

Modelación analítica del comportamiento térmico de una pila de energía en México

Analytical modelling of the thermal behavior of an energy pile in Mexico

Angel Gerardo Rivera-López, Norma Patricia López-Acosta y David Francisco Barba-Galdámez
Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM)

RESUMEN: Las pilas de energía consisten en elementos de cimentación equipados con un sistema cerrado de tuberías que les permite utilizar el gradiente de temperatura entre el suelo y el ambiente para la climatización de espacios y el abastecimiento de agua caliente doméstica. En este artículo se presenta una metodología basada en modelos analíticos para simular el comportamiento térmico de pilas de energía. Se describen las diferentes soluciones analíticas, junto con sus principales hipótesis y limitaciones. Adicionalmente, se implementa el método propuesto para analizar la respuesta térmica de una pila de energía ubicada en la zona costera del Estado de Jalisco. Los resultados demuestran que la metodología presentada permite estimar adecuadamente el comportamiento térmico de las pilas de energía y representa un recurso invaluable para la implementación de esta tecnología en el país.

ABSTRACT: Energy piles are foundation elements equipped with a closed-loop system that allows them to use the temperature gradient between the ground and the environment for the air conditioning of spaces and the supply of domestic hot water. This article presents the implementation of a methodology for modeling the thermal behavior of energy piles based on analytical solutions of heat transfer and the superposition principle. In order to demonstrate its applicability and highlight the differences between the different analytical solutions implemented, the simulation of the operation of a power pile located in the coastal area of the State of Jalisco during one year of use is presented. The results obtained indicate that the methodology described allows adequately estimating the thermal behavior of energy piles and represents an important tool for the design and implementation of this technology in Mexico.

1 INTRODUCCIÓN

En la actualidad, las fuentes de energías limpias y de bajo costo se han vuelto una prioridad en el área de la investigación, ya que existe una creciente demanda energética a nivel mundial. Una alternativa para sustituir el uso de la energía termoeléctrica (producto del empleo de gas natural, gas LP y combustibles contaminantes) consiste en aprovechar la energía geotérmica mediante la implementación de cimentaciones termoactivas, entre ellas, las denominadas *pilas de energía*. Su aplicación permite reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y tiene beneficios económicos respecto a los sistemas convencionales (Lee *et al.*, 2021).

En los últimos años, diversos países como Suiza (Laloui *et al.*, 2015), España (Groot, 2017), Estados Unidos (Murphy *et al.*, 2015) y Corea del Sur (Park *et al.*, 2015) han estudiado los efectos de los cambios de temperatura en el comportamiento de las pilas de energía con la finalidad de mejorar su diseño y evitar costos adicionales. No obstante, en México las cimentaciones termoactivas no se utilizan actualmente. La principal limitación se relaciona con el desconocimiento de la tecnología, el diseño térmico, el comportamiento geotécnico y estructural, así como, las propiedades térmicas de los suelos mexicanos. En este sentido, el presente trabajo pretende mejorar el panorama en cuanto al diseño térmico para la implementación de las pilas de energía en México.

El correcto funcionamiento de un sistema a base de pilas de energía depende de la eficiencia con la que opera la bomba de calor, ya que requiere una temperatura específica para trabajar de forma óptima. Para ello, es necesario obtener la variación de temperatura del fluido en la entrada

y salida, así como, en la periferia de la pila. Con esta finalidad, se pueden aplicar diversos métodos analíticos como el modelo de fuente lineal e infinita (ILSM, por sus siglas en inglés *Infinite Line Source Model*), el modelo de fuente lineal finita (FLSM, por sus siglas en inglés *Finite Line Source Model*) y el modelo de fuente cilíndrica infinita (ICSM, por sus siglas en inglés *Infinite Cylindrical Source Model*) (Loveridge *et al.*, 2013).

En este artículo se presenta la implementación de una metodología para la modelación del comportamiento térmico de pilas de energía basada en soluciones analíticas de transferencia de calor y el principio de superposición. Este procedimiento permite estimar la variación en el tiempo de las temperaturas en la entrada y salida del fluido intercambiador de calor, así como, del suelo circundante. Con el objetivo de demostrar su aplicabilidad y resaltar las diferencias entre las diferentes soluciones analíticas implementadas, se presenta la simulación del funcionamiento de una pila de energía ubicada en la zona costera del Estado de Jalisco durante un año de uso.

2 METODOLOGÍA PARA LA MODELACIÓN DEL COMPORTAMIENTO TÉRMICO DE PILAS DE ENERGÍA

Debido a su doble función (como elemento de cimentación e intercambiador de calor), el diseño de las pilas de energía requiere de la interacción de análisis térmicos, geotécnicos y estructurales (Bourne-Webb *et al.*, 2016). Desde un punto de vista térmico, el diseño implica estimar la cantidad de energía térmica que las pilas de energía pueden intercambiar con el suelo circundante para satisfacer total o

parcialmente las cargas térmicas de la edificación. Con este fin es necesario estimar los cambios de temperatura en el fluido que circula a través de las pilas de energía, así como, en la periferia de las pilas de energía. Esta información se utiliza para verificar que la operación de las pilas de energía se encuentre dentro de los límites de funcionamiento de la bomba de calor seleccionada (Fadejev *et al.*, 2017).

