

Análisis numérico de un intercambiador de calor en U para aprovechamiento de yacimientos geotérmicos de media y baja entalpía

Jorge Alberto Rangel Arista, J. Jesús Pacheco Ibarra, Carlos Rubio Maya, Óskar Javier González Pedraza, Daniel Alcántar Martínez y Hugo Cuauhtémoc Gutiérrez Sánchez

Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Avenida Francisco J. Múgica S/N, Ciudad Universitaria, C.P. 58030, Morelia, Michoacán, México. Correos: araj_02@hotmail.com, jjpi15.pacheco@gmail.com, rmaya@umich.mx, onibblueoskar@gmail.com, danielcan_mtz@hotmail.com, hcgshan@umich.mx.

RESUMEN

El intercambiador de calor en U para la extracción de energía geotérmica contenida en un sistema geotérmico de media o baja entalpía a profundidades someras, es una tecnología relativamente nueva. Surge como alternativa cuando el pozo no fluye de manera natural o cuando la inducción del pozo no se mantiene o bien el flujo es muy débil y, por lo tanto, la energía no puede aprovecharse. El intercambiador en U es un sistema que también puede implementarse en sistemas geotérmicos de roca seca caliente. En este trabajo se realiza el análisis numérico de un intercambiador de calor en U para estimar la longitud mínima con la que se pueda obtener la extracción de calor máxima y que satisfaga las condiciones requeridas de temperatura mínima. En este caso particular, la temperatura mínima del fluido debe ser de 125°C que es la requerida para la operación de un ciclo binario de potencia que generará energía eléctrica. Los resultados de la simulación estimaron una temperatura de 93.4°C para un intercambiador de 100 m de longitud, 104.9°C para una longitud de 200 m y de 118°C para una longitud de 500 m. Estos pobres resultados se atribuyen a un bajo coeficiente de convección natural de lado del fluido geotérmico. Continuar la simulación para estimar resultados con una longitud mayor ya no resultaba de interés desde el punto de vista técnico-económico, pues el sistema resultante sería demasiado costoso y, técnicamente, difícil de colocar en un pozo geotérmico.

Palabras Clave: Plantas geotérmicas, intercambiador de calor en U, análisis numérico, media entalpía, baja entalpía.

Numerical analysis of a U-shape heat exchanger to exploit geothermal reservoirs of medium- and low-enthalpy

ABSTRACT

The U-shape heat exchanger to extract geothermal energy contained in medium or low enthalpy geothermal systems at shallow depths is a relatively new technology. The U-shape heat exchanger is an alternative when a well does not flow naturally or the well induction produces an interrupted or scarce flow and so the energy cannot be exploited; it is also a system that could be implemented in hot dry rock geothermal systems. In this paper a numerical analysis is reported over a U-shape heat exchanger to estimate the minimum length for obtaining the maximum heat extraction and reaching the minimum required temperature. In this case, the minimum temperature must be 125°C that is requirement to operate a binary cycle power plant. The modeling simulation results estimated a temperature of 93.42°C for a heat exchanger 100 m long, 104.87°C for 200 m long, and only 117.21°C for a length of 500 m. These poor results are attributed to the low natural convection coefficient in the side of the geothermal fluid. Therefore, there was no point keep simulating a greater length up to get the minimum temperature since the resulting system would be too costly and technically difficult to place in a geothermal well.

Keywords: Geothermal plants, U-shape heat exchanger, numerical analysis, medium enthalpy, low enthalpy.

I. INTRODUCCIÓN

La energía geotérmica representa una de las energías renovables más atractivas, debido a que es una fuente constante de energía y los residuos creados por su utilización son casi despreciables. El uso de la energía geotérmica viene regido principalmente por el tipo de yacimiento, esto es, si es de alta, media o baja entalpía. La Tabla 1 muestra la clasificación de los yacimientos geotérmicos con base en su temperatura, de acuerdo a varios autores (Muffler and Cataldi, 1978; Hochstein, 1990; Nicholson, 1993).

Tabla 1. Clasificación de los recursos geotérmicos en base a su temperatura.

| Autor / Clasificación | Baja entalpía (T en °C) | Entalpía media (T en °C) | Alta entalpía (T en °C) |
|-------------------------------------|-------------------------|--------------------------|-------------------------|
| Muffler & Cataldi (1978) | < 90 | 90 – 150 | > 150 |
| Hochstein (1990) | < 125 | 125 a 225 | -- |
| Nicholson (1993) | ≤ 150 | -- | > 150 |
| Goldstein et al. (2011) | < 100 | 100 – 180 | > 180 |

Los recursos geotérmicos de alta entalpía se utilizan principalmente para la generación de energía eléctrica, dejando de lado tanto los recursos de media como de baja entalpía, apesar de ser los recursos más abundantes en el planeta (García-Gutiérrez et al., 2009). Actualmente se cuenta con la tecnología para explotar yacimientos de baja y media entalpía, tanto para la producción de energía eléctrica como para el acondicionamiento climático de espacios, entre otras actividades.

Para el aprovechamiento de la energía geotérmica, generalmente es necesario inducir el pozo mediante la inyección de aire a presión, para provocar que el fluido contenido en el pozo fluya y lleve consigo la energía térmica contenida del reservorio geotérmico. Existen casos donde la inducción del pozo no resulta, debido a taponamientos u obstrucciones que puede presentar el propio pozo, así como por problemas de baja permeabilidad en el reservorio, lo que hace que el fluido no circule de manera continua. Como una alternativa para su aprovechamiento, se han implementado, entre otros dispositivos, los intercambiadores de calor cuyo objetivo es transportar la energía térmica contenida en el reservorio hasta la superficie, para su aprovechamiento.

