

EVALUACIÓN DEL RENDIMIENTO TERMO-HIDRÁULICO DE INTERCAMBIADORES DE CALOR GEOTÉRMICOS – ETAPA 1

José Roberto Lozano Ocampo¹, José Manuel Luna²

¹ Instituto Tecnológico Sanmiguelense de Estudios Superiores, lozano-@live.com

² Instituto Tecnológico Sanmiguelense de Estudios Superiores / Grupo SSC, jm.luna@gruposscc.com

Resumen

Esta investigación se ha desarrollado con el fin de utilizarse a favor del diseño de intercambiadores de calor geotérmicos. Esta etapa de la investigación se enfoca en el cálculo de los perfiles de temperatura a lo largo de la profundidad del suelo basándose en un balance de energía sobre la superficie tomando en cuenta efectos tales como convección, radiación de onda corta y larga, así como evaporación cuyo efecto es el más significativo sobre la respuesta térmica. Los resultados obtenidos con la metodología numérica se compararon con estudios experimentales realizados en Japón y Polonia y reportados en literatura. La metodología verificada se utilizó con el fin de estimar los perfiles de temperatura en la ciudad de San Miguel de Allende bajo la consideración de condiciones meteorológicas promedio disponibles. Este estudio será la base para futuras investigaciones por parte de los autores acerca de los intercambiadores de calor geotérmicos.

Abstract

This research was developed in order to take advantage in favor of geothermal heat exchangers, as a future stage. In this stage it focuses on the calculation of temperature profiles based on an energy balance in the soil surface, taking into account convection, radiation of short and long wave, and the use of evaporative latent energy which tends to vary widely the results. Results obtained numerically were compared with experimental studies developed in Saga, Japan and Poland Poznan, in order to obtain temperature profiles of San Miguel de Allende, using average weather conditions for each month. This study will be the basis for future research on geothermal heat exchangers

Palabras Clave

Simulación numérica, Balance de energía, Perfil de Temperatura.

INTRODUCCIÓN

El estudio se centra en los intercambiadores geotérmicos horizontales y de flujo continuo, para los cuales su rendimiento depende del perfil de temperatura con el que cuenta el medio en el que se someten.

Actualmente para la obtención de los perfiles se recurre a muestreo experimental (Selemat S.,2015), o a la adecuación de ecuaciones senoidales (Popiel C, 2001). Respectivamente estos métodos son costosos o necesitan de factores de corrección tomando en cuenta las temperaturas máximas, mínimas y promedio del lugar.

Alternativamente, el balance de energía usado por varios autores (Badache, 2016; Xáman, 2015; El-Din, 1999) consta del balance superficial de energía dado por la siguiente ecuación.

$$q'' = -\gamma \frac{\partial T}{\partial x} |_{x=0} = CE - LR + SR - LE$$

Donde CE representa la convección dada por la ley de enfriamiento de Newton; siendo h el coeficiente de convección, T_s (K) la temperatura superficial y T_∞ (K) la temperatura del medio ambiente.

En este trabajo el coeficiente h (W/m^2) se calcula por las siguientes ecuaciones:

$$h = 5.678 \left[0.775 + 0.350 \left(\frac{V}{0.304} \right) \right] \quad \text{si } V < 4.88 \frac{m}{s}$$

$$h = 5.678 \left[0.775 + 0.35 \left(\frac{V}{0.304} \right)^{0.78} \right] \quad \text{si } V \geq 4.88 \frac{m}{s}$$

SR representa la radiación de onda larga, la cual depende de la radiación G (W/m^2) y el albedo del suelo, el cual representa la radiación reflejada.

$$SR = (1 - \text{albedo}) * G$$

LR representa la radiación de onda larga. En la literatura se reportan diferentes formas para su cálculo considerando generalmente la temperatura de cielo obtenida por la aproximación basada en la temperatura ambiente (Adelard, 1998), la emisividad del suelo y la constante de Stefan-Bozmann $\sigma = 5.67e^{-08} W/m^2K^4$.

$$LR = \varepsilon * \sigma * (T_s^4 - T_\infty^4) \quad (\text{Badache, 2016})$$

$$LR = \varepsilon * 63 \frac{W}{m^2} \quad (\text{Xáman J., 2015})$$

$$T_c = 0.0552 * T_\infty^{1.5} \quad (\text{Adelard, 1998})$$

El uso de las dos variantes será probada.