De acuerdo con Laloui y Rotta Loria (2020), la diferencia (ΔT) entre la temperatura promedio del fluido que recorre las pilas de energía (T_f) y la temperatura inalterada del suelo (T_g) al aplicar una carga térmica por unidad de longitud (q) constante puede determinarse como:

$$\Delta T = T_f - T_g = q[R_b + G(t)] \quad (1)$$

donde R_b es la resistencia térmica de la pila de energía (mKW^{-1}) y $G(t)$ es una función dependiente del tiempo (t) que considera la respuesta térmica del suelo en la periferia de la pila de energía de radio r_b , denominada función-g. El valor de R_b se estima con base en la geometría de la pila de energía, el número de tuberías instaladas, la velocidad de circulación del fluido y las propiedades térmicas de los materiales utilizados (Kavanaugh y Rafferty, 2014). Por otra parte, la función $G(t)$ suele determinarse aplicando diferentes modelos analíticos de transferencia de calor por conducción en medios continuos (Li y Lai, 2015). Entre los modelos más utilizados se encuentran el de Fuente Lineal Infinita (ILSM), el modelo de Fuente Cilíndrica Infinita (ICSM) y el modelo de Fuente Lineal Finita (FLSM).

Por otra, se sabe que la carga térmica por unidad de longitud (q) transferida al suelo es función de la diferencia entre la temperatura de entrada ($T_{f,in}$) y salida ($T_{f,out}$) del fluido que circula por las tuberías de la pila de energía (Loveridge *et al.*, 2014):

$$q = \rho_f c_{pf} \dot{V} (T_{f,in} - T_{f,out}) / H \quad (2)$$

donde H es la longitud de la pila de energía (m), ρ_f y c_{pf} son la densidad (kg m^{-3}) y el calor volumétrico específico ($\text{Jm}^{-3}\text{°C}^{-1}$) del fluido, respectivamente, y \dot{V} es el caudal volumétrico (m^3s^{-1}). Así, si se asume que $T_f = (T_{f,in} - T_{f,out})/2$, es posible calcular $T_{f,in}$ y $T_{f,out}$ como:

$$T_{in} = T_f + \frac{qH}{2\rho_f c_{pf} \dot{V}} \quad (3)$$

$$T_{out} = T_f - \frac{qH}{2\rho_f c_{pf} \dot{V}} \quad (4)$$

Las cargas térmicas q a las que se ven sometidas las pilas de energía no suelen ser constantes. Sus valores varían en función de los cambios en las condiciones atmosféricas a lo largo del año. Dichos cambios pueden evaluarse utilizando el principio de superposición temporal (Li y Lai, 2015).

$$\Delta T(t) = \frac{q}{\pi^2 r_b \lambda} \int_0^\infty (e^{-\alpha u^2 t} - 1) \frac{J_0(ur)Y_1(ur_b) - Y_0(ur)J_1(ur_b)}{u^2 [J_1^2(ur_b) + Y_1^2(ur_b)]} du \quad (8)$$

Dado que las cargas térmicas de las edificaciones suelen definirse de forma escalonada con valores constantes por hora o por día, ΔT puede determinarse como:

$$\Delta T(i) = q(t_i)R_b + \sum [q(t_i) - q(t_j)]G(t_i - t_j) \quad (5)$$

3 MODELOS ANALÍTICOS IMPLEMENTADOS

3.1 Fuente lineal infinita (ILSM)

Este modelo considera la transferencia radial de calor por conducción en un medio continuo, homogéneo e isótropo debida a una fuente lineal infinita (cilindro de diámetro tan pequeño que es despreciable). En estas condiciones, el cambio de temperatura ΔT en un punto ubicado a una distancia r de la fuente lineal infinita puede calcularse como (Ingersoll *et al.*, 1948; Carslaw y Jaeger, 1959):

$$\Delta T(t) = \frac{q}{4\pi\lambda} \int_{\frac{r^2}{4\alpha t}}^\infty \frac{e^{-u}}{u} du = \frac{q}{4\pi\lambda} E_1 \left(\frac{r^2}{4\alpha t} \right) \quad (6)$$

donde E_1 es la función integral exponencial, q es la tasa de transferencia de calor por unidad de longitud (Wm^{-1}), λ es la conductividad térmica del medio ($\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$), α es la difusividad térmica del medio (m^2s^{-1}), y t es el tiempo en el que se aplica la fuente lineal continua (s).

Si se considera un valor de distancia radial r igual al radio de la pila de energía r_b , la función-g para una fuente lineal infinita $G_{ILSM}(t)$ puede escribirse como:

$$G_{ILSM}(t) = \frac{1}{4\pi\lambda} E_1 \left(\frac{r_b^2}{4\alpha t} \right) \quad (7)$$

3.2 Fuente cilíndrica