Dentro de las configuraciones más convencionales, se encuentra el intercambiador de calor en U o BHE (Borehole Heat Exchanger, por sus siglas en inglés). El BHE está compuesto de dos tuberías circulares, las cuales se encuentran unidas en uno de los extremos mediante un retorno de 180°. El fluido de trabajo entra por cualquiera de las dos tuberías y la salida se encuentra en la tubería restante, como se ilustra en la Figura 1 (todas las figuras al final del texto).

A pesar de que el uso de intercambiador de calor en U para el aprovechamiento de recursos geotérmicos es una tecnología relativamente nueva, ya existen estudios relacionados con la simulación numérica. Uno de ellos (Al-Khoury, 2009) llevó a cabo la modelación numérica de un intercambiador de calor en U en conjunto con la roca circundante que rodea a dicho intercambiador, concluyendo que la transferencia de calor se comporta de diferente manera dependiendo de la región analizada.

Más recientemente, Ozudogru et al. (2014) realizaron un análisis numérico tanto de un intercambiador de calor en U como en doble U, aplicando en la pared del pozo un flujo de calor intermitente como condición de frontera. Concluyeron que la metodología que siguió para el análisis predice en buena medida el comportamiento de este tipo de intercambiadores para las condiciones consideradas.

Rees y He (2013) analizaron numéricamente el comportamiento de un intercambiador de calor en U empleando una condición de frontera de temperatura constante en la pared del pozo. En este sentido, determinaron cómo se comporta la transferencia de calor para escalas de tiempo pequeñas y prolongadas.

Lenhard y Malcho (2013) llevaron a cabo la simulación numérica de un intercambiador de calor de doble U. Para ello emplearon como condición de frontera en la pared del pozo una distribución real de temperatura, la cual fue obtenida de una porción de tierra de baja capacidad energética, para determinar cómo se lleva a cabo el fenómeno de transferencia de calor tanto en el intercambiador de calor como en el terreno circundante.

En esos trabajos, si bien se han llevado a cabo análisis numéricos para los intercambiadores de calor en U, estos no han estado enfocados en la explotación de un yacimiento geotérmico real de media o baja entalpía, para utilizar el calor con un propósito específico. Por lo tanto, en el presente trabajo se realizó una simulación numérica de un intercambiador de calor en U para el aprovechamiento de un yacimiento geotérmico de media entalpía, con objeto de estimar la longitud mínima que logre la máxima extracción de calor y satisfaga las condiciones mínimas requeridas de temperatura, que para nuestro caso es mayor o igual a 125°C, temperatura mínima requerida para operar una planta geotermoeléctrica específica de ciclo binario.

II. CASO DE ESTUDIO

El presente caso de estudio se centró en la explotación del pozo geotérmico GSE-S01, que se ubica en la población de San Nicolás Simirao, Municipio de Zinapécuaro, Michoacán, México. Mecánicamente, el pozo se encuentra en condiciones estables. Tiene un diámetro final de 13 3/8" (0.3397 m) y originalmente contaba con una profundidad aproximada de 1200 m, pero actualmente existe una obstrucción a los 550 m de profundidad. En la Figura 2 se muestra la lectura de temperatura de la pared del pozo geotérmico, en la cual se observa que en los primeros 100 m de profundidad la temperatura va desde los 60°C hasta los 140°C, para después mantenerse casi constante a una temperatura de 142°C hasta alcanzar los 550 m de profundidad libre actual (CFE, 2011). Dadas las condiciones del pozo, se planteó diseñar y utilizar un intercambiador de calor en U para tratar de aprovechar la energía geotérmica del pozo GSE-S01.

Así, se diseñó un intercambiador de calor en U fabricado en acero al carbón, de manera que pueda resistir el contacto continuo con el agua geotérmica, aunque esta parte no se analizará en el presente trabajo, pues solo presentamos el comportamiento termohidráulico del intercambiador. El modelo conceptual del intercambiador acoplado al pozo es justamente el que se presentó en la Figura 1. Por su parte, la Figura 3 muestra las dimensiones diametrales utilizadas para el análisis numérico, tanto del pozo geotérmico como del intercambiador de calor en U.

III. MODELO MATEMÁTICO

El fluido que circularía en el intercambiador de calor en U lo hará en turbulencia, debido a que el fluido de trabajo estaría presurizado. La turbulencia mejora el efecto convectivo de transferencia de calor. En consecuencia, la convección forzada será el mecanismo que transporte el calor en el intercambiador. Por otro lado, en el acuífero geotérmico el principal mecanismo de transferencia de calor es la convección natural, debido a que no existe ningún estímulo externo para que el transporte de energía ocurra de distinta manera.