LE es el calor latente debido a la evaporación. Su cálculo requiere de información asociada a la humedad relativa R_h , valores de constantes de adecuación y a la razón de evaporación (valor de 1 para suelos saturados, entre 0.6 y 0.8 para húmedos, entre 0.4 – 0.5 para suelos secos y entre 0.1 – 0.2 para los áridos)

Si $263 \leq T \leq 303K$ $a=103 Pa/K$ y $b=609 Pa$

$$LE = 0.0168 * f * h * [(a * T_s + b) - R_h * (a * T_\infty + b)]$$

Para este estudio se consideraron los estudios realizados por Selemat, en Saga Japón el 1 de Agosto del 2013, y el reportado por Popiel (Popiel C, 2001) en Poznan Polonia durante el año 2000, con el fin de obtener un criterio de convergencia y corroborar el método de balance de energía. Posteriormente la metodología se ha usado para calcular los perfiles mensuales de San Miguel de Allende.

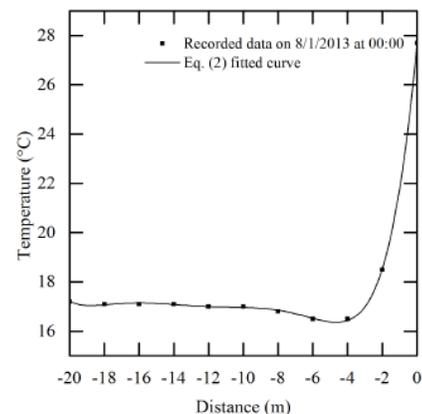


Figura 1. Perfil de Temperatura de Saga, (Selemat S.,2015)

La relevancia de este trabajo se enfoca en la obtención precisa y puntual de los perfiles de temperatura debido a que tienen un gran impacto sobre el rendimiento de intercambiadores de calor subterráneos

El análisis de este tipo de intercambiadores de calor está se seguirá desarrollando en trabajos futuros bajo la modalidad de proyecto de tesis.

MATERIALES Y MÉTODOS

Perfiles de Temperatura

La solución numérica para la obtención de los perfiles de temperatura se realizó bajo las siguientes consideraciones:

- Temperatura constante a partir de los 10 metros, igual a la temperatura media anual.
- Terreno homogéneo

El proceso de transferencia de calor a través del dominio se encuentra descrito por la ecuación de la energía

$$\frac{\partial(\rho h)}{\partial t} + \nabla(V \cdot \rho h) = \nabla(K \nabla T) + S_h$$

Caso de estudio: Saga, Japón

Las condiciones del sistema que se tomaron en cuenta para la simulación de este caso se presentan en la tabla 1. El dominio bidimensional de cálculo se estableció por una región de 15 x15 m.

Tabla 1 Condiciones climatológicas características del suelo (Selemat S.,2015)

Saga Japón	Suelo	Clima	
Densidad [Kg/m ³]	1700	29.3	T _m [°C]
Calor específico [J/KgK]	1800	76	R _h [%]
Conductividad Térmica [W/mK]	1.2	160.185	G [W/m ²]

Con la finalidad de evaluar las alternativas reportadas en la literatura de manejar el balance de energía, se plantearon los siguientes 4 casos de estudio:

-Usar LE y usar LR de Xáman

-Usar LE y usar LR de Badache

-Eliminar LE y usar LR de Xáman

-Eliminar LE y usar LR de Badache

Además, se supuso un suelo constituido de arcilla, con baja humedad, un albedo de 0.15 y una emisividad de 0.97.

La solución numérica se llevó a cabo considerando 29800 nodos y 19452 elementos cuadriláteros. Adicionalmente se aplicaron superficies de control en la pared superficial, donde se evaluó la temperatura y el flujo de calor.

Caso de estudio: Poznan, Polonia

Este estudio toma en cuenta una superficie cubierta de hierba y se reportan lecturas de la temperatura durante todo el año. Sin embargo sólo se indican valores de las condiciones climatológicas para el mes de enero.

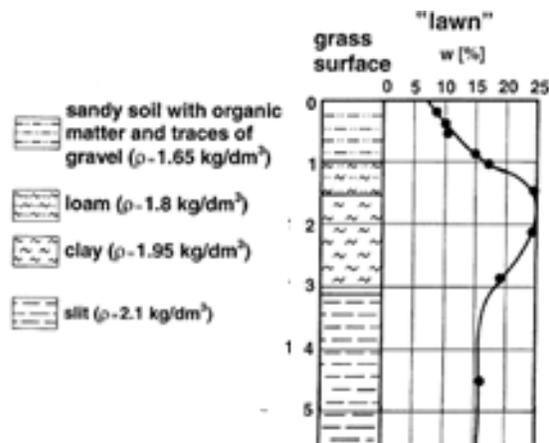


Figura 2. Composición del suelo en Poznan, (Popiel C, 2001)

El trabajo reporta para dicho mes obtuvo una temperatura promedio de -0.48 °C, R_h = 86%, una velocidad promedio del viento de 16.35 km/h, y una temperatura media anual de 12.93 °C junto a una radiación promedio de 134.13 W/m².

