligned}
 \alpha (T_P - T_{P^o}) + F_e T_P - F_w T_W + F_n T_N - F_s T_P \\
 = D_e (T_E - T_P) - D_w (T_P - T_W) + D_n (T_N - T_P) \\
 - D_s (T_P - T_S)
 \end{aligned} \tag{16}$$

Donde α es el termino transitorio es

$$\alpha = \frac{\rho C_p A}{t} \tag{17}$$

Donde ρ es densidad (Kg/m^3), C_p es capacidad calorífica ($\text{J/Kg}^\circ\text{C}$), A es un área (m^2) y t es el tiempo (s).

3.8.5.1 Región 1

$$\begin{aligned}
& \alpha(T_P - T_{P^\circ}) + F_e T_P - F_w T_{Wf} + F_n T_{Nf} - F_s T_P \\
& = D_e(T_E - T_P) - 2D_w(T_P - T_{Wf}) + 2D_n(T_{Nf} - T_P) \\
& \quad - D_s(T_P - T_S)
\end{aligned} \tag{18}$$

$$\begin{aligned}
& \alpha T_P - \alpha T_{P^\circ} + F_e T_P - F_w T_{Wf} + F_n T_{Nf} - F_s T_P \\
& = D_e T_E - D_e T_P - 2D_w T_P + 2D_w T_{Wf} + 2D_n T_{Nf} - 2D_n T_P \\
& \quad - D_s T_P + D_s T_S
\end{aligned} \tag{19}$$

$$\begin{aligned}
& \alpha T_P + F_e T_P - F_s T_P + D_e T_P + 2D_w T_P + 2D_n T_P + D_s T_P \\
& = D_e T_E + 2D_w T_{Wf} + 2D_n T_{Nf} + D_s T_S + F_w T_{Wf} - F_n T_{Nf} \\
& \quad + \alpha T_{P^\circ}
\end{aligned} \tag{20}$$

$$\begin{aligned}
& (\alpha + F_e - F_s + D_e + 2D_w + 2D_n + D_s) T_P \\
& = D_e T_E + (2D_w + F_w) T_{Wf} + (2D_n - F_n) T_{Nf} + D_s T_S \\
& \quad + \alpha T_{P^\circ}
\end{aligned} \tag{21}$$

$$\begin{aligned}
& [\alpha + D_e + (2D_w + F_w) + (F_e - F_w) + (2D_n - F_n) + D_s + (F_n - F_s)] T_P \\
& = D_e T_E + (2D_w + F_w) T_{Wf} + (2D_n - F_n) T_{Nf} + D_s T_S \\
& \quad + \alpha T_{P^\circ}
\end{aligned} \tag{22}$$

3.8.5.2 Región 2

$$\begin{aligned}
& \alpha(T_P - T_{P^\circ}) + F_e T_P - F_w T_{Wf} + F_n T_N - F_s T_P \\
& = D_e(T_E - T_P) - 2D_w(T_P - T_{Wf}) + D_n(T_N - T_P) \\
& \quad - D_s(T_P - T_S)
\end{aligned} \tag{23}$$

$$\begin{aligned}
& \alpha T_P - \alpha T_{P^\circ} + F_e T_P - F_w T_{Wf} + F_n T_N - F_s T_P \\
& = D_e T_E - D_e T_P - 2D_w T_P + 2D_w T_{Wf} + D_n T_N - D_n T_P \\
& \quad - D_s T_P + D_s T_S
\end{aligned} \tag{24}$$

$$\begin{aligned}
& \alpha T_P + F_e T_P - F_s T_P + D_e T_P + 2D_w T_P + D_n T_P + D_s T_P \\
& = D_e T_E + 2D_w T_{Wf} + D_n T_N + D_s T_S + F_w T_{Wf} - F_n T_N \\
& \quad + \alpha T_{P^\circ}
\end{aligned} \tag{25}$$

$$\begin{aligned}
& (\alpha + F_e - F_s + D_e + 2D_w + D_n + D_s) T_P \\
& = D_e T_E + (2D_w + F_w) T_{Wf} + (D_n - F_n) T_N + D_s T_S + \alpha T_{P^\circ}
\end{aligned} \tag{26}$$

$$\begin{aligned}
& [\alpha + D_e + (2D_w + F_w) + (F_e - F_w) + (D_n - F_n) + D_s + (F_n - F_s)] T_P \\
& = D_e T_E + (2D_w + F_w) T_{Wf} + (D_n - F_n) T_N + D_s T_S + \alpha T_{P^\circ}
\end{aligned} \tag{27}$$

3.8.5.3 Región 3

$$\begin{aligned}
& \alpha(T_P - T_{P^\circ}) + F_e T_P - F_w T_{Wf} + F_n T_N - F_s T_P \\
& = D_e(T_E - T_P) - 2D_w(T_P - T_{Wf}) + D_n(T_N - T_P) \\
& \quad - 2D_s(T_P - T_{Sf})
\end{aligned} \tag{28}$$

$$\begin{aligned}
& \alpha T_P - \alpha T_{P^\circ} + F_e T_P - F_w T_{Wf} + F_n T_N - F_s T_P \\
& = D_e T_E - D_e T_P - 2D_w T_P + 2D_w T_{Wf} + D_n T_N - D_n T_P \\
& \quad - 2D_s T_P + 2D_s T_{Sf}
\end{aligned} \tag{29}$$

$$\begin{aligned}
& \alpha T_P + F_e T_P - F_s T_P + D_e T_P + 2D_w T_P + D_n T_P + 2D_s T_P \\
& = D_e T_E + 2D_w T_{Wf} + D_n T_N + 2D_s T_{Sf} + F_w T_{Wf} - F_n T_N \\
& \quad + \alpha T_{P^\circ}
\end{aligned} \tag{30}$$

$$\begin{aligned}
& (\alpha + F_e - F_s + D_e + 2D_w + D_n + 2D_s)T_P \\
& = D_e T_E + (2D_w + F_w)T_{Wf} + (D_n - F_n)T_N + 2D_s T_{Sf} \\
& + \alpha T_{P^\circ}
\end{aligned} \tag{31}$$

$$\begin{aligned}
& [\alpha + D_e + (2D_w + F_w) + (F_e - F_w) + (D_n - F_n) + 2D_s + (F_n - F_s)]T_P \\
& = D_e T_E + (2D_w + F_w)T_{Wf} + (D_n - F_n)T_N + 2D_s T_{Sf} \\
& + \alpha T_{P^\circ}
\end{aligned} \tag{32}$$

3.8.5.4 Región 4

$$\begin{aligned}
& \alpha(T_P - T_{P^\circ}) + F_e T_P - F_w T_W + F_n T_{Nf} - F_s T_P \\
& = D_e(T_E - T_P) - D_w(T_P - T_W) + 2D_n(T_{Nf} - T_P) \\
& - D_s(T_P - T_S)
\end{aligned} \tag{33}$$

$$\begin{aligned}
& \alpha T_P - \alpha T_{P^\circ} + F_e T_P - F_w T_W + F_n T_{Nf} - F_s T_P \\
& = D_e T_E - D_e T_P - D_w T_P + D_w T_W + 2D_n T_{Nf} - 2D_n T_P \\
& - D_s T_P + D_s T_S
\end{aligned} \tag{34}$$

$$\begin{aligned}
& \alpha T_P + F_e T_P - F_s T_P + D_e T_P + D_w T_P + 2D_n T_P + D_s T_P \\
& = D_e T_E + D_w T_W + 2D_n T_{Nf} + D_s T_S + F_w T_W - F_n T_{Nf} \\
& + \alpha T_{P^\circ}
\end{aligned} \tag{35}$$

$$\begin{aligned}
& (\alpha + F_e - F_s + D_e + D_w + 2D_n + D_s)T_P \\
& = D_e T_E + (D_w + F_w)T_W + (2D_n - F_n)T_{Nf} + D_s T_S + \alpha T_{P^\circ}
\end{aligned} \tag{36}$$

$$\begin{aligned}
& [\alpha + D_e + (D_w + F_w) + (F_e - F_w) + (2D_n - F_n) + D_s + (F_n - F_s)]T_P \\
& = D_e T_E + (D_w + F_w)T_W + (2D_n - F_n)T_{Nf} + D_s T_S + \alpha T_{P^\circ}
\end{aligned} \tag{37}$$

3.8.5.5 Región 5

$$\begin{aligned}
& \alpha(T_P - T_{P^\circ}) + F_e T_P - F_w T_W + F_n T_N - F_s T_P \\
& \quad = D_e(T_E - T_P) - D_w(T_P - T_W) + D_n(T_N - T_P) \\
& \quad \quad - D_s(T_P - T_S)
\end{aligned} \tag{38}$$

$$\begin{aligned}
& \alpha T_P - \alpha T_{P^\circ} + F_e T_P - F_w T_W + F_n T_N - F_s T_P \\
& \quad = D_e T_E - D_e T_P - D_w T_P + D_w T_W + D_n T_N - D_n T_P - D_s T_P \\
& \quad \quad + D_s T_S
\end{aligned} \tag{39}$$

$$\begin{aligned}
& \alpha T_P + F_e T_P - F_s T_P + D_e T_P + D_w T_P + D_n T_P + D_s T_P \\
& \quad = D_e T_E + D_w T_W + D_n T_N + D_s T_S + F_w T_W - F_n T_N + \alpha T_{P^\circ}
\end{aligned} \tag{40}$$

$$\begin{aligned}
& (\alpha + F_e - F_s + D_e + D_w + D_n + D_s) T_P \\
& \quad = D_e T_E + (D_w + F_w) T_W + (D_n - F_n) T_N + D_s T_S + \alpha T_{P^\circ}
\end{aligned} \tag{41}$$

$$\begin{aligned}
& [\alpha + D_e + (D_w + F_w) + (F_e - F_w) + (D_n - F_n) + D_s + (F_n - F_s)] T_P \\
& \quad = D_e T_E + (D_w + F_w) T_W + (D_n - F_n) T_N + D_s T_S + \alpha T_{P^\circ}
\end{aligned} \tag{42}$$

3.8.5.6 Región 6

$$\begin{aligned}
& \alpha(T_P - T_{P^\circ}) + F_e T_P - F_w T_W + F_n T_N - F_s T_P \\
& \quad = D_e(T_E - T_P) - D_w(T_P - T_W) + D_n(T_N - T_P) \\
& \quad \quad - 2D_s(T_P - T_{Sf})
\end{aligned} \tag{43}$$

$$\begin{aligned}
& \alpha T_P - \alpha T_{P^\circ} + F_e T_P - F_w T_W + F_n T_N - F_s T_P \\
& \quad = D_e T_E - D_e T_P - D_w T_P + D_w T_W + D_n T_N - D_n T_P - 2D_s T_P \\
& \quad \quad + 2D_s T_{Sf}
\end{aligned} \tag{44}$$

$$\begin{aligned}
& \alpha T_P + F_e T_P - F_s T_P + D_e T_P + D_w T_P + D_n T_P + 2D_s T_P \\
& \quad = D_e T_E + D_w T_W + D_n T_N + 2D_s T_{Sf} + F_w T_W - F_n T_N + \alpha T_{P^\circ}
\end{aligned} \tag{45}$$

$$\begin{aligned}
& (\alpha + F_e - F_s + D_e + D_w + D_n + 2D_s)T_P \\
& = D_e T_E + (D_w + F_w)T_W + (D_n - F_n)T_N + 2D_s T_{Sf} + \alpha T_{P^\circ}
\end{aligned} \tag{46}$$

$$\begin{aligned}
& [\alpha + D_e + (D_w + F_w) + (F_e - F_w) + (D_n - F_n) + 2D_s + (F_n - F_s)]T_P \\
& = D_e T_E + (D_w + F_w)T_W + (D_n - F_n)T_N + 2D_s T_{Sf} + \alpha T_{P^\circ}
\end{aligned} \tag{47}$$

3.8.5.7 Región 7

$$\begin{aligned}
& \alpha(T_P - T_{P^\circ}) + F_e T_P - F_w T_W + F_n T_{Nf} - F_s T_P \\
& = 2D_e(T_{Ef} - T_P) - D_w(T_P - T_W) + 2D_n(T_{Nf} - T_P) \\
& \quad - D_s(T_P - T_S)
\end{aligned} \tag{48}$$

$$\begin{aligned}
& \alpha T_P - \alpha T_{P^\circ} + F_e T_P - F_w T_W + F_n T_{Nf} - F_s T_P \\
& = 2D_e T_{Ef} - 2D_e T_P - D_w T_P + D_w T_W + 2D_n T_{Nf} - 2D_n T_P \\
& \quad - D_s T_P + D_s T_S
\end{aligned} \tag{49}$$

$$\begin{aligned}
& \alpha T_P + F_e T_P - F_s T_P + 2D_e T_P + D_w T_P + 2D_n T_P + D_s T_P \\
& = 2D_e T_{Ef} + D_w T_W + 2D_n T_{Nf} + D_s T_S + F_w T_W - F_n T_{Nf} \\
& \quad + \alpha T_{P^\circ}
\end{aligned} \tag{50}$$

$$\begin{aligned}
& (\alpha + F_e - F_s + 2D_e + D_w + 2D_n + D_s)T_P \\
& = 2D_e T_{Ef} + (D_w + F_w)T_W + (2D_n - F_n)T_{Nf} + D_s T_S \\
& \quad + \alpha T_{P^\circ}
\end{aligned} \tag{51}$$

$$\begin{aligned}
& [\alpha + 2D_e + (D_w + F_w) + (F_e - F_w) + (2D_n - F_n) + D_s + (F_n - F_s)]T_P \\
& = 2D_e T_{Ef} + (D_w + F_w)T_W + (2D_n - F_n)T_{Nf} + D_s T_S \\
& \quad + \alpha T_{P^\circ}
\end{aligned} \tag{52}$$

3.8.5.8 Región 8

$$\begin{aligned}
& \alpha(T_P - T_{P^\circ}) + F_e T_P - F_w T_W + F_n T_N - F_s T_P \\
& = 2D_e(T_{Ef} - T_P) - D_w(T_P - T_W) + D_n(T_N - T_P) \\
& \quad - D_s(T_P - T_S)
\end{aligned} \tag{53}$$

$$\begin{aligned}
& \alpha T_P - \alpha T_{P^\circ} + F_e T_P - F_w T_W + F_n T_N - F_s T_P \\
& = 2D_e T_{Ef} - 2D_e T_P - D_w T_P + D_w T_W + D_n T_N - D_n T_P \\
& \quad - D_s T_P + D_s T_S
\end{aligned} \tag{54}$$

$$\begin{aligned}
& \alpha T_P + F_e T_P - F_s T_P + 2D_e T_P + D_w T_P + D_n T_P + D_s T_P \\
& = 2D_e T_{Ef} + D_w T_W + D_n T_N + D_s T_S + F_w T_W - F_n T_N + \alpha T_{P^\circ}
\end{aligned} \tag{55}$$

$$\begin{aligned}
& (\alpha + F_e - F_s + 2D_e + D_w + D_n + D_s) T_P \\
& = 2D_e T_{Ef} + (D_w + F_w) T_W + (D_n - F_n) T_N + D_s T_S + \alpha T_{P^\circ}
\end{aligned} \tag{56}$$

$$\begin{aligned}
& [\alpha + 2D_e + (D_w + F_w) + (F_e - F_w) + (D_n - F_n) + D_s + (F_n - F_s)] T_P \\
& = 2D_e T_{Ef} + (D_w + F_w) T_W + (D_n - F_n) T_N + D_s T_S + \alpha T_{P^\circ}
\end{aligned} \tag{57}$$

3.8.5.9 Región 9

$$\begin{aligned}
& \alpha(T_P - T_{P^\circ}) + F_e T_P - F_w T_W + F_n T_N - F_s T_P \\
& = 2D_e(T_{Ef} - T_P) - D_w(T_P - T_W) + D_n(T_N - T_P) \\
& \quad - 2D_s(T_P - T_{Sf})
\end{aligned} \tag{58}$$

$$\begin{aligned}
& \alpha T_P - \alpha T_{P^\circ} + F_e T_P - F_w T_W + F_n T_N - F_s T_P \\
& = 2D_e T_{Ef} - 2D_e T_P - D_w T_P + D_w T_W + D_n T_N - D_n T_P \\
& \quad - 2D_s T_P + 2D_s T_{Sf}
\end{aligned} \tag{59}$$

$$\begin{aligned}
& \alpha T_P + F_e T_P - F_s T_P + 2D_e T_P + D_w T_P + D_n T_P + 2D_s T_P \\
& = 2D_e T_{Ef} + D_w T_W + D_n T_N + 2D_s T_{Sf} + F_w T_W - F_n T_N \\
& \quad + \alpha T_{P^\circ}
\end{aligned} \tag{60}$$

$$\begin{aligned}
& (\alpha + F_e - F_s + 2D_e + D_w + D_n + 2D_s)T_P \\
& = 2D_e T_{Ef} + (D_w + F_w)T_W + (D_n - F_n)T_N + 2D_s T_{Sf} \\
& + \alpha T_P^\circ
\end{aligned} \tag{61}$$

$$\begin{aligned}
& [\alpha + 2D_e + (D_w + F_w) + (F_e - F_w) + (D_n - F_n) + 2D_s + (F_n - F_s)]T_P \\
& = 2D_e T_{Ef} + (D_w + F_w)T_W + (D_n - F_n)T_N + 2D_s T_S + \alpha T_P^\circ
\end{aligned} \tag{62}$$

3.8.5.10 Coeficientes

Tabla 6. Coeficientes resultantes de la discretización de las nueve ecuaciones.

Región	a _E	a _w	a _N	a _S
1	D _e	0	0	D _s
2	D _e	0	D _n +F _n	D _s
3	D _e	0	D _n +F _n	0
4	D _e	D _w -F _w	0	D _s
5	D _e	D _w -F _w	D _n +F _n	D _s
6	D _e	D _w -F _w	D _n +F _n	0
7	0	D _w -F _w	0	D _s
8	0	D _w -F _w	D _n +F _n	D _s
9	0	D _w -F _w	D _n +F _n	0

Tabla 7. Continuación de la tabla anterior con los dos coeficientes faltantes*.

Región	S _U	S _P
1	(2D _{wf} +F _{wf})T _{wf} +(2D _{nf} -F _{nf})T _{Nf} +a _S T _S +αT _P	-(2D _{wf} +F _{wf})-(2D _{nf} -F _{nf})-(F _e -F _w)-(F _n -F _s)
2	(2D _{wf} +F _{wf})T _{wf} +a _N T _N +a _S T _S +αT _P	-(2D _{wf} +F _{wf})-(F _e -F _w)-(F _n -F _s)
3	(2D _{wf} +F _{wf})T _{wf} +a _N T _N +(2D _{sf})T _S +αT _P	-(2D _{wf} +F _{wf})-(2D _{sf})-(F _e -F _w)-(F _n -F _s)
4	(2D _{nf} -F _{nf})T _{Nf} +a _S T _S +αT _P	-(2D _{nf} -F _{nf})-(F _e -F _w)-(F _n -F _s)
5	a _N T _N +a _S T _S +αT _P	(F _e -F _w)-(F _n -F _s)
6	a _N T _N +(2D _{sf})T _S +αT _P	-(2D _{sf})-(F _e -F _w)-(F _n -F _s)
7	(2D _{ef})T _{ef} +(2D _{nf} -F _{nf})T _{Nf} +a _S T _S +αT _P	-(2D _{ef})-(2D _{nf} -F _{nf})-(F _e -F _w)-(F _n -F _s)
8	(2D _{ef})T _{ef} +a _N T _N +a _S T _S +αT _P	-(2D _{ef})-(F _e -F _w)-(F _n -F _s)
9	(2D _{ef})T _{ef} +a _N T _N +(2D _{sf})T _S +αT _P	-(2D _{ef})-(2D _{sf})-(F _e -F _w)-(F _n -F _s)

$$*a_P T_P = \alpha + a_E T_E + a_W T_W + a_N T_N + a_S T_S - S_P$$

3.9 MTDA: solución numérica del sistema de ecuaciones no lineales

Hay dos tipos de técnicas para resolver ecuaciones algebraicas no lineales: los métodos directos y los indirectos o iterativos. Un ejemplo de método directo es la eliminación de Gauss, que para solucionarlo se tiene una N cantidad de ecuaciones con una N cantidad de incógnitas. El problema con esta técnica es un gran requerimiento de memoria. Los métodos iterativos por su parte tienen un menor requerimiento de almacenamiento debido a que se guardan una gran cantidad de ceros (Versteeg y Malalasekera, 2007). En problemas de dinámica de fluidos computacionales (CFD por sus siglas en inglés) de una dimensión se obtienen matrices con sistemas tridiagonales (Figura 12) en donde cada ecuación tiene solamente tres coeficientes diferentes a cero y si se tiene en consideración la difusión y convección en 2D, el sistema se transforma en pentadiagonal, lo cual es más complejo. Con estas consideraciones en un problema de CFD que suele tener más de 100000 ecuaciones, se considera apropiado usar un método iterativo (Versteeg y Malalasekera, 2007).

$$\begin{bmatrix} 2 & 3 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 3 & 4 & 5 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 5 & 6 & 7 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 7 & 8 & 9 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 9 & 10 & 11 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 11 & 12 \end{bmatrix}$$

Figura 12. Ejemplo de matriz tridiagonal.

Una técnica para resolver sistema tridiagonales de manera sencilla es el algoritmo de Thomas o el algoritmo de matriz tridiagonal (TDMA). Esta técnica es un método directo para resolver problemas de una dimensión, pero se puede utilizar de manera indirecta para resolver problemas multidimensionales. Tiene la ventaja de no ser exigente computacionalmente y requiere de poca capacidad de memoria (Versteeg y Malalasekera, 2007). Para resolver este problema se renombraron cuatro variables, $a=a_p$, $b=a_E$, $c=a_w$ y $d=S_u$. Patankar (1980) sugiere que para utilizar esta técnica en 1, 2 o 3D se utilizan dos coeficientes $P_{i,j}$ y $Q_{i,j}$, los cuales se resolverán con los coeficientes renombrados para cada volumen de control y el orden es de arriba hacia abajo y de derecha a izquierda. Cuando $i=1$ entonces tenemos:

$$P_{i,j} = \frac{b_{1,j}}{a_{1,j}} \quad (63)$$

$$Q_{i,j} = \frac{d_{1,j}}{a_{1,j}} \quad (64)$$

Para cualquier otro valor de i entonces tenemos:

$$P_{i,j} = \frac{b_{i,j}}{a_{i,j} - c_{i,j}P_{i-1,j}} \quad (65)$$

$$Q_{i,j} = \frac{d_{i,j} + c_{i,j}Q_{i-1,j}}{a_{i,j} - c_{i,j}P_{i-1,j}} \quad (66)$$

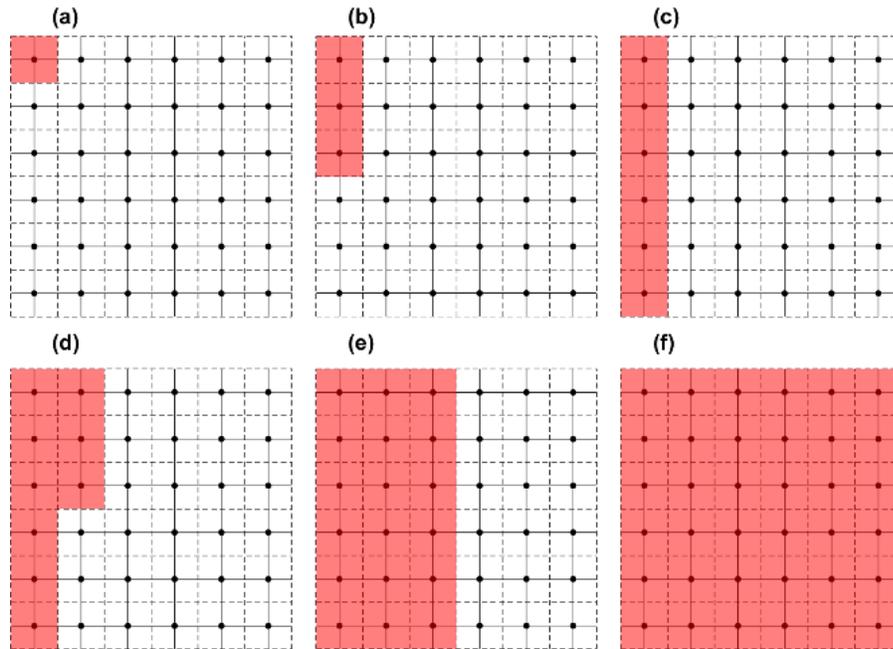


Figura 13. Ejemplo de cómo se soluciona el algoritmo de matriz tridiagonal (TDMA) en una malla 2D. (a), (b) y (c) representan las ecuaciones 63 y 64, mientras que (d), (e) y (f) son una representación de las ecuaciones 65 y 66.

Con estos coeficientes se puede estimar la temperatura. En este caso, cuando $i=n$ tenemos:

$$T_{n,j} = Q_{n,j} \quad (67)$$

Y para los demás valores (de derecha a izquierda) tenemos:

$$T_{i,j} = P_{i,j}T_{i+1,j} + Q_{i,j} \quad (68)$$

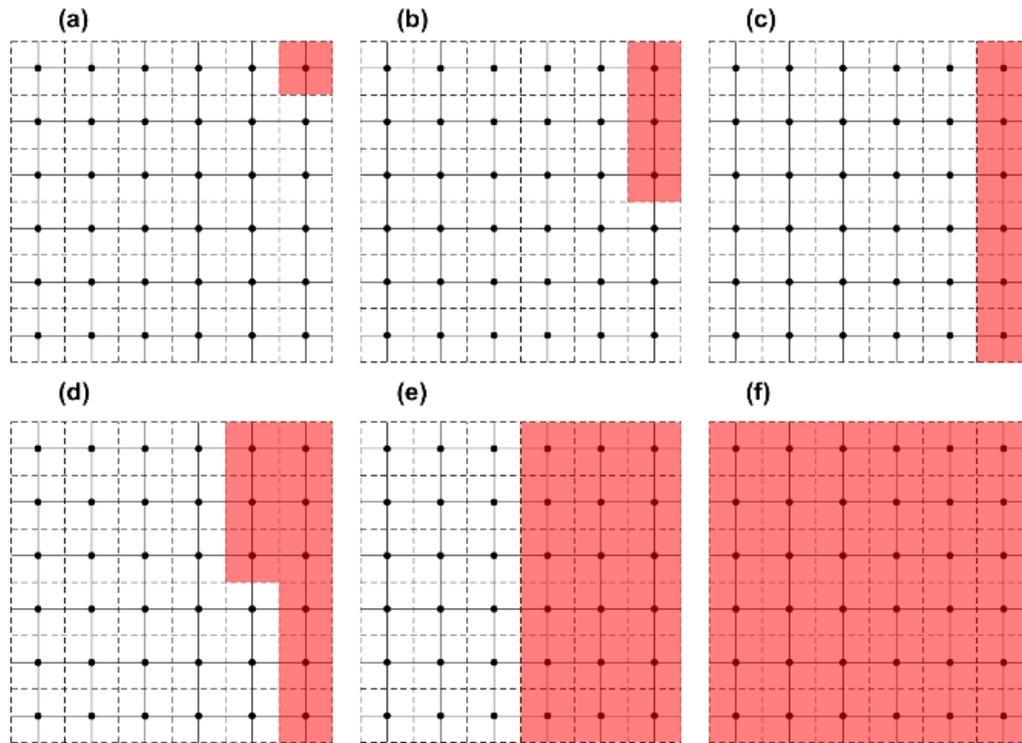


Figura 14. Ejemplo de cómo se calcula la temperatura utilizando el algoritmo de matriz tridiagonal (TDMA) en una malla 2D. (a), (b) y (c) representan la ecuación 67, mientras que (d), (e) y (f) son una representación de la ecuación 68.

3.10 Diagrama de flujo

Este modelo se desarrolló en lenguaje MATLAB. Se generaron las mallas y se resolvieron todas las ecuaciones discretizadas para la transferencia de calor. De esta manera se pudo modelar el campo de temperaturas conductivo-convectivo (Figura 15).

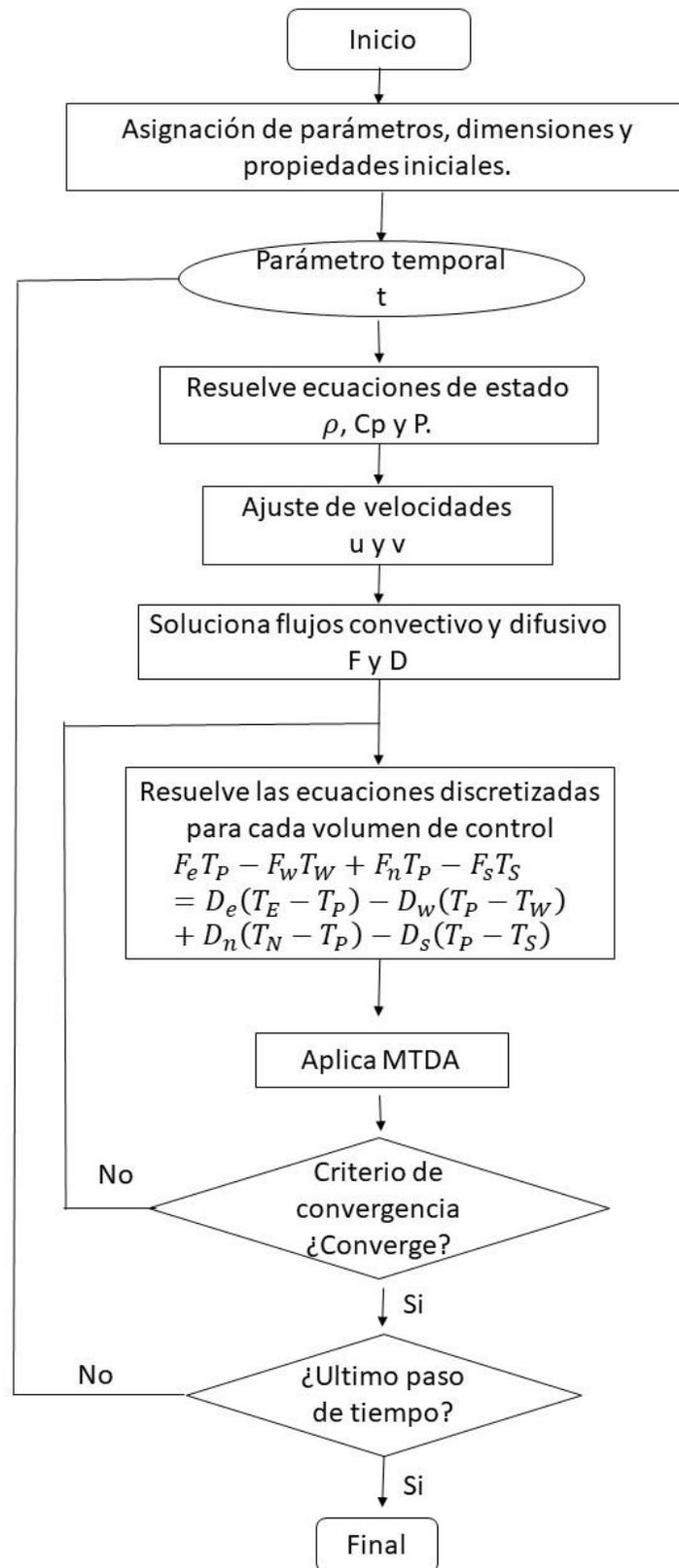


Figura 15. Diagrama de flujo del código numérico en lenguaje MATLAB que resuelve la transferencia de calor conductivo-convectivo en 2D en un sistema geotérmico de ciclo cerrado

3.11 Estimación del calor disponible

Una vez que se obtienen las temperaturas en el interior de la tubería, es momento de estimar valores teóricos del calor disponible que se puede extraer mediante sistemas geotérmicos de ciclo cerrado para generación de energía eléctrica. Para esto se utiliza la siguiente ecuación:

$$Q = \dot{m}C_pT \quad (69)$$

donde \dot{m} es el flujo másico (kg/s), C_p es la capacidad calorífica del fluido de trabajo (agua) (J/kg°C) y T es la temperatura (°C). Para obtener \dot{m} se utilizó la siguiente ecuación:

$$\dot{m} = \rho VA \quad (70)$$

donde ρ es la densidad del fluido (agua) (kg/m³), V es la velocidad (m/s) y A es el área (m²). Finalmente, para obtener el área se utiliza la siguiente ecuación

$$A = \pi \left(\frac{\phi}{2}\right)^2 \quad (71)$$

donde ϕ es el diámetro de la tubería (m).

Capítulo 4. Resultados y discusiones

4.1 Validación del código numérico

La validación del código numérico se realizó al modelar la transferencia de calor del agua (como fluido de trabajo) en movimiento en un intercambiador de calor en U reportado por Saucedo-Velázquez et al. (2022). Los autores reportaron resultados de un modelo 1D basado en el método de volumen finito. Para esto, se adaptó el modelo numérico a las condiciones reportadas por los autores utilizando la geología del pozo LP-2 del campo geotérmico de Cerritos Colorados (antes La Primavera, Jalisco), con una profundidad de 2000 m, donde los primeros 1000 m se conforman de riolita, los siguientes 800 m son de andesita y los últimos 200 m de riolita (Tabla 8) (Verma et al., 2012).

Tabla 8. Propiedades térmicas utilizadas en la validación del modelo.

	k (w/m°C)	ρ (kg/m ³)	Cp(J/kg°C)
Riolita	3.08	2200	1200
Andesita	2.28	2460	1373
Agua	0.6	1000	4200
Aislante	0.31	2140	2000

Para la validación se escogieron dos casos a replicar. El caso uno es una tubería de 4000 m de longitud total, 2000 m de inyección (descenso del fluido) y 2000 m de producción (ascenso del fluido), el diámetro de la tubería es de 0.15m (3") y no se tiene ningún aislante en la sección de la tubería de producción. La temperatura de entrada del fluido fue de 20 °C y la velocidad de 6 m/s. El segundo caso tiene la única diferencia de que se tiene un aislante en los últimos 1000m de la tubería de producción. No se menciona cual es la conductividad térmica del aislante, pero sí se tiene la difusividad térmica la cual es de 1.08×10^{-9} m²/s.

La Figura 16 muestra los perfiles de temperaturas, tanto simulados para ambos modelos y los reportados por Saucedo-Velázquez et al. (2022). El primer resultado en cuadros azules corresponde a la temperatura del agua en equilibrio térmico (antes de modelar la transferencia de calor en el tiempo), el cual es básicamente el gradiente de temperatura. Los siguientes dos resultados, triángulos naranjas y rombos

grises, son los casos uno y dos reportados por los autores. Los últimos dos resultados, círculos rojos y asteriscos negros, son los resultados de los modelos obtenidos utilizando el código numérico desarrollado en el presente trabajo.