Con base en lo anterior, se realizaron las siguientes suposiciones para el modelado numérico:

- Tanto para el intercambiador de calor como para el acuífero el fluido de trabajo es agua en fase líquida.
- Se considera que las propiedades termo-físicas del agua son constantes.
- El pozo geotérmico es impermeable.
- El pozo se encuentra sellado en la parte superior.
- El pozo se encuentra sellado a 550 m de profundidad.
- La radiación térmica desprendida por la pared del pozo geotérmico es despreciable.
- El pozo están en condiciones estables.
- El perfil de temperatura de la pared del pozo geotérmico está dada por la ecuación (1). Este perfil de temperatura fue derivado del registro de temperatura que se presentó en la Figura 2.

$$T_{pg}(z) = (1.737 \times 10^{-15})z^7 + (-3.572 \times 10^{-12})z^6 + (2.977 \times 10^{-9})z^5 + (-1.291 \times 10^{-6})z^4 + (0.0003112)z^3 + (-0.04151)z^2 + (2.868)z + 62.63 \quad (1)$$

Ecuaciones gobernantes

Las ecuaciones que describen el fenómeno son la ecuación de conservación de energía, la de conservación de masa y las ecuaciones de flujo turbulento de Navier-Stokes. Estas ecuaciones se pueden representar por la siguiente expresión general:

$$\nabla \cdot (\Gamma_\phi \nabla \phi) - \nabla \cdot (\rho \mathbf{V} \phi) + S_\phi = \frac{\partial \rho \phi}{\partial t} \quad (2)$$

- La ecuación de la conservación de la masa (continuidad) para un fluido con densidad constante, se representa como

$$\nabla \cdot \mathbf{v} = 0 \quad (3)$$

- La ecuación de la conservación de la energía con presión constante y densidad independiente de la temperatura, se expresa como

$$\nabla \cdot \left(\frac{k_t}{C_p} \nabla T \right) - \nabla \cdot (\rho \mathbf{v} T) = \rho \frac{\partial T}{\partial t} \quad (4)$$

- Las ecuaciones de conservación de momento, para cada eje coordenado, se expresan como:
 - Conservación de momento en la dirección x:

$$\nabla \cdot (\mu_{eff} \nabla v_x) - \nabla \cdot (\rho \mathbf{v} v_x) - \frac{\partial P}{\partial x} = \frac{\partial \rho v_x}{\partial t} \quad (5)$$

- Conservación de momento en la dirección y:

$$\nabla \cdot (\mu_{eff} \nabla v_y) - \nabla \cdot (\rho \mathbf{v} v_y) - \frac{\partial P}{\partial y} = \frac{\partial \rho v_y}{\partial t} \quad (6)$$

- Conservación de momento en la dirección z:

$$\nabla \cdot (\mu_{eff} \nabla v_z) - \nabla \cdot (\rho \mathbf{v} v_z) - \frac{\partial P}{\partial z} + \rho g (T - T_0) = \frac{\partial \rho v_z}{\partial t} \quad (7)$$

El término $\rho g (T - T_0)$ de la Ecuación (7) representa las fuerzas boyantes en términos de la aproximación de Boussinesq (Bird et al., 2002).

- Ecuaciones para el modelo de turbulencia

Para el presente trabajo se empleó el modelo de turbulencia K-ε estándar, que es el modelo de turbulencia por excelencia y el más simple. Este modelo consta de dos ecuaciones, que relacionan

entre sí a la energía cinética turbulenta y a la conservación de la tasa de disipación de la energía cinética turbulenta. La ecuación de la conservación de la energía cinética turbulenta, k , se expresa como:

$$\frac{\partial (\rho k)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v} k) = \nabla \cdot \left[\frac{\mu_{\text{eff}}}{\sigma_k} \nabla k \right] + G - \rho \varepsilon \quad (8)$$

Mientras que la ecuación de la conservación de la tasa de disipación de la energía cinética turbulenta, ε , se define como:

$$\frac{\partial (\rho \varepsilon)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v} \varepsilon) = \nabla \cdot \left[\frac{\mu_{\text{eff}}}{\sigma_\varepsilon} \nabla \varepsilon \right] + \frac{G}{k} (C_1 G - C_2 \rho \varepsilon) \quad (9)$$

El término fuente, G , para la energía cinética turbulenta está dada por:

$$G = \mu_{\text{eff}} \rho \left[\left(\frac{\partial v_x}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v_y}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v_z}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v_y}{\partial x} + \frac{\partial v_x}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial v_z}{\partial y} + \frac{\partial v_y}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial v_x}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial x} \right)^2 \right] \quad (10)$$

La viscosidad efectiva, μ_{eff} , se define como:

$$\mu_{\text{eff}} = \mu + \mu_t \quad (11)$$

La viscosidad turbulenta, μ_t , se calcula mediante la combinación de k y ε , como se muestra a continuación:

$$\mu_t = \frac{\rho C_\mu k^2}{\varepsilon} \quad (12)$$

$C_1, C_2, \sigma_k, \sigma_\varepsilon$ y C_μ son constantes obtenidas mediante experimentación, cuyos valores son (Launder and Spalding, 1974):

$$C_1 = 1.44, C_2 = 1.92, C_\mu = 0.09, \sigma_k = 1.0, \sigma_\varepsilon = 1.3$$

Condiciones de Frontera

Las condiciones de frontera se desprenden de las figuras 1 y 2, donde se consideran como paredes: el sello en la parte superior del pozo, la obstrucción a los 550 m, el área longitudinal interna y externa del intercambiador de calor en U y la pared del pozo geotérmico. La condición de entrada se define en una de las áreas transversales de las tuberías del intercambiador que se encuentran en la superficie, mientras la tubería restante se define como salida. Con respecto a la temperatura de entrada del fluido al intercambiador de calor en U y su flujo másico, se utilizaron 100°C y un flujo másico de 19.9 kg/s, respectivamente, que son parámetros predeterminados por la planta de ciclo binario que se pretender instalar.