La solución numérica se realizó sobre un dominio de 13 x 113 m utilizando una malla con 176,118 nodos y 174,788 elementos cuadriláteros. Una vez más se usaron superficies de control, con la temperatura en la parte superior del modelo.

San Miguel de Allende

Para la predicción del campo de temperatura en suelo local se utilizó un dominio multicapa de 15 x 15 m y aplicando las siguientes condiciones climatológicas de la Tabla 2. La variación del tipo suelo se consideró de la siguiente forma:

0.0m -1.5m Slit

1.5m.-5.0m. Slit-Clay

5.0m-15.0m. –Clay

Para este caso se usó una malla con 174628 nodos y 173308 elementos cuadriláteros.

Tabla 2. Condiciones climatológicas de Sanmiguel de Allende, Fuente: Fundación Guanajuato Produce A.C., 2015

Mes	R _n (%)	G (W/m ²)	T _∞ (°C)	V (Km/h)
Abril	52.539935	276.123457	18.4807415	4.70810025
Mayo	62.8039773	273.025719	19.0095643	4.43964158
Junio	68.2536127	231.233093	18.2169375	4.97520751
Julio	73.2384173	251.899323	17.4774915	4.24835871
Agosto	70.2636765	288.899898	17.4894364	4.78311292
Septiembre	68.6172013	253.599401	17.7491867	4.72518519

El criterio de convergencia se estableció al alcanzar el valor estable de la temperatura en diferentes puntos a lo largo de la profundidad.

Tabla 3. Propiedades térmicas de materiales varios, Paul D Geothermal energy and heat storage, 2002

	K [W/mK]	P [kg/m ³]	Cp [KJ/KgK]
Clay	0.85	1950	1692.30769
Silty-Clay	1.1	2025	1530.8642
Silt	1.2	2100	1357.14286
Sand	1.5	1650	1727.27273
Water	0.58	1000	2728.5
Loam	1.18	1860	1629.03226

También se supuso un suelo descubierto de arcilla, con poca humedad, con un albedo de 0.15 y una emisividad de 0.97.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Perfiles de Temperatura

Para el caso de Saga, Japón, la comparación de los resultados obtenidos con el perfil experimental se muestra en la Figura 3, donde los casos 1 y 2 corresponden a la variación en la densidad de malla; mientras que los casos 3 y 4 corresponden a la variación de la temperatura ambiental superficial. Los resultados reflejan una excelente correspondencia con las lecturas experimentales de la Figura 1.

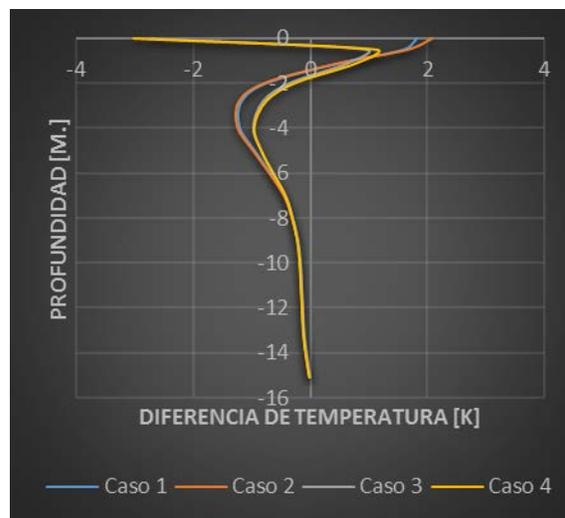


Figura 3. Resultados más acertados para Saga

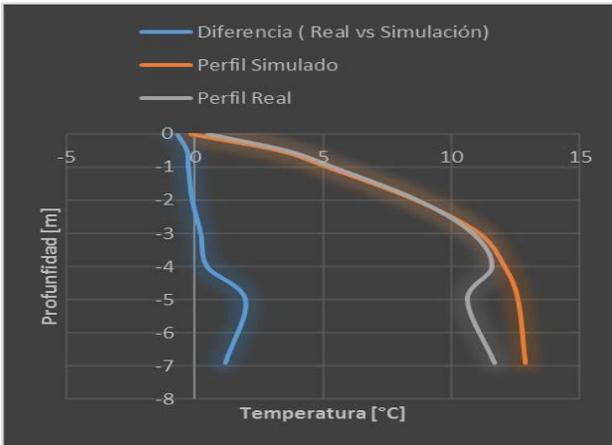


Figura 4. Resultados de Poznan

La comparación con los resultados experimentales de los resultados obtenidos para el caso de Polonia se presenta en la Figura 4. Nuevamente, la metodología planteada presenta una excelente predicción del perfil de temperatura.