Los resultados se pueden separar en dos partes, para los 2000 m de inyección y para los restantes 2000 m de producción. En la primera parte se puede observar que los modelos 1 y 2 que reportan los autores llegan a una temperatura muy similar, entre 190 y 200 °C y, los modelos del presente trabajo aproximadamente a 180 °C. Siguiendo en esta parte del modelo, se aprecia que los modelos reportados por los autores muestran un aumento de temperatura siguiendo un comportamiento convexo, mientras que los simulados en el presente trabajo el incremento de la temperatura obedece más a un comportamiento de tipo cóncavo o exponencial, lo que sugiere que la transferencia de calor entre la tubería y el fluido en movimiento durante su descenso es más lenta, lo cual es razonable (Xamán y Gijón-Rivera, 2015).

En la segunda parte de los resultados se observa una divergencia marcada en los resultados reportados en el artículo, en el caso uno (Saucedo-Velazquez 1) observa una disminución de temperatura hasta los 60 °C, mientras que el segundo caso la temperatura final es de 175 °C. Los resultados de este trabajo no muestran una divergencia tan marcada, de hecho, esta empieza a ser visible hasta los 3000 m que corresponde a la sección del modelo con aislante y sin aislante.

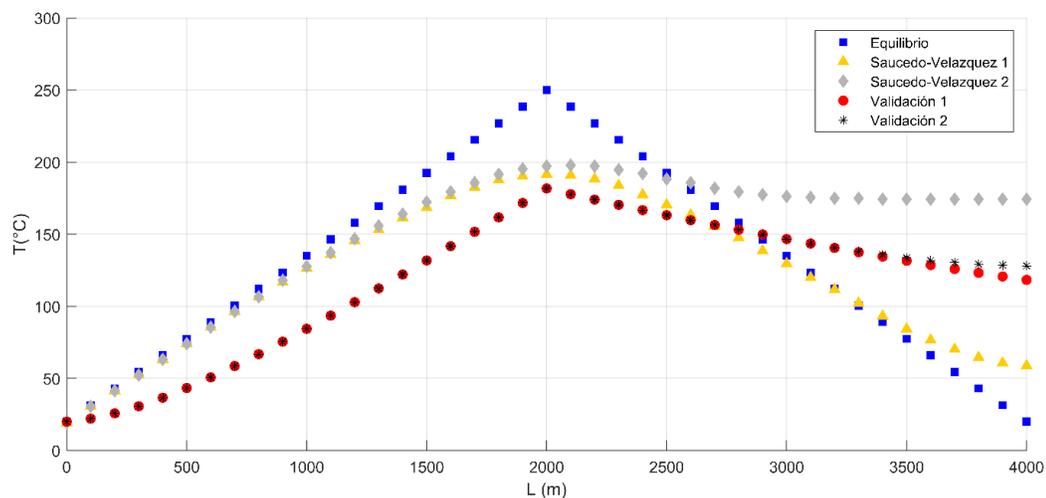


Figura 16. Perfil de temperaturas en un intercambiador de calor en U en el pozo LP-2 de campo geotérmico Cerritos Colorados (antes La Primavera, Jalisco). Los triángulos naranjas y rombos grises, son los casos uno y dos reportados por Saucedo-Velázquez et al., 2022. Los círculos rojos y asteriscos negros, son los resultados de los modelos obtenidos utilizando el código numérico desarrollado en el presente trabajo.

Las diferencias en los resultados mostrados en la Figura 16 se deben a distintos factores. Uno de ellos y quizá el más importante es la solución numérica utilizada en el presente trabajo, consideró la conductividad térmica en lugar de la difusividad térmica como lo plantean Saucedo-Velázquez et al. (2022), el valor de la difusividad térmica estimada en el presente trabajo fue de 7.24×10^{-8} , el cual es distinto al utilizado por Saucedo-Velázquez et al. (2022) que es de $1.08 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$. Otro factor que pudo contribuir a las diferencias fue que no se utilizó la ecuación de momentum, por lo tanto, el flujo fue considerado como laminar y todas las velocidades son rectas, por lo tanto, el modelo no presenta turbulencia, en el trabajo de Saucedo-Velázquez et al. (2022) no queda claro si se consideró la turbulencia.

4.2 Comportamiento de la temperatura y calor en el modelo

El comportamiento de la temperatura fue el esperado, ya que la temperatura del agua que entra a $20 \text{ }^\circ\text{C}$ es calentada debido al gradiente de temperatura de la zona y al flujo de calor. Una vez que el fluido se ubica en la tubería horizontal, que es donde se encuentra la temperatura más alta, se seguirá calentando hasta llegar a un valor máximo. Finalmente, cuando el agua sube por la tubería, ésta se comienza a enfriar debido a que la temperatura disminuye con el gradiente. Para evitar que el fluido pierda temperatura con su entorno durante el ascenso, el modelo considera un aislante, con lo cual se obtiene un fluido con mayor temperatura que el inyectado en la entrada.

El comportamiento mencionado anteriormente también fue descrito por Sun et al. (2018), con la diferencia que en ese trabajo el fluido utilizado fue el CO_2 . En la Figura 17 se puede observar que la temperatura tiene un aumento a partir de los 200 m, lo que es evidente debido a que es la profundidad del piso marino, donde el perfil de temperatura varía de $30 \text{ }^\circ\text{C}$ en la superficie del mar hasta los $15 \text{ }^\circ\text{C}$ en el piso marino, donde el aumento de la temperatura y calor se presenta a partir de los 200 m de profundidad debido al gradiente de temperatura y flujo de calor (ver Tabla 3). En el Anexo A (Figuras 31-37) se pueden ver los perfiles de temperatura para las doce velocidades con las configuraciones máximas y mínimas de la profundidad (Z), el flujo de calor (\dot{q}) y diámetro de la tubería (ϕ).

En los Anexos B y C se presentan las tablas que contienen todas las temperaturas de salida simuladas para las 2592 configuraciones, así como de las temperaturas máximas en la tubería horizontal, respectivamente.

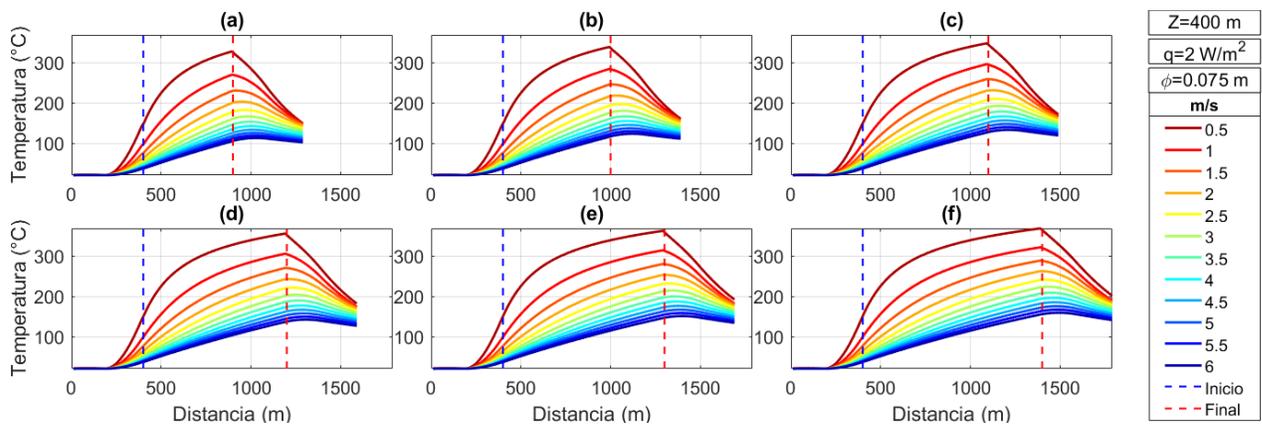


Figura 17. Comportamiento de la temperatura a lo largo de la tubería considerando doce velocidades. La profundidad (Z), el flujo de calor (\dot{q}) y diámetro de la tubería (ϕ) son constantes. Las líneas punteadas azules indican la profundidad de la tubería (descenso del fluido) mientras que las líneas punteadas rojas indican la profundidad donde comienza el ascenso del fluido. La distancia entre ambas líneas corresponde al inicio y el final de la tubería horizontal con longitudes de: (a) 500 m, (b) 600 m, (c) 700 m, (d) 800 m, (e) 900 m y (f) 1000 m.

Cabe destacar que obtener una mayor temperatura no significa que se tenga una mayor extracción de calor. La cantidad de calor extraída al igual que la temperatura varía dependiendo de los parámetros que se observen. Sun et al. (2018) llegaron a la misma conclusión y destacan la importancia que tiene el flujo másico (\dot{m} ; kg/s) para la obtención de calor (Q) y la temperatura (T) que se puede alcanzar. Debido a su relación proporcional con el flujo másico se tiene que dar especial importancia al diámetro de la tubería (ϕ) y a la velocidad del fluido (V). Adelante se mostrarán y discutirán los resultados obtenidos para cada parámetro. En los Anexos D y E se presentan las tablas que contienen todos los valores de los calores de salida para las 2592 configuraciones, así como los valores máximos estimados en la tubería horizontal.

Las Figuras que se mostrarán a continuación tienen las configuraciones que muestran los mejores resultados. Para la temperatura se escogieron los valores de mayor profundidad (400 m), longitud horizontal (1000 m) y flujo de calor (2.0 W/m^2), mientras que para la velocidad y diámetro de la tubería se escogieron los valores más bajos, 0.5 m/s y 0.075 m, respectivamente. Para la comparación de calor se escogieron los mismos valores de profundidad, longitud horizontal y flujo de calor, pero para la velocidad se utilizó 2 m/s y el diámetro fue de 0.15 m (6"). Estos dos últimos valores se consideran como los óptimos para la generación de calor con una buena temperatura. Si se utiliza esta configuración, el calor en la salida es de 21.6 MW con una temperatura de 157.2 °C. Mientras en la horizontal es de 25.1 MW con una temperatura de 183.3 °C. Los resultados de todas las configuraciones se pueden consultar en las Tablas de los anexos B, C, D y E.

4.2.1 Profundidad

La profundidad en el modelo respeta el gradiente de temperatura, por lo tanto, entre mayor sea la profundidad mayor será la temperatura en el medio. La Figura 18 muestra los perfiles de temperatura del agua en la tubería del sistema geotérmico de ciclo cerrado para las tres configuraciones de profundidad (300, 350 y 400 m) donde la temperatura es más alta a mayor profundidad.

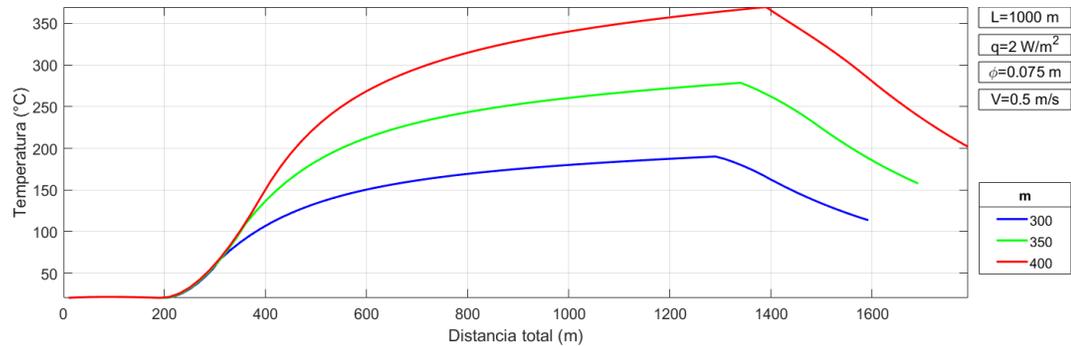


Figura 18. Comparación de los perfiles de temperatura con las 3 configuraciones de profundidad. La longitud horizontal (L), el flujo de calor (\dot{q}), diámetro de la tubería (ϕ) y velocidad (V) son constantes.

Los resultados de calor vs. temperatura se pueden observar en la Figura 19 en dos grupos, (a) son las temperaturas finales y (b) son las temperaturas al final de la tubería horizontal. Se observa que el calor aumenta al igual que la temperatura con la profundidad, o el gradiente térmico, por lo tanto, entre mayor sea la profundidad mayor serán la temperatura y el calor extraído. El valor de calor la salida de la tubería (Figura 19 a) es cercano a 21 MW con una temperatura mayor a 150°C, al final de la tubería horizontal (Figura 19 b) el calor es cercano a 24 MW con una temperatura aproximada de 180°C.

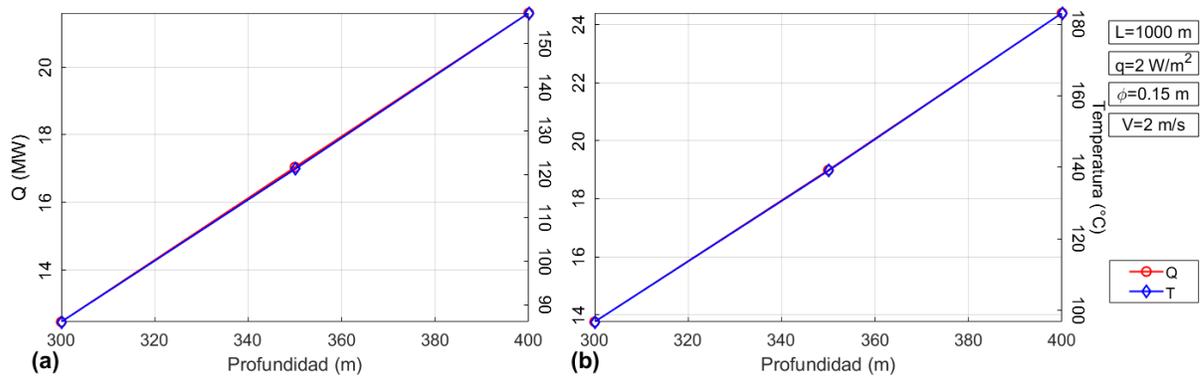


Figura 19 Comparación de los perfiles de calor y temperatura vs. profundidad. (a) Son los valores en la salida de la tubería y (b) son al final de la tubería horizontal. La longitud horizontal (L), el flujo de calor (\dot{q}), diámetro de la tubería (ϕ) y velocidad (V) son constantes.

4.2.2 Longitud horizontal de la tubería

La distancia horizontal de la tubería influye en los resultados. Esto se debe a que entre mayor sea la longitud, mayor será el tiempo que el fluido permanece en la zona de mayor temperatura, por lo tanto, el valor final será más alto. Este es un comportamiento que se puede observar en la Figura 20, en la que se destacó las longitudes de 500 m y 1000 m, ya que en el segundo se cuenta a una distancia horizontal el doble de largo que el primero. Este comportamiento coincide con lo observado por Sun et al. (2019), que indican que este comportamiento se debe a que mientras el fluido de trabajo que entra al sistema sea con una menor temperatura que el medio, el fluido seguirá aumentando su temperatura. Debido a esto, se puede suponer que existe una longitud que sea tan larga para que el fluido alcance una temperatura igual a la del medio, y, por lo tanto, un aumento en la longitud sea irrelevante, pero en este trabajo no se llegó a eso. Por otro lado, Cui et al. (2017) realizaron una investigación utilizando una tubería coaxial, con la novedad de que estaba dispuesta en una posición horizontal. En este trabajo los autores también indican que entre mayor sea la longitud mayor es la temperatura recuperada.

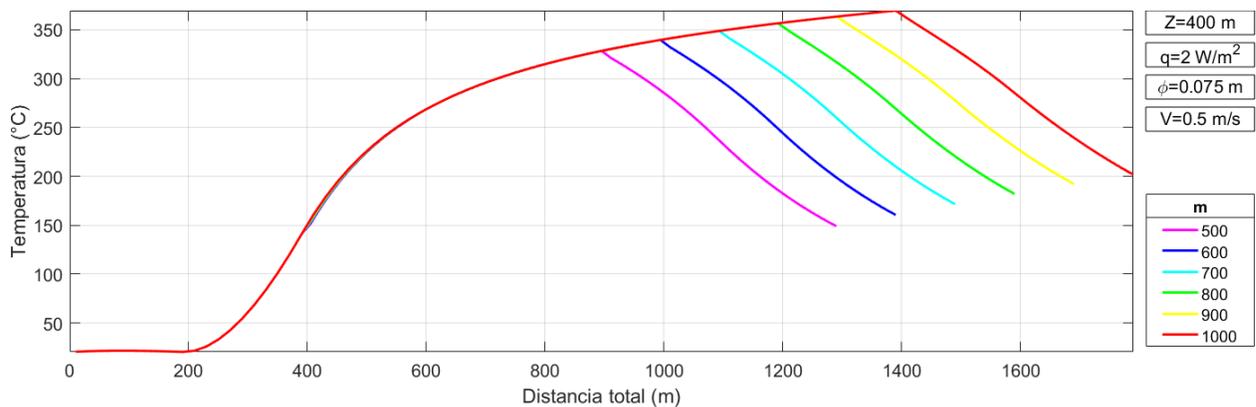


Figura 20. Comparación de los perfiles de temperatura con las seis configuraciones de longitudes horizontales. La profundidad (Z), el flujo de calor (\dot{q}), diámetro de la tubería (ϕ) y velocidad (V) son constantes.

La Figura 21 muestra el comportamiento del calor y la temperatura en función de la longitud de la tubería. Al igual que con la profundidad, estas variables están totalmente correlacionadas ya que no hay diferencia en su comportamiento, lo que indica que entre mayor sea la longitud mayor será la temperatura y el calor. El valor de calor en la salida de la tubería se encuentra un poco por arriba de los 21 MW con una temperatura ligeramente por arriba de 155 °C (Figura 20 a), al final de la sección horizontal de la tubería el calor es cercano a 24 MW con una temperatura aproximada de 180 °C (Figura 20 b).

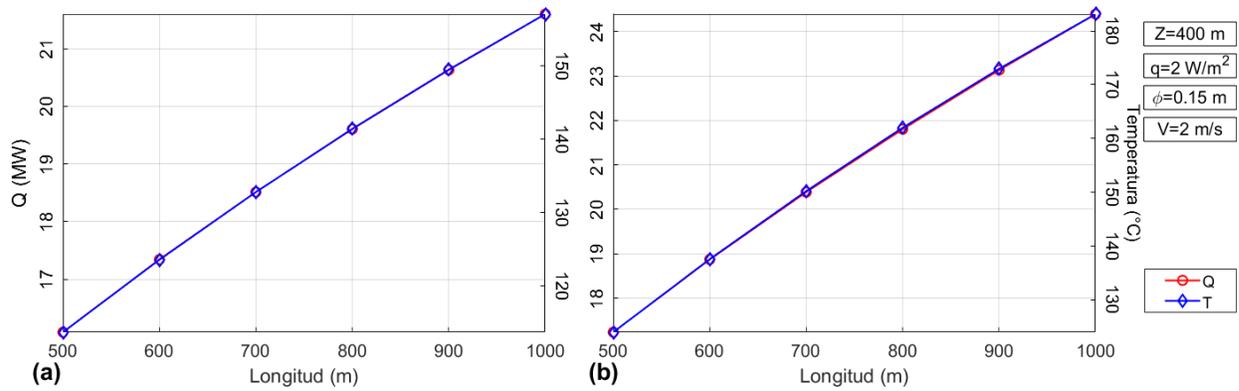


Figura 21. Comparación de los perfiles de calor y temperatura contra la longitud horizontal. (a) Son los valores en la salida de la tubería y (b) son al final de la tubería horizontal. La profundidad (Z), el flujo de calor (\dot{q}), diámetro de la tubería (ϕ) y velocidad (V) son constantes.

4.2.3 Flujo de calor (\dot{q})

Un flujo de calor produce un gradiente de calor mayor, por lo tanto, la temperatura aumenta en proporción al flujo de calor, lo que da una mayor temperatura en el medio. El patrón que se observó es que entre más alto es el flujo de calor, mayor es la temperatura obtenida en el modelo. Este patrón se puede observar la Figura 22.

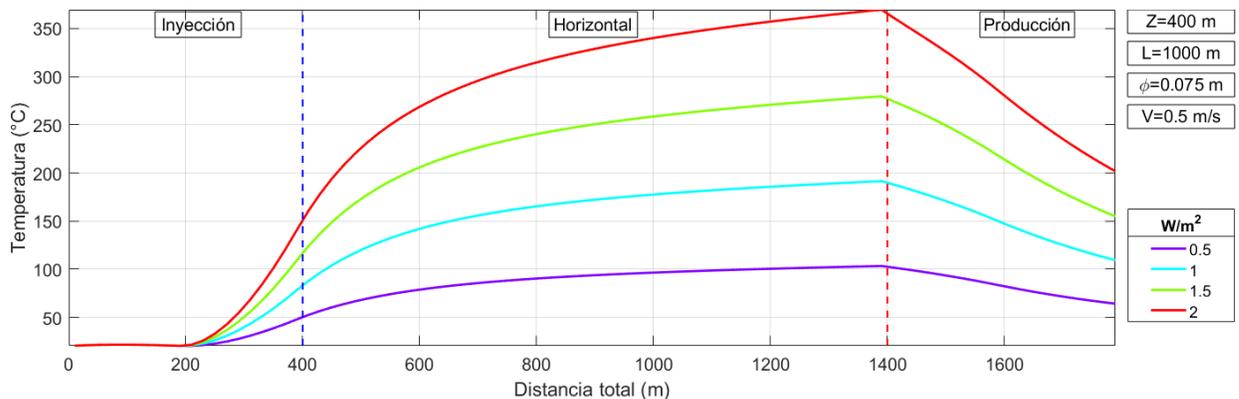


Figura 22. Comparación de los perfiles de temperatura con las cuatro configuraciones de flujo de calor. La profundidad (Z), la longitud horizontal (L), diámetro de la tubería (ϕ) y velocidad (V) son constantes.

En la Figura 23 se puede observar un comportamiento similar del calor y la temperatura en función del flujo de calor, comportamiento que es muy similar al observado con la profundidad y la longitud. Por lo tanto, los aumentos de la temperatura y el calor son proporcionales al flujo de calor. El valor de calor en la tubería de salida se encuentra por encima de los 20 MW con una temperatura cercana a $160\text{ }^\circ\text{C}$ (Figura 23 a), el calor es cercano a 24 MW con una temperatura aproximada de $180\text{ }^\circ\text{C}$ (Figura 23 b).

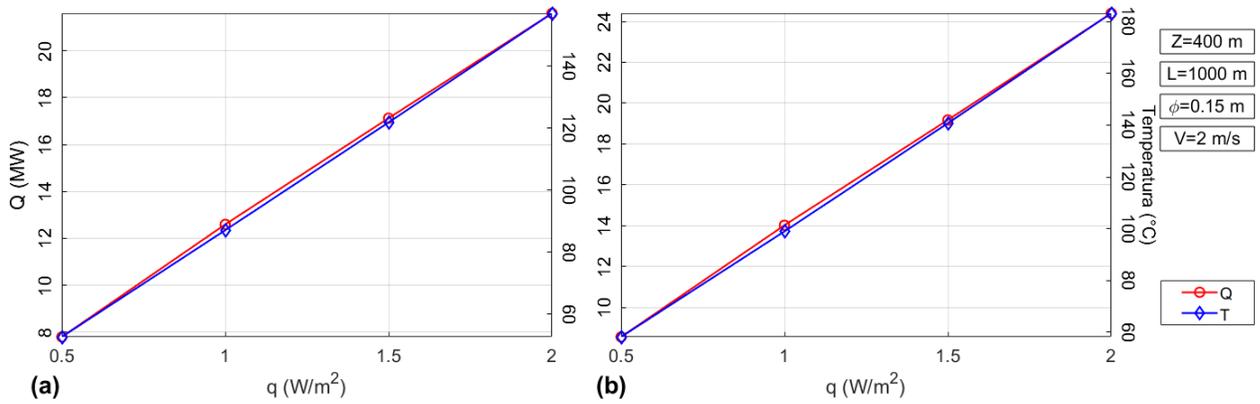


Figura 23 Comparación de los perfiles de calor y temperatura vs. flujo de calor. (a) Son los valores en la salida de la tubería y (b) son al final de la tubería horizontal. La profundidad (Z), la longitud horizontal (L), diámetro de la tubería (ϕ) y velocidad (V) son constantes.

4.2.4 Diámetro de tubería (ϕ)

El diámetro de la tubería es un parámetro que también afecta la transferencia de calor, por lo que también se tiene que considerar en el modelo. Los resultados indican que entre menor es el diámetro, mayor será la temperatura final. Esto se debe a que con un diámetro pequeño el área de contacto con el fluido es mayor que con un diámetro de mayor tamaño. Este efecto se muestra en la Figura 24.

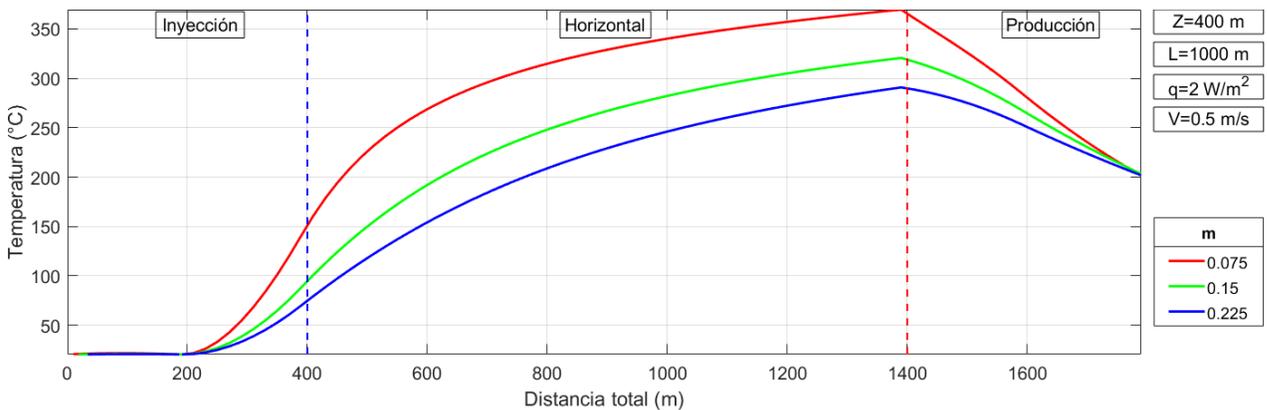


Figura 24. Comparación de los perfiles de temperatura con las tres configuraciones de diámetros. La profundidad (Z), longitud horizontal (L), el flujo de calor (\dot{q}) y velocidad (V) son constantes.

En la Figura 25 se observa que el comportamiento de la temperatura es inverso al del calor. Esto se debe a que un diámetro pequeño tiene un flujo másico menor, lo que resulta en un calor bajo, a diferencia de la temperatura que se ve beneficiada. Consideramos que los diámetros ideales son aquellos en los que los valores de la temperatura y el calor se intersectan. En aquellos casos en los que no se cuenta con suficientes valores simulados, se consideraron los más cercanos a la intersección. Los valores de calor

obtenidos se encuentran entre 20 y 25 MW, con temperaturas de 150-160 °C en la salida y 180-200 °C en la zona horizontal. El valor ideal corresponde al de 0.15 cm o 6''.

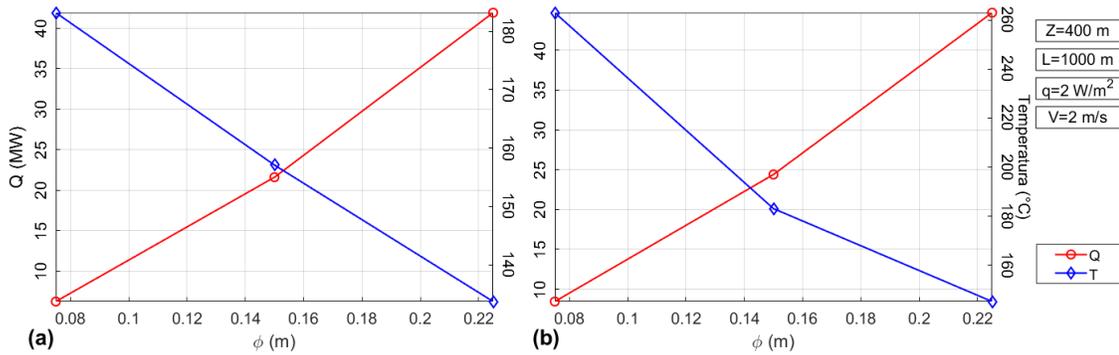


Figura 25. Comparación de los perfiles de calor y temperatura vs. el diámetro de la tubería. (a) Son los valores en la salida de la tubería y (b) son al final de la tubería horizontal. La profundidad (Z), longitud horizontal (L), el flujo de calor (\dot{q}) y velocidad (V) son constantes.

4.2.5 Velocidad

La velocidad del fluido es un factor muy importante, ya que determina la magnitud del flujo másico, entre mayor sea la velocidad mayor es el flujo másico. En la Figura 26 se puede observar este patrón, especialmente si se comparan las velocidades de 0.5 y 6 m/s.

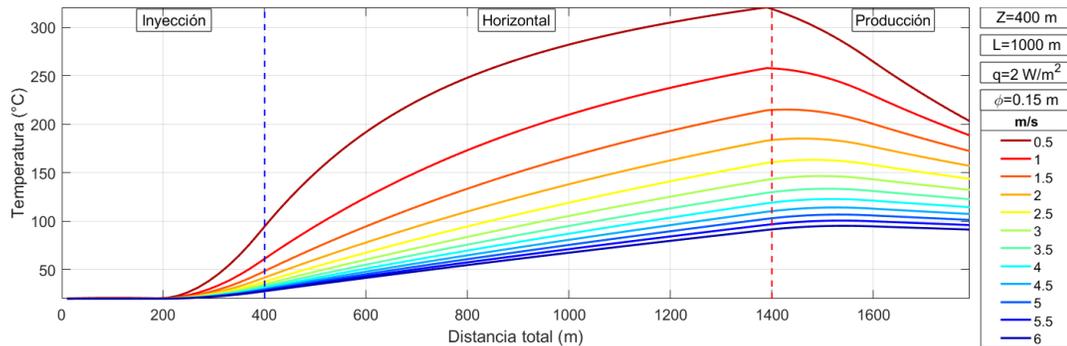


Figura 26. Perfiles de temperatura para cada una de las velocidades consideradas. La profundidad (Z), longitud horizontal (L), flujo de calor (\dot{q}) y diámetro de la tubería (ϕ) son constantes.

Este comportamiento de la temperatura se debe a que cuando el fluido tiene una menor velocidad, tiene un mayor tiempo de contacto con el acero, por lo tanto, obtiene una mayor temperatura, mientras que con una velocidad mayor el tiempo de contacto es menor y por lo tanto el intercambio de calor es menor, con lo que se obtiene una menor temperatura. Esta relación de la temperatura con la velocidad del fluido

coincide con los resultados de Fallah et al. (2021). Sun et al. (2018) también observaron un comportamiento similar e indican que la extracción de energía geotermal juega un papel importante en el aumento de temperatura de un fluido cuando se utilizan flujos másicos bajos. Indican que la misma cantidad de energía calorífica puede calentar un fluido a una mayor temperatura cuando la masa molar del fluido es pequeña.

Como se puede observar, en la Figura 27 se hizo un análisis comparativo de calor y temperatura (eje Y izquierda y derecha) en función del flujo másico y la velocidad (eje X superior e inferior). Los Anexos F y G contienen las figuras con todas las configuraciones mínimas y máximas de calor y temperatura a la salida de la tubería y en la tubería horizontal. De esta manera, se puede apreciar que con un flujo másico alto se obtiene un mayor calor. Por el contrario, y como se vio en las figuras anteriores, la temperatura decrece con un flujo másico alto. El calor ideal en ambas secciones de la tubería se encuentra entre los 20-25 MW (Figura 27), y las temperaturas están entre los 140-160 °C en la salida de la tubería (Figura 27 a) y cerca de los 200 °C al final de la sección horizontal (Figura 27 b).

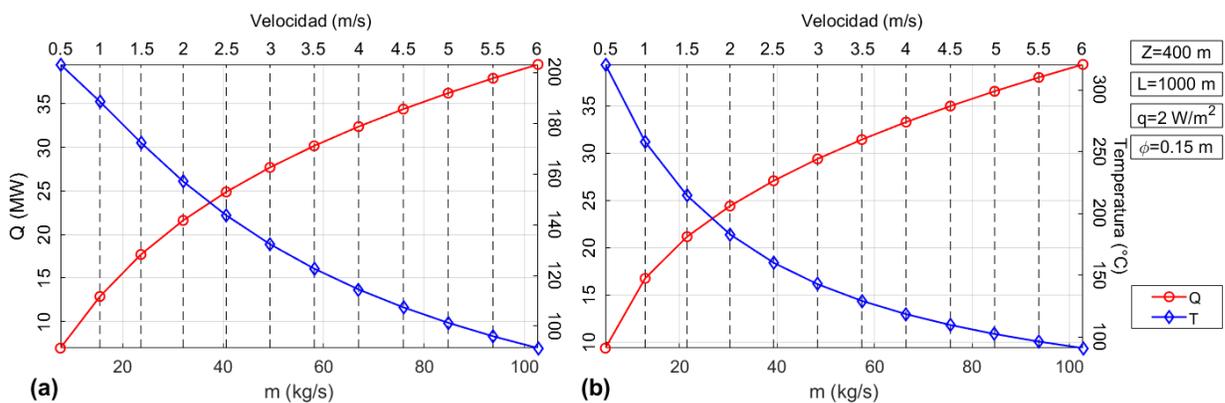


Figura 27. Comparación de los perfiles de calor y temperatura vs. las velocidades. (a) Son los valores en la salida de la tubería y (b) son al final de la tubería horizontal. La profundidad (Z), longitud horizontal (L), flujo de calor (\dot{q}) y diámetro de la tubería (ϕ) son constantes.

Considerando el análisis anterior, los resultados indican que, a bajas velocidades se tiene una alta temperatura, pero un calor bajo, mientras que una velocidad alta se tendrá un calor alto pero una baja temperatura. Con esta observación se decidió encontrar el punto de calor y temperatura óptimo, el cual se encuentra en la intersección de sus perfiles. Debido a que se cuenta con 12 velocidades, de las 2592 configuraciones se obtienen 216 puntos óptimos. Con estos puntos se encontró que las velocidades óptimas se encuentran entre 2-3 m/s para las temperaturas de salida, mientras que para las temperaturas

máximas en la horizontal se encuentran entre 1.5-2.5 m/s. Siendo la velocidad de 2 m/s la de mayor frecuencia en ambos casos (Figura 28).

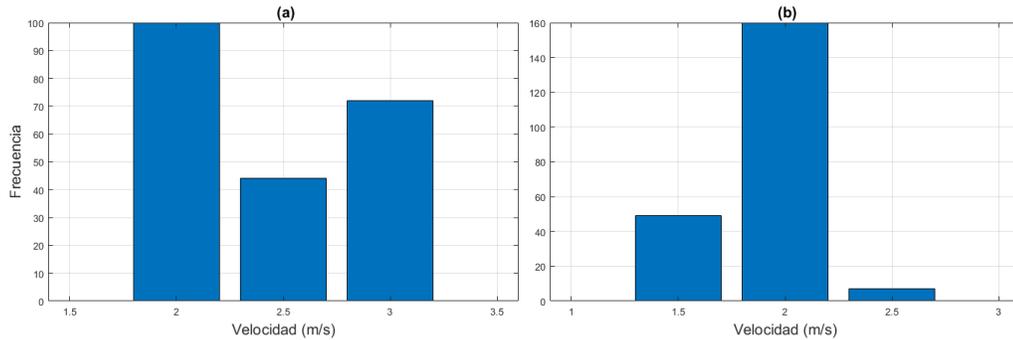


Figura 28. Graficas de barra que representan la frecuencia de las 216 velocidades optimas. (a) Son los valores a la salida de la tubería y (b) son al final de la tubería horizontal.

Con los resultados que se ilustran en la Figura 27 se podría entender que la temperatura y el calor tienen comportamientos inversos, sin embargo, si se comparan estos en la distancia se puede observar que los comportamientos de los perfiles son muy similares. Si se hicieran los perfiles de calor, estos serían muy parecidos a la temperatura que se muestra en la Figura 17. Para observar la diferencia entre el calor y temperatura de la Figura 27, se realizó la Figura 29, que cuenta con 3 perfiles con los parámetros óptimos profundidad (400 m), longitud horizontal (1000 m), flujo de calor (2 W/m^2), diámetro (0.15 m) y con tres velocidades constantes, (a) 1m/s, (b) 2m/s y (c) 3 m/s.

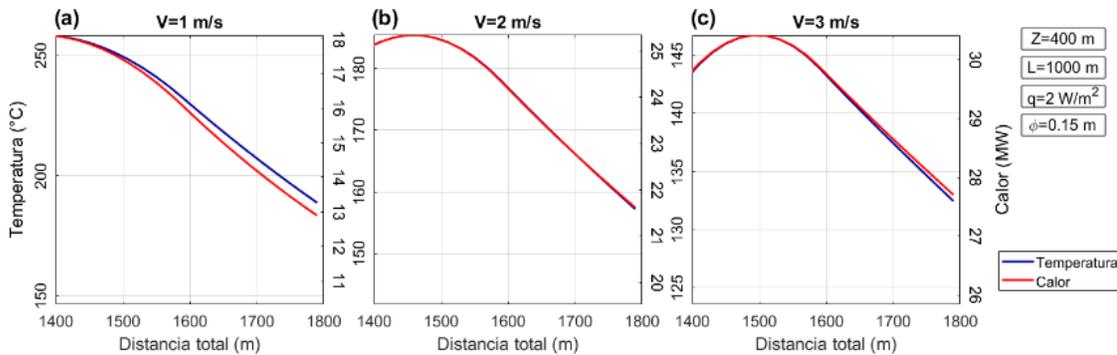


Figura 29. Comparación de temperatura vs. calor en la distancia con 3 velocidades distintas. (a) 1 m/s, (b) 2m/s y (c) 3 m/s. La profundidad (Z), longitud horizontal (L), flujo de calor (\dot{q}) y diámetro de la tubería (ϕ) son constantes.

Se escogieron estos valores debido a que 2 m/s es el que tiene la mayor frecuencia de puntos óptimos y los otros dos porque es donde se observan las diferencias entre calor y temperatura. Se realizaron ambos perfiles con la distancia total de 1800 m para el eje X, y sus mínimos y máximos valores de temperatura y

calor para el eje Y. Se hizo un acercamiento para que se aprecie con más facilidad que con velocidades bajas el perfil de temperatura se encuentra ligeramente por encima del de calor, comportamiento contrario si se tiene una velocidad mayor.

Para describir el comportamiento en las Figuras 27 y 29 en la Figura 30 se muestra, una comparación entre temperatura vs. densidad (ρ). La densidad es una función de la temperatura (Ecuación 7) y tiene un comportamiento inverso. Por otro lado, el flujo másico (Ecuación 69) depende de la densidad cuando la velocidad (V) y el área (A) son constantes. Finalmente, en la Ecuación 68 se indica que el calor (Q) depende del flujo másico, y ya que este depende de la densidad, cuando la temperatura desciende el calor comienza a ascender. Esto se puede ver en la Figura 29, que, si bien los comportamientos de los perfiles son similares, se ve como los valores de temperatura bajan de (a)-(c) y como los valores de calor comienzan a ascender.

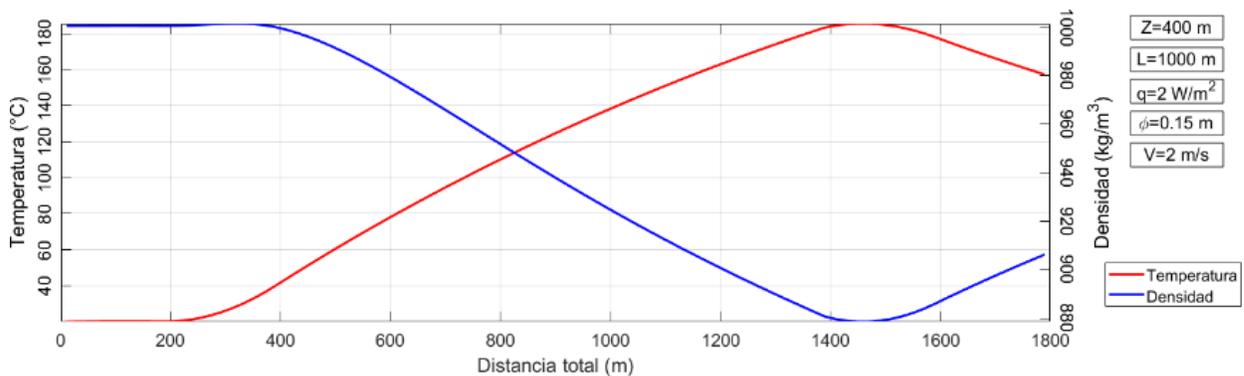


Figura 30 Comparación de temperatura vs. densidad (ρ) en una sola configuración donde la profundidad (Z)=400 m, la longitud horizontal (L)=1000 m, flujo de calor (q)= 2 W/m², diámetro (ϕ)=0.15 m y velocidad (V)=2 m/s.

Capítulo 5. Conclusiones

Se modeló en MATLAB el intercambio de calor en un sistema geotérmico de ciclo cerrado (tubería en U) mediante el método de volumen finito (MVF) o volumen de control (MVC). Este modelo fue útil para estimar la temperatura que puede alcanzar el sistema en toda la tubería. Con estos resultados se puede evaluar la cantidad de energía eléctrica (calor) en MW que se puede extraer dependiendo la configuración de diseño.

Los parámetros utilizados para los diferentes modelos (configuraciones) desarrollados fueron profundidad (300, 350, y 450 m), longitud horizontal (500, 600, 700, 800, 900, 1000 m), flujo de calor (0.5, 1, 1.5, 2 W/m²), diámetro (0.075, 0.15, 0.225 m) y velocidad (0.5, 1, 1.5, 2, 2.5, 3, 3.5, 4, 4.5, 5, 5.5 y 6 m/s). Las combinaciones de todos estos dieron como resultado 2592 configuraciones distintas.

Los dos parámetros que más influyen en el cambio de temperatura y la extracción de calor son el diámetro de la tubería (ϕ) y la velocidad de fluido. Estos dependen mayormente del flujo másico. Las velocidades bajas y diámetros pequeños contribuyen para tener un flujo másico menor, mientras que velocidades altas y un diámetro grande generan un flujo másico mayor. El flujo másico a su vez, depende de la densidad del fluido, debido al comportamiento inverso que tiene la densidad con la temperatura, el flujo másico se incrementa con temperaturas menores, y debido a que el calor también depende en parte del flujo másico, este también aumenta con una densidad menor o una temperatura mayor. Por lo tanto, un flujo másico menor genera mayores temperaturas, pero el calor obtenido es menor, por el contrario, un flujo másico mayor nos da temperaturas bajas pero un calor mayor.

La velocidad óptima para alcanzar tanto una temperatura como un calor adecuado es de 2 m/s. Mientras que el diámetro recomendado es de 0.15 m. Estas condiciones son aplicables tanto para la salida como para la sección horizontal de la tubería. Para los parámetros óptimos restantes se recomienda utilizar los valores más altos, profundidad de 400 m, longitud horizontal de 1000m y flujo de calor de 2 W/m². Con esta configuración se pueden encontrar los mejores valores para calor y temperatura, que si bien, no son los más altos, tampoco se tienen mínimos de calor o temperatura. Los valores óptimos de temperatura y calor en la salida de modelo son 157 °C y 21.6 MW y al final de la tubería horizontal son 183.3 °C y 25.1 MW.

Para generar energía eléctrica de la Cuenca de Wagner se recomienda explotar las zonas donde el flujo de calor es mayor, probablemente en la zona nombrada como "Devil's hole", ya que de los 24 valores de flujo

de calor reportados por Peña-Domínguez et al. (2022) 12 son mayores a los 2 W/m^2 que fue el valor máximo utilizado en los modelos desarrollados en el presente estudio. Por lo cual, las profundidades y las longitudes horizontales se podrían reducir considerablemente.

Los modelos de temperatura obtenidos a partir de las diferentes configuraciones del sistema geotérmico de ciclo cerrado muestran un comportamiento lógico aún con la limitación de que el código numérico desarrollado (para modelar la transferencia de calor conductivo-convectivo en 2D en estado transitorio) no resuelve las ecuaciones de momentum de Navier-Stokes, por lo que el campo de velocidades fue propuesto para resolver la transferencia de calor del flujo de un fluido en régimen laminar. Si se quiere resolver este problema con una sola malla se tienen que considerar la generación de una malla lo suficientemente fina para que no existan problemas de turbulencia en los codos de la tubería.

Literatura citada

- Aragón-Arreola, M. y Martín-Barajas, A. (2007). Westward migration of extension in the northern Gulf of California, Mexico. *Geology*, 35(6), 571–574. doi: 10.1130/G23360A.1
- Barragán-Cárdenas, N. (2019). Heladas, precios de alimentos e inercia térmica. Universidad de los Andes. URI: <http://hdl.handle.net/1992/45664>.
- Canet, C., Prol-Ledesma, R. M., Dando, P. R., Vázquez-Figueroa, V., Shumilin, E., Birosta, E., Sánchez, A., Robinson, C. J., Camprubí, A., y Tauler, E. (2010). Discovery of massive seafloor gas seepage along the Wagner Fault, northern Gulf of California. *Sedimentary Geology*, 228(3–4), 292–303. doi: 10.1016/j.sedgeo.2010.05.004
- Cengel, Y. A. y Boles, M. A. (2011). *Termodinámica*. (7th ed). Mc Graw Hill.
- DiPippo, R. (2016). *Geothermal power plants : principles, applications, case studies, and environmental impact*. (4th ed). Elsevier Ltd.
- Espinoza-Ojeda, O. M., Prol-Ledesma, R. M., Iglesias, E. R., y Figueroa-Soto, A. (2017). Update and review of heat flow measurements in México. *Energy*. Elsevier Ltd, 121, 466–479. doi: 10.1016/j.energy.2017.01.045
- Fallah, A. H., Gu, Q., Chen, D., Ashok, P., y van Oort, E. (2021). Globally scalable geothermal energy production through managed pressure operation control of deep closed-loop well systems. *Energy Conversion and Management*. Elsevier Ltd, 236. doi: 10.1016/j.enconman.2021.114056
- Gutiérrez-Negrin, L. C. A. (2019). Current status of geothermal-electric production in Mexico. In *IOP Conference Series: Earth y Environmental Science*. Institute of Physics Publishing, 249(1). doi: 10.1088/1755-1315/249/1/012017
- Helenes, J., Carreño, A. L., y Carrillo, R. M. (2009). Middle to late Miocene chronostratigraphy and development of the northern Gulf of California. *Marine Micropaleontology*, 72(1–2), pp. 10–25. doi: 10.1016/j.marmicro.2009.02.003
- Hiriart, G., María Prol-Ledesma, R., Alcocer, S., y Espíndola, S. (2010). Submarine Geothermics; Hydrothermal Vents and Electricity Generation. In *Proceedings World Geothermal Congress*. 25–29
- Kim, C. (1975). Thermophysical properties of stainless steels. (No. ANL-75-55). Argonne National Lab., III (USA). <https://inldigitallibrary.inl.gov/Reports/ANL-75-55.pdf>
- Martín-Barajas, A., González-Escobar, M., Fletcher, J. M., Pacheco, M., Oskin, M., y Dorsey, R. (2013). Thick deltaic sedimentation and detachment faulting delay the onset of continental rupture in the Northern Gulf of California: Analysis of seismic reflection profiles. *Tectonics*, 32(5), 1294–1311. doi: 10.1002/tect.20063
- Neumann, F., Negrete-Aranda, R., Harris, R. N., Contreras, J., Sclater, J. G., y González-Fernández, A. (2017). Systematic heat flow measurements across the Wagner Basin, northern Gulf of California. *Earth and Planetary Science Letters*. Elsevier B.V., 479, 340–353. doi: 10.1016/j.epsl.2017.09.037
- Patankar Suhas V. (1980). *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*. (1st ed). Mc Graw Hill. 197. <https://doi.org/10.1201/9781482234213>

- Peña-Domínguez, J. G., Negrete-Aranda, R., Neumann, F., Contreras, J., Spelz, R. M., Vega-Ramírez, L. Á., y González-Fernández, A. (2022). Heat flow and 2D multichannel seismic reflection survey of the Devil's Hole geothermal reservoir in the Wagner basin, northern Gulf of California. *Geothermics*. Elsevier Ltd, 103. doi: 10.1016/j.geothermics.2022.102415
- Prol-Ledesma, R. M., Torres-Vera, M. A., Rodolfo-Metalpa, R., Ángeles, C., Lechuga Deveze, C. H., Villanueva-Estrada, R. E., Shumilin, E., y Robinson, C. (2013). High heat flow and ocean acidification at a nascent rift in the northern Gulf of California. *Nature Communications*, 4. doi: 10.1038/ncomms2390
- Saucedo-Velázquez, J., Gutiérrez-Urueta, G., Wong-Loya, J. A., Molina-Rodea, R., y Franco, W. R. G. (2022). Cooling Potential for Single and Advanced Absorption Cooling Systems in a Geothermal Field in Mexico. *Processes*. MDPI, 10(3). doi: 10.3390/pr10030583
- Schulz S.U. (2008). *Investigations on the Improvement of the Energy Output of a Closed Loop Geothermal System (CLGS)*.
- Stock, J. M. and Hodges, K. v. (1989). Pre-pliocene extension around the Gulf of California and the transfer of Baja California to the pacific plate. In *tectonics* (Vol. 8, Issue 1). 99–115. <https://doi.org/10.1029/TC008i001p00099>
- Suárez-Arriaga, M. C. (2004). Evaluación del potencial, biogénesis y características esenciales de los sistemas geotérmicos submarinos en México-Norte de la Costa Mexicana del Océano Pacífico y Golfo de California-. Vol. 17, Issue 1. <http://polya.dme.umich.mx/msuarez/>
- Suárez-Arriaga, M. C., Bundschuh, J., y Samaniego, F. (2014). Assessment of submarine geothermal resources and development of tools to quantify their energy potentials for environmentally sustainable development. In *Journal of Cleaner Production* (Vol. 83). Elsevier Ltd. doi: 10.1016/j.jclepro.2014.07.040
- Sun, F., Yao, Y., Li, G., y Li, X. (2018). Geothermal energy development by circulating CO₂ in a U-shaped closed loop geothermal system. *Energy Conversion and Management*. Elsevier Ltd, 174, pp. 971–982. doi: 10.1016/j.enconman.2018.08.094
- Vázquez-Figueroa, V., Canet, C., María Prol-Ledesma, R., Sánchez, A., Dando, P., Camprubí, A., Robinson, C. J., y Hiriart Le Bert, G. (2009). Batimetría y características hidrográficas (Mayo, 2007) en las Cuencas de Consag y Wagner, Norte de California, México. Issue 1. 119–127 doi:[10.18268/BSGM2009v61n1a11](https://doi.org/10.18268/BSGM2009v61n1a11)
- Verma, S. P., Arredondo-Parra, U. C., Andaverde, J., Gómez-Arias, E., y Guerrero-Martínez, F. J. (2012). Three-dimensional temperature field simulation of a cooling of a magma chamber, La Primavera caldera, Jalisco, Mexico. In *International Geology Review* (Vol. 54, Issue 7). doi: 10.1080/00206814.2011.585036
- Versteeg, H. K. and Malalasekera, W. (2007). *An Introduction to Computational Fluid Dynamics: the finite volume method*. (2nd ed) Pearson education.
- Xamán, J. y Gijón-Rivera, M. (2015). *Dinámica de fluidos computacional para ingenieros*. Palibrio.
- Xu, T., Hu, Z., Feng, B., Feng, G., Li, F., y Jiang, Z. (2020). Numerical evaluation of building heating potential from a co-axial closed-loop geothermal system using wellbore–reservoir coupling numerical model.

Energy Exploration and Exploitation. SAGE Publications Inc., 38(3), 733–754. doi:
10.1177/0144598719889799

Anexo A

Las Figuras 31-37 muestran el comportamiento de la temperatura con respecto a las diferentes longitudes horizontales de la tubería.

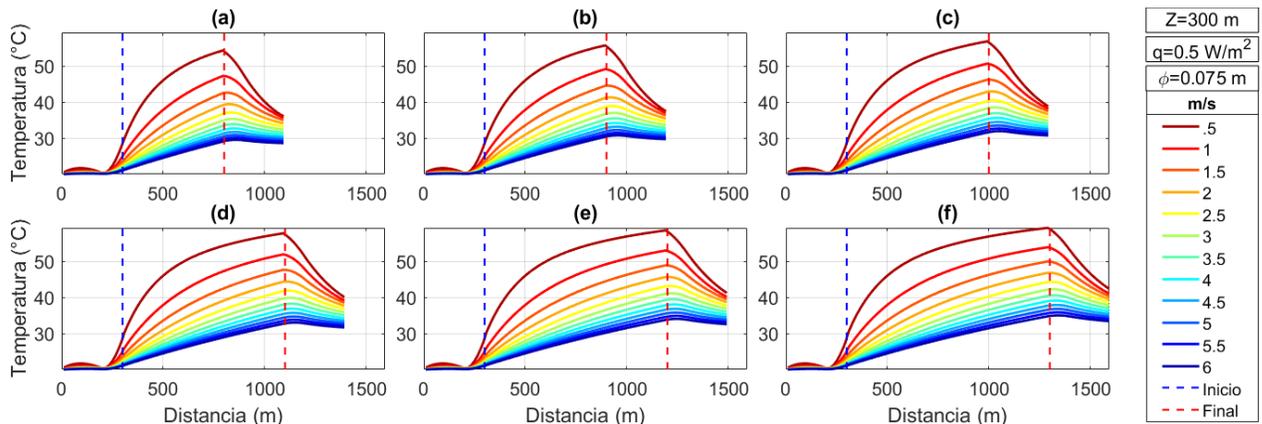


Figura 31. Comportamiento de la temperatura a lo largo de la tubería considerando doce velocidades. La profundidad (Z), el flujo de calor (\dot{q}) y diámetro de la tubería (ϕ) son constantes. Las líneas punteadas azules indican la profundidad de la tubería (descenso del fluido) mientras que las líneas punteadas rojas indican la profundidad donde comienza el ascenso del fluido. La distancia entre ambas líneas corresponde al inicio y el final de la tubería horizontal con longitudes de: (a) 500 m, (b) 600 m, (c) 700 m, (d) 800 m, (e) 900 m y (f) 1000 m.

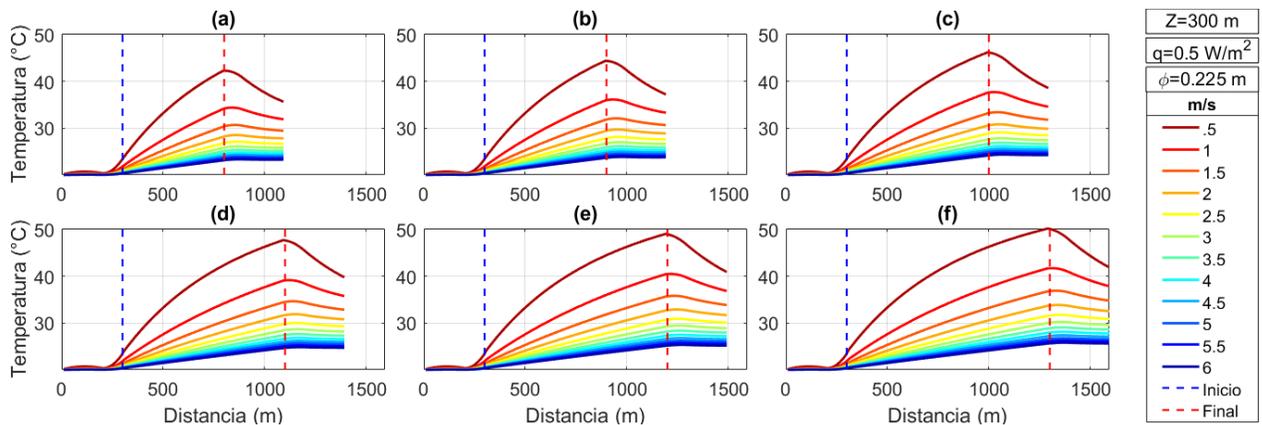


Figura 32 Comportamiento de la temperatura a lo largo de la tubería considerando doce velocidades. La profundidad (Z), el flujo de calor (\dot{q}) y diámetro de la tubería (ϕ) son constantes. Las líneas punteadas azules indican la profundidad de la tubería (descenso del fluido) mientras que las líneas punteadas rojas indican la profundidad donde comienza el ascenso del fluido. La distancia entre ambas líneas corresponde al inicio y el final de la tubería horizontal con longitudes de: (a) 500 m, (b) 600 m, (c) 700 m, (d) 800 m, (e) 900 m y (f) 1000 m.

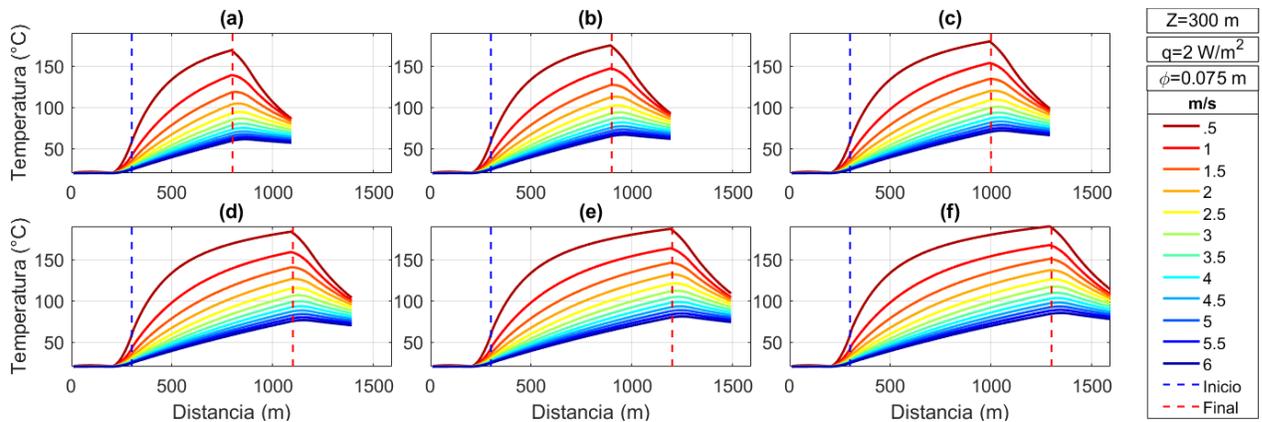


Figura 33 Comportamiento de la temperatura a lo largo de la tubería considerando doce velocidades. La profundidad (Z), el flujo de calor (\dot{q}) y diámetro de la tubería (ϕ) son constantes. Las líneas punteadas azules indican la profundidad de la tubería (descenso del fluido) mientras que las líneas punteadas rojas indican la profundidad donde comienza el ascenso del fluido. La distancia entre ambas líneas corresponde al inicio y el final de la tubería horizontal con longitudes de: (a) 500 m, (b) 600 m, (c) 700 m, (d) 800 m, (e) 900 m y (f) 1000 m.

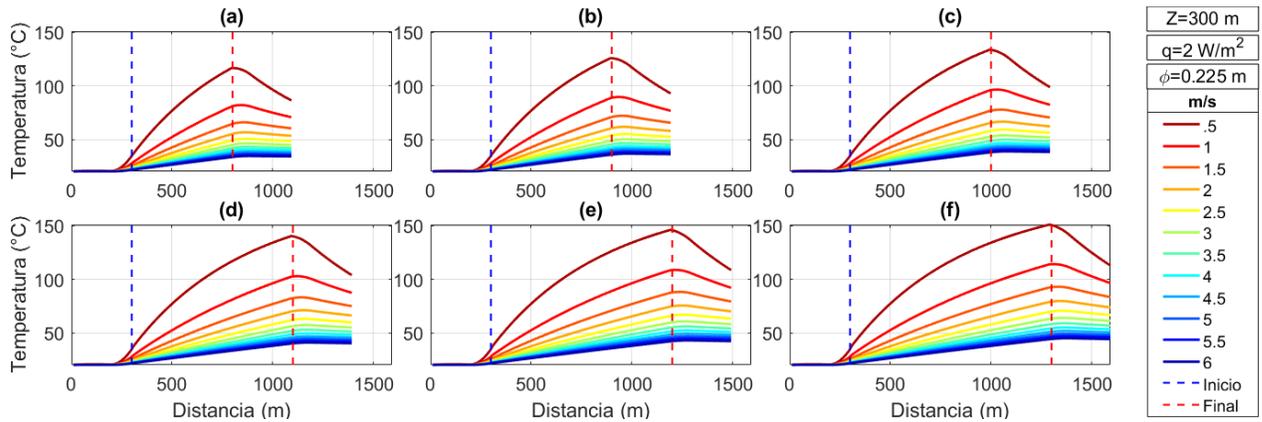


Figura 34 Comportamiento de la temperatura a lo largo de la tubería considerando doce velocidades. La profundidad (Z), el flujo de calor (\dot{q}) y diámetro de la tubería (ϕ) son constantes. Las líneas punteadas azules indican la profundidad de la tubería (descenso del fluido) mientras que las líneas punteadas rojas indican la profundidad donde comienza el ascenso del fluido. La distancia entre ambas líneas corresponde al inicio y el final de la tubería horizontal con longitudes de: (a) 500 m, (b) 600 m, (c) 700 m, (d) 800 m, (e) 900 m y (f) 1000 m.

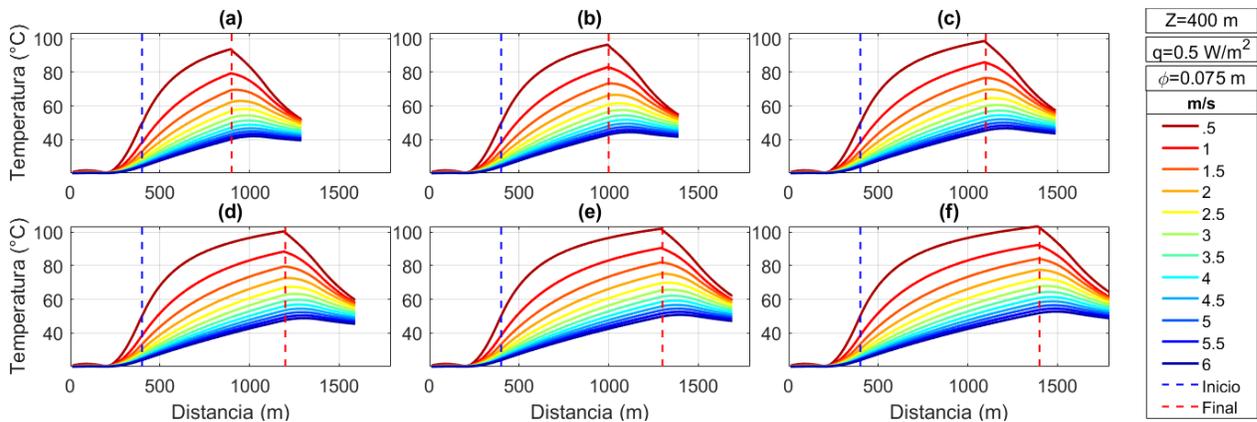


Figura 35 Comportamiento de la temperatura a lo largo de la tubería considerando doce velocidades. La profundidad (Z), el flujo de calor (\dot{q}) y diámetro de la tubería (ϕ) son constantes. Las líneas punteadas azules indican la profundidad de la tubería (descenso del fluido) mientras que las líneas punteadas rojas indican la profundidad donde comienza el ascenso del fluido. La distancia entre ambas líneas corresponde al inicio y el final de la tubería horizontal con longitudes de: (a) 500 m, (b) 600 m, (c) 700 m, (d) 800 m, (e) 900 m y (f) 1000 m.

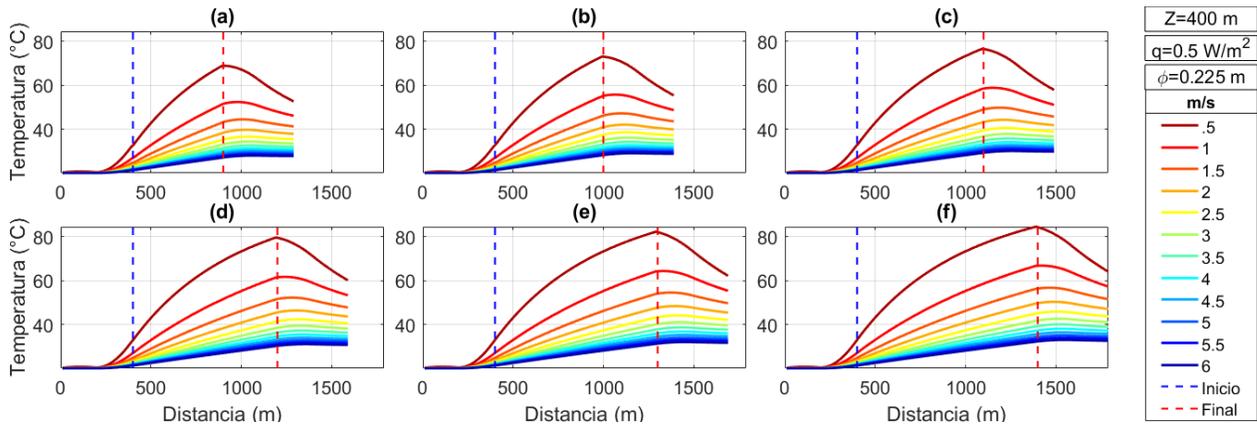


Figura 36 Comportamiento de la temperatura a lo largo de la tubería considerando doce velocidades. La profundidad (Z), el flujo de calor (\dot{q}) y diámetro de la tubería (ϕ) son constantes. Las líneas punteadas azules indican la profundidad de la tubería (descenso del fluido) mientras que las líneas punteadas rojas indican la profundidad donde comienza el ascenso del fluido. La distancia entre ambas líneas corresponde al inicio y el final de la tubería horizontal con longitudes de: (a) 500 m, (b) 600 m, (c) 700 m, (d) 800 m, (e) 900 m y (f) 1000 m.

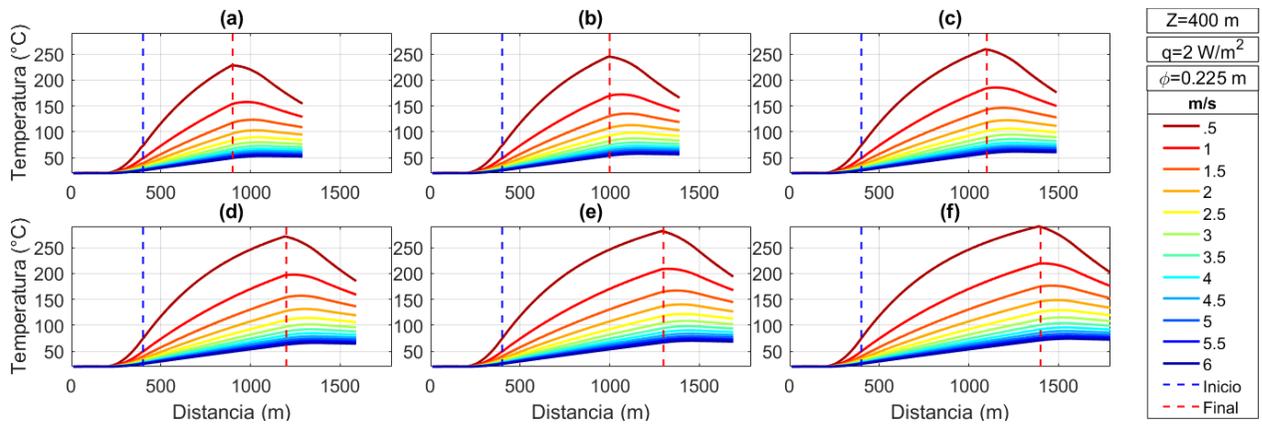


Figura 37 Comportamiento de la temperatura a lo largo de la tubería considerando doce velocidades. La profundidad (Z), el flujo de calor (\dot{q}) y diámetro de la tubería (ϕ) son constantes. Las líneas punteadas azules indican la profundidad de la tubería (descenso del fluido) mientras que las líneas punteadas rojas indican la profundidad donde comienza el ascenso del fluido. La distancia entre ambas líneas corresponde al inicio y el final de la tubería horizontal con longitudes de: (a) 500 m, (b) 600 m, (c) 700 m, (d) 800 m, (e) 900 m y (f) 1000 m.

Anexo B

Las Tablas 9-11 contienen las temperaturas de salida de las 2592 configuraciones modeladas.

Tabla 9. Temperaturas simuladas. Resultados para 300 m de profundidad (valor de la longitud de la tubería de descenso y de la de ascenso) donde L es la longitud horizontal (m), LT es la longitud total (m), ϕ es el diámetro de la tubería (m), V es la velocidad del fluido (m/s), \dot{q} es el flujo de calor (W/m²) y los datos del centro son las temperaturas de salida.

L	LT	V	$\phi = 0.075$				$\phi = 0.15$				$\phi = 0.225$			
			$\dot{q}=0.5$	$\dot{q}=1$	$\dot{q}=1.5$	$\dot{q}=2$	$\dot{q}=0.5$	$\dot{q}=1$	$\dot{q}=1.5$	$\dot{q}=2$	$\dot{q}=0.5$	$\dot{q}=1$	$\dot{q}=1.5$	$\dot{q}=2$
500	1100	0.5	36.1	53.3	70.7	88.2	36.6	54.4	72.2	89.8	35.7	52.7	69.6	86.6
		1	35.7	52.5	69.1	85.5	34.0	49.1	64.2	79.4	31.9	44.9	57.8	70.8
		1.5	35.1	51.2	67.3	83.4	31.7	44.5	57.2	70.0	29.5	39.8	50.1	60.4
		2	34.2	49.5	64.8	80.1	30.1	41.0	51.9	62.9	27.8	36.4	44.9	53.4
		2.5	33.3	47.7	62.0	76.4	28.8	38.3	47.9	57.5	26.7	34.0	41.2	48.5
		3	32.4	45.9	59.4	72.9	27.8	36.3	44.7	53.2	25.8	32.2	38.5	44.9
		3.5	31.6	44.3	56.9	69.6	27.0	34.6	42.2	49.8	25.2	30.8	36.4	42.0
		4	30.9	42.8	54.6	66.5	26.4	33.3	40.2	47.1	24.6	29.7	34.8	39.8
		4.5	30.3	41.4	52.6	63.8	25.8	32.1	38.5	44.8	24.2	28.8	33.4	38.0
		5	29.7	40.2	50.7	61.3	25.4	31.2	37.0	42.8	23.9	28.1	32.3	36.5
5.5	29.2	39.1	49.1	59.1	25.0	30.4	35.8	41.2	23.6	27.4	31.3	35.2		
6	28.7	38.1	47.6	57.0	24.6	29.7	34.7	39.7	23.3	26.9	30.5	34.1		
600	1200	0.5	37.6	57.0	76.4	95.9	38.1	57.5	76.8	96.0	37.2	55.9	74.5	93.1
		1	37.0	55.2	73.2	91.0	35.4	52.1	68.9	85.6	33.3	47.8	62.3	76.9
		1.5	36.4	54.0	71.6	89.0	33.1	47.3	61.6	75.9	30.7	42.3	53.9	65.6
		2	35.5	52.3	69.1	85.8	31.3	43.6	55.9	68.3	28.9	38.6	48.3	58.0
		2.5	34.6	50.5	66.3	82.2	29.9	40.7	51.5	62.3	27.6	35.9	44.2	52.5
		3	33.8	48.7	63.6	78.5	29.4	38.4	48.0	57.7	26.7	33.9	41.2	48.4
		3.5	32.9	47.0	61.0	75.1	29.4	36.6	45.3	53.9	25.9	32.4	38.8	45.2
		4	32.2	45.4	58.6	71.9	29.4	35.1	43.0	50.9	25.3	31.1	36.9	42.7
		4.5	31.5	44.0	56.5	69.0	29.4	33.8	41.1	48.3	24.8	30.1	35.4	40.6
		5	30.9	42.7	54.5	66.4	29.4	32.8	39.4	46.1	24.4	29.3	34.1	38.9
5.5	30.3	41.5	52.7	64.0	29.4	31.9	38.1	44.2	24.1	28.6	33.0	37.5		
6	29.8	40.4	51.1	61.8	29.4	31.1	36.9	42.6	23.8	27.9	32.1	36.2		
700	1300	0.5	39.3	60.5	81.7	103.0	39.4	60.3	81.0	101.5	38.6	58.8	78.9	99.0
		1	38.2	57.7	76.9	96.0	36.7	54.9	73.1	91.3	34.6	50.5	66.5	82.5
		1.5	37.6	56.5	75.3	94.0	34.3	49.9	65.6	81.3	31.8	44.7	57.6	70.5
		2	36.7	54.8	72.9	90.9	32.4	46.0	59.6	73.2	29.9	40.7	51.4	62.3
		2.5	35.8	53.0	70.1	87.3	31.0	42.9	54.9	66.9	28.5	37.7	47.0	56.3
		3	34.9	51.1	67.4	83.7	29.8	40.5	51.2	61.9	27.4	35.6	43.7	51.8
		3.5	34.1	49.4	64.8	80.2	29.4	38.5	48.1	57.8	26.6	33.9	41.1	48.3
		4	33.3	47.8	62.3	76.9	29.4	36.9	45.6	54.5	26.0	32.5	39.0	45.5

L	LT	V	$\phi = 0.075$				$\phi = 0.15$				$\phi = 0.225$			
			$\dot{q}=0.5$	$\dot{q}=1$	$\dot{q}=1.5$	$\dot{q}=2$	$\dot{q}=0.5$	$\dot{q}=1$	$\dot{q}=1.5$	$\dot{q}=2$	$\dot{q}=0.5$	$\dot{q}=1$	$\dot{q}=1.5$	$\dot{q}=2$
		4.5	32.6	46.3	60.1	73.9	29.4	35.5	43.6	51.6	25.4	31.4	37.3	43.2
		5	32.0	45.0	58.0	71.1	29.4	34.3	41.8	49.3	25.0	30.4	35.9	41.3
		5.5	31.4	43.7	56.1	68.5	29.4	33.3	40.3	47.2	24.6	29.6	34.7	39.7
		6	30.8	42.6	54.4	66.2	29.4	32.4	38.9	45.4	24.3	29.0	33.6	38.3
800	1400	0.5	40.8	63.7	86.6	109.6	40.5	62.7	84.7	106.5	39.8	61.4	82.8	104.2
		1	39.3	59.9	80.3	100.4	37.9	57.4	76.9	96.4	35.8	53.0	70.3	87.6
		1.5	38.6	58.7	78.6	98.4	35.5	52.3	69.3	86.2	32.9	46.9	61.0	75.1
		2	37.8	57.0	76.3	95.4	33.5	48.3	63.0	77.9	30.8	42.6	54.5	66.3
		2.5	36.9	55.2	73.6	91.9	32.0	45.0	58.1	71.2	29.3	39.5	49.7	59.9
		3	36.0	53.4	70.8	88.3	30.7	42.4	54.1	65.9	28.2	37.1	46.1	55.1
		3.5	35.2	51.6	68.2	84.8	29.7	40.3	50.9	61.5	27.3	35.3	43.3	51.3
		4	34.4	50.0	65.7	81.4	29.4	38.5	48.2	57.9	26.6	33.8	41.0	48.2
		4.5	33.6	48.5	63.4	78.3	29.4	37.1	45.9	54.9	26.0	32.6	39.2	45.7
		5	33.0	47.1	61.2	75.4	29.4	35.8	44.0	52.3	25.5	31.6	37.6	43.6
		5.5	32.3	45.8	59.2	72.8	29.4	34.7	42.4	50.0	25.1	30.7	36.3	41.8
6	31.8	44.6	57.4	70.3	29.4	33.7	40.9	48.1	24.8	29.9	35.1	40.3		
900	1500	0.5	42.3	66.7	91.2	115.8	41.6	64.9	88.0	111.0	40.9	63.7	86.3	108.9
		1	40.2	61.9	83.4	104.5	39.0	59.7	80.3	101.0	36.9	55.3	73.8	92.4
		1.5	39.6	60.7	81.6	102.5	36.5	54.6	72.6	90.8	33.9	49.0	64.2	79.5
		2	38.8	59.1	79.3	99.5	34.5	50.4	66.2	82.2	31.7	44.5	57.3	70.2
		2.5	37.9	57.3	76.7	96.1	32.9	47.0	61.1	75.3	30.1	41.2	52.3	63.4
		3	37.0	55.5	74.0	92.5	31.6	44.2	56.9	69.7	28.9	38.7	48.4	58.2
		3.5	36.1	53.7	71.3	89.0	30.5	42.0	53.5	65.0	28.0	36.7	45.4	54.1
		4	35.3	52.0	68.8	85.6	29.6	40.1	50.7	61.2	27.2	35.1	43.0	50.9
		4.5	34.6	50.5	66.4	82.4	29.4	38.6	48.2	58.0	26.6	33.8	41.0	48.1
		5	33.9	49.0	64.2	79.5	29.4	37.2	46.2	55.2	26.1	32.7	39.3	45.9
		5.5	33.2	47.7	62.2	76.7	29.4	36.0	44.4	52.8	25.6	31.7	37.8	44.0
6	32.7	46.5	60.3	74.2	29.4	35.0	42.9	50.7	25.2	30.9	36.6	42.3		
1000	1600	0.5	43.6	69.6	95.6	121.7	42.6	67.0	91.1	115.1	41.9	65.8	89.5	113.2
		1	41.1	63.8	86.2	108.4	40.0	61.7	83.5	105.2	37.9	57.4	77.1	96.7
		1.5	40.4	62.5	84.4	106.1	37.5	56.6	75.8	95.0	34.8	51.0	67.2	83.6
		2	39.6	60.9	82.1	103.3	35.5	52.3	69.3	86.3	32.6	46.3	60.1	73.9
		2.5	38.8	59.1	79.5	99.9	33.8	48.8	63.9	79.1	30.9	42.8	54.8	66.7
		3	37.9	57.3	76.8	96.3	32.4	46.0	59.6	73.2	29.6	40.1	50.7	61.2
		3.5	37.0	55.6	74.2	92.8	31.3	43.6	56.0	68.4	28.6	38.0	47.5	56.9
		4	36.2	53.9	71.6	89.4	30.4	41.7	53.0	64.4	27.8	36.3	44.9	53.4
		4.5	35.5	52.3	69.2	86.2	29.6	40.0	50.4	60.9	27.1	34.9	42.7	50.5
		5	34.8	50.9	67.0	83.2	29.4	38.6	48.3	58.0	26.6	33.7	40.9	48.1
		5.5	34.1	49.5	64.9	80.4	29.4	37.3	46.4	55.4	26.1	32.7	39.4	46.0
6	33.5	48.2	63.0	77.8	29.4	36.2	44.7	53.2	25.7	31.8	38.0	44.2		

Tabla 10 Temperaturas simuladas. Resultados para 350 m de profundidad (valor de la longitud de la tubería de descenso y de la de ascenso) donde L es la longitud horizontal (m), LT es la longitud total (m), ϕ es el diámetro de la tubería (m), V es la velocidad del fluido (m/s), \dot{q} es el flujo de calor (W/m^2) y los datos del centro son las temperaturas de salida.

L	LT	V	$\phi = 0.075$				$\phi = 0.15$				$\phi = 0.225$			
			$\dot{q}=0.5$	$\dot{q}=1$	$\dot{q}=1.5$	$\dot{q}=2$	$\dot{q}=0.5$	$\dot{q}=1$	$\dot{q}=1.5$	$\dot{q}=2$	$\dot{q}=0.5$	$\dot{q}=1$	$\dot{q}=1.5$	$\dot{q}=2$
500	1100	0.5	45.0	71.7	98.3	125.2	45.2	71.6	97.6	123.6	44.1	69.6	95.1	120.4
		1	43.7	68.4	92.6	116.6	41.7	64.8	87.8	110.9	38.8	58.8	78.9	99.2
		1.5	43.0	67.2	91.1	114.9	38.6	58.3	78.0	97.9	35.2	51.3	67.4	83.7
		2	41.9	65.1	88.1	111.2	36.1	53.1	70.2	87.5	32.6	46.1	59.5	73.1
		2.5	40.7	62.6	84.6	106.6	34.1	49.1	64.1	79.3	30.8	42.3	53.9	65.5
		3	39.5	60.2	80.9	101.8	32.6	45.9	59.3	72.8	29.5	39.6	49.6	59.8
		3.5	38.4	57.9	77.5	97.1	31.3	43.4	55.4	67.5	28.4	37.4	46.3	55.3
		4	37.3	55.7	74.2	92.8	30.3	41.3	52.2	63.2	27.6	35.6	43.7	51.8
		4.5	36.4	53.7	71.2	88.7	29.5	39.5	49.5	59.6	26.9	34.2	41.6	48.9
		5	35.5	51.9	68.4	85.0	29.4	38.0	47.3	56.6	26.3	33.0	39.8	46.5
		5.5	34.7	50.3	65.9	81.7	29.4	36.7	45.3	54.0	25.8	32.0	38.2	44.4
		6	34.0	48.8	63.6	78.6	29.4	35.6	43.6	51.7	25.4	31.2	36.9	42.7
600	1200	0.5	47.6	77.1	106.6	136.4	47.3	75.8	104.0	132.1	46.3	74.2	101.9	129.5
		1	45.6	72.2	98.3	124.3	43.8	69.1	94.3	119.6	40.9	63.1	85.4	107.8
		1.5	44.9	71.0	96.9	122.6	40.5	62.3	84.2	106.3	36.9	55.0	73.1	91.3
		2	43.8	69.0	94.0	119.1	37.9	56.9	76.0	95.2	34.2	49.3	64.5	79.7
		2.5	42.6	66.6	90.6	114.6	35.8	52.5	69.4	86.4	32.2	45.2	58.2	71.3
		3	41.4	64.1	86.9	109.8	34.1	49.1	64.1	79.3	30.7	42.1	53.5	65.0
		3.5	40.2	61.7	83.3	105.0	32.7	46.3	59.9	73.5	29.6	39.7	49.8	60.0
		4	39.2	59.5	79.9	100.5	31.6	44.0	56.3	68.8	28.6	37.8	46.9	56.1
		4.5	38.1	57.4	76.8	96.3	30.7	42.0	53.4	64.8	27.8	36.2	44.5	52.8
		5	37.2	55.5	73.9	92.4	29.9	40.4	50.9	61.4	27.2	34.8	42.5	50.1
		5.5	36.4	53.7	71.2	88.8	29.3	38.9	48.7	58.5	26.6	33.7	40.8	47.8
		6	35.6	52.1	68.7	85.5	29.3	37.7	46.8	56.0	26.2	32.7	39.3	45.9
700	1300	0.5	50.1	82.1	114.3	146.8	49.2	79.7	109.8	139.9	48.3	78.2	107.9	137.7
		1	47.3	75.6	103.4	131.2	45.7	73.0	100.2	127.5	42.8	67.0	91.3	115.8
		1.5	46.6	74.4	102.0	129.5	42.3	66.1	89.9	114.0	38.6	58.4	78.4	98.5
		2	45.6	72.5	99.3	126.1	39.6	60.4	81.3	102.4	35.7	52.4	69.1	86.0
		2.5	44.4	70.1	95.9	121.7	37.3	55.8	74.3	93.0	33.5	47.9	62.4	76.9
		3	43.1	67.7	92.3	117.0	35.6	52.1	68.7	85.5	31.9	44.6	57.3	70.0
		3.5	41.9	65.2	88.6	112.2	34.1	49.1	64.1	79.3	30.6	41.9	53.2	64.6
		4	40.8	62.9	85.2	107.6	32.9	46.6	60.3	74.1	29.6	39.8	50.0	60.2
		4.5	39.8	60.8	81.9	103.2	31.9	44.4	57.1	69.8	28.7	38.0	47.3	56.7
		5	38.8	58.8	78.9	99.2	31.0	42.6	54.3	66.1	28.0	36.6	45.1	53.7
		5.5	37.9	57.0	76.1	95.4	30.2	41.1	52.0	62.9	27.4	35.3	43.2	51.1
		6	37.1	55.3	73.5	91.9	29.6	39.7	49.9	60.1	26.9	34.3	41.6	49.0
800	1400	0.5	52.4	86.9	121.5	156.7	50.9	83.1	115.0	146.9	50.1	81.8	113.4	145.0
		1	48.8	78.7	108.1	137.6	47.4	76.5	105.5	134.6	44.5	70.5	96.7	123.1

L	LT	V	$\phi = 0.075$				$\phi = 0.15$				$\phi = 0.225$			
			$\dot{q}=0.5$	$\dot{q}=1$	$\dot{q}=1.5$	$\dot{q}=2$	$\dot{q}=0.5$	$\dot{q}=1$	$\dot{q}=1.5$	$\dot{q}=2$	$\dot{q}=0.5$	$\dot{q}=1$	$\dot{q}=1.5$	$\dot{q}=2$
		1.5	48.1	77.5	106.7	135.7	44.0	69.6	95.2	121.1	40.2	61.7	83.3	105.2
		2	47.1	75.7	104.1	132.5	41.1	63.6	86.3	109.1	37.1	55.3	73.6	92.0
		2.5	45.9	73.3	100.7	128.2	38.8	58.8	79.0	99.3	34.8	50.5	66.4	82.3
		3	44.7	70.9	97.1	123.5	36.9	54.9	73.1	91.3	33.1	46.9	60.8	74.9
		3.5	43.5	68.5	93.5	118.7	35.4	51.7	68.2	84.7	31.7	44.1	56.5	69.0
		4	42.4	66.1	90.0	114.1	34.1	49.0	64.1	79.2	30.6	41.8	53.0	64.3
		4.5	41.3	63.9	86.7	109.7	33.0	46.8	60.6	74.5	29.6	39.9	50.1	60.4
		5	40.3	61.9	83.6	105.5	32.0	44.8	57.7	70.6	28.9	38.3	47.7	57.1
		5.5	39.4	60.0	80.7	101.6	31.2	43.1	55.1	67.1	28.2	36.9	45.6	54.4
6	38.5	58.2	78.0	98.0	30.5	41.7	52.9	64.1	27.6	35.7	43.9	52.0		
900	1500	0.5	54.5	91.3	128.4	166.0	52.4	86.3	119.7	153.4	51.7	85.1	118.4	151.7
		1	50.2	81.6	112.5	143.5	49.0	79.7	110.4	141.2	46.1	73.9	101.8	129.9
		1.5	49.5	80.4	110.9	141.4	45.6	72.8	100.1	127.6	41.7	64.8	88.0	111.5
		2	48.5	78.5	108.4	138.2	42.6	66.7	91.0	115.4	38.4	58.1	77.8	97.8
		2.5	47.3	76.3	105.1	134.1	40.2	61.7	83.4	105.3	36.0	53.0	70.2	87.5
		3	46.1	73.8	101.6	129.5	38.2	57.6	77.2	96.9	34.2	49.2	64.3	79.5
		3.5	44.9	71.4	98.0	124.7	36.6	54.3	72.0	89.9	32.7	46.1	59.7	73.3
		4	43.8	69.0	94.5	120.1	35.2	51.4	67.7	84.1	31.5	43.7	55.9	68.2
		4.5	42.7	66.8	91.1	115.6	34.1	49.0	64.0	79.1	30.5	41.6	52.8	64.0
		5	41.7	64.7	87.9	111.4	33.1	46.9	60.9	74.9	29.7	39.9	50.2	60.5
5.5	40.7	62.8	85.0	107.4	32.2	45.1	58.1	71.2	28.9	38.5	48.0	57.5		
6	39.8	60.9	82.2	103.7	31.4	43.6	55.7	68.0	28.3	37.2	46.1	54.9		
1000	1600	0.5	56.6	95.6	134.8	174.8	53.8	89.2	124.1	159.4	53.2	88.2	122.9	157.8
		1	51.6	84.3	116.6	149.1	50.5	82.7	114.9	147.1	47.6	77.0	106.5	136.2
		1.5	50.8	83.0	114.8	146.7	47.0	75.7	104.6	133.7	43.1	67.7	92.5	117.5
		2	49.8	81.1	112.3	143.5	44.0	69.6	95.3	121.4	39.7	60.7	81.9	103.2
		2.5	48.6	78.9	109.2	139.5	41.5	64.5	87.6	110.9	37.2	55.4	73.8	92.4
		3	47.4	76.5	105.7	135.0	39.5	60.2	81.1	102.2	35.2	51.4	67.6	84.0
		3.5	46.2	74.1	102.1	130.3	37.8	56.7	75.7	94.9	33.6	48.2	62.7	77.4
		4	45.1	71.8	98.6	125.6	36.3	53.7	71.2	88.8	32.4	45.5	58.7	72.0
		4.5	44.0	69.5	95.2	121.1	35.1	51.2	67.3	83.6	31.3	43.4	55.4	67.5
		5	43.0	67.4	92.0	116.8	34.0	49.0	64.0	79.1	30.4	41.5	52.6	63.8
5.5	42.0	65.4	89.0	112.8	33.1	47.1	61.1	75.2	29.7	40.0	50.3	60.6		
6	41.1	63.5	86.1	109.0	32.3	45.4	58.5	71.7	29.0	38.6	48.2	57.8		

Tabla 11 Temperaturas simuladas. Resultados para 400 m de profundidad (valor de la longitud de la tubería de descenso y de la de ascenso) donde L es la longitud horizontal (m), LT es la longitud total (m), ϕ es el diámetro de la tubería (m), V es la velocidad del fluido (m/s), \dot{q} es el flujo de calor (W/m^2) y los datos del centro son las temperaturas de salida.

L	LT	V	$\phi = 0.075$				$\phi = 0.15$				$\phi = 0.225$			
			$\dot{q}=0.5$	$\dot{q}=1$	$\dot{q}=1.5$	$\dot{q}=2$	$\dot{q}=0.5$	$\dot{q}=1$	$\dot{q}=1.5$	$\dot{q}=2$	$\dot{q}=0.5$	$\dot{q}=1$	$\dot{q}=1.5$	$\dot{q}=2$
500	1100	0.5	54.4	90.6	127.0	164.1	53.6	88.3	122.5	157.1	52.6	86.6	120.4	154.4
		1	51.5	83.7	115.4	147.5	49.7	80.7	111.8	143.1	46.1	73.5	101.1	128.9
		1.5	50.9	82.9	114.5	146.3	45.7	72.7	99.9	127.3	41.2	63.6	86.1	108.9
		2	49.8	80.8	111.6	142.6	42.4	66.0	89.8	113.8	37.8	56.6	75.5	94.5
		2.5	48.3	78.0	107.7	137.5	39.8	60.7	81.7	102.9	35.4	51.5	67.7	84.1
		3	46.9	75.0	103.3	131.8	37.7	56.4	75.1	94.1	33.5	47.6	61.9	76.2
		3.5	45.4	72.1	99.0	126.1	36.0	52.9	69.8	86.9	32.0	44.6	57.3	70.0
		4	44.1	69.4	94.8	120.5	34.6	50.0	65.4	81.0	30.8	42.2	53.6	65.1
		4.5	42.8	66.8	91.0	115.4	33.4	47.6	61.7	76.0	29.9	40.2	50.6	61.0
		5	41.7	64.4	87.3	110.5	32.4	45.5	58.6	71.8	29.1	38.6	48.1	57.6
		5.5	40.6	62.2	84.0	106.1	31.6	43.7	55.9	68.1	28.4	37.2	45.9	54.8
		6	39.6	60.2	81.0	102.0	30.8	42.2	53.5	65.0	27.8	36.0	44.1	52.3
600	1200	0.5	57.8	97.6	137.7	178.6	56.3	93.5	130.4	168.0	55.4	92.2	128.8	165.7
		1	53.9	88.4	122.5	157.2	52.3	86.1	119.9	153.9	48.7	78.8	109.2	139.8
		1.5	53.3	87.6	121.6	155.9	48.2	77.9	107.7	137.8	43.5	68.3	93.3	118.6
		2	52.2	85.6	118.9	152.3	44.8	70.8	97.1	123.7	39.9	60.8	81.8	103.2
		2.5	50.7	82.9	115.0	147.3	42.0	65.1	88.4	112.0	37.2	55.2	73.4	91.7
		3	49.3	79.9	110.7	141.7	39.7	60.5	81.4	102.6	35.1	51.0	66.9	83.0
		3.5	47.8	77.0	106.4	136.0	37.9	56.7	75.6	94.7	33.5	47.7	61.9	76.2
		4	46.4	74.1	102.1	130.3	36.4	53.5	70.8	88.3	32.2	45.0	57.8	70.7
		4.5	45.1	71.5	98.1	124.9	35.1	50.9	66.8	82.8	31.1	42.8	54.5	66.2
		5	43.9	69.0	94.3	119.9	33.9	48.6	63.3	78.1	30.2	40.9	51.7	62.4
		5.5	42.7	66.7	90.8	115.2	33.0	46.6	60.3	74.1	29.5	39.4	49.3	59.2
		6	41.7	64.5	87.6	110.8	32.2	44.9	57.7	70.6	28.8	38.0	47.2	56.5
700	1300	0.5	61.0	104.1	147.7	192.3	58.6	98.3	137.6	178.0	57.9	97.2	136.3	176.0
		1	56.0	92.7	129.0	166.1	54.7	91.0	127.2	163.8	51.1	83.8	116.7	149.9
		1.5	55.4	91.9	128.0	164.6	50.5	82.6	114.9	147.5	45.7	72.8	100.1	127.8
		2	54.3	89.9	125.4	161.1	46.9	75.3	103.9	132.9	41.8	64.8	87.9	111.4
		2.5	52.9	87.3	121.7	156.3	44.0	69.3	94.8	120.7	38.9	58.8	78.8	99.1
		3	51.4	84.4	117.5	150.7	41.6	64.4	87.3	110.6	36.7	54.2	71.8	89.6
		3.5	50.0	81.4	113.1	145.0	39.7	60.3	81.2	102.2	34.9	50.6	66.3	82.2
		4	48.5	78.5	108.8	139.3	38.0	56.9	76.0	95.2	33.5	47.7	61.9	76.2
		4.5	47.2	75.8	104.6	133.8	36.6	54.0	71.6	89.3	32.3	45.3	58.2	71.3
		5	45.9	73.2	100.7	128.6	35.4	51.6	67.8	84.2	31.3	43.2	55.1	67.1
		5.5	44.8	70.8	97.1	123.7	34.4	49.4	64.6	79.9	30.5	41.5	52.5	63.6
		6	43.7	68.6	93.7	119.2	33.5	47.6	61.7	76.0	29.8	40.0	50.3	60.6
800	1400	0.5	64.0	110.3	157.2	205.3	60.8	102.6	144.2	187.1	60.1	101.7	143.2	185.4
		1	58.0	96.6	135.0	174.5	56.9	95.4	133.9	172.8	53.3	88.3	123.6	159.2

L	LT	V	$\phi = 0.075$				$\phi = 0.15$				$\phi = 0.225$			
			$\dot{q}=0.5$	$\dot{q}=1$	$\dot{q}=1.5$	$\dot{q}=2$	$\dot{q}=0.5$	$\dot{q}=1$	$\dot{q}=1.5$	$\dot{q}=2$	$\dot{q}=0.5$	$\dot{q}=1$	$\dot{q}=1.5$	$\dot{q}=2$
		1.5	57.3	95.7	133.8	172.6	52.7	87.0	121.6	156.5	47.8	77.0	106.6	136.5
		2	56.3	93.9	131.3	169.1	49.0	79.5	110.3	141.5	43.7	68.5	93.7	119.2
		2.5	54.9	91.3	127.7	164.4	45.9	73.2	100.9	128.8	40.6	62.2	84.0	106.1
		3	53.4	88.4	123.6	159.0	43.4	68.1	93.0	118.2	38.2	57.3	76.6	96.0
		3.5	52.0	85.5	119.2	153.3	41.3	63.8	86.4	109.4	36.3	53.4	70.6	88.0
		4	50.5	82.6	114.9	147.6	39.6	60.2	80.9	101.9	34.8	50.3	65.8	81.5
		4.5	49.1	79.8	110.7	142.0	38.1	57.1	76.2	95.6	33.5	47.7	61.9	76.2
		5	47.8	77.1	106.8	136.7	36.8	54.5	72.2	90.2	32.4	45.5	58.5	71.7
		5.5	46.6	74.7	103.0	131.7	35.7	52.2	68.7	85.4	31.5	43.6	55.7	67.9
6	45.5	72.4	99.5	127.0	34.7	50.1	65.7	81.3	30.7	42.0	53.3	64.6		
900	1500	0.5	66.9	116.2	166.3	217.5	62.8	106.6	150.4	195.5	62.2	105.9	149.5	194.1
		1	59.8	100.3	140.6	182.3	58.9	99.4	140.0	181.0	55.4	92.5	130.0	167.8
		1.5	59.1	99.2	139.2	179.9	54.7	91.1	127.8	164.8	49.7	81.0	112.6	144.7
		2	58.0	97.5	136.7	176.5	50.9	83.5	116.4	149.6	45.4	72.2	99.2	126.7
		2.5	56.7	95.0	133.2	171.9	47.8	77.0	106.6	136.5	42.2	65.5	89.0	112.9
		3	55.3	92.2	129.2	166.5	45.1	71.6	98.4	125.5	39.6	60.3	81.1	102.2
		3.5	53.8	89.2	124.9	160.9	42.9	67.1	91.5	116.2	37.6	56.1	74.8	93.7
		4	52.3	86.3	120.6	155.2	41.1	63.3	85.7	108.4	36.0	52.8	69.7	86.7
		4.5	50.9	83.5	116.4	149.6	39.5	60.0	80.7	101.7	34.6	50.0	65.4	81.0
		5	49.6	80.8	112.3	144.2	38.2	57.2	76.4	95.9	33.5	47.6	61.9	76.2
5.5	48.4	78.3	108.5	139.1	37.0	54.8	72.7	90.9	32.5	45.6	58.8	72.1		
6	47.2	75.9	104.9	134.3	35.9	52.6	69.5	86.4	31.7	43.9	56.2	68.5		
1000	1600	0.5	69.5	121.7	174.9	229.0	64.6	110.3	156.0	203.4	64.1	109.7	155.3	202.0
		1	61.5	103.8	146.0	189.6	60.7	103.2	145.6	188.7	57.3	96.5	136.0	175.8
		1.5	60.7	102.5	144.1	186.8	56.5	94.9	133.5	172.5	51.5	84.7	118.3	152.4
		2	59.7	100.8	141.7	183.3	52.7	87.2	122.0	157.2	47.1	75.6	104.5	133.8
		2.5	58.4	98.3	138.3	178.7	49.5	80.5	112.0	143.8	43.7	68.6	93.8	119.4
		3	56.9	95.6	134.3	173.5	46.8	74.9	103.5	132.4	41.0	63.2	85.5	108.2
		3.5	55.5	92.7	130.1	167.9	44.5	70.3	96.3	122.8	38.9	58.8	78.8	99.1
		4	54.0	89.8	125.8	162.2	42.5	66.3	90.2	114.6	37.2	55.2	73.4	91.8
		4.5	52.6	87.0	121.6	156.7	40.9	62.9	85.0	107.5	35.7	52.3	68.9	85.7
		5	51.3	84.3	117.6	151.3	39.5	59.9	80.5	101.4	34.5	49.8	65.1	80.5
5.5	50.0	81.7	113.7	146.1	38.2	57.3	76.6	96.1	33.5	47.6	61.8	76.1		
6	48.9	79.3	110.0	141.2	37.1	55.1	73.1	91.4	32.6	45.8	59.0	72.3		

Anexo C

Las Tablas 12-14 Las Tablas 8-10 contienen las temperaturas máximas de la temperatura horizontal de las 2592 configuraciones modeladas.

Tabla 12 Temperaturas simuladas. Resultados para 300 m de profundidad (valor de la longitud de la tubería de descenso y de la de ascenso) donde L es la longitud horizontal (m), LT es la longitud total (m), ϕ es el diámetro de la tubería (m), V es la velocidad del fluido (m/s), \dot{q} es el flujo de calor (W/m^2) y los datos del centro son las temperaturas al final de la tubería horizontal.

L	LT	V	$\phi = 0.075$				$\phi = 0.15$				$\phi = 0.225$			
			$\dot{q}=0.5$	$\dot{q}=1$	$\dot{q}=1.5$	$\dot{q}=2$	$\dot{q}=0.5$	$\dot{q}=1$	$\dot{q}=1.5$	$\dot{q}=2$	$\dot{q}=0.5$	$\dot{q}=1$	$\dot{q}=1.5$	$\dot{q}=2$
500	1100	0.5	54.4	92.5	130.8	169.4	46.8	76.4	106.3	136.7	42.3	66.9	91.7	116.9
		1	47.4	77.6	108.2	139.1	38.3	58.3	78.5	99.0	34.1	49.6	65.2	80.8
		1.5	42.6	67.5	92.7	118.2	33.8	48.9	64.1	79.4	30.3	41.6	52.9	64.3
		2	39.3	60.5	81.8	103.5	31.1	43.3	55.5	67.7	28.2	37.1	46.0	55.0
		2.5	36.8	55.3	73.9	92.7	29.3	39.5	49.7	60.0	26.8	34.2	41.5	48.9
		3	35.0	51.4	67.9	84.6	28.1	36.9	45.7	54.5	25.8	32.1	38.4	44.7
		3.5	33.5	48.3	63.1	78.1	27.1	34.9	42.6	50.4	25.1	30.6	36.1	41.6
		4	32.3	45.8	59.3	72.9	26.4	33.3	40.2	47.2	24.5	29.4	34.3	39.2
		4.5	31.3	43.7	56.1	68.6	25.8	32.0	38.3	44.6	24.1	28.5	32.9	37.3
		5	30.5	41.9	53.4	65.0	25.3	31.0	36.7	42.5	23.7	27.7	31.8	35.8
		5.5	29.8	40.4	51.1	61.8	24.8	30.1	35.4	40.7	23.4	27.1	30.8	34.5
6	29.1	39.1	49.1	59.2	24.5	29.4	34.3	39.2	23.1	26.6	30.0	33.4		
600	1200	0.5	55.9	95.4	135.3	175.3	48.8	80.6	112.8	145.4	44.4	71.3	98.6	126.2
		1	49.3	81.6	114.3	147.3	40.3	62.6	85.1	108.0	35.9	53.4	71.0	88.8
		1.5	44.6	71.8	99.3	127.1	35.6	52.6	69.8	87.2	31.8	44.7	57.7	70.7
		2	41.3	64.6	88.3	112.2	32.7	46.5	60.4	74.4	29.4	39.7	49.9	60.3
		2.5	38.7	59.3	80.1	101.1	30.7	42.4	54.1	65.8	27.8	36.4	44.9	53.5
		3	36.8	55.2	73.7	92.4	29.3	39.4	49.5	59.7	26.7	34.0	41.4	48.7
		3.5	35.2	51.9	68.6	85.5	28.2	37.1	46.1	55.0	25.9	32.3	38.7	45.1
		4	33.9	49.1	64.5	79.9	27.3	35.3	43.4	51.4	25.2	31.0	36.7	42.4
		4.5	32.8	46.9	61.0	75.2	26.7	33.9	41.2	48.5	24.7	29.9	35.0	40.2
		5	31.9	45.0	58.0	71.2	26.1	32.7	39.4	46.0	24.3	29.0	33.7	38.4
5.5	31.1	43.3	55.5	67.8	25.6	31.8	37.9	44.0	24.0	28.3	32.6	36.9		
6	30.4	41.9	53.3	64.8	25.2	30.9	36.6	42.3	23.7	27.7	31.7	35.6		
700	1300	0.5	57.0	97.8	138.8	180.0	50.4	84.0	118.0	152.4	46.2	75.2	104.5	134.2
		1	50.8	84.8	119.2	153.9	42.1	66.4	90.9	115.8	37.6	56.9	76.4	96.1
		1.5	46.3	75.4	104.8	134.5	37.2	56.0	75.1	94.3	33.2	47.6	62.1	76.7
		2	43.0	68.3	93.9	119.8	34.1	49.5	65.0	80.7	30.6	42.1	53.7	65.3
		2.5	40.4	62.8	85.5	108.4	32.0	45.0	58.2	71.4	28.8	38.5	48.1	57.8
		3	38.4	58.5	78.9	99.5	30.4	41.8	53.2	64.6	27.6	35.9	44.2	52.5
3.5	36.7	55.1	73.6	92.3	29.2	39.3	49.4	59.5	26.7	33.9	41.2	48.5		

L	LT	V	$\phi = 0.075$				$\phi = 0.15$				$\phi = 0.225$			
			$\dot{q}=0.5$	$\dot{q}=1$	$\dot{q}=1.5$	$\dot{q}=2$	$\dot{q}=0.5$	$\dot{q}=1$	$\dot{q}=1.5$	$\dot{q}=2$	$\dot{q}=0.5$	$\dot{q}=1$	$\dot{q}=1.5$	$\dot{q}=2$
		4	35.4	52.2	69.2	86.3	28.3	37.3	46.4	55.5	26.0	32.4	38.9	45.4
		4.5	34.2	49.8	65.5	81.3	27.5	35.7	44.0	52.2	25.4	31.2	37.1	43.0
		5	33.2	47.8	62.3	77.0	26.9	34.4	42.0	49.5	24.9	30.3	35.6	41.0
		5.5	32.4	46.0	59.6	73.3	26.4	33.3	40.3	47.2	24.5	29.4	34.4	39.3
		6	31.7	44.4	57.2	70.1	25.9	32.4	38.8	45.3	24.2	28.7	33.3	37.8
800	1400	0.5	57.9	99.7	141.8	184.0	51.8	86.9	122.3	158.1	47.8	78.4	109.5	140.9
		1	52.1	87.5	123.3	159.3	43.6	69.7	96.0	122.8	39.1	60.1	81.3	102.8
		1.5	47.8	78.4	109.5	140.8	38.7	59.2	79.8	100.8	34.5	50.3	66.3	82.4
		2	44.5	71.4	98.7	126.4	35.4	52.3	69.3	86.5	31.7	44.4	57.2	70.1
		2.5	41.9	66.0	90.3	115.0	33.1	47.5	62.0	76.6	29.8	40.5	51.2	62.0
		3	39.8	61.6	83.6	105.9	31.5	44.0	56.6	69.3	28.4	37.7	46.9	56.2
		3.5	38.1	58.0	78.1	98.4	30.2	41.3	52.5	63.7	27.4	35.5	43.7	51.8
		4	36.7	55.0	73.5	92.2	29.2	39.2	49.3	59.4	26.6	33.9	41.1	48.4
		4.5	35.5	52.5	69.6	86.9	28.4	37.5	46.6	55.8	26.0	32.6	39.1	45.7
		5	34.5	50.3	66.3	82.4	27.7	36.1	44.4	52.8	25.5	31.5	37.5	43.4
5.5	33.6	48.5	63.4	78.5	27.1	34.8	42.6	50.4	25.0	30.6	36.1	41.6		
6	32.8	46.8	60.9	75.0	26.6	33.8	41.0	48.2	24.7	29.8	34.9	40.0		
900	1500	0.5	58.7	101.4	144.3	187.4	52.9	89.2	125.9	162.9	49.1	81.2	113.7	146.6
		1	53.1	89.7	126.7	163.8	45.0	72.6	100.6	128.9	40.5	63.0	85.8	108.8
		1.5	49.0	81.1	113.5	146.2	40.0	62.0	84.2	106.7	35.7	52.9	70.2	87.7
		2	45.8	74.2	103.0	132.1	36.6	54.9	73.3	91.9	32.7	46.6	60.6	74.7
		2.5	43.2	68.8	94.6	120.8	34.3	49.9	65.6	81.5	30.7	42.4	54.2	66.0
		3	41.1	64.3	87.8	111.6	32.5	46.2	59.9	73.8	29.3	39.4	49.5	59.7
		3.5	39.4	60.7	82.2	104.0	31.1	43.3	55.5	67.8	28.2	37.1	46.0	55.0
		4	37.9	57.6	77.5	97.6	30.0	41.0	52.0	63.1	27.3	35.3	43.3	51.3
		4.5	36.7	55.0	73.5	92.1	29.2	39.2	49.2	59.3	26.6	33.8	41.1	48.3
		5	35.6	52.8	70.0	87.4	28.4	37.6	46.8	56.1	26.0	32.7	39.3	45.9
5.5	34.7	50.8	67.0	83.3	27.8	36.3	44.8	53.4	25.6	31.7	37.7	43.8		
6	33.9	49.0	64.3	79.7	27.3	35.2	43.1	51.1	25.2	30.8	36.5	42.1		
1000	1600	0.5	59.4	102.9	146.6	190.4	53.9	91.2	129.0	166.9	50.2	83.6	117.4	151.6
		1	54.1	91.6	129.5	167.7	46.3	75.2	104.6	134.3	41.7	65.7	89.9	114.4
		1.5	50.1	83.3	116.9	150.9	41.2	64.6	88.2	112.2	36.8	55.3	73.9	92.7
		2	46.9	76.7	106.7	137.2	37.8	57.3	77.0	97.0	33.7	48.7	63.8	79.1
		2.5	44.4	71.3	98.5	126.0	35.3	52.1	69.0	86.1	31.6	44.3	57.0	69.8
		3	42.3	66.8	91.6	116.8	33.5	48.2	63.1	78.0	30.0	41.0	52.0	63.1
		3.5	40.5	63.1	86.0	109.1	32.0	45.2	58.4	71.7	28.9	38.6	48.3	58.0
		4	39.1	60.0	81.2	102.6	30.9	42.8	54.7	66.7	28.0	36.6	45.4	54.1
		4.5	37.8	57.3	77.0	97.0	29.9	40.8	51.7	62.6	27.2	35.1	43.0	50.9
		5	36.7	55.0	73.5	92.1	29.1	39.1	49.2	59.2	26.6	33.8	41.0	48.3
5.5	35.7	53.0	70.3	87.9	28.5	37.7	47.0	56.3	26.1	32.7	39.4	46.0		
6	34.9	51.2	67.6	84.1	27.9	36.5	45.2	53.8	25.6	31.8	38.0	44.2		

Tabla 13 Temperaturas simuladas. Resultados para 350 m de profundidad (valor de la longitud de la tubería de descenso y de la de ascenso) donde L es la longitud horizontal (m), LT es la longitud total (m), ϕ es el diámetro de la tubería (m), V es la velocidad del fluido (m/s), \dot{q} es el flujo de calor (W/m^2) y los datos del centro son las temperaturas al final de la tubería horizontal.

L	LT	V	$\phi = 0.075$				$\phi = 0.15$				$\phi = 0.225$			
			$\dot{q}=0.5$	$\dot{q}=1$	$\dot{q}=1.5$	$\dot{q}=2$	$\dot{q}=0.5$	$\dot{q}=1$	$\dot{q}=1.5$	$\dot{q}=2$	$\dot{q}=0.5$	$\dot{q}=1$	$\dot{q}=1.5$	$\dot{q}=2$
500	1100	0.5	73.9	131.9	190.2	248.4	62.3	107.9	154.3	201.0	55.3	93.3	132.1	171.5
		1	63.1	109.6	156.9	204.4	49.0	80.1	111.7	144.0	42.5	66.5	90.9	115.6
		1.5	55.7	94.2	133.4	173.2	41.9	65.4	89.1	113.3	36.5	54.0	71.7	89.6
		2	50.5	83.2	116.6	150.5	37.7	56.5	75.6	94.8	33.0	46.9	60.8	74.8
		2.5	46.6	75.2	104.2	133.8	34.9	50.7	66.6	82.6	30.8	42.3	53.8	65.3
		3	43.7	69.1	94.8	120.9	32.8	46.5	60.2	74.0	29.2	39.1	48.9	58.7
		3.5	41.4	64.2	87.4	110.8	31.3	43.3	55.4	67.5	28.1	36.7	45.3	53.9
		4	39.5	60.3	81.3	102.6	30.1	40.9	51.6	62.5	27.2	34.8	42.5	50.1
		4.5	37.9	57.1	76.4	95.9	29.2	38.9	48.6	58.4	26.5	33.4	40.2	47.1
		5	36.6	54.3	72.2	90.2	28.4	37.3	46.2	55.1	25.9	32.2	38.4	44.7
5.5	35.5	52.0	68.6	85.3	27.7	35.9	44.1	52.3	25.4	31.2	36.9	42.7		
6	34.5	49.9	65.5	81.1	27.2	34.8	42.4	50.0	25.0	30.3	35.6	41.0		
600	1200	0.5	76.0	136.1	196.6	256.8	65.2	114.0	163.6	213.3	58.5	100.0	142.3	185.1
		1	65.9	115.5	165.7	216.0	52.0	86.5	121.6	157.3	45.3	72.3	99.7	127.7
		1.5	58.7	100.5	143.1	186.1	44.6	71.0	97.8	125.0	38.7	58.7	78.8	99.3
		2	53.5	89.5	126.2	163.5	40.0	61.4	83.0	105.0	34.9	50.8	66.7	82.8
		2.5	49.5	81.2	113.4	146.3	36.9	54.9	73.1	91.5	32.4	45.6	58.8	72.1
		3	46.4	74.7	103.5	132.8	34.7	50.3	66.0	81.8	30.6	41.9	53.3	64.7
		3.5	44.0	69.6	95.6	122.0	33.0	46.7	60.6	74.5	29.3	39.2	49.2	59.1
		4	41.9	65.4	89.1	113.2	31.6	44.0	56.4	68.8	28.3	37.1	46.0	54.8
		4.5	40.2	61.8	83.7	105.9	30.6	41.8	53.0	64.3	27.5	35.5	43.4	51.4
		5	38.8	58.8	79.1	99.6	29.7	39.9	50.2	60.5	26.8	34.1	41.4	48.6
5.5	37.6	56.3	75.2	94.3	28.9	38.4	47.8	57.3	26.3	33.0	39.6	46.3		
6	36.5	54.0	71.7	89.6	28.3	37.1	45.8	54.7	25.8	32.0	38.2	44.3		
700	1300	0.5	77.7	139.5	201.7	263.6	67.6	119.0	171.1	223.1	61.2	105.6	150.9	196.5
		1	68.2	120.2	172.7	225.2	54.7	92.1	130.3	169.0	47.8	77.5	107.8	138.7
		1.5	61.3	105.8	151.2	196.8	47.1	76.1	105.7	135.7	40.8	63.1	85.5	108.4
		2	56.1	94.9	134.5	174.6	42.2	65.9	90.0	114.4	36.7	54.4	72.3	90.5
		2.5	52.0	86.5	121.6	157.3	38.9	59.0	79.3	99.8	33.9	48.8	63.7	78.7
		3	48.9	79.8	111.3	143.4	36.4	53.9	71.5	89.3	32.0	44.7	57.5	70.4
		3.5	46.3	74.4	103.0	132.2	34.5	50.0	65.6	81.3	30.5	41.7	52.9	64.2
		4	44.2	70.0	96.2	122.9	33.1	47.0	60.9	75.0	29.4	39.4	49.4	59.4
		4.5	42.4	66.2	90.4	115.0	31.9	44.5	57.2	69.9	28.5	37.5	46.5	55.6
		5	40.8	63.1	85.5	108.4	30.9	42.5	54.0	65.7	27.8	36.0	44.2	52.5
5.5	39.5	60.3	81.3	102.6	30.1	40.7	51.4	62.2	27.1	34.7	42.3	49.9		
6	38.3	57.9	77.6	97.6	29.4	39.3	49.2	59.2	26.6	33.6	40.6	47.6		
800	1400	0.5	79.1	142.4	205.9	269.3	69.7	123.1	177.3	231.2	63.5	110.4	158.2	206.2
		1	70.1	124.0	178.6	232.9	57.1	97.1	137.9	179.2	50.1	82.3	115.2	148.7

L	LT	V	$\phi = 0.075$				$\phi = 0.15$				$\phi = 0.225$			
			$\dot{q}=0.5$	$\dot{q}=1$	$\dot{q}=1.5$	$\dot{q}=2$	$\dot{q}=0.5$	$\dot{q}=1$	$\dot{q}=1.5$	$\dot{q}=2$	$\dot{q}=0.5$	$\dot{q}=1$	$\dot{q}=1.5$	$\dot{q}=2$
		1.5	63.5	110.4	158.0	205.8	49.3	80.8	112.9	145.5	42.8	67.2	91.9	117.0
		2	58.3	99.6	141.7	184.3	44.2	70.2	96.5	123.3	38.4	58.0	77.7	97.8
		2.5	54.3	91.2	128.8	167.0	40.7	62.7	85.1	107.7	35.4	51.8	68.3	85.0
		3	51.1	84.4	118.4	153.0	38.1	57.3	76.7	96.4	33.3	47.4	61.6	75.9
		3.5	48.4	78.9	109.9	141.4	36.0	53.1	70.3	87.7	31.7	44.1	56.6	69.2
		4	46.2	74.2	102.7	131.7	34.5	49.8	65.3	80.9	30.5	41.6	52.7	63.9
		4.5	44.3	70.3	96.7	123.6	33.2	47.1	61.2	75.3	29.5	39.5	49.6	59.7
		5	42.7	67.0	91.5	116.5	32.1	44.9	57.8	70.8	28.6	37.8	47.0	56.2
		5.5	41.3	64.1	87.1	110.5	31.2	43.0	54.9	66.9	28.0	36.4	44.9	53.3
6	40.1	61.5	83.1	105.1	30.4	41.4	52.5	63.6	27.4	35.2	43.0	50.9		
900	1500	0.5	80.3	144.8	209.7	274.4	71.3	126.6	182.4	238.0	65.5	114.6	164.4	214.4
		1	71.7	127.3	183.4	239.3	59.2	101.5	144.6	188.1	52.1	86.7	121.9	157.8
		1.5	65.4	114.3	163.9	213.6	51.4	85.1	119.5	154.5	44.6	71.0	97.8	125.0
		2	60.3	103.8	148.1	192.7	46.1	74.1	102.5	131.5	40.0	61.3	82.8	104.7
		2.5	56.3	95.4	135.2	175.6	42.4	66.3	90.6	115.2	36.8	54.7	72.8	91.1
		3	53.0	88.6	124.8	161.6	39.6	60.6	81.7	103.2	34.6	50.0	65.6	81.3
		3.5	50.3	82.9	116.1	149.8	37.5	56.1	74.9	93.9	32.8	46.5	60.2	74.0
		4	48.1	78.2	108.8	139.9	35.8	52.6	69.5	86.6	31.5	43.7	55.9	68.2
		4.5	46.1	74.1	102.5	131.5	34.4	49.7	65.1	80.6	30.4	41.5	52.5	63.7
		5	44.5	70.6	97.2	124.2	33.2	47.3	61.4	75.6	29.5	39.6	49.7	59.9
5.5	43.0	67.6	92.5	117.8	32.2	45.3	58.3	71.5	28.8	38.1	47.4	56.7		
6	41.7	64.9	88.3	112.2	31.4	43.5	55.7	67.9	28.1	36.8	45.4	54.1		
1000	1600	0.5	81.3	147.0	213.0	278.8	72.8	129.5	186.8	243.7	67.2	118.1	169.8	221.4
		1	73.1	130.1	187.6	244.9	61.1	105.4	150.5	196.0	54.1	90.7	128.1	166.1
		1.5	67.0	117.6	168.9	220.2	53.3	89.0	125.5	162.6	46.4	74.6	103.4	132.6
		2	62.1	107.5	153.6	200.1	47.9	77.8	108.2	139.2	41.5	64.5	87.7	111.4
		2.5	58.1	99.2	141.0	183.3	44.0	69.7	95.8	122.3	38.2	57.6	77.1	96.9
		3	54.8	92.3	130.5	169.3	41.1	63.7	86.5	109.6	35.8	52.5	69.4	86.5
		3.5	52.1	86.6	121.8	157.5	38.9	59.0	79.3	99.8	33.9	48.7	63.6	78.6
		4	49.8	81.8	114.3	147.5	37.1	55.2	73.5	92.0	32.5	45.7	59.1	72.5
		4.5	47.8	77.6	107.9	138.8	35.6	52.1	68.8	85.7	31.3	43.3	55.4	67.5
		5	46.1	74.0	102.4	131.3	34.3	49.6	64.9	80.4	30.4	41.4	52.4	63.5
5.5	44.6	70.9	97.5	124.7	33.3	47.4	61.6	75.9	29.6	39.7	49.9	60.1		
6	43.2	68.1	93.2	118.8	32.4	45.5	58.8	72.1	28.9	38.3	47.7	57.2		

Tabla 14 Temperaturas simuladas. Resultados para 400 m de profundidad (valor de la longitud de la tubería de descenso y de la de ascenso) donde L es la longitud horizontal (m), LT es la longitud total (m), ϕ es el diámetro de la tubería (m), V es la velocidad del fluido (m/s), \dot{q} es el flujo de calor (W/m^2) y los datos del centro son las temperaturas al final de la tubería horizontal.

L	LT	V	$\phi = 0.075$				$\phi = 0.15$				$\phi = 0.225$			
			$\dot{q}=0.5$	$\dot{q}=1$	$\dot{q}=1.5$	$\dot{q}=2$	$\dot{q}=0.5$	$\dot{q}=1$	$\dot{q}=1.5$	$\dot{q}=2$	$\dot{q}=0.5$	$\dot{q}=1$	$\dot{q}=1.5$	$\dot{q}=2$
500	1100	0.5	93.8	172.1	250.4	328.6	78.3	140.8	204.1	266.5	68.9	121.3	174.8	228.4
		1	79.4	143.0	207.2	270.6	60.3	103.2	147.3	191.9	51.4	84.6	118.6	153.2
		1.5	69.4	122.3	176.2	230.1	50.6	83.0	116.0	149.8	43.0	67.3	91.9	116.9
		2	62.2	107.3	153.5	200.2	44.7	70.7	97.1	124.1	38.2	57.3	76.7	96.2
		2.5	56.9	96.2	136.5	177.5	40.7	62.5	84.6	107.0	35.1	50.9	66.9	83.0
		3	52.9	87.8	123.5	159.9	37.9	56.7	75.7	94.9	32.9	46.5	60.1	73.8
		3.5	49.7	81.1	113.2	145.9	35.8	52.4	69.0	85.9	31.3	43.2	55.0	67.0
		4	47.1	75.7	104.8	134.6	34.1	49.0	63.8	78.9	30.1	40.6	51.2	61.8
		4.5	44.9	71.2	97.9	125.2	32.8	46.2	59.7	73.3	29.1	38.6	48.1	57.6
		5	43.1	67.4	92.1	117.2	31.7	44.0	56.3	68.7	28.3	36.9	45.6	54.3
		5.5	41.5	64.2	87.2	110.5	30.8	42.1	53.4	64.8	27.6	35.5	43.5	51.5
		6	40.2	61.4	82.9	104.7	30.0	40.5	51.0	61.5	27.0	34.4	41.7	49.1
600	1200	0.5	96.5	177.5	258.4	339.8	82.2	148.6	215.7	281.7	73.1	129.9	187.9	245.4
		1	83.1	150.4	218.2	285.0	64.3	111.7	160.2	209.1	55.0	92.2	130.3	169.2
		1.5	73.4	130.5	188.6	246.3	54.2	90.4	127.6	165.4	46.0	73.5	101.4	129.9
		2	66.2	115.5	166.0	216.7	47.8	77.2	107.1	137.7	40.7	62.5	84.6	107.0
		2.5	60.7	104.2	148.7	193.7	43.5	68.2	93.3	118.9	37.3	55.4	73.6	92.1
		3	56.5	95.3	135.0	175.5	40.4	61.8	83.4	105.5	34.8	50.3	65.9	81.7
		3.5	53.1	88.2	124.1	160.7	38.0	56.9	76.0	95.3	33.0	46.6	60.2	74.0
		4	50.3	82.4	115.1	148.6	36.1	53.1	70.2	87.4	31.6	43.7	55.8	68.1
		4.5	48.0	77.5	107.7	138.4	34.7	50.0	65.5	81.1	30.4	41.4	52.3	63.3
		5	46.0	73.4	101.4	129.8	33.4	47.5	61.6	75.8	29.5	39.5	49.5	59.5
		5.5	44.3	69.9	95.9	122.4	32.4	45.4	58.4	71.5	28.8	37.9	47.1	56.3
		6	42.8	66.8	91.2	116.0	31.5	43.5	55.6	67.8	28.1	36.6	45.1	53.6
700	1300	0.5	98.7	181.8	265.0	349.0	85.3	155.0	225.1	294.1	76.6	137.3	198.9	259.7
		1	86.0	156.4	227.1	296.9	67.9	119.1	171.5	223.9	58.4	99.2	141.1	183.6
		1.5	76.7	137.4	199.0	259.8	57.4	97.3	138.1	179.6	48.8	79.3	110.4	142.2
		2	69.6	122.7	176.9	230.9	50.7	83.2	116.4	150.4	43.1	67.4	92.1	117.3
		2.5	64.1	111.2	159.4	208.0	46.1	73.6	101.6	130.2	39.3	59.6	80.1	100.9
		3	59.7	102.0	145.4	189.4	42.7	66.6	90.8	115.5	36.6	54.1	71.6	89.4
		3.5	56.2	94.7	134.1	174.1	40.1	61.3	82.6	104.4	34.6	49.9	65.3	80.8
		4	53.3	88.5	124.6	161.4	38.1	57.1	76.2	95.6	33.0	46.7	60.4	74.2
		4.5	50.8	83.4	116.7	150.7	36.4	53.7	71.0	88.6	31.8	44.1	56.5	68.9
		5	48.7	79.0	110.0	141.5	35.1	50.9	66.8	82.8	30.7	42.0	53.3	64.6
		5.5	46.9	75.3	104.2	133.6	33.9	48.5	63.2	78.0	29.9	40.2	50.6	61.0
		6	45.3	71.9	99.0	126.7	32.9	46.5	60.1	73.8	29.2	38.7	48.3	58.0
800	1400	0.5	100.5	185.5	270.5	356.8	87.9	160.3	232.9	304.5	79.7	143.5	208.1	271.8
		1	88.5	161.4	234.5	306.8	71.0	125.6	181.4	236.9	61.4	105.6	150.9	196.7

L	LT	V	$\phi = 0.075$				$\phi = 0.15$				$\phi = 0.225$			
			$\dot{q}=0.5$	$\dot{q}=1$	$\dot{q}=1.5$	$\dot{q}=2$	$\dot{q}=0.5$	$\dot{q}=1$	$\dot{q}=1.5$	$\dot{q}=2$	$\dot{q}=0.5$	$\dot{q}=1$	$\dot{q}=1.5$	$\dot{q}=2$
		1.5	79.6	143.3	207.7	271.2	60.4	103.5	147.7	192.4	51.5	84.8	118.9	153.6
		2	72.6	128.9	186.2	243.2	53.4	88.9	125.1	162.2	45.4	72.1	99.3	127.1
		2.5	67.1	117.4	168.9	220.5	48.5	78.7	109.4	140.8	41.3	63.7	86.4	109.4
		3	62.7	108.2	154.8	201.8	44.9	71.2	97.8	125.1	38.4	57.6	77.1	96.8
		3.5	59.0	100.5	143.1	186.3	42.1	65.4	89.0	113.0	36.2	53.1	70.2	87.5
		4	56.0	94.2	133.4	173.2	39.9	60.9	82.1	103.6	34.5	49.6	64.8	80.2
		4.5	53.4	88.9	125.1	162.1	38.1	57.2	76.4	95.9	33.1	46.8	60.5	74.4
		5	51.2	84.2	118.0	152.5	36.7	54.1	71.8	89.6	31.9	44.5	57.0	69.6
		5.5	49.3	80.3	111.9	144.1	35.4	51.6	67.9	84.3	31.0	42.5	54.1	65.7
6	47.6	76.8	106.5	136.8	34.3	49.4	64.5	79.8	30.2	40.9	51.6	62.3		
900	1500	0.5	102.1	188.8	275.4	363.7	90.1	164.7	239.4	313.3	82.3	148.9	216.1	282.2
		1	90.6	165.6	240.7	315.2	73.8	131.4	190.0	248.2	64.2	111.4	159.8	208.5
		1.5	82.1	148.4	215.2	281.0	63.2	109.2	156.4	204.1	53.9	90.0	126.8	164.4
		2	75.3	134.4	194.4	253.8	55.9	94.1	133.3	173.1	47.5	76.6	106.2	136.5
		2.5	69.8	123.0	177.3	231.5	50.8	83.5	116.8	150.8	43.2	67.6	92.4	117.6
		3	65.3	113.7	163.2	213.0	47.0	75.5	104.6	134.2	40.1	61.1	82.4	104.1
		3.5	61.6	105.9	151.4	197.3	44.1	69.4	95.2	121.4	37.7	56.2	75.0	93.9
		4	58.5	99.4	141.4	184.0	41.7	64.6	87.7	111.2	35.8	52.4	69.1	86.0
		4.5	55.8	93.9	132.9	172.6	39.8	60.6	81.6	103.0	34.3	49.4	64.5	79.7
		5	53.5	89.1	125.5	162.6	38.2	57.3	76.6	96.2	33.1	46.8	60.6	74.5
5.5	51.5	84.9	119.1	153.9	36.9	54.5	72.4	90.4	32.1	44.7	57.4	70.2		
6	49.8	81.3	113.4	146.2	35.7	52.2	68.7	85.5	31.2	42.9	54.7	66.5		
1000	1600	0.5	103.5	191.6	279.8	369.8	92.0	168.5	244.9	320.9	84.6	153.5	222.9	291.2
		1	92.4	169.2	246.0	322.6	76.3	136.5	197.7	258.2	66.7	116.7	167.9	219.2
		1.5	84.2	152.7	221.6	289.6	65.7	114.4	164.4	214.6	56.3	94.8	134.3	174.5
		2	77.6	139.2	201.6	263.2	58.3	99.1	140.8	183.3	49.6	80.9	112.8	145.4
		2.5	72.2	128.0	184.8	241.3	53.0	88.0	123.8	160.3	45.0	71.4	98.2	125.5
		3	67.7	118.7	170.8	223.0	49.0	79.7	111.0	142.9	41.7	64.5	87.6	111.1
		3.5	64.0	110.9	158.9	207.3	45.9	73.2	101.0	129.4	39.2	59.3	79.6	100.2
		4	60.8	104.3	148.8	193.9	43.4	68.1	93.1	118.6	37.2	55.2	73.4	91.7
		4.5	58.1	98.6	140.1	182.3	41.4	63.9	86.7	109.8	35.6	51.9	68.3	84.9
		5	55.7	93.7	132.5	172.1	39.7	60.4	81.3	102.5	34.3	49.2	64.2	79.3
5.5	53.7	89.4	125.9	163.1	38.3	57.4	76.8	96.4	33.1	46.9	60.7	74.7		
6	51.8	85.5	120.0	155.1	37.0	54.9	72.9	91.1	32.2	45.0	57.8	70.7		

Anexo D

Las Tablas 15-17 contienen todos los valores de calor (Q) en la salida de las 2592 configuraciones modeladas.

Tabla 15. Valores de calor (Q) estimados. Resultados para 300 m de profundidad donde L es la longitud horizontal (m), LT es la longitud total (m), ϕ es el diámetro de la tubería (m), V es la velocidad del fluido (m/s), \dot{q} es flujo de calor (W/m²) y los datos del centro son los valores de calor (MW) finales.

L	LT	V	$\phi = 0.075$				$\phi = 0.15$				$\phi = 0.225$			
			$\dot{q}=0.5$	$\dot{q}=1$	$\dot{q}=1.5$	$\dot{q}=2$	$\dot{q}=0.5$	$\dot{q}=1$	$\dot{q}=1.5$	$\dot{q}=2$	$\dot{q}=0.5$	$\dot{q}=1$	$\dot{q}=1.5$	$\dot{q}=2$
500	1100	0.5	0.3	0.5	0.6	0.8	1.4	2.0	2.6	3.2	3.0	4.4	5.7	7.0
		1	0.7	1.0	1.3	1.5	2.5	3.6	4.7	5.8	5.3	7.5	9.6	11.7
		1.5	1.0	1.4	1.9	2.3	3.5	5.0	6.3	7.7	7.4	10.0	12.5	15.0
		2	1.3	1.8	2.4	2.9	4.5	6.1	7.7	9.3	9.3	12.2	15.0	17.8
		2.5	1.5	2.2	2.9	3.5	5.3	7.1	8.9	10.6	11.2	14.2	17.2	20.2
		3	1.8	2.6	3.3	4.0	6.2	8.1	10.0	11.8	13.0	16.1	19.3	22.5
		3.5	2.1	2.9	3.7	4.5	7.0	9.0	11.0	12.9	14.7	18.0	21.3	24.6
		4	2.3	3.2	4.0	4.9	7.8	9.9	11.9	14.0	16.5	19.9	23.2	26.6
		4.5	2.5	3.5	4.4	5.3	8.6	10.7	12.9	15.0	18.2	21.7	25.1	28.6
		5	2.8	3.7	4.7	5.6	9.4	11.6	13.8	15.9	19.9	23.5	27.0	30.5
		5.5	3.0	4.0	5.0	6.0	10.2	12.4	14.6	16.8	21.6	25.2	28.8	32.4
6	3.2	4.2	5.3	6.3	11.0	13.2	15.5	17.7	23.4	27.0	30.6	34.2		
600	1200	0.5	0.3	0.5	0.7	0.9	1.4	2.1	2.8	3.4	3.1	4.6	6.1	7.5
		1	0.7	1.0	1.3	1.6	2.6	3.9	5.0	6.2	5.6	8.0	10.3	12.6
		1.5	1.0	1.5	2.0	2.4	3.7	5.3	6.8	8.3	7.7	10.6	13.5	16.3
		2	1.3	1.9	2.5	3.1	4.7	6.5	8.3	10.0	9.7	12.9	16.1	19.3
		2.5	1.6	2.3	3.0	3.7	5.6	7.6	9.5	11.5	11.5	15.0	18.4	21.9
		3	1.9	2.7	3.5	4.3	6.6	8.6	10.7	12.8	13.4	17.0	20.6	24.2
		3.5	2.1	3.0	3.9	4.8	7.7	9.5	11.8	14.0	15.2	18.9	22.7	26.4
		4	2.4	3.4	4.3	5.3	8.8	10.4	12.8	15.1	16.9	20.8	24.7	28.5
		4.5	2.6	3.7	4.7	5.7	9.8	11.3	13.7	16.1	18.7	22.7	26.6	30.6
		5	2.9	4.0	5.0	6.1	10.9	12.2	14.7	17.1	20.4	24.5	28.5	32.5
		5.5	3.1	4.2	5.4	6.5	12.0	13.0	15.6	18.1	22.1	26.3	30.4	34.5
6	3.3	4.5	5.7	6.8	13.1	13.9	16.4	19.0	23.9	28.0	32.2	36.3		
700	1300	0.5	0.4	0.6	0.7	0.9	1.5	2.2	2.9	3.6	3.2	4.9	6.5	8.0
		1	0.7	1.1	1.4	1.7	2.7	4.1	5.3	6.6	5.8	8.4	11.0	13.5
		1.5	1.0	1.6	2.1	2.5	3.8	5.5	7.2	8.9	8.0	11.2	14.3	17.4
		2	1.4	2.0	2.7	3.3	4.8	6.8	8.8	10.7	10.0	13.6	17.1	20.6
		2.5	1.7	2.4	3.2	3.9	5.8	8.0	10.1	12.3	11.9	15.8	19.6	23.4
		3	1.9	2.8	3.7	4.5	6.6	9.0	11.4	13.7	13.8	17.8	21.9	25.9
		3.5	2.2	3.2	4.2	5.1	7.7	10.0	12.5	14.9	15.6	19.8	24.0	28.2

L	LT	V	$\phi = 0.075$				$\phi = 0.15$				$\phi = 0.225$			
			$\dot{q}=0.5$	$\dot{q}=1$	$\dot{q}=1.5$	$\dot{q}=2$	$\dot{q}=0.5$	$\dot{q}=1$	$\dot{q}=1.5$	$\dot{q}=2$	$\dot{q}=0.5$	$\dot{q}=1$	$\dot{q}=1.5$	$\dot{q}=2$
		4	2.5	3.5	4.6	5.6	8.8	11.0	13.5	16.1	17.4	21.7	26.1	30.4
		4.5	2.7	3.9	5.0	6.1	9.8	11.9	14.6	17.2	19.1	23.6	28.1	32.5
		5	3.0	4.2	5.3	6.5	10.9	12.8	15.5	18.2	20.9	25.4	30.0	34.5
		5.5	3.2	4.5	5.7	6.9	12.0	13.6	16.4	19.2	22.6	27.3	31.9	36.5
		6	3.4	4.7	6.0	7.3	13.1	14.5	17.4	20.2	24.3	29.1	33.7	38.4
800	1400	0.5	0.4	0.6	0.8	1.0	1.5	2.3	3.1	3.8	3.3	5.1	6.8	8.4
		1	0.7	1.1	1.5	1.8	2.8	4.2	5.6	6.9	6.0	8.8	11.6	14.2
		1.5	1.1	1.6	2.1	2.6	4.0	5.8	7.6	9.4	8.2	11.7	15.2	18.5
		2	1.4	2.1	2.8	3.4	5.0	7.2	9.3	11.3	10.3	14.2	18.1	21.9
		2.5	1.7	2.6	3.4	4.1	5.9	8.3	10.7	13.0	12.3	16.5	20.7	24.9
		3	2.0	3.0	3.9	4.8	6.9	9.4	12.0	14.5	14.1	18.6	23.1	27.5
		3.5	2.3	3.3	4.4	5.4	7.7	10.5	13.2	15.9	16.0	20.7	25.3	29.9
		4	2.6	3.7	4.8	5.9	8.8	11.5	14.3	17.1	17.8	22.6	27.4	32.2
		4.5	2.8	4.0	5.2	6.4	9.8	12.4	15.3	18.3	19.6	24.5	29.5	34.3
		5	3.1	4.4	5.6	6.9	10.9	13.3	16.3	19.3	21.3	26.4	31.4	36.4
5.5	3.3	4.7	6.0	7.3	12.0	14.2	17.3	20.4	23.1	28.2	33.4	38.5		
6	3.5	5.0	6.4	7.7	13.1	15.1	18.2	21.4	24.8	30.0	35.3	40.4		
900	1500	0.5	0.4	0.6	0.8	1.0	1.5	2.4	3.2	3.9	3.4	5.3	7.0	8.7
		1	0.7	1.1	1.5	1.9	2.9	4.4	5.8	7.2	6.2	9.2	12.1	15.0
		1.5	1.1	1.7	2.2	2.7	4.1	6.1	8.0	9.8	8.5	12.3	15.9	19.5
		2	1.4	2.2	2.9	3.6	5.1	7.5	9.7	11.9	10.6	14.9	19.0	23.1
		2.5	1.8	2.6	3.5	4.3	6.1	8.7	11.3	13.7	12.6	17.2	21.8	26.2
		3	2.1	3.1	4.1	5.0	7.0	9.9	12.6	15.3	14.5	19.4	24.2	29.0
		3.5	2.4	3.5	4.6	5.6	7.9	10.9	13.8	16.7	16.4	21.5	26.5	31.5
		4	2.6	3.9	5.0	6.2	8.8	11.9	15.0	18.0	18.2	23.5	28.7	33.9
		4.5	2.9	4.2	5.5	6.7	9.8	12.9	16.1	19.2	20.0	25.4	30.8	36.1
		5	3.1	4.5	5.9	7.2	10.9	13.8	17.1	20.4	21.8	27.3	32.8	38.3
5.5	3.4	4.9	6.3	7.7	12.0	14.7	18.1	21.5	23.5	29.2	34.8	40.4		
6	3.6	5.2	6.7	8.1	13.1	15.6	19.1	22.5	25.3	31.0	36.7	42.4		
1000	1600	0.5	0.4	0.6	0.9	1.1	1.6	2.5	3.3	4.1	3.5	5.4	7.3	9.0
		1	0.8	1.2	1.6	1.9	3.0	4.5	6.1	7.5	6.3	9.5	12.6	15.6
		1.5	1.1	1.7	2.3	2.8	4.2	6.3	8.3	10.2	8.7	12.7	16.7	20.5
		2	1.5	2.2	3.0	3.7	5.3	7.7	10.2	12.5	10.9	15.5	19.9	24.3
		2.5	1.8	2.7	3.6	4.5	6.3	9.0	11.8	14.4	12.9	17.9	22.8	27.6
		3	2.1	3.2	4.2	5.2	7.2	10.2	13.2	16.1	14.9	20.1	25.3	30.5
		3.5	2.4	3.6	4.7	5.8	8.1	11.3	14.5	17.6	16.8	22.3	27.7	33.1
		4	2.7	4.0	5.2	6.5	9.0	12.4	15.7	18.9	18.6	24.3	30.0	35.5
		4.5	3.0	4.4	5.7	7.0	9.9	13.4	16.8	20.2	20.4	26.3	32.1	37.9
		5	3.2	4.7	6.1	7.5	10.9	14.3	17.9	21.4	22.2	28.2	34.2	40.1
5.5	3.5	5.0	6.6	8.0	12.0	15.3	18.9	22.5	24.0	30.1	36.2	42.2		
6	3.7	5.4	7.0	8.5	13.1	16.2	19.9	23.6	25.7	32.0	38.2	44.3		

Tabla 16 Valores de calor (Q) estimados. Resultados para 350 m de profundidad donde L es la longitud horizontal (m), LT es la longitud total (m), ϕ es el diámetro de la tubería (m), V es la velocidad del fluido (m/s), \dot{q} es flujo de calor (W/m²) y los datos del centro son los valores de calor (MW) finales.

L	LT	V	$\phi = 0.075$				$\phi = 0.15$				$\phi = 0.225$			
			$\dot{q}=0.5$	$\dot{q}=1$	$\dot{q}=1.5$	$\dot{q}=2$	$\dot{q}=0.5$	$\dot{q}=1$	$\dot{q}=1.5$	$\dot{q}=2$	$\dot{q}=0.5$	$\dot{q}=1$	$\dot{q}=1.5$	$\dot{q}=2$
500	1100	0.5	0.4	0.7	0.9	1.1	1.7	2.6	3.5	4.3	3.7	5.7	7.7	9.5
		1	0.8	1.3	1.7	2.1	3.1	4.8	6.3	7.9	6.5	9.8	12.9	16.0
		1.5	1.2	1.8	2.5	3.0	4.3	6.4	8.5	10.5	8.8	12.8	16.7	20.5
		2	1.6	2.4	3.2	3.9	5.4	7.9	10.3	12.6	10.9	15.4	19.8	24.0
		2.5	1.9	2.9	3.8	4.7	6.3	9.1	11.8	14.4	12.9	17.7	22.4	27.1
		3	2.2	3.3	4.4	5.5	7.3	10.2	13.1	16.0	14.8	19.8	24.8	29.7
		3.5	2.5	3.7	4.9	6.1	8.2	11.3	14.3	17.3	16.6	21.9	27.1	32.2
		4	2.8	4.1	5.4	6.7	9.0	12.3	15.5	18.6	18.4	23.8	29.2	34.5
		4.5	3.0	4.5	5.9	7.2	9.9	13.2	16.5	19.8	20.2	25.8	31.2	36.7
		5	3.3	4.8	6.3	7.7	10.9	14.1	17.5	20.9	22.0	27.6	33.2	38.8
5.5	3.5	5.1	6.7	8.2	12.0	15.0	18.5	21.9	23.8	29.5	35.2	40.8		
6	3.8	5.4	7.0	8.6	13.1	15.9	19.4	23.0	25.5	31.3	37.1	42.8		
600	1200	0.5	0.4	0.7	0.9	1.2	1.8	2.8	3.7	4.6	3.9	6.1	8.2	10.2
		1	0.8	1.3	1.8	2.2	3.3	5.1	6.8	8.4	6.8	10.4	13.9	17.2
		1.5	1.2	1.9	2.6	3.2	4.5	6.9	9.2	11.3	9.3	13.7	18.0	22.2
		2	1.6	2.5	3.4	4.2	5.6	8.4	11.1	13.7	11.4	16.4	21.3	26.1
		2.5	2.0	3.1	4.1	5.1	6.6	9.7	12.7	15.6	13.5	18.9	24.2	29.4
		3	2.3	3.5	4.7	5.8	7.6	10.9	14.1	17.3	15.4	21.1	26.7	32.2
		3.5	2.6	4.0	5.3	6.5	8.5	12.0	15.4	18.8	17.3	23.2	29.1	34.9
		4	2.9	4.4	5.8	7.2	9.4	13.1	16.6	20.2	19.1	25.2	31.3	37.3
		4.5	3.2	4.8	6.3	7.8	10.3	14.0	17.8	21.4	20.9	27.2	33.4	39.6
		5	3.5	5.1	6.7	8.3	11.1	15.0	18.8	22.6	22.7	29.1	35.5	41.8
5.5	3.7	5.5	7.2	8.8	12.0	15.9	19.9	23.7	24.5	31.0	37.5	43.9		
6	4.0	5.8	7.6	9.3	13.1	16.8	20.8	24.8	26.3	32.9	39.4	45.9		
700	1300	0.5	0.5	0.7	1.0	1.3	1.8	2.9	3.9	4.9	4.0	6.4	8.6	10.8
		1	0.9	1.4	1.8	2.3	3.4	5.3	7.2	8.9	7.1	11.1	14.8	18.4
		1.5	1.3	2.0	2.7	3.4	4.7	7.3	9.7	12.1	9.7	14.5	19.3	23.8
		2	1.7	2.7	3.6	4.4	5.9	8.9	11.8	14.6	11.9	17.4	22.8	28.0
		2.5	2.1	3.2	4.3	5.3	6.9	10.3	13.6	16.7	14.0	20.0	25.8	31.5
		3	2.4	3.7	5.0	6.2	7.9	11.6	15.1	18.6	16.0	22.3	28.5	34.6
		3.5	2.7	4.2	5.6	7.0	8.9	12.7	16.5	20.2	17.9	24.5	31.0	37.4
		4	3.0	4.6	6.2	7.6	9.8	13.8	17.8	21.7	19.8	26.6	33.3	40.0
		4.5	3.3	5.0	6.7	8.3	10.7	14.8	19.0	23.0	21.6	28.6	35.5	42.4
		5	3.6	5.4	7.2	8.9	11.5	15.8	20.1	24.3	23.4	30.6	37.7	44.7
5.5	3.9	5.8	7.6	9.4	12.4	16.8	21.2	25.5	25.2	32.5	39.7	46.9		
6	4.1	6.1	8.1	9.9	13.2	17.7	22.2	26.6	27.0	34.4	41.7	49.0		
800	1400	0.5	0.5	0.8	1.1	1.3	1.9	3.0	4.1	5.1	4.2	6.7	9.0	11.3
		1	0.9	1.4	1.9	2.4	3.5	5.6	7.5	9.4	7.4	11.6	15.6	19.4

L	LT	V	$\phi = 0.075$				$\phi = 0.15$				$\phi = 0.225$			
			$\dot{q}=0.5$	$\dot{q}=1$	$\dot{q}=1.5$	$\dot{q}=2$	$\dot{q}=0.5$	$\dot{q}=1$	$\dot{q}=1.5$	$\dot{q}=2$	$\dot{q}=0.5$	$\dot{q}=1$	$\dot{q}=1.5$	$\dot{q}=2$
		1.5	1.3	2.1	2.8	3.5	4.9	7.6	10.3	12.8	10.1	15.3	20.4	25.3
		2	1.7	2.8	3.7	4.6	6.1	9.4	12.5	15.5	12.4	18.4	24.2	29.8
		2.5	2.1	3.3	4.5	5.6	7.2	10.9	14.4	17.8	14.6	21.1	27.4	33.6
		3	2.5	3.9	5.2	6.5	8.2	12.2	16.0	19.7	16.6	23.5	30.3	36.9
		3.5	2.8	4.4	5.9	7.3	9.2	13.4	17.5	21.5	18.5	25.8	32.9	39.8
		4	3.1	4.9	6.5	8.1	10.1	14.5	18.8	23.1	20.4	27.9	35.3	42.5
		4.5	3.4	5.3	7.1	8.8	11.0	15.6	20.1	24.5	22.3	30.0	37.6	45.1
		5	3.7	5.7	7.6	9.4	11.9	16.6	21.3	25.8	24.1	32.0	39.8	47.5
		5.5	4.0	6.1	8.1	10.0	12.8	17.6	22.4	27.1	25.9	34.0	41.9	49.7
6	4.3	6.4	8.5	10.5	13.6	18.6	23.5	28.3	27.7	35.9	44.0	51.9		
900	1500	0.5	0.5	0.8	1.1	1.4	1.9	3.1	4.2	5.3	4.3	6.9	9.4	11.8
		1	0.9	1.5	2.0	2.5	3.6	5.8	7.8	9.8	7.7	12.1	16.4	20.4
		1.5	1.4	2.2	2.9	3.7	5.1	8.0	10.7	13.4	10.4	16.1	21.5	26.7
		2	1.8	2.9	3.8	4.8	6.3	9.8	13.1	16.3	12.9	19.3	25.5	31.5
		2.5	2.2	3.5	4.7	5.8	7.5	11.4	15.1	18.7	15.1	22.1	28.9	35.6
		3	2.6	4.0	5.4	6.8	8.5	12.8	16.9	20.8	17.1	24.6	31.9	39.1
		3.5	2.9	4.6	6.1	7.7	9.5	14.0	18.4	22.7	19.1	27.0	34.6	42.2
		4	3.2	5.1	6.8	8.4	10.5	15.2	19.9	24.4	21.1	29.2	37.2	45.0
		4.5	3.6	5.5	7.4	9.2	11.4	16.3	21.2	25.9	22.9	31.3	39.6	47.7
		5	3.9	5.9	7.9	9.9	12.3	17.4	22.4	27.3	24.8	33.4	41.8	50.2
5.5	4.2	6.4	8.5	10.5	13.2	18.4	23.6	28.7	26.6	35.4	44.0	52.5		
6	4.4	6.7	8.9	11.1	14.0	19.4	24.7	29.9	28.4	37.3	46.1	54.8		
1000	1600	0.5	0.5	0.9	1.2	1.5	2.0	3.2	4.4	5.5	4.4	7.2	9.7	12.2
		1	1.0	1.5	2.1	2.6	3.7	6.0	8.1	10.2	7.9	12.6	17.0	21.3
		1.5	1.4	2.3	3.0	3.8	5.2	8.3	11.2	14.0	10.8	16.8	22.5	28.0
		2	1.8	2.9	4.0	5.0	6.5	10.2	13.7	17.1	13.3	20.1	26.7	33.1
		2.5	2.3	3.6	4.8	6.0	7.7	11.8	15.8	19.7	15.5	23.0	30.3	37.4
		3	2.6	4.2	5.6	7.0	8.8	13.3	17.7	21.9	17.7	25.7	33.5	41.1
		3.5	3.0	4.7	6.4	8.0	9.8	14.6	19.3	23.9	19.7	28.1	36.4	44.4
		4	3.3	5.3	7.1	8.8	10.8	15.9	20.8	25.6	21.7	30.4	39.0	47.4
		4.5	3.7	5.7	7.7	9.6	11.7	17.0	22.2	27.3	23.6	32.6	41.5	50.2
		5	4.0	6.2	8.3	10.3	12.7	18.1	23.5	28.8	25.4	34.7	43.8	52.8
5.5	4.3	6.6	8.8	11.0	13.5	19.2	24.7	30.2	27.3	36.7	46.1	55.3		
6	4.6	7.0	9.3	11.6	14.4	20.2	25.9	31.5	29.1	38.7	48.2	57.6		

Tabla 17 Valores de calor (Q) estimados. Resultados para 400 m de profundidad donde L es la longitud horizontal (m), LT es la longitud total (m), ϕ es el diámetro de la tubería (m), V es la velocidad del fluido (m/s), \dot{q} es flujo de calor (W/m²) y los datos del centro son los valores de calor (MW) finales.

L	LT	V	$\phi = 0.075$				$\phi = 0.15$				$\phi = 0.225$			
			$\dot{q}=0.5$	$\dot{q}=1$	$\dot{q}=1.5$	$\dot{q}=2$	$\dot{q}=0.5$	$\dot{q}=1$	$\dot{q}=1.5$	$\dot{q}=2$	$\dot{q}=0.5$	$\dot{q}=1$	$\dot{q}=1.5$	$\dot{q}=2$
500	1100	0.5	0.5	0.8	1.1	1.4	2.0	3.2	4.3	5.4	4.4	7.0	9.5	12.0
		1	1.0	1.5	2.0	2.5	3.7	5.9	7.9	9.9	7.7	12.1	16.3	20.3
		1.5	1.4	2.3	3.0	3.8	5.1	8.0	10.7	13.4	10.3	15.8	21.0	26.1
		2	1.8	2.9	4.0	4.9	6.3	9.7	13.0	16.1	12.7	18.8	24.8	30.6
		2.5	2.2	3.5	4.8	6.0	7.4	11.2	14.8	18.4	14.8	21.4	27.9	34.3
		3	2.6	4.1	5.5	6.9	8.4	12.5	16.5	20.3	16.8	23.8	30.8	37.5
		3.5	2.9	4.6	6.2	7.7	9.4	13.7	17.9	22.0	18.7	26.1	33.3	40.4
		4	3.3	5.1	6.8	8.5	10.3	14.8	19.2	23.5	20.6	28.2	35.7	43.0
		4.5	3.6	5.5	7.4	9.2	11.2	15.9	20.5	24.9	22.5	30.3	37.9	45.5
		5	3.9	5.9	7.9	9.8	12.1	16.9	21.6	26.3	24.3	32.2	40.1	47.9
5.5	4.1	6.3	8.4	10.4	12.9	17.8	22.7	27.5	26.1	34.2	42.2	50.1		
6	4.4	6.7	8.8	10.9	13.7	18.8	23.8	28.6	27.9	36.1	44.2	52.3		
600	1200	0.5	0.5	0.9	1.2	1.5	2.1	3.4	4.6	5.8	4.6	7.5	10.1	12.8
		1	1.0	1.6	2.2	2.7	3.9	6.2	8.4	10.6	8.1	12.9	17.4	21.8
		1.5	1.5	2.4	3.2	4.0	5.4	8.5	11.5	14.4	10.9	16.9	22.7	28.2
		2	1.9	3.1	4.2	5.2	6.6	10.4	13.9	17.4	13.3	20.2	26.7	33.1
		2.5	2.3	3.8	5.1	6.4	7.8	12.0	16.0	19.8	15.5	23.0	30.2	37.2
		3	2.7	4.4	5.9	7.4	8.9	13.4	17.7	22.0	17.6	25.5	33.2	40.7
		3.5	3.1	4.9	6.6	8.3	9.9	14.7	19.3	23.8	19.6	27.8	35.9	43.8
		4	3.4	5.4	7.3	9.1	10.8	15.8	20.7	25.5	21.5	30.0	38.4	46.6
		4.5	3.8	5.9	7.9	9.9	11.7	16.9	22.1	27.0	23.4	32.2	40.8	49.2
		5	4.1	6.3	8.5	10.5	12.6	18.0	23.3	28.4	25.3	34.2	43.0	51.7
5.5	4.4	6.7	9.0	11.2	13.5	19.0	24.4	29.8	27.1	36.2	45.2	54.1		
6	4.6	7.1	9.5	11.8	14.3	20.0	25.6	31.0	28.9	38.1	47.3	56.3		
700	1300	0.5	0.6	0.9	1.3	1.6	2.2	3.5	4.8	6.1	4.8	7.8	10.7	13.5
		1	1.0	1.7	2.3	2.8	4.0	6.6	8.9	11.2	8.5	13.7	18.5	23.3
		1.5	1.5	2.5	3.4	4.2	5.6	9.0	12.2	15.3	11.4	18.0	24.2	30.2
		2	2.0	3.2	4.4	5.5	7.0	11.0	14.8	18.5	14.0	21.4	28.6	35.5
		2.5	2.4	3.9	5.3	6.7	8.2	12.7	17.0	21.2	16.3	24.4	32.3	39.9
		3	2.9	4.6	6.2	7.8	9.3	14.2	18.9	23.5	18.4	27.1	35.5	43.7
		3.5	3.2	5.2	7.0	8.8	10.3	15.6	20.6	25.5	20.4	29.5	38.4	47.0
		4	3.6	5.7	7.7	9.7	11.3	16.8	22.2	27.4	22.4	31.8	41.0	50.0
		4.5	3.9	6.2	8.4	10.5	12.2	18.0	23.6	29.0	24.3	34.0	43.5	52.8
		5	4.3	6.7	9.0	11.2	13.2	19.1	24.9	30.5	26.2	36.1	45.9	55.4
5.5	4.6	7.1	9.6	11.9	14.0	20.1	26.1	31.9	28.1	38.1	48.1	57.9		
6	4.9	7.5	10.1	12.6	14.9	21.2	27.3	33.3	29.9	40.1	50.3	60.3		
800	1400	0.5	0.6	1.0	1.4	1.8	2.2	3.7	5.0	6.4	5.0	8.2	11.2	14.3
		1	1.1	1.7	2.3	3.0	4.2	6.8	9.3	11.8	8.9	14.4	19.5	24.6

L	LT	V	$\phi = 0.075$				$\phi = 0.15$				$\phi = 0.225$			
			$\dot{q}=0.5$	$\dot{q}=1$	$\dot{q}=1.5$	$\dot{q}=2$	$\dot{q}=0.5$	$\dot{q}=1$	$\dot{q}=1.5$	$\dot{q}=2$	$\dot{q}=0.5$	$\dot{q}=1$	$\dot{q}=1.5$	$\dot{q}=2$
		1.5	1.6	2.6	3.5	4.4	5.8	9.4	12.8	16.1	12.0	18.9	25.6	32.0
		2	2.1	3.4	4.6	5.8	7.3	11.6	15.7	19.6	14.6	22.6	30.3	37.8
		2.5	2.5	4.1	5.6	7.0	8.5	13.4	18.0	22.5	16.9	25.8	34.3	42.5
		3	3.0	4.8	6.5	8.2	9.7	15.0	20.1	25.0	19.2	28.6	37.7	46.5
		3.5	3.4	5.4	7.3	9.2	10.7	16.4	21.9	27.2	21.2	31.1	40.7	50.1
		4	3.7	6.0	8.1	10.2	11.8	17.7	23.5	29.1	23.3	33.5	43.5	53.3
		4.5	4.1	6.5	8.8	11.1	12.7	19.0	25.0	30.9	25.2	35.8	46.1	56.3
		5	4.4	7.0	9.5	11.9	13.7	20.1	26.4	32.5	27.1	37.9	48.6	59.0
		5.5	4.8	7.5	10.1	12.6	14.6	21.2	27.7	34.0	29.0	40.0	50.9	61.6
6	5.1	7.9	10.7	13.3	15.5	22.3	28.9	35.4	30.8	42.1	53.2	64.1		
900	1500	0.5	0.6	1.0	1.4	1.9	2.3	3.8	5.2	6.7	5.2	8.5	11.6	14.9
		1	1.1	1.8	2.4	3.1	4.3	7.1	9.7	12.4	9.2	15.0	20.4	25.9
		1.5	1.6	2.7	3.6	4.6	6.1	9.8	13.4	16.9	12.4	19.9	26.9	33.8
		2	2.1	3.5	4.8	6.0	7.5	12.1	16.4	20.6	15.2	23.8	32.0	39.9
		2.5	2.6	4.3	5.8	7.4	8.9	14.0	19.0	23.7	17.6	27.1	36.2	44.9
		3	3.1	5.0	6.8	8.6	10.0	15.7	21.1	26.4	19.9	30.0	39.8	49.2
		3.5	3.5	5.6	7.7	9.7	11.2	17.2	23.1	28.7	22.0	32.7	43.0	53.0
		4	3.9	6.2	8.5	10.7	12.2	18.6	24.8	30.8	24.1	35.1	45.9	56.5
		4.5	4.2	6.8	9.2	11.6	13.2	19.9	26.4	32.7	26.1	37.5	48.7	59.6
		5	4.6	7.3	9.9	12.5	14.2	21.1	27.9	34.4	28.0	39.7	51.2	62.5
5.5	4.9	7.8	10.6	13.3	15.1	22.3	29.2	36.0	29.9	41.9	53.7	65.2		
6	5.3	8.3	11.2	14.0	16.0	23.4	30.5	37.5	31.8	44.0	56.0	67.8		
1000	1600	0.5	0.6	1.1	1.5	2.0	2.4	3.9	5.4	7.0	5.3	8.8	12.0	15.6
		1	1.1	1.9	2.5	3.2	4.5	7.4	10.1	12.9	9.5	15.6	21.3	27.1
		1.5	1.7	2.7	3.7	4.8	6.3	10.2	14.0	17.7	12.9	20.7	28.1	35.4
		2	2.2	3.6	4.9	6.3	7.8	12.6	17.1	21.6	15.7	24.8	33.5	41.9
		2.5	2.7	4.4	6.0	7.6	9.2	14.6	19.8	24.9	18.2	28.3	38.0	47.3
		3	3.2	5.1	7.0	8.9	10.4	16.4	22.1	27.7	20.6	31.4	41.8	51.9
		3.5	3.6	5.8	8.0	10.1	11.6	18.0	24.2	30.2	22.8	34.2	45.2	55.9
		4	4.0	6.5	8.8	11.1	12.6	19.5	26.0	32.4	24.9	36.7	48.3	59.5
		4.5	4.4	7.1	9.6	12.1	13.7	20.8	27.7	34.4	26.9	39.2	51.1	62.8
		5	4.7	7.6	10.4	13.0	14.7	22.1	29.3	36.2	28.9	41.5	53.8	65.9
5.5	5.1	8.2	11.1	13.9	15.6	23.3	30.7	37.9	30.8	43.7	56.3	68.7		
6	5.4	8.7	11.7	14.7	16.5	24.4	32.1	39.5	32.7	45.8	58.8	71.4		

Anexo E

Las Tablas 18-20 contienen todos los valores de calor en la parte final de la tubería horizontal de las 2592 configuraciones modeladas.

Tabla 18 Valores de calor (Q) estimados. Resultados para 300 m de profundidad donde L es la longitud horizontal (m), LT es la longitud total (m), ϕ es el diámetro de la tubería (m), V es la velocidad del fluido (m/s), \dot{q} es flujo de calor (W/m²) y los datos del centro son los valores de calor (MW) al final de la tubería horizontal.

L	LT	V	$\phi = 0.075$				$\phi = 0.15$				$\phi = 0.225$			
			$\dot{q}=0.5$	$\dot{q}=1$	$\dot{q}=1.5$	$\dot{q}=2$	$\dot{q}=0.5$	$\dot{q}=1$	$\dot{q}=1.5$	$\dot{q}=2$	$\dot{q}=0.5$	$\dot{q}=1$	$\dot{q}=1.5$	$\dot{q}=2$
500	1100	0.5	0.5	0.8	1.1	1.4	1.7	2.8	3.8	4.8	3.5	5.5	7.4	9.3
		1	0.9	1.4	1.9	2.4	2.8	4.3	5.7	7.1	5.7	8.3	10.8	13.2
		1.5	1.2	1.9	2.5	3.1	3.8	5.4	7.1	8.7	7.6	10.4	13.2	16.0
		2	1.5	2.2	3.0	3.7	4.6	6.4	8.2	9.9	9.4	12.4	15.4	18.3
		2.5	1.7	2.6	3.4	4.2	5.5	7.3	9.2	11.1	11.2	14.3	17.4	20.4
		3	1.9	2.9	3.7	4.6	6.3	8.2	10.2	12.1	12.9	16.1	19.3	22.4
		3.5	2.2	3.1	4.1	5.0	7.0	9.1	11.1	13.1	14.7	17.9	21.1	24.4
		4	2.4	3.4	4.4	5.3	7.8	9.9	11.9	14.0	16.4	19.7	23.0	26.2
		4.5	2.6	3.6	4.7	5.7	8.6	10.7	12.8	14.9	18.1	21.4	24.8	28.1
		5	2.8	3.9	4.9	6.0	9.4	11.5	13.6	15.8	19.8	23.2	26.6	29.9
		5.5	3.0	4.1	5.2	6.3	10.1	12.3	14.5	16.6	21.5	24.9	28.3	31.7
6	3.2	4.4	5.5	6.5	10.9	13.1	15.3	17.5	23.2	26.6	30.1	33.5		
600	1200	0.5	0.5	0.9	1.2	1.5	1.8	2.9	4.0	5.0	3.7	5.9	7.9	9.9
		1	0.9	1.5	2.0	2.5	3.0	4.6	6.2	7.7	6.0	8.9	11.7	14.4
		1.5	1.2	2.0	2.7	3.3	4.0	5.8	7.7	9.5	8.0	11.2	14.4	17.5
		2	1.5	2.4	3.2	4.0	4.9	6.9	8.9	10.9	9.8	13.3	16.6	20.0
		2.5	1.8	2.7	3.6	4.5	5.7	7.9	10.0	12.1	11.6	15.2	18.7	22.2
		3	2.0	3.1	4.0	5.0	6.5	8.8	11.0	13.2	13.4	17.1	20.7	24.4
		3.5	2.3	3.4	4.4	5.4	7.3	9.7	12.0	14.2	15.1	18.9	22.7	26.4
		4	2.5	3.6	4.7	5.8	8.1	10.5	12.9	15.2	16.9	20.7	24.5	28.3
		4.5	2.7	3.9	5.1	6.2	8.9	11.3	13.8	16.2	18.6	22.5	26.4	30.2
		5	3.0	4.2	5.4	6.5	9.7	12.2	14.6	17.1	20.3	24.3	28.2	32.1
		5.5	3.2	4.4	5.6	6.8	10.5	13.0	15.5	18.0	22.0	26.0	30.0	33.9
6	3.4	4.7	5.9	7.1	11.2	13.8	16.3	18.8	23.7	27.7	31.8	35.8		
700	1300	0.5	0.5	0.9	1.2	1.5	1.9	3.0	4.2	5.2	3.9	6.2	8.4	10.5
		1	0.9	1.5	2.1	2.6	3.1	4.9	6.6	8.2	6.3	9.5	12.5	15.5
		1.5	1.3	2.1	2.8	3.5	4.1	6.2	8.2	10.2	8.3	11.9	15.4	18.9
		2	1.6	2.5	3.4	4.2	5.1	7.3	9.6	11.7	10.2	14.1	17.9	21.6
		2.5	1.9	2.9	3.9	4.8	5.9	8.4	10.7	13.1	12.0	16.1	20.1	24.0
		3	2.1	3.2	4.3	5.3	6.8	9.3	11.8	14.3	13.8	18.0	22.1	26.2
		3.5	2.4	3.6	4.7	5.8	7.6	10.2	12.8	15.4	15.6	19.9	24.1	28.3

L	LT	V	$\phi = 0.075$				$\phi = 0.15$				$\phi = 0.225$			
			$\dot{q}=0.5$	$\dot{q}=1$	$\dot{q}=1.5$	$\dot{q}=2$	$\dot{q}=0.5$	$\dot{q}=1$	$\dot{q}=1.5$	$\dot{q}=2$	$\dot{q}=0.5$	$\dot{q}=1$	$\dot{q}=1.5$	$\dot{q}=2$
		4	2.6	3.9	5.1	6.2	8.4	11.1	13.8	16.4	17.3	21.7	26.0	30.3
		4.5	2.9	4.2	5.4	6.6	9.2	12.0	14.7	17.4	19.1	23.5	27.9	32.3
		5	3.1	4.4	5.7	7.0	10.0	12.8	15.6	18.3	20.8	25.3	29.8	34.2
		5.5	3.3	4.7	6.0	7.4	10.8	13.6	16.5	19.3	22.5	27.1	31.6	36.1
		6	3.5	4.9	6.3	7.7	11.6	14.4	17.3	20.2	24.2	28.8	33.4	38.0
800	1400	0.5	0.5	0.9	1.2	1.6	1.9	3.1	4.3	5.4	4.0	6.4	8.7	11.0
		1	1.0	1.6	2.2	2.7	3.2	5.1	6.9	8.6	6.5	10.0	13.3	16.5
		1.5	1.3	2.1	2.9	3.7	4.3	6.5	8.7	10.8	8.6	12.6	16.4	20.2
		2	1.6	2.6	3.5	4.4	5.3	7.7	10.2	12.5	10.6	14.8	19.0	23.1
		2.5	1.9	3.0	4.1	5.1	6.2	8.8	11.4	14.0	12.5	16.9	21.3	25.7
		3	2.2	3.4	4.5	5.7	7.0	9.8	12.5	15.2	14.3	18.9	23.5	28.0
		3.5	2.5	3.7	5.0	6.2	7.9	10.7	13.6	16.4	16.0	20.8	25.5	30.2
		4	2.7	4.1	5.4	6.6	8.7	11.7	14.6	17.5	17.8	22.7	27.5	32.3
		4.5	3.0	4.4	5.7	7.1	9.5	12.5	15.6	18.6	19.6	24.5	29.4	34.3
		5	3.2	4.7	6.1	7.5	10.3	13.4	16.5	19.6	21.3	26.3	31.3	36.3
5.5	3.4	4.9	6.4	7.9	11.1	14.2	17.4	20.5	23.0	28.1	33.2	38.2		
6	3.7	5.2	6.7	8.2	11.9	15.1	18.3	21.5	24.7	29.9	35.0	40.1		
900	1500	0.5	0.5	0.9	1.2	1.6	2.0	3.2	4.4	5.6	4.1	6.6	9.0	11.4
		1	1.0	1.6	2.2	2.8	3.3	5.3	7.2	9.0	6.8	10.4	14.0	17.4
		1.5	1.4	2.2	3.0	3.8	4.5	6.8	9.2	11.4	9.0	13.2	17.4	21.4
		2	1.7	2.7	3.7	4.6	5.4	8.1	10.7	13.2	10.9	15.6	20.1	24.5
		2.5	2.0	3.2	4.2	5.3	6.4	9.2	12.1	14.8	12.8	17.7	22.5	27.3
		3	2.3	3.5	4.8	5.9	7.2	10.3	13.3	16.2	14.7	19.7	24.8	29.7
		3.5	2.6	3.9	5.2	6.5	8.1	11.3	14.4	17.4	16.5	21.7	26.9	32.0
		4	2.8	4.3	5.6	7.0	8.9	12.2	15.4	18.6	18.3	23.6	28.9	34.2
		4.5	3.1	4.6	6.0	7.5	9.8	13.1	16.4	19.7	20.0	25.5	30.9	36.3
		5	3.3	4.9	6.4	7.9	10.6	14.0	17.4	20.7	21.8	27.3	32.8	38.3
5.5	3.5	5.2	6.8	8.3	11.4	14.8	18.3	21.7	23.5	29.1	34.7	40.3		
6	3.8	5.5	7.1	8.7	12.2	15.7	19.2	22.7	25.2	30.9	36.6	42.2		
1000	1600	0.5	0.5	0.9	1.3	1.6	2.0	3.3	4.5	5.7	4.2	6.8	9.3	11.8
		1	1.0	1.7	2.3	2.9	3.4	5.5	7.5	9.4	7.0	10.9	14.6	18.2
		1.5	1.4	2.3	3.1	3.9	4.6	7.1	9.6	11.9	9.2	13.8	18.2	22.5
		2	1.7	2.8	3.8	4.8	5.6	8.5	11.2	13.9	11.3	16.3	21.1	25.9
		2.5	2.1	3.3	4.4	5.5	6.6	9.6	12.7	15.6	13.2	18.5	23.7	28.8
		3	2.4	3.7	5.0	6.2	7.5	10.7	13.9	17.0	15.1	20.6	26.0	31.3
		3.5	2.6	4.1	5.4	6.8	8.3	11.7	15.1	18.4	16.9	22.6	28.2	33.7
		4	2.9	4.4	5.9	7.3	9.2	12.7	16.2	19.6	18.7	24.5	30.3	36.0
		4.5	3.2	4.8	6.3	7.8	10.0	13.6	17.2	20.7	20.5	26.4	32.3	38.2
		5	3.4	5.1	6.7	8.3	10.8	14.5	18.2	21.8	22.2	28.3	34.3	40.2
5.5	3.7	5.4	7.1	8.7	11.6	15.4	19.2	22.9	24.0	30.1	36.2	42.3		
6	3.9	5.7	7.4	9.1	12.4	16.3	20.1	23.9	25.7	31.9	38.1	44.3		

Tabla 19 Valores de calor (Q) estimados. Resultados para 350 m de profundidad donde L es la longitud horizontal (m), LT es la longitud total (m), ϕ es el diámetro de la tubería (m), V es la velocidad del fluido (m/s), \dot{q} es flujo de calor (W/m²) y los datos del centro son los valores de calor (MW) al final de la tubería horizontal.

L	LT	V	$\phi = 0.075$				$\phi = 0.15$				$\phi = 0.225$			
			$\dot{q}=0.5$	$\dot{q}=1$	$\dot{q}=1.5$	$\dot{q}=2$	$\dot{q}=0.5$	$\dot{q}=1$	$\dot{q}=1.5$	$\dot{q}=2$	$\dot{q}=0.5$	$\dot{q}=1$	$\dot{q}=1.5$	$\dot{q}=2$
500	1100	0.5	0.7	1.1	1.6	2.2	2.3	3.8	5.3	6.9	4.6	7.6	10.4	13.2
		1	1.2	1.9	2.7	3.5	3.6	5.8	7.9	10.0	7.1	11.0	14.7	18.4
		1.5	1.5	2.5	3.5	4.4	4.7	7.2	9.7	12.0	9.1	13.5	17.7	21.8
		2	1.9	3.0	4.1	5.2	5.6	8.4	11.0	13.6	11.0	15.6	20.2	24.6
		2.5	2.2	3.4	4.6	5.8	6.5	9.4	12.2	15.0	12.9	17.7	22.4	27.0
		3	2.4	3.8	5.1	6.4	7.3	10.3	13.3	16.2	14.7	19.6	24.4	29.2
		3.5	2.7	4.1	5.5	6.9	8.1	11.3	14.3	17.3	16.4	21.5	26.4	31.4
		4	2.9	4.4	5.9	7.3	9.0	12.1	15.3	18.4	18.2	23.3	28.4	33.4
		4.5	3.2	4.7	6.3	7.7	9.8	13.0	16.2	19.4	19.9	25.1	30.3	35.4
		5	3.4	5.0	6.6	8.1	10.5	13.9	17.1	20.4	21.6	26.9	32.1	37.3
5.5	3.6	5.3	6.9	8.5	11.3	14.7	18.0	21.3	23.4	28.7	34.0	39.2		
6	3.8	5.5	7.2	8.8	12.1	15.5	18.9	22.2	25.1	30.4	35.8	41.1		
600	1200	0.5	0.7	1.2	1.7	2.3	2.4	4.0	5.6	7.3	4.9	8.0	11.1	14.2
		1	1.2	2.0	2.8	3.7	3.9	6.3	8.5	10.8	7.6	11.9	16.1	20.1
		1.5	1.6	2.7	3.7	4.8	5.0	7.8	10.5	13.1	9.7	14.6	19.4	24.0
		2	2.0	3.2	4.4	5.6	5.9	9.0	12.0	15.0	11.7	16.9	22.0	27.0
		2.5	2.3	3.7	5.0	6.3	6.9	10.2	13.4	16.5	13.6	19.0	24.4	29.7
		3	2.6	4.1	5.5	6.9	7.7	11.2	14.5	17.8	15.4	21.0	26.6	32.1
		3.5	2.9	4.5	6.0	7.5	8.6	12.1	15.6	19.0	17.2	23.0	28.7	34.3
		4	3.1	4.8	6.4	8.0	9.4	13.1	16.7	20.2	18.9	24.8	30.7	36.5
		4.5	3.4	5.1	6.8	8.5	10.2	14.0	17.6	21.3	20.7	26.7	32.7	38.5
		5	3.6	5.4	7.2	8.9	11.0	14.8	18.6	22.3	22.4	28.5	34.6	40.5
5.5	3.8	5.7	7.5	9.3	11.8	15.7	19.5	23.3	24.2	30.3	36.4	42.5		
6	4.1	6.0	7.9	9.7	12.6	16.5	20.4	24.2	25.9	32.1	38.3	44.4		
700	1300	0.5	0.7	1.2	1.7	2.3	2.5	4.2	5.9	7.7	5.1	8.5	11.7	15.1
		1	1.3	2.1	3.0	3.9	4.0	6.6	9.1	11.6	8.0	12.7	17.2	21.7
		1.5	1.7	2.8	3.9	5.0	5.2	8.3	11.3	14.2	10.2	15.7	20.9	26.0
		2	2.1	3.4	4.7	6.0	6.3	9.7	13.0	16.2	12.3	18.1	23.8	29.3
		2.5	2.4	3.9	5.3	6.8	7.2	10.9	14.4	17.9	14.2	20.3	26.3	32.2
		3	2.7	4.4	5.9	7.4	8.1	12.0	15.7	19.3	16.1	22.4	28.7	34.8
		3.5	3.0	4.8	6.4	8.1	9.0	13.0	16.9	20.7	17.9	24.4	30.8	37.2
		4	3.3	5.1	6.9	8.6	9.8	13.9	18.0	21.9	19.7	26.3	32.9	39.4
		4.5	3.5	5.5	7.3	9.1	10.7	14.9	19.0	23.0	21.4	28.2	35.0	41.6
		5	3.8	5.8	7.7	9.6	11.5	15.8	20.0	24.1	23.2	30.1	36.9	43.7
5.5	4.0	6.1	8.1	10.1	12.3	16.6	20.9	25.2	24.9	31.9	38.8	45.7		
6	4.3	6.4	8.5	10.5	13.1	17.5	21.9	26.2	26.7	33.7	40.7	47.7		
800	1400	0.5	0.7	1.2	1.8	2.4	2.6	4.3	6.1	8.0	5.3	8.8	12.2	15.9
		1	1.3	2.2	3.1	4.0	4.2	7.0	9.6	12.2	8.3	13.4	18.3	23.1

L	LT	V	$\phi = 0.075$				$\phi = 0.15$				$\phi = 0.225$			
			$\dot{q}=0.5$	$\dot{q}=1$	$\dot{q}=1.5$	$\dot{q}=2$	$\dot{q}=0.5$	$\dot{q}=1$	$\dot{q}=1.5$	$\dot{q}=2$	$\dot{q}=0.5$	$\dot{q}=1$	$\dot{q}=1.5$	$\dot{q}=2$
		1.5	1.8	2.9	4.1	5.3	5.5	8.8	12.0	15.1	10.7	16.6	22.3	27.8
		2	2.2	3.6	4.9	6.3	6.6	10.3	13.8	17.3	12.8	19.2	25.5	31.5
		2.5	2.5	4.1	5.6	7.2	7.6	11.5	15.4	19.1	14.8	21.6	28.2	34.6
		3	2.8	4.6	6.3	7.9	8.5	12.7	16.8	20.7	16.7	23.7	30.6	37.4
		3.5	3.1	5.0	6.8	8.6	9.4	13.8	18.0	22.2	18.6	25.8	32.9	39.9
		4	3.4	5.4	7.3	9.2	10.2	14.8	19.2	23.5	20.4	27.8	35.1	42.3
		4.5	3.7	5.8	7.8	9.8	11.1	15.7	20.3	24.7	22.2	29.7	37.2	44.5
		5	4.0	6.1	8.2	10.3	11.9	16.7	21.3	25.9	23.9	31.6	39.2	46.7
		5.5	4.2	6.5	8.7	10.8	12.7	17.6	22.3	27.0	25.7	33.5	41.2	48.8
6	4.5	6.8	9.0	11.2	13.6	18.5	23.3	28.1	27.5	35.3	43.1	50.9		
900	1500	0.5	0.7	1.3	1.8	2.4	2.6	4.4	6.2	8.3	5.4	9.1	12.7	16.6
		1	1.3	2.2	3.1	4.2	4.4	7.3	10.0	12.9	8.7	14.1	19.3	24.4
		1.5	1.8	3.0	4.2	5.5	5.7	9.2	12.6	16.0	11.2	17.5	23.6	29.6
		2	2.2	3.7	5.1	6.6	6.8	10.8	14.6	18.3	13.4	20.3	27.0	33.6
		2.5	2.6	4.3	5.9	7.5	7.9	12.2	16.3	20.3	15.4	22.8	29.9	36.9
		3	2.9	4.8	6.6	8.3	8.8	13.4	17.8	22.1	17.3	25.0	32.5	39.9
		3.5	3.3	5.3	7.2	9.0	9.7	14.5	19.1	23.6	19.2	27.1	34.9	42.5
		4	3.6	5.7	7.7	9.7	10.6	15.6	20.4	25.0	21.1	29.2	37.2	45.0
		4.5	3.8	6.1	8.2	10.3	11.5	16.6	21.5	26.4	22.9	31.2	39.4	47.4
		5	4.1	6.5	8.7	10.9	12.3	17.5	22.6	27.6	24.7	33.1	41.4	49.7
5.5	4.4	6.8	9.2	11.4	13.2	18.5	23.7	28.8	26.5	35.0	43.5	51.8		
6	4.6	7.2	9.6	11.9	14.0	19.4	24.7	29.9	28.2	36.9	45.5	54.0		
1000	1600	0.5	0.7	1.3	1.8	2.5	2.7	4.5	6.4	8.5	5.6	9.4	13.1	17.2
		1	1.3	2.3	3.2	4.3	4.5	7.5	10.4	13.4	9.0	14.7	20.2	25.6
		1.5	1.8	3.1	4.3	5.7	5.9	9.6	13.2	16.7	11.6	18.4	24.9	31.2
		2	2.3	3.8	5.3	6.8	7.1	11.3	15.4	19.3	13.9	21.3	28.5	35.5
		2.5	2.7	4.4	6.1	7.8	8.2	12.8	17.2	21.5	16.0	23.9	31.6	39.1
		3	3.0	5.0	6.8	8.7	9.2	14.0	18.8	23.3	17.9	26.2	34.3	42.2
		3.5	3.4	5.5	7.5	9.5	10.1	15.2	20.2	25.0	19.9	28.4	36.9	45.1
		4	3.7	5.9	8.1	10.2	11.0	16.3	21.5	26.5	21.7	30.5	39.2	47.7
		4.5	4.0	6.4	8.6	10.8	11.9	17.4	22.7	27.9	23.6	32.6	41.5	50.2
		5	4.3	6.8	9.1	11.4	12.8	18.4	23.9	29.2	25.4	34.6	43.6	52.5
5.5	4.5	7.1	9.6	12.0	13.6	19.3	25.0	30.5	27.2	36.5	45.7	54.8		
6	4.8	7.5	10.1	12.6	14.4	20.3	26.0	31.6	29.0	38.4	47.7	57.0		

Tabla 20 Valores de calor (Q) estimados. Resultados para 400 m de profundidad donde L es la longitud horizontal (m), LT es la longitud total (m), ϕ es el diámetro de la tubería (m), V es la velocidad del fluido (m/s), \dot{q} es flujo de calor (W/m²) y los datos del centro son los valores de calor (MW) al final de la tubería horizontal.

L	LT	V	$\phi = 0.075$				$\phi = 0.15$				$\phi = 0.225$			
			$\dot{q}=0.5$	$\dot{q}=1$	$\dot{q}=1.5$	$\dot{q}=2$	$\dot{q}=0.5$	$\dot{q}=1$	$\dot{q}=1.5$	$\dot{q}=2$	$\dot{q}=0.5$	$\dot{q}=1$	$\dot{q}=1.5$	$\dot{q}=2$
500	1100	0.5	0.8	1.5	2.2	2.8	2.9	4.9	7.0	9.4	5.7	9.6	13.5	17.7
		1	1.4	2.5	3.5	4.8	4.4	7.4	10.2	13.1	8.6	13.8	18.8	23.7
		1.5	1.9	3.2	4.5	6.0	5.6	9.0	12.3	15.5	10.8	16.7	22.3	27.8
		2	2.3	3.8	5.3	6.8	6.6	10.4	13.9	17.4	12.8	19.0	25.1	31.1
		2.5	2.6	4.3	5.9	7.6	7.6	11.5	15.3	19.0	14.7	21.2	27.6	33.9
		3	2.9	4.8	6.5	8.2	8.5	12.6	16.6	20.5	16.5	23.3	29.9	36.4
		3.5	3.2	5.2	7.0	8.8	9.3	13.6	17.7	21.8	18.3	25.2	32.0	38.7
		4	3.5	5.5	7.5	9.4	10.1	14.5	18.8	23.0	20.1	27.1	34.1	40.9
		4.5	3.8	5.9	7.9	9.9	11.0	15.4	19.8	24.1	21.9	29.0	36.1	43.1
		5	4.0	6.2	8.3	10.3	11.8	16.3	20.8	25.2	23.6	30.9	38.0	45.1
5.5	4.2	6.5	8.7	10.8	12.6	17.2	21.7	26.2	25.4	32.7	39.9	47.1		
6	4.5	6.8	9.0	11.2	13.4	18.0	22.7	27.2	27.1	34.5	41.8	49.1		
600	1200	0.5	0.9	1.5	2.3	2.8	3.0	5.1	7.4	10.0	6.0	10.2	14.4	19.2
		1	1.5	2.6	3.8	5.0	4.7	7.9	11.0	14.3	9.2	14.9	20.5	26.1
		1.5	2.0	3.4	4.8	6.4	6.0	9.8	13.4	17.0	11.5	18.1	24.5	30.6
		2	2.4	4.1	5.7	7.4	7.1	11.2	15.2	19.1	13.6	20.7	27.6	34.2
		2.5	2.8	4.6	6.4	8.3	8.1	12.5	16.8	20.9	15.6	23.0	30.3	37.3
		3	3.1	5.1	7.0	9.0	9.0	13.6	18.2	22.5	17.5	25.2	32.7	40.1
		3.5	3.4	5.6	7.6	9.7	9.9	14.7	19.4	24.0	19.3	27.2	35.0	42.6
		4	3.7	6.0	8.1	10.3	10.7	15.7	20.6	25.3	21.1	29.2	37.1	44.9
		4.5	4.0	6.4	8.6	10.8	11.6	16.7	21.6	26.5	22.9	31.1	39.2	47.2
		5	4.3	6.7	9.1	11.3	12.4	17.6	22.7	27.7	24.7	33.0	41.2	49.4
5.5	4.5	7.0	9.5	11.8	13.2	18.5	23.7	28.8	26.4	34.9	43.2	51.5		
6	4.8	7.4	9.9	12.3	14.0	19.4	24.7	29.8	28.2	36.7	45.1	53.5		
700	1300	0.5	0.9	1.6	2.3	2.7	3.1	5.3	7.8	10.4	6.3	10.7	15.3	20.5
		1	1.6	2.7	3.9	5.2	5.0	8.4	11.7	15.4	9.7	16.0	22.0	28.2
		1.5	2.1	3.6	5.1	6.8	6.4	10.5	14.4	18.4	12.2	19.5	26.4	33.2
		2	2.6	4.3	6.0	8.0	7.5	12.1	16.4	20.7	14.4	22.3	29.9	37.2
		2.5	2.9	4.9	6.8	8.9	8.5	13.4	18.1	22.7	16.4	24.7	32.8	40.6
		3	3.3	5.5	7.5	9.7	9.5	14.7	19.6	24.5	18.4	27.0	35.4	43.5
		3.5	3.6	6.0	8.2	10.4	10.4	15.8	21.0	26.0	20.3	29.1	37.8	46.3
		4	3.9	6.4	8.7	11.1	11.3	16.9	22.2	27.5	22.1	31.2	40.1	48.8
		4.5	4.2	6.8	9.3	11.7	12.2	17.9	23.4	28.8	23.9	33.1	42.2	51.2
		5	4.5	7.2	9.8	12.3	13.0	18.8	24.5	30.0	25.7	35.1	44.3	53.4
5.5	4.8	7.6	10.2	12.8	13.9	19.8	25.6	31.2	27.5	37.0	46.4	55.6		
6	5.0	7.9	10.6	13.3	14.7	20.7	26.6	32.4	29.3	38.9	48.4	57.8		
800	1400	0.5	0.9	1.6	2.4	2.7	3.2	5.5	8.1	10.7	6.5	11.2	16.0	21.6
		1	1.6	2.8	4.1	5.4	5.2	8.8	12.4	16.4	10.2	16.9	23.4	30.3

L	LT	V	$\phi = 0.075$				$\phi = 0.15$				$\phi = 0.225$			
			$\dot{q}=0.5$	$\dot{q}=1$	$\dot{q}=1.5$	$\dot{q}=2$	$\dot{q}=0.5$	$\dot{q}=1$	$\dot{q}=1.5$	$\dot{q}=2$	$\dot{q}=0.5$	$\dot{q}=1$	$\dot{q}=1.5$	$\dot{q}=2$
		1.5	2.2	3.7	5.3	7.2	6.7	11.1	15.3	19.7	12.9	20.7	28.3	35.7
		2	2.7	4.5	6.4	8.5	7.9	12.8	17.5	22.3	15.1	23.7	32.0	40.0
		2.5	3.1	5.2	7.2	9.5	9.0	14.3	19.4	24.4	17.2	26.3	35.1	43.7
		3	3.5	5.8	8.0	10.4	10.0	15.6	21.0	26.3	19.2	28.7	37.9	46.9
		3.5	3.8	6.3	8.7	11.1	10.9	16.8	22.5	28.0	21.2	30.9	40.5	49.8
		4	4.1	6.8	9.3	11.9	11.9	17.9	23.8	29.5	23.0	33.1	42.9	52.5
		4.5	4.4	7.2	9.9	12.5	12.8	19.0	25.1	31.0	24.9	35.1	45.2	55.0
		5	4.7	7.6	10.4	13.1	13.6	20.0	26.3	32.3	26.7	37.1	47.3	57.4
		5.5	5.0	8.0	10.9	13.7	14.5	21.0	27.4	33.6	28.5	39.1	49.5	59.7
6	5.3	8.4	11.4	14.3	15.3	22.0	28.5	34.8	30.3	41.0	51.5	61.9		
900	1500	0.5	0.9	1.6	2.4	2.6	3.2	5.6	8.3	10.9	6.7	11.6	16.7	22.5
		1	1.6	2.8	4.2	5.5	5.4	9.2	13.0	17.3	10.6	17.8	24.7	32.2
		1.5	2.2	3.8	5.5	7.5	7.0	11.6	16.1	21.0	13.5	21.9	30.0	38.1
		2	2.7	4.7	6.6	8.9	8.3	13.5	18.6	23.7	15.9	25.1	34.0	42.7
		2.5	3.2	5.4	7.6	10.0	9.4	15.1	20.6	26.0	18.0	27.9	37.4	46.6
		3	3.6	6.0	8.4	11.0	10.5	16.5	22.4	28.0	20.1	30.4	40.4	50.1
		3.5	4.0	6.6	9.1	11.8	11.4	17.8	23.9	29.9	22.1	32.7	43.1	53.2
		4	4.3	7.1	9.8	12.6	12.4	19.0	25.4	31.5	24.0	34.9	45.6	56.0
		4.5	4.6	7.6	10.4	13.3	13.3	20.1	26.7	33.1	25.8	37.0	48.0	58.7
		5	5.0	8.0	11.0	13.9	14.2	21.2	27.9	34.5	27.7	39.1	50.3	61.2
5.5	5.2	8.5	11.5	14.6	15.1	22.2	29.1	35.9	29.5	41.1	52.5	63.6		
6	5.5	8.9	12.0	15.2	15.9	23.2	30.2	37.1	31.3	43.0	54.6	66.0		
1000	1600	0.5	0.9	1.6	2.5	2.5	3.3	5.8	8.5	11.1	6.9	11.9	17.3	23.2
		1	1.7	2.9	4.3	5.6	5.6	9.5	13.5	18.1	11.0	18.5	25.9	33.9
		1.5	2.3	3.9	5.7	7.7	7.2	12.1	16.9	22.1	14.0	23.0	31.6	40.3
		2	2.8	4.8	6.9	9.3	8.6	14.2	19.5	25.1	16.5	26.4	35.9	45.3
		2.5	3.3	5.6	7.9	10.5	9.8	15.9	21.7	27.5	18.8	29.4	39.6	49.5
		3	3.7	6.3	8.8	11.5	10.9	17.4	23.6	29.7	20.9	32.0	42.7	53.1
		3.5	4.1	6.9	9.6	12.4	11.9	18.7	25.3	31.6	22.9	34.4	45.6	56.4
		4	4.5	7.4	10.3	13.3	12.9	20.0	26.8	33.4	24.9	36.7	48.2	59.5
		4.5	4.8	7.9	10.9	14.0	13.8	21.1	28.2	35.1	26.8	38.9	50.7	62.3
		5	5.1	8.4	11.5	14.7	14.7	22.3	29.5	36.6	28.6	41.0	53.1	64.9
5.5	5.5	8.9	12.1	15.4	15.6	23.3	30.8	38.0	30.5	43.1	55.4	67.5		
6	5.8	9.3	12.7	16.0	16.5	24.3	32.0	39.4	32.3	45.1	57.6	69.9		

Anexo F

Las Figuras 38-45 Nos muestran las comparaciones de temperatura (T) vs. calor (Q) a la salida del sistema geotérmico de ciclo cerrado para las diferentes velocidades y sus respectivos valores de flujo másico (\dot{m}). Los resultados se muestran considerando los valores máximos y mínimos de las variables profundidad (Z), el flujo de calor (\dot{q}) y diámetro de la tubería (ϕ).

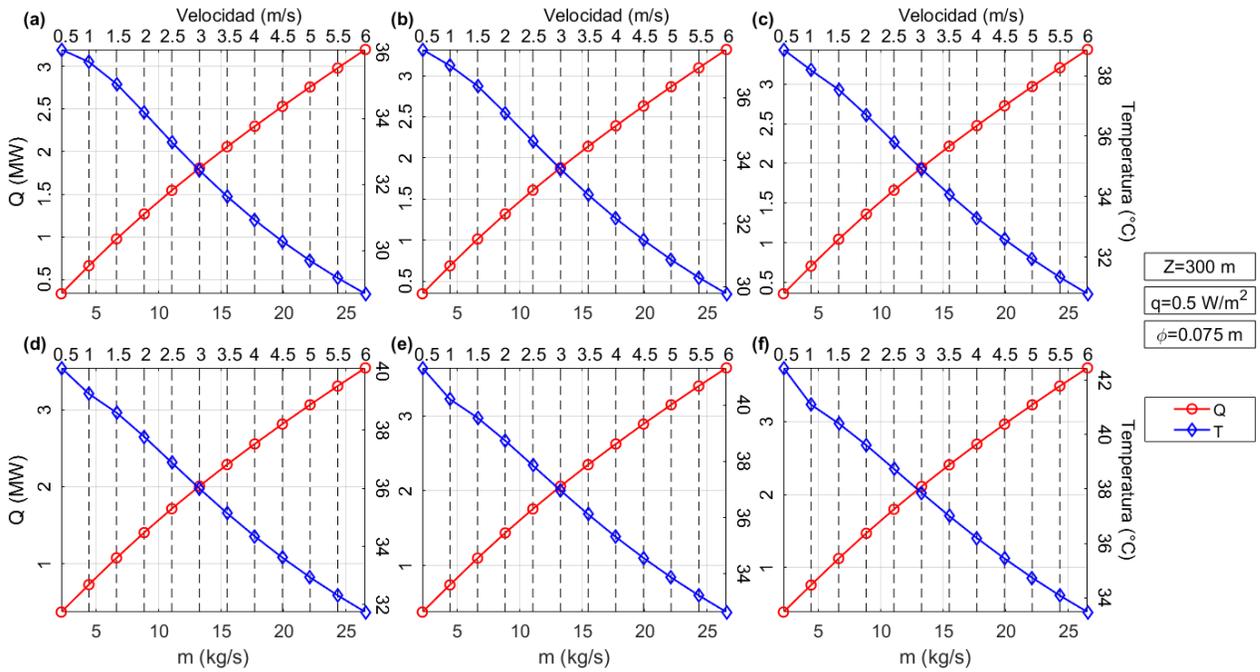


Figura 38. Comparación de la temperatura (T) y el calor (Q) a la salida del sistema geotérmico de ciclo cerrado considerando las doce velocidades. La profundidad (z), el flujo de calor (\dot{q}) y diámetro de la tubería (ϕ) son constantes y la longitud horizontal es de (a) 500 m, (b) 600 m, (c) 700 m, (d) 800 m, (e) 900 m y (f) 1000 m. Las líneas punteadas rojas y azules representan el inicio y el final de la tubería horizontal.

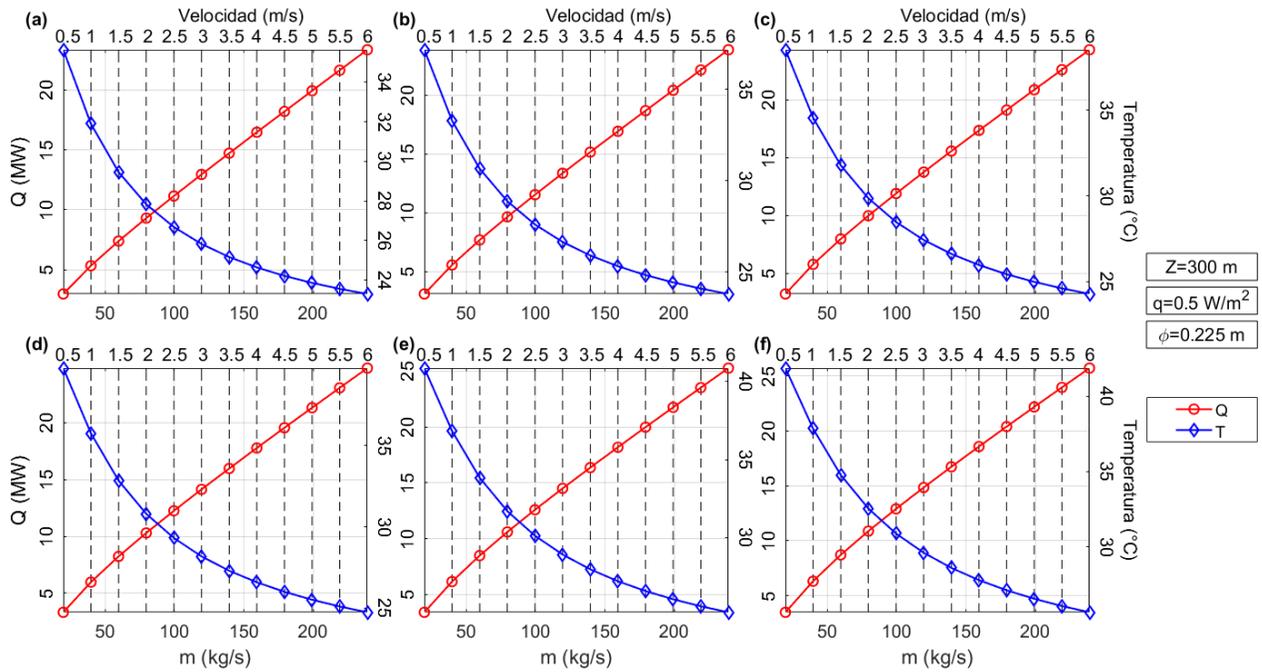


Figura 39 Comparación de la temperatura (T) y el calor (Q) a la salida del sistema geotérmico de ciclo cerrado considerando las doce velocidades. La profundidad (z), el flujo de calor (\dot{q}) y diámetro de la tubería (ϕ) son constantes y la longitud horizontal es de (a) 500 m, (b) 600 m, (c) 700 m, (d) 800 m, (e) 900 m y (f) 1000 m. Las líneas punteadas rojas y azules representan el inicio y el final de la tubería horizontal.

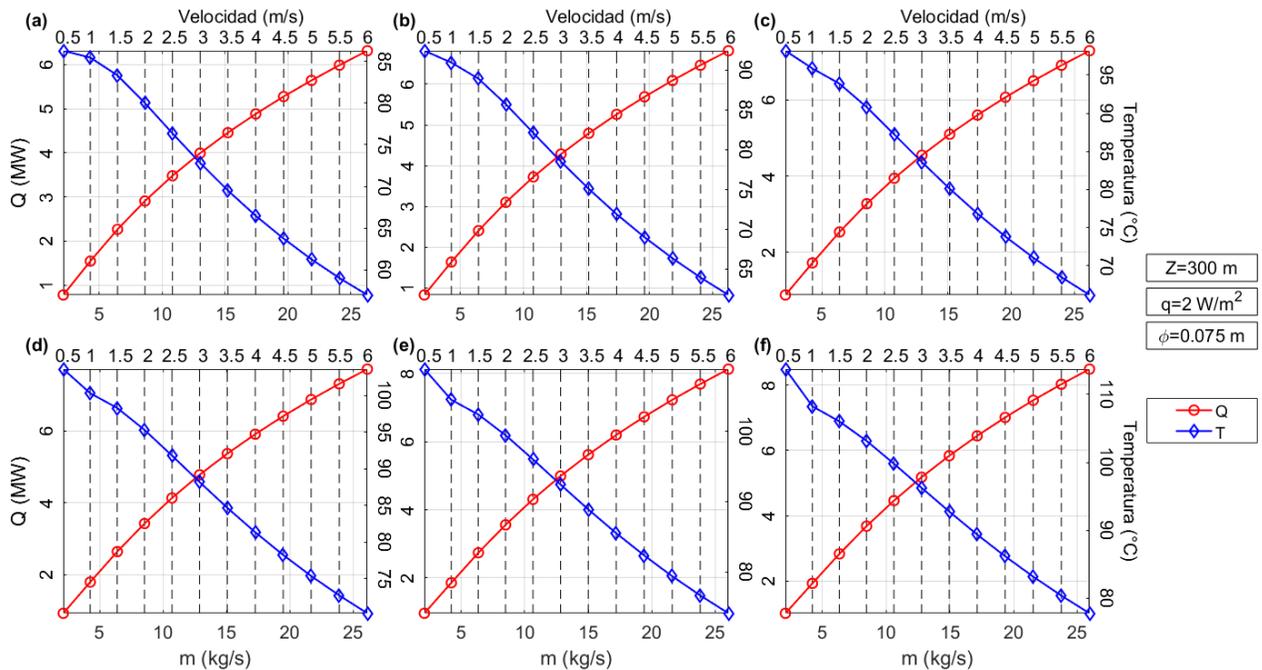


Figura 40 Comparación de la temperatura (T) y el calor (Q) a la salida del sistema geotérmico de ciclo cerrado considerando las doce velocidades. La profundidad (z), el flujo de calor (\dot{q}) y diámetro de la tubería (ϕ) son constantes y la longitud horizontal es de (a) 500 m, (b) 600 m, (c) 700 m, (d) 800 m, (e) 900 m y (f) 1000 m. Las líneas punteadas rojas y azules representan el inicio y el final de la tubería horizontal.

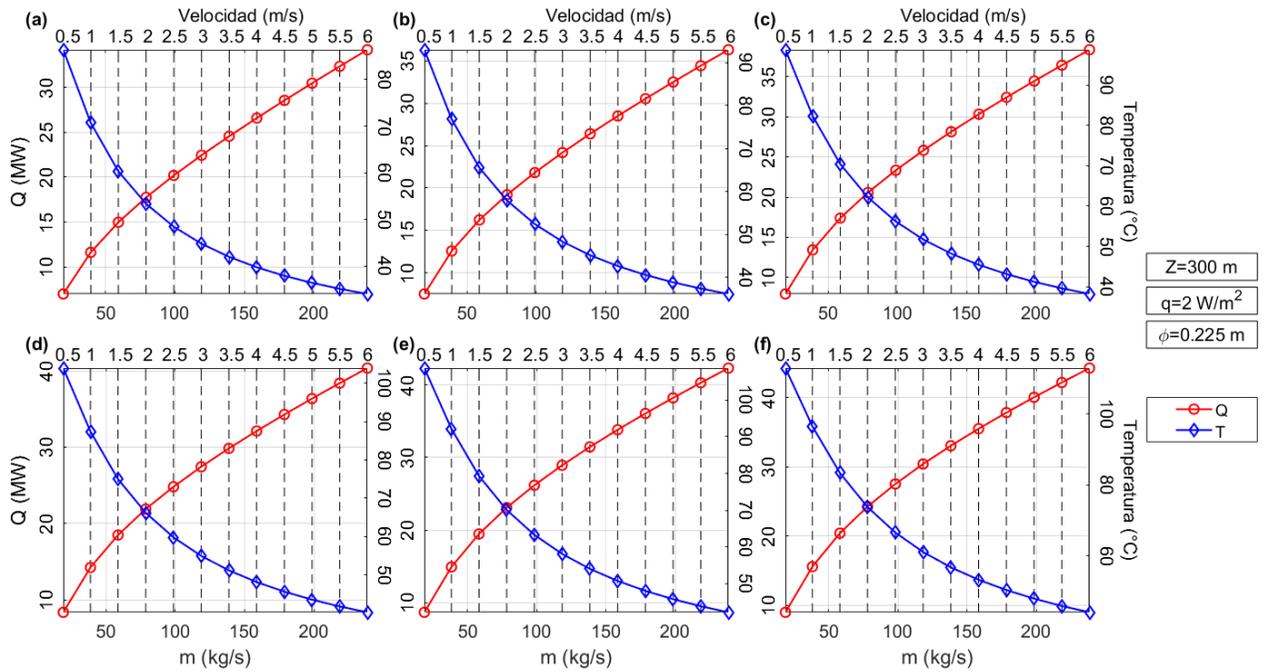


Figura 41 Comparación de la temperatura (T) y el calor (Q) a la salida del sistema geotérmico de ciclo cerrado considerando las doce velocidades. La profundidad (z), el flujo de calor (\dot{q}) y diámetro de la tubería (ϕ) son constantes y la longitud horizontal es de (a) 500 m, (b) 600 m, (c) 700 m, (d) 800 m, (e) 900 m y (f) 1000 m. Las líneas punteadas rojas y azules representan el inicio y el final de la tubería horizontal.

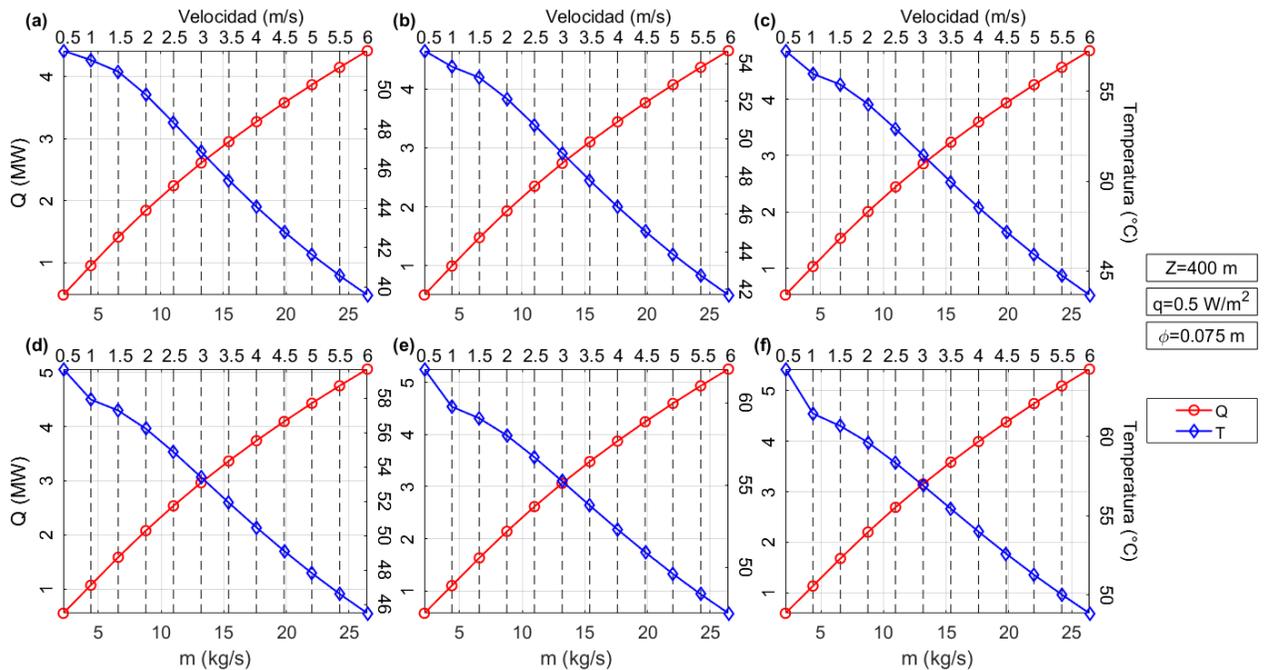


Figura 42 Comparación de la temperatura (T) y el calor (Q) a la salida del sistema geotérmico de ciclo cerrado considerando las doce velocidades. La profundidad (z), el flujo de calor (\dot{q}) y diámetro de la tubería (ϕ) son constantes y la longitud horizontal es de (a) 500 m, (b) 600 m, (c) 700 m, (d) 800 m, (e) 900 m y (f) 1000 m. Las líneas punteadas rojas y azules representan el inicio y el final de la tubería horizontal.

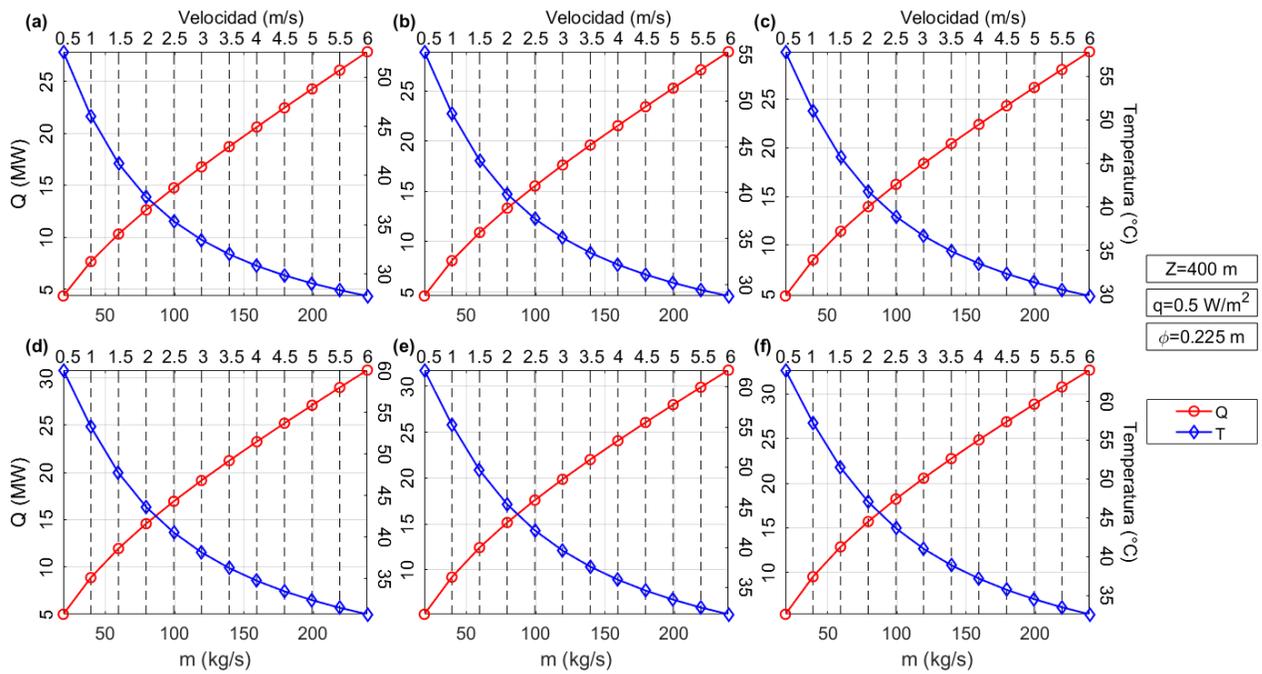


Figura 43 Comparación de la temperatura (T) y el calor (Q) a la salida del sistema geotérmico de ciclo cerrado considerando las doce velocidades. La profundidad (z), el flujo de calor (\dot{q}) y diámetro de la tubería (ϕ) son constantes y la longitud horizontal es de (a) 500 m, (b) 600 m, (c) 700 m, (d) 800 m, (e) 900 m y (f) 1000 m. Las líneas punteadas rojas y azules representan el inicio y el final de la tubería horizontal.

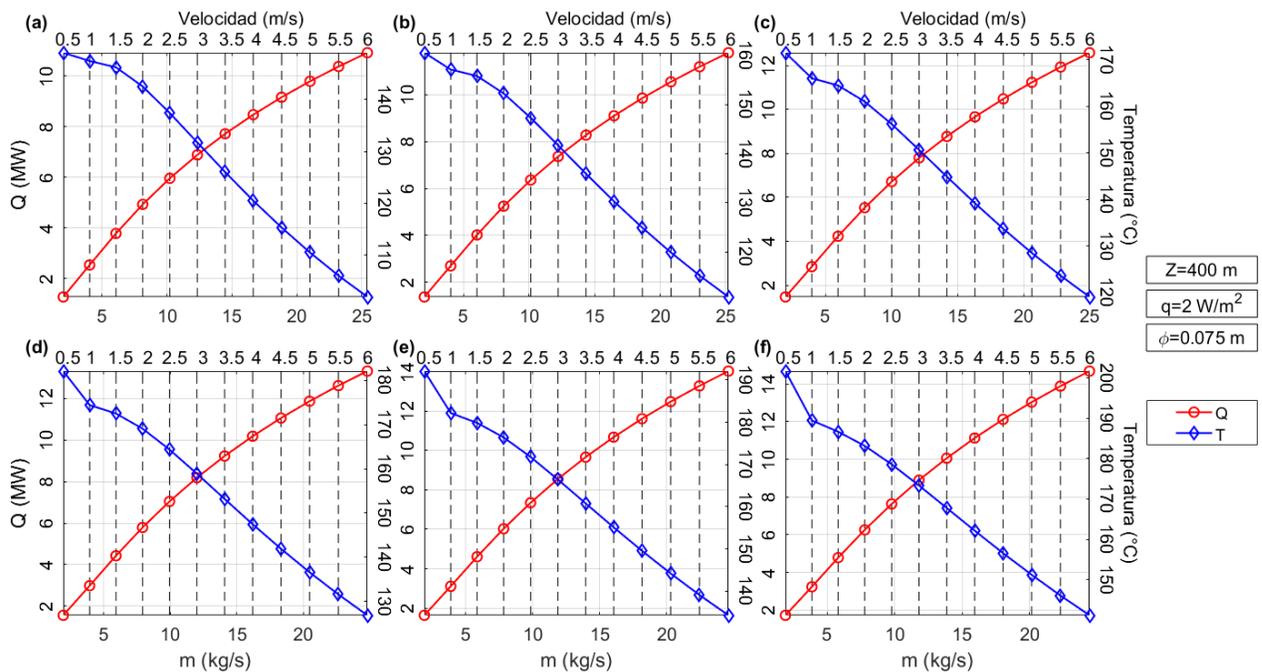


Figura 44 Comparación de la temperatura (T) y el calor (Q) a la salida del sistema geotérmico de ciclo cerrado considerando las doce velocidades. La profundidad (z), el flujo de calor (\dot{q}) y diámetro de la tubería (ϕ) son constantes y la longitud horizontal es de (a) 500 m, (b) 600 m, (c) 700 m, (d) 800 m, (e) 900 m y (f) 1000 m. Las líneas punteadas rojas y azules representan el inicio y el final de la tubería horizontal.

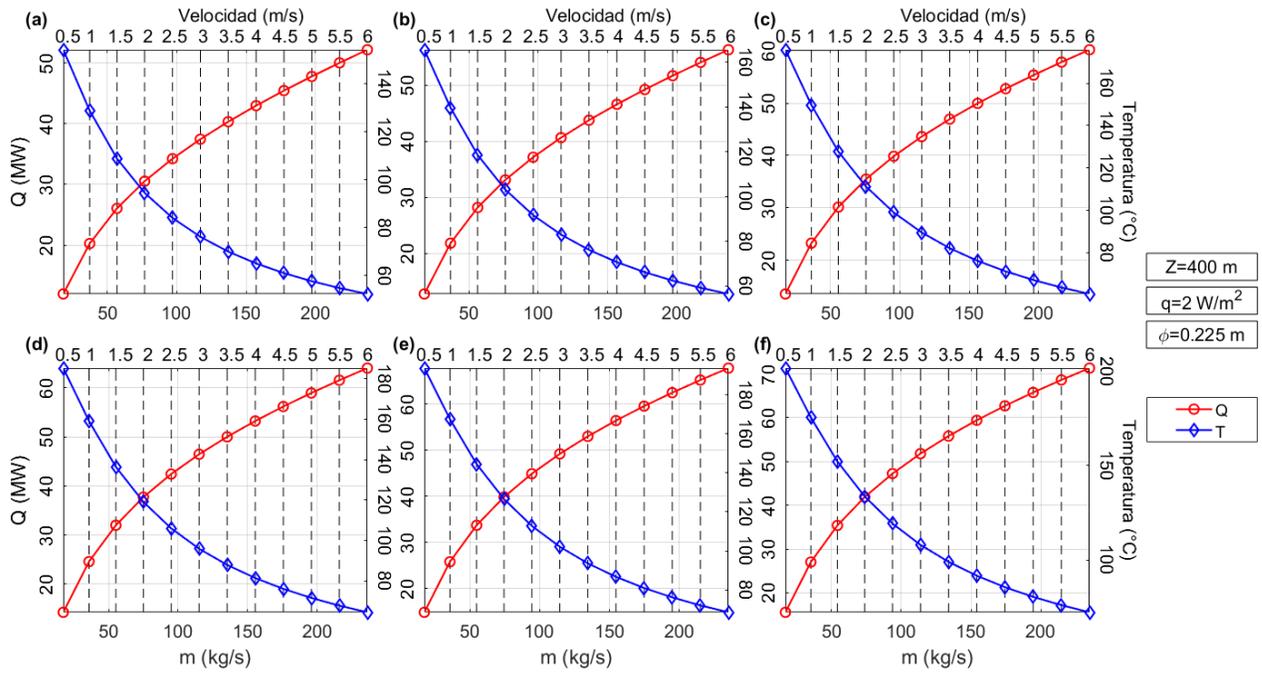


Figura 45 Comparación de la temperatura (T) y el calor (Q) a la salida del sistema geotérmico de ciclo cerrado considerando las doce velocidades. La profundidad (z), el flujo de calor (\dot{q}) y diámetro de la tubería (ϕ) son constantes y la longitud horizontal es de (a) 500 m, (b) 600 m, (c) 700 m, (d) 800 m, (e) 900 m y (f) 1000 m. Las líneas punteadas rojas y azules representan el inicio y el final de la tubería horizontal.

Anexo G

Las Figuras 46-53 Nos muestran las comparaciones de temperatura y calor de la tubería horizontal con todas las profundidades y velocidades, los demás parámetros de encuentran en los valores máximos y mínimos.

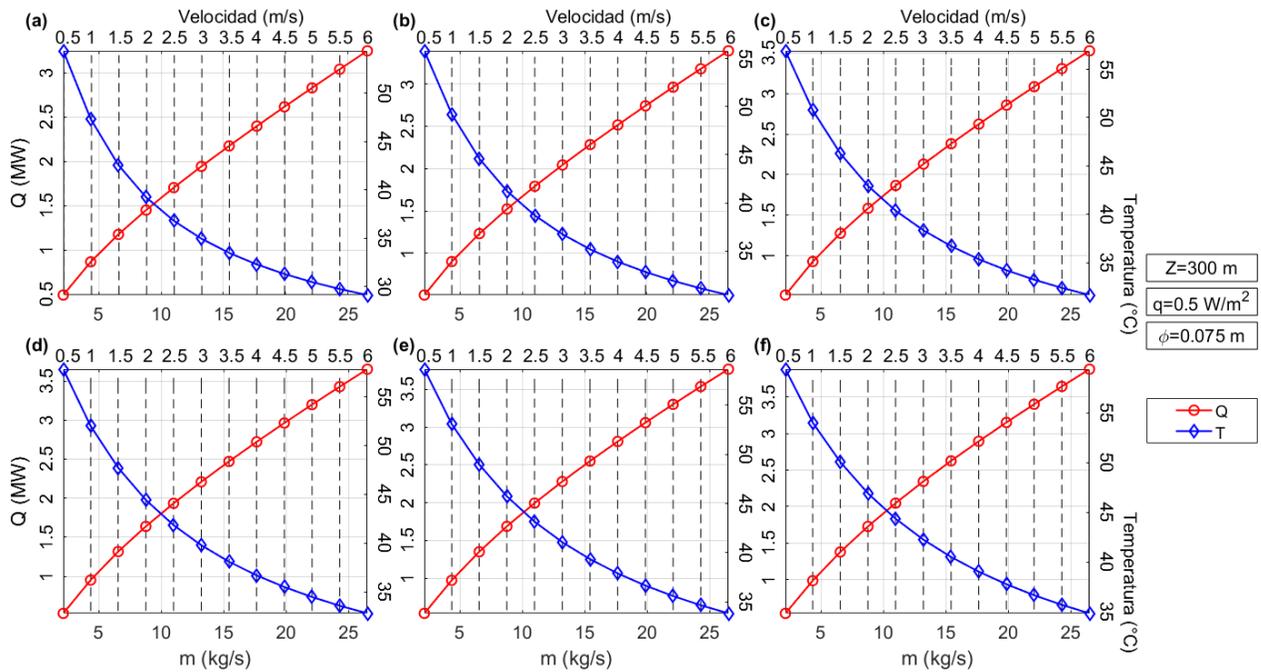


Figura 46 Comparación de la temperatura (T) y el calor (Q) al final de la tubería horizontal del sistema geotérmico de ciclo cerrado considerando las doce velocidades. La profundidad (z), el flujo de calor (\dot{q}) y diámetro de la tubería (ϕ) son constantes y la longitud horizontal es de (a) 500 m, (b) 600 m, (c) 700 m, (d) 800 m, (e) 900 m y (f) 1000 m. Las líneas punteadas rojas y azules representan el inicio y el final de la tubería horizontal.

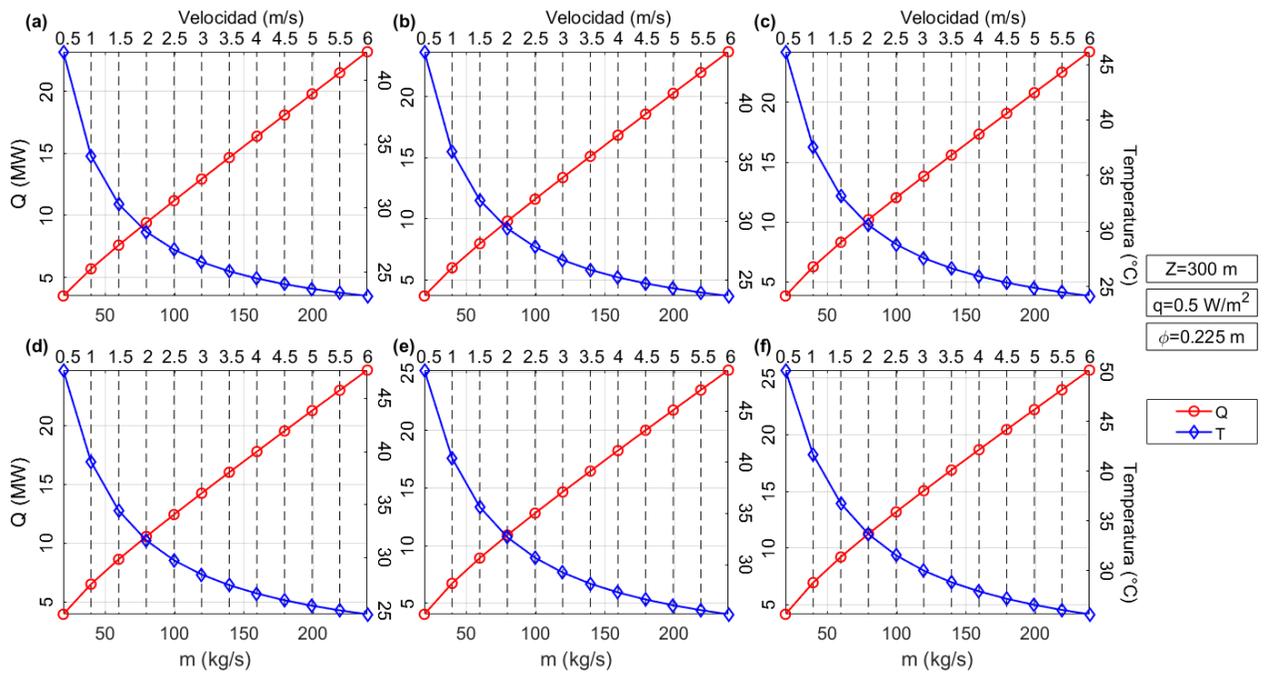


Figura 47 Comparación de la temperatura (T) y el calor (Q) al final de la tubería horizontal del sistema geotérmico de ciclo cerrado considerando las doce velocidades. La profundidad (z), el flujo de calor (\dot{q}) y diámetro de la tubería (ϕ) son constantes y la longitud horizontal es de (a) 500 m, (b) 600 m, (c) 700 m, (d) 800 m, (e) 900 m y (f) 1000 m. Las líneas punteadas rojas y azules representan el inicio y el final de la tubería horizontal.

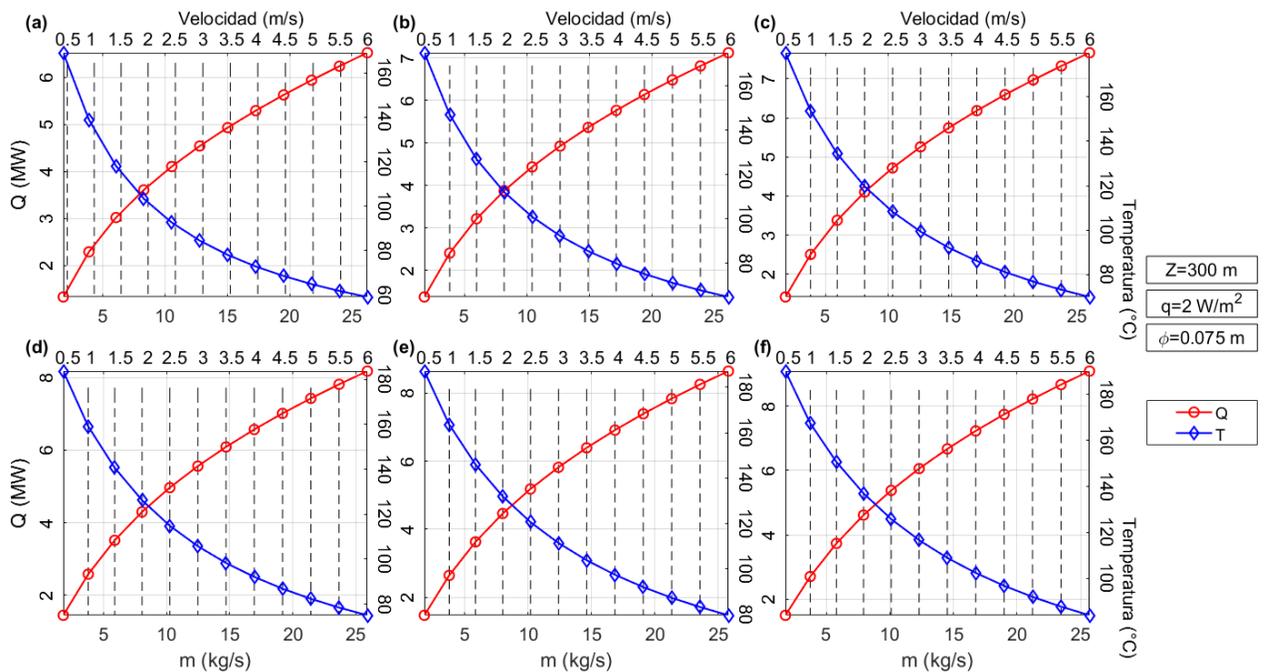


Figura 48 Comparación de la temperatura (T) y el calor (Q) al final de la tubería horizontal del sistema geotérmico de ciclo cerrado considerando las doce velocidades. La profundidad (z), el flujo de calor (\dot{q}) y diámetro de la tubería (ϕ) son constantes y la longitud horizontal es de (a) 500m, (b) 600m, (c) 700m, (d) 800m, (e) 900m y (f) 1000m. Las líneas punteadas rojas y azules representan el inicio y el final de la tubería horizontal.

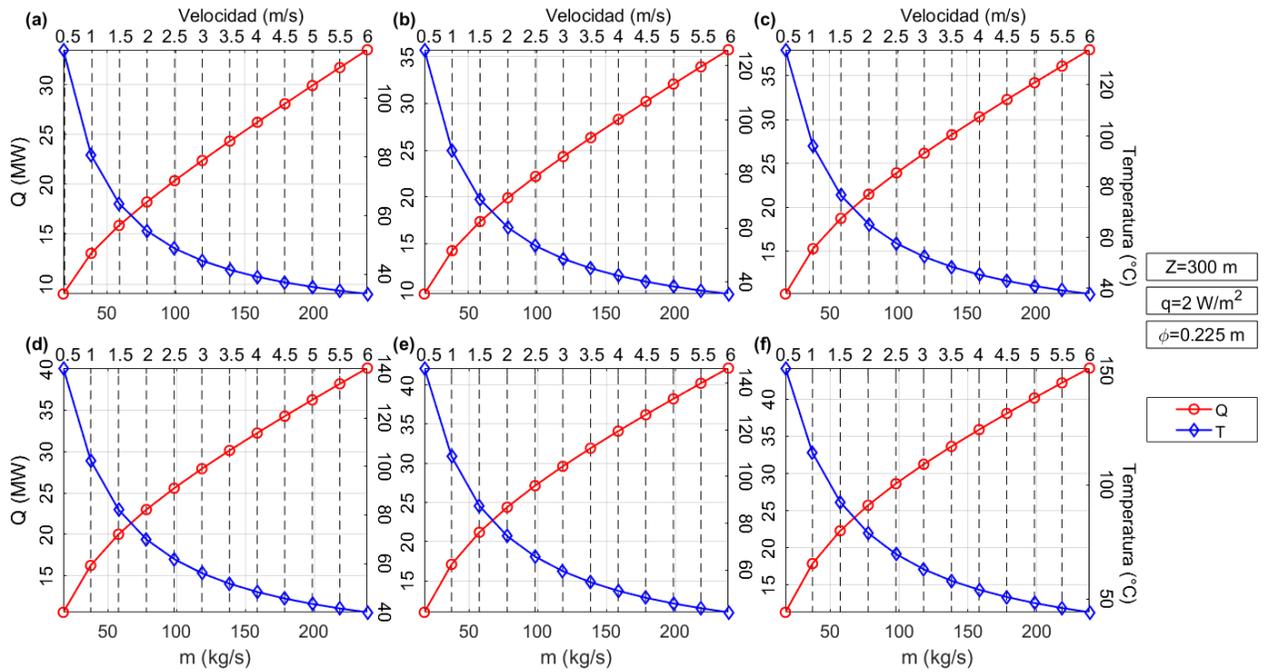


Figura 49 Comparación de la temperatura (T) y el calor (Q) al final de la tubería horizontal del sistema geotérmico de ciclo cerrado considerando las doce velocidades. La profundidad (z), el flujo de calor (\dot{q}) y diámetro de la tubería (ϕ) son constantes y la longitud horizontal es de (a) 500 m, (b) 600 m, (c) 700 m, (d) 800 m, (e) 900 m y (f) 1000 m. Las líneas punteadas rojas y azules representan el inicio y el final de la tubería horizontal.

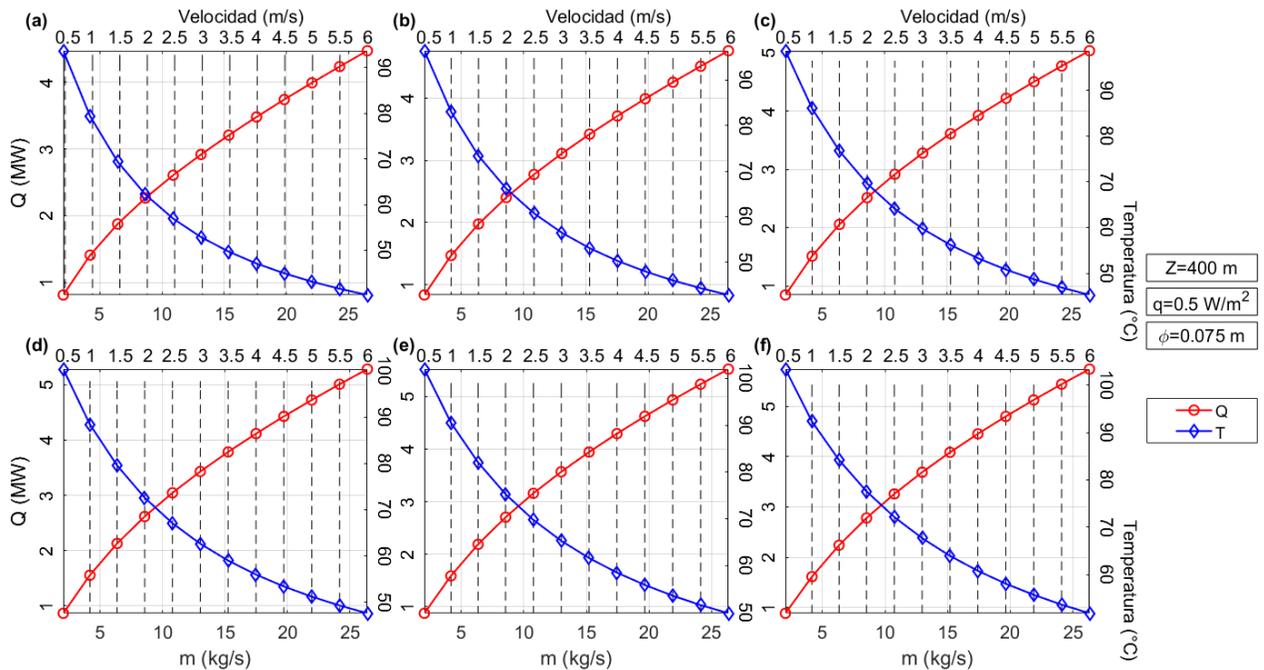


Figura 50 Comparación de la temperatura (T) y el calor (Q) al final de la tubería horizontal del sistema geotérmico de ciclo cerrado considerando las doce velocidades. La profundidad (z), el flujo de calor (\dot{q}) y diámetro de la tubería (ϕ) son constantes y la longitud horizontal es de (a) 500 m, (b) 600 m, (c) 700 m, (d) 800 m, (e) 900 m y (f) 1000 m. Las líneas punteadas rojas y azules representan el inicio y el final de la tubería horizontal.

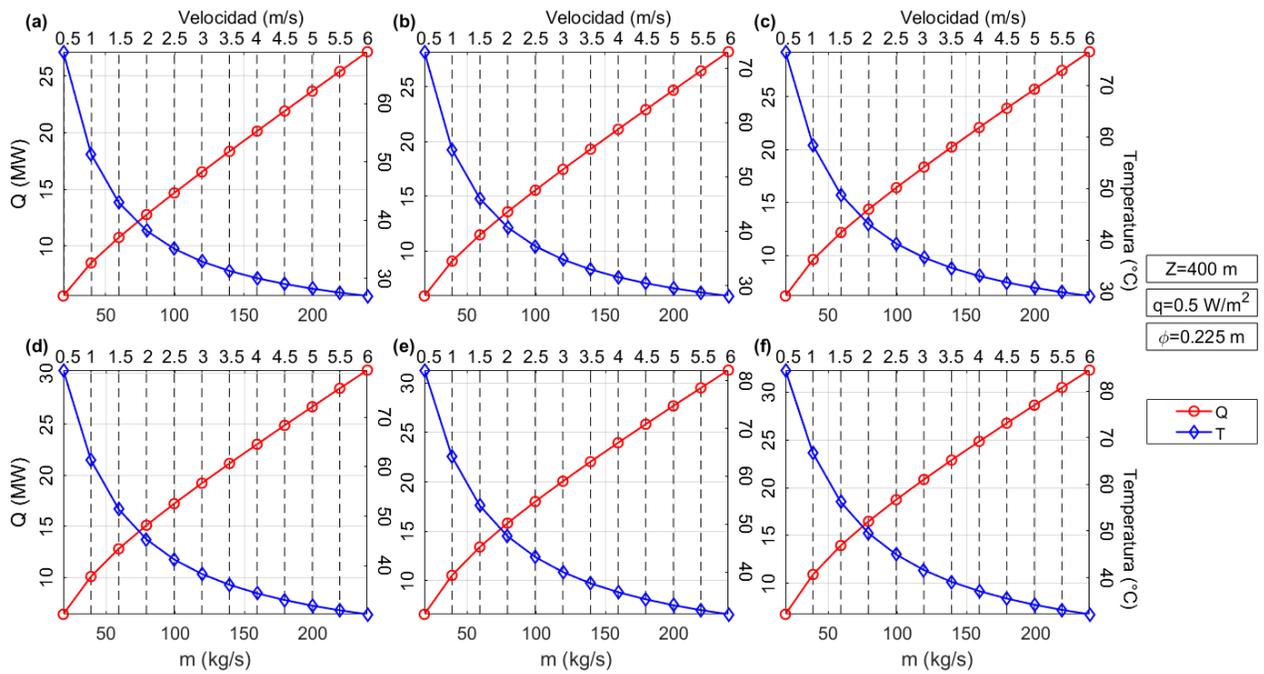


Figura 51 Comparación de la temperatura (T) y el calor (Q) al final de la tubería horizontal del sistema geotérmico de ciclo cerrado considerando las doce velocidades. La profundidad (z), el flujo de calor (\dot{q}) y diámetro de la tubería (ϕ) son constantes y la longitud horizontal es de (a) 500 m, (b) 600 m, (c) 700 m, (d) 800 m, (e) 900 m y (f) 1000 m. Las líneas punteadas rojas y azules representan el inicio y el final de la tubería horizontal.

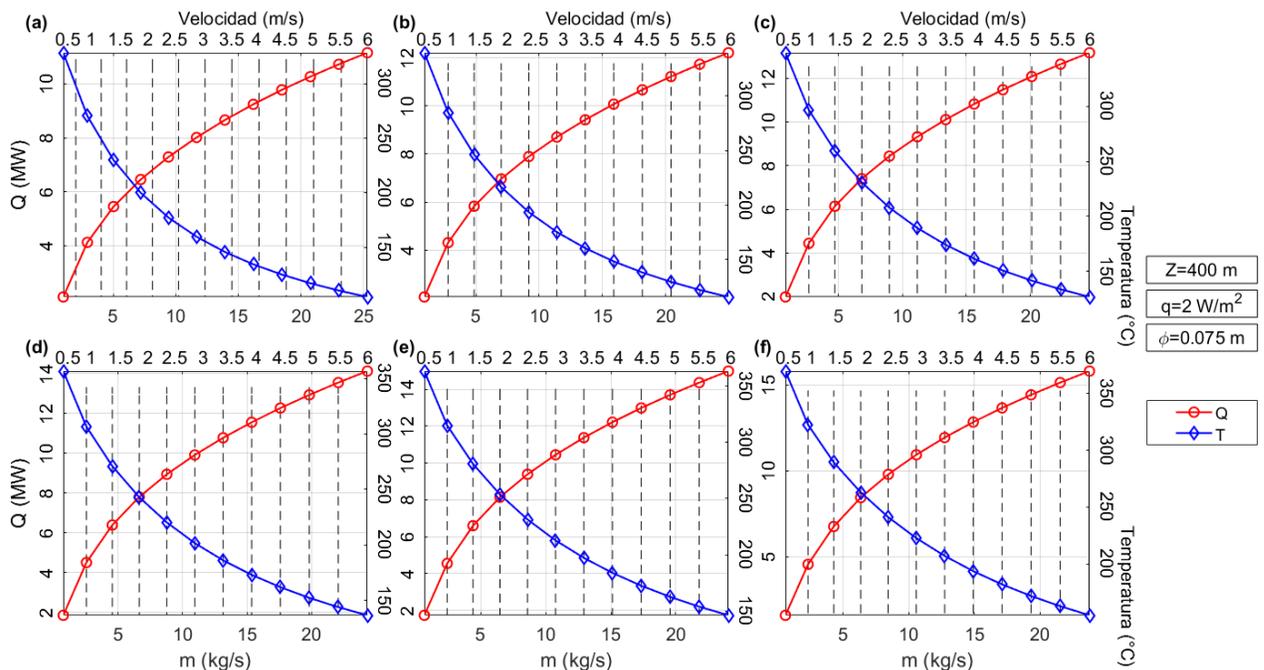


Figura 52 Comparación de la temperatura (T) y el calor (Q) al final de la tubería horizontal del sistema geotérmico de ciclo cerrado considerando las doce velocidades. La profundidad (z), el flujo de calor (\dot{q}) y diámetro de la tubería (ϕ) son constantes y la longitud horizontal es de (a) 500 m, (b) 600 m, (c) 700 m, (d) 800 m, (e) 900 m y (f) 1000 m. Las líneas punteadas rojas y azules representan el inicio y el final de la tubería horizontal.

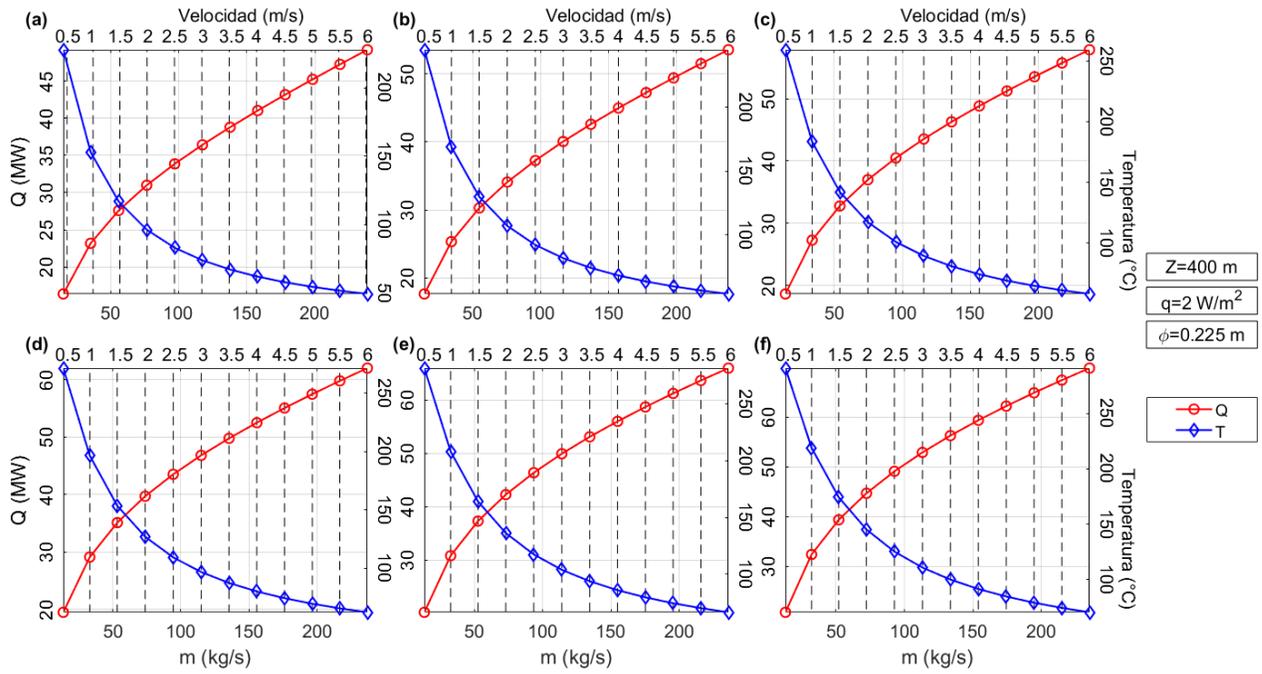


Figura 53 Comparación de la temperatura (T) y el calor (Q) al final de la tubería horizontal del sistema geotérmico de ciclo cerrado considerando las doce velocidades. La profundidad (z), el flujo de calor (\dot{q}) y diámetro de la tubería (ϕ) son constantes y la longitud horizontal es de (a) 500 m, (b) 600 m, (c) 700 m, (d) 800 m, (e) 900 m y (f) 1000 m. Las líneas punteadas rojas y azules representan el inicio y el final de la tubería horizontal.