Pared superior e inferior

Estas se consideran como pared en las condiciones de frontera, y por lo tanto se establece una condición de no deslizamiento, lo que hace que la velocidad en la pared sea cero. Además, ambas paredes se consideran adiabáticas y sin ningún tipo de interacción con el ambiente, con el fluido del acuífero o el intercambiador de calor.

$$v_x = v_y = v_z = 0 \quad \text{condición de no deslizamiento} \quad (13)$$

Pared interna y externa del intercambiador de calor en U

Se consideran como paredes en las condiciones de frontera. No existen velocidades en la cercanía de la pared debido a la condición de no deslizamiento.

$$v_x = v_y = v_z = 0 \quad \text{condición de no deslizamiento} \quad (14)$$

Por otro lado, la pared externa interactúa con el fluido del acuífero, cuyo principal mecanismo de transferencia de calor es la convección natural. Mientras tanto, la pared interna interactúa con el fluido que corre por el interior del intercambiador de calor en U, donde el mecanismo predominante de transporte de energía es la convección forzada. Debido a que se presentan dos mecanismos de transferencia de calor (convección natural y forzada), para el análisis numérico las paredes del intercambiador se acoplan en sus fronteras. El acoplamiento entre las paredes se realiza mediante la ecuación de la conducción de calor, para que de esta manera exista conexión en la transferencia de calor que recorre desde la pared del pozo geotérmico hasta el fluido que corre por el interior del intercambiador de calor. La forma general de la ecuación de conducción de calor se expresa como:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (k_t \nabla T) + q_{\text{gen}} \quad (15)$$

Pared del pozo geotérmico

Se define como pared en las condiciones de frontera, por lo tanto, no existen velocidades en su cercanía (condición de no deslizamiento):

$$v_x = v_y = v_z = 0 \quad \text{condición de no deslizamiento} \quad (16)$$

Además, en esta pared se implementó un perfil de temperatura como condición de frontera, mediante el uso de una función definida por el usuario o UDF (User Define Function, por sus siglas en inglés). El perfil de temperatura implementado es el que se muestra en la ecuación 1.

Para el presente análisis numérico, las propiedades del fluido empleado (agua) se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2. Propiedades del agua empleada.

| C_p (kJ/kg-K) | Conductividad Térmica (W/m-°K) | Densidad (kg/m ³) | Viscosidad Dinámica (Pa-s) |
|-----------------|--------------------------------|-------------------------------|----------------------------|
| 4.256 | 0.688 | 937.21 | 0.000217 |

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se empleó el modelo de turbulencia k-ε estándar, debido a la geometría así como a las ventajas computacionales que presenta. Respecto a la geometría sobre la que se desarrolla el fenómeno, no existen curvas o líneas complejas por el cual el fluido circule, presentando solamente un retorno en los extremos de la tubería. Este método ha probado ser el mejor para este tipo de fenómenos (Bardina et

a., 1997; Lenhard and Malcho, 2013). Por otro lado, el poder computacional que se emplea para los cálculos, así como el tiempo, es pequeño en comparación con los demás modelos de turbulencia (Bardina et al., 1997).

Mediante la utilización de un paquete computacional se realizó la geometría, la malla, así como la resolución del conjunto de ecuaciones que rigen el fenómeno. Las dimensiones diametrales del intercambiador de calor en U y del pozo geotérmico empleadas para la simulación son las que se presentan en la Figura 3. Las longitudes empleadas del intercambiador de calor en U para los análisis, fueron de 100, 200, 300, 400 y 500 m, respectivamente. De esta manera, se obtuvieron tanto el perfil de velocidades como el de temperaturas del fluido que corre por el interior del intercambiador de calor en U.

En la Figura 4 se muestra el perfil de velocidades del fluido dentro del intercambiador. La velocidad se anula en sus paredes interiores, para llegar a un máximo de 5.88 m/s en la parte media del diámetro del tubo.

En las Figuras 5 a 9 la curva azul representa la temperatura del fluido que va descendiendo hasta alcanzar la profundidad mostrada, mientras que el color rojo simboliza la temperatura del fluido que va ascendiendo desde el punto más profundo hasta la superficie.

En la Figura 5 se presenta el perfil de temperaturas del intercambiador con una longitud de 100 m, donde el fluido que desciende sufre un aumento en su temperatura de manera casi lineal debido a la ganancia de calor. El fluido desciende hasta su profundidad total de 100 m y después empieza a ascender llegando a una temperatura máxima de 104.87°C a los 61 m de profundidad, la cual es la máxima temperatura que se obtiene en el intercambiador. A la salida del intercambiador, el fluido tiene una temperatura de 93.42°C, que es inclusive menor a la temperatura a la que ingresó (100°C). Esta deficiencia se debe al pobre coeficiente convectivo natural entre el intercambiador de calor y la pared del pozo, además de la baja temperatura del propio pozo en sus primeros 100 m.

En la Figura 6 se presentan los perfiles de temperatura del intercambiador cuando su longitud total es de 200 m. El perfil de temperatura del fluido que desciende tiene un comportamiento lineal durante toda la trayectoria, hasta llegar al fondo del intercambiador, en donde empieza a ascender. En su ascenso el fluido tiene un comportamiento casi lineal por zonas, con una temperatura máxima de 111.56°C a una profundidad de 73 m. La temperatura del fluido a su llegada a la superficie es de apenas 104.87°C.

Las figuras 7, 8 y 9 presentan los perfiles de temperatura del intercambiador para longitudes totales de 300, 400 y 500 m, respectivamente. El comportamiento de las gráficas es similar a la gráfica de la Figura 6. Para la longitud de 300 m se obtiene una temperatura máxima de 116.56°C dentro del intercambiador. Para la longitud de 400 m se llega a una temperatura máxima de 121.65°C y para una longitud de 500 m se alcanza una temperatura máxima de 126.04°C. Las temperaturas del fluido en superficie, al salir del intercambiador, son de 110.86°C para la longitud de 300 m, 114.85°C para la de 400 m y 117.21°C para 500 m de longitud.

Después de analizar el comportamiento simulado del intercambiador de calor en U mostrado en las figuras anteriores, se propone utilizar un aislante térmico sólo en la rama de salida a fin de evitar la pérdida de calor a la salida, suponiendo que técnica y operativamente fuese posible implementar dicho aislamiento en condiciones reales de campo. El tipo de aislante considerado es fibra cerámica y cubriría los últimos 75 m de salida del intercambiador. En la Figura 10 se ilustra el comportamiento de las temperaturas a la salida del intercambiador de calor para distintas longitudes, con y sin aislante. Como se puede apreciar, se pierde menos temperatura utilizando el aislante debido a que este impide la transferencia de calor en la región más fría del pozo lo que permite conservar la temperatura ya ganada.

V. CONCLUSIONES

La simulación realizada demuestra que el intercambiador de calor en U es funcional para la extracción de calor de yacimientos de media y baja entalpia, lográndose obtener temperaturas cada vez mayores conforme se aumenta su longitud. Sin embargo, este tipo de configuración no parece funcionar para nuestro caso específico pues no se logra alcanzar la temperatura mínima requerida para el funcionamiento de la planta de ciclo binario que se pretende instalar. Esta requiere una temperatura mínima de 125°C, la cual no se logra ni aun con la máxima longitud modelada para el intercambiador de 500 m con la cual se obtuvieron 117.21°C, o bien 124.56°C utilizando un aislante. En la práctica, se estima inviable y demasiado costoso construir y acondicionar un intercambiador de calor en U de más de 500 m longitud, con aislante térmico, en el pozo GSE-S01.

El intercambiador de calor en U, en cambio, puede implementarse para satisfacer otras exigencias de temperatura requeridas por otros usos directos del calor geotérmico, como por ejemplo el acondicionamiento climático de espacios, la refrigeración industrial, la operación de un ciclo de potencia Rankin Orgánico (ORC), el calentamiento de una alberca, entre otras aplicaciones.

NOMENCLATURA

| | |
|-----------------|--|
| C_p | Calor específico [J/kg-K] |
| G | Término fuente de k |
| g | Gravedad [m/s^2] |
| k | Energía cinética turbulenta |
| k_t | Conductividad térmica [$W/m-^{\circ}K$] |
| P | Presión [Pa] |
| \dot{q}_{gen} | Tasa de calor generado [J/s] |
| S_{ϕ} | Término(s) fuente diferente(s) a la convección, difusión o términos transitorios |
| T | Temperatura [$^{\circ}C$] |
| T_0 | Temperatura de referencia [$^{\circ}C$] |
| T_{PG} | Temperatura de la pared del pozo [$^{\circ}C$] |
| t | Tiempo [s] |
| \mathbf{v} | Vector de velocidad |
| v_x | Componente de la velocidad en la dirección x [m/s] |
| v_y | Componente de la velocidad en la dirección y [m/s] |
| v_z | Componente de la velocidad en la dirección z [m/s] |
| Γ_{ϕ} | Coeficiente de difusión [kg/m-s] |
| γ | Coeficiente de expansión volumétrica [$1/^{\circ}K$] |
| ε | Tasa de disipación de la energía cinética turbulenta |
| μ | Viscosidad molecular [Pa-s] |
| μ_{eff} | Viscosidad efectiva [Pa-s] |
| μ_t | Viscosidad turbulenta [Pa-s] |
| ρ | Densidad [kg/m^3] |
| ϕ | Variable dependiente, por ejemplo velocidad |

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Centro Mexicano en Innovación en Energía Geotérmica (CeMIE-GEO), al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) y a la Secretaría de Energía (SENER) por su apoyo en la realización de la investigación.

REFERENCIAS

- Al-Khoury, R., 2009. Efficient finite element modeling of shallow geothermal systems. In *Environmental and Computer Science*, ICECS, 2009, pp. 371-374.
- Bardina, J.E., P.G. Huang and T.J. Coakley, 1997. *Turbulence Modeling Validation, Testing, and Development*. NASA, Technical Memorandum 110446.
- Bird, R.B., W.E. Stewart and E.N. Lightfoot, 2002. *Phenomena transport*. Ed. John Wiley & Sons, New York, US.
- CFE, 2011. Medición de la presión, temperatura y calibración del pozo GSE-S01, localizado en la población de Zimirao, Municipio de Zinapécuaro, Mich., CFE, DINYAC-013, Inédito.
- García-Gutiérrez, A., R.M. Barragán-Reyes y V.M. Arellano-Gómez, 2009. Situación y prospectiva de la energía geotermoeléctrica. Seminario sobre la situación actual y prospectiva energética en México y el Mundo, México, 2009.
- Goldstein., B, G. Hiriart, R. Bertani, C. Bromley, L. Gutiérrez-Negrín, E. Huenges, H. Muraoka, A. Ragnarsson, J. Tester, V. Zui, 2011: Geothermal Energy. In IPCC Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation [O. Edenhofer, R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, K. Seyboth, P. Matschoss, S. Kadner, T. Zwickel, P. Eickemeier, G. Hansen, S. Schlömer, C. von Stechow (eds)], Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Hochstein, M.P., 1990. Classification and assessment of geothermal resources. In: Dickson, M.H. and Fanelli, M. eds., *Small Geothermal Resources: A Guide to Development and Utilization*, UNITAR, pp. 31-57.
- Launder, B.E., and D.B. Spalding, 1974. The numerical computation of turbulent flows. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, vol. 3, pp. 269-289.
- Lenhard, R., and M. Malcho, 2013. Numerical simulation device for the transport of geothermal heat with forced circulation of media. *Mathematical and Computer Modelling*, vol. 57, pp. 111-125.
- Muffler, J.L.P., and R. Cataldi, 1978. Methods for regional assessment of geothermal resources. *Geothermics*, vol. 7, pp. 53-89.
- Nicholson, K., 1993. Geothermal Fluids. Ed. Springer Verlag, vol. 18, pp. 257-264.
- Ozudogru, T.Y., C.G. Olgun and A. Senol, 2014. 3D numerical modeling of vertical geothermal heat exchangers. *Geothermics*, vol. 51, pp. 312-324.

Rees, S.J. and M. He, 2013. A three-dimensional numerical model of borehole heat exchanger heat transfer and fluid flow. *Geothermics*, vol. 46, pp. 1-13.

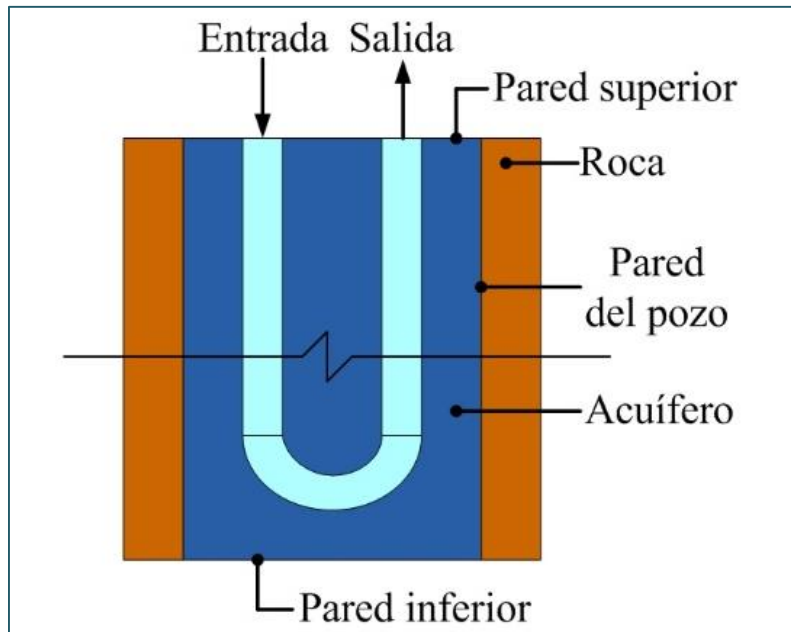


Fig. 1. Intercambiador de calor en U en un pozo geotérmico.

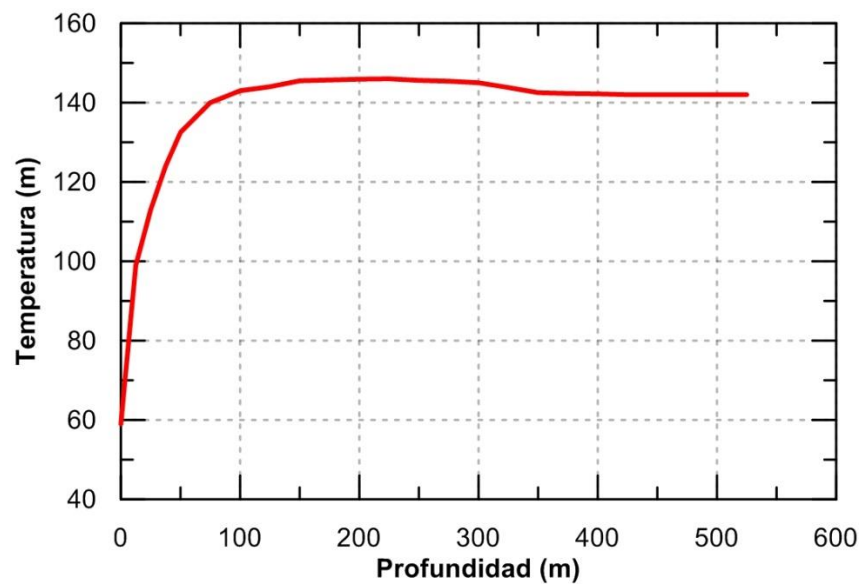


Figura 2. Perfil de temperatura del pozo geotérmico GSE-S01.

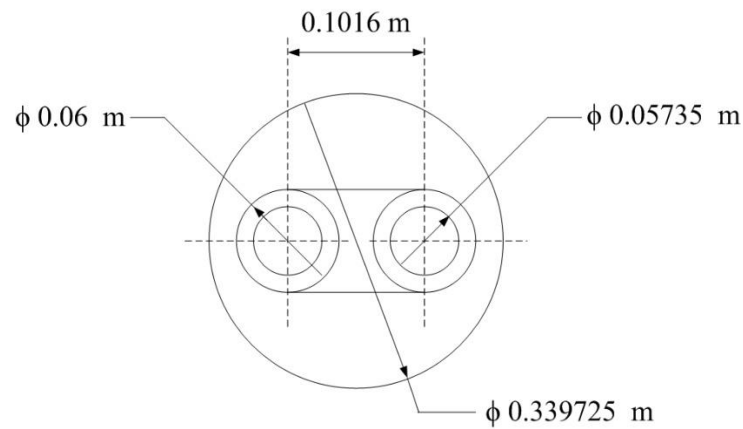


Figura 3. Dimensiones diametrales del intercambiador de calor y del pozo geotérmico.

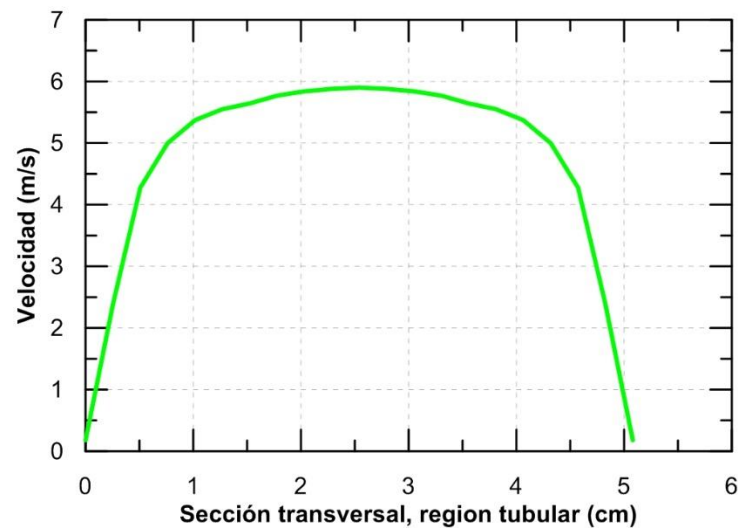


Figura 4. Perfil de velocidades del intercambiador de calor geotérmico en U.

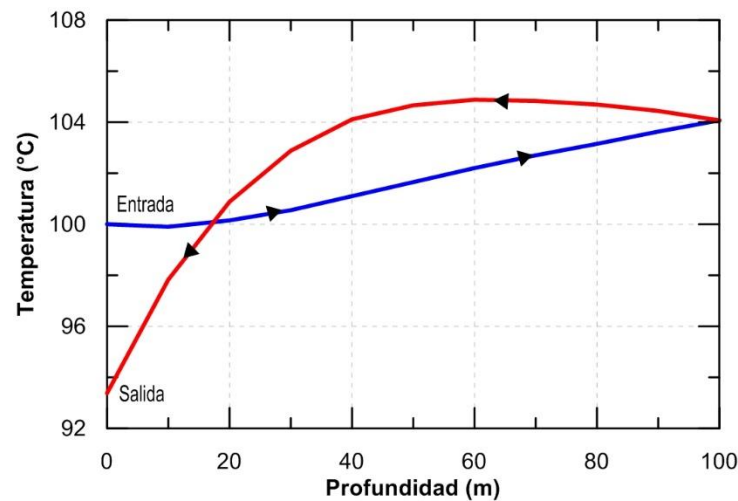


Figura 5. Perfil de temperaturas del intercambiador de calor geotérmico en U, 100m.

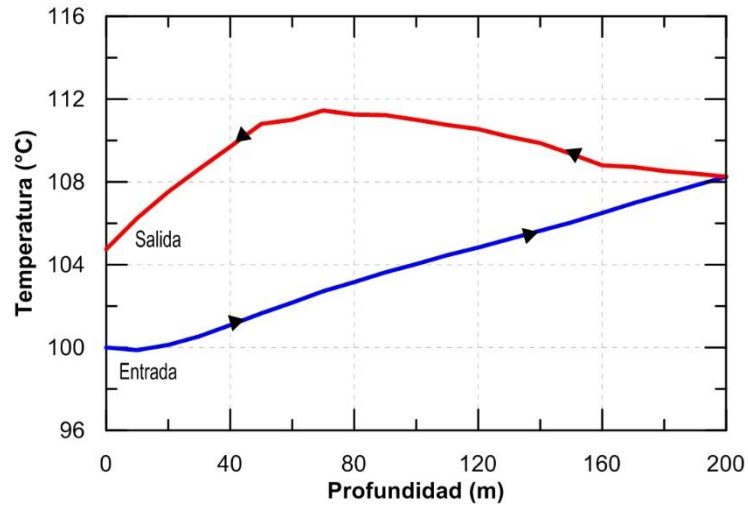


Figura 6. Perfil de temperaturas del intercambiador de calor geotérmico en U, 200m.

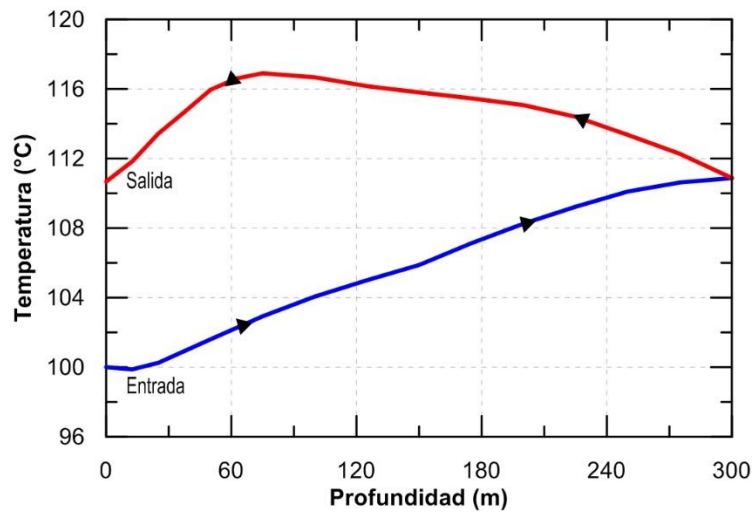


Figura 7. Perfil de temperaturas del intercambiador de calor geotérmico en U, 300m.

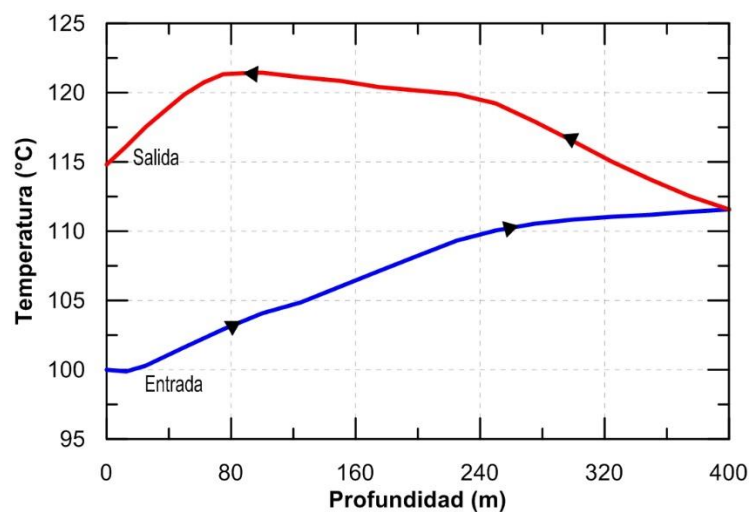


Figura 8. Perfil de temperaturas del intercambiador de calor geotérmico en U, 400m.

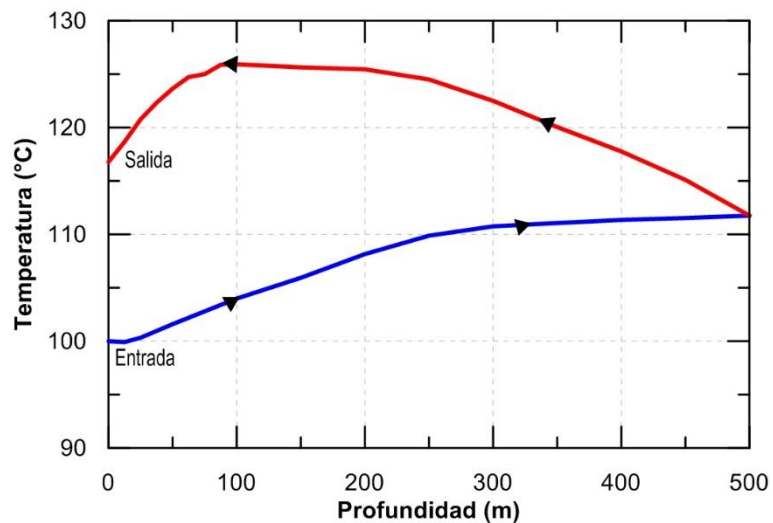


Figura 9. Perfil de temperaturas del intercambiador de calor geotérmico en U, 500m.

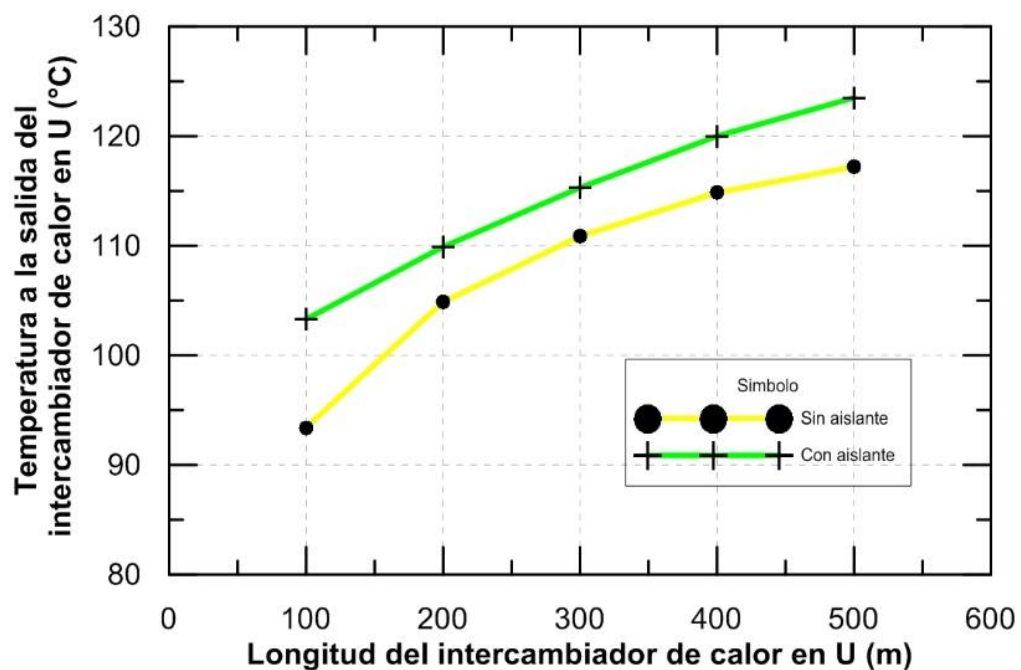


Figura 10. Comparación del comportamiento del intercambiador de calor en U, con y sin aislante.