Los resultados obtenidos para el caso de San Miguel de Allende se presentan en la Figura 5. Con la metodología verificada con datos reportados en la literatura se establece un perfil sin variación significativa durante el periodo de análisis, mientras que puntualmente se predice una variación en los primeros 20 cm. Con este resultado se fundamenta la consideración de un perfil de temperatura constante en el estudio de intercambiadores de calor geotérmicos en San Miguel de Allende.

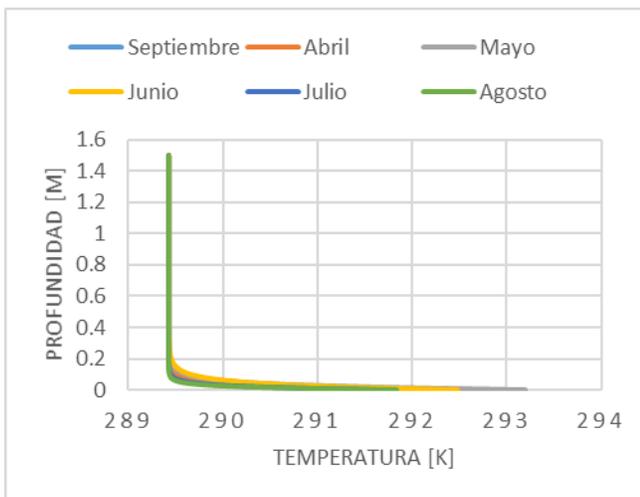


Figura .5 Perfiles calculados para San Miguel de Allende

CONCLUSIONES

Este trabajo presenta las capacidades de estimar perfiles de temperatura subterránea al considerar condiciones climatológicas promedio. El conocimiento a priori del perfil de temperatura subterránea es de suma importancia para evaluar la factibilidad del uso de intercambiadores de calor geotérmico para fines de climatización de espacios residenciales.

La estrategia numérica desarrollada en esta primera etapa del proyecto de investigación se verificó al reproducir resultados experimentales reportados en la literatura. En el caso de San Miguel al no haber grandes variaciones de temperatura, las curvas formadas no son tan prolongadas. Algo bueno para el uso de intercambiadores, donde se buscan temperaturas constantes.

Futuros trabajos.

Actualmente la investigación se encuentra en la etapa de desarrollar una metodología numérica para evaluar el rendimiento termo-hidráulico de intercambiadores de calor geotérmico tomando en cuenta la distribución de temperatura subterránea resultante por diferentes condiciones termo-físicas y climatológicas. Los resultados que se presentan en este trabajo corresponden a la investigación de tesis de licenciatura que actualmente se está llevando a cabo.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco al Dr. Luna por brindarme la oportunidad y asesorarme en la elaboración de este proyecto, así como al Dr. Jesús García al Ing. Gerardo Palma por su ayuda en la elaboración del proyecto.

REFERENCIAS

[1] Adelard I., Pignolet.Tardan F., Mara T., Lauret P., Garde F.,Boyer H.(1998),Sky temperatura modelisation and application in building simulation. Renewable Energy, 15, pp418-430.

- [2] Badache M, Eslami-Nejad P, Ouzzane M, Aidon Z. A new modeling approach for improved ground temperature profile determination. *Renewable Energy*, 85, pp 436-444
- [3] Popiel C., Wojtkowiak J.& Biernacka B.(2001). Measurements of temperature distribution in ground. Cover image *Experimental Thermal and Fluid Science Experimental Thermal and Fluid Science* , 25, pp 301-309.
- [4] Salah El-Din M.M.. (1999). On the heat flow into the ground. *Renewable Energy*, 18, pp 473-490.
- [5] Selamat S,Miyara A & Kariya K. (2015). Analysis of Short Time Period of Operation of Horizontal Ground Heat Exchangers. *Resources*, 4, pp 507-523
- [6] Xáman J.Hernández-López I., Alvarado-Juárez R., Hernández-Pérez I., Álvarez G.& Chávez Y.. (2015). Pseudo transient numerical study of an earth-to-air heat exchanger for different climates of México. *Energy and Buildings*, 99, pp 273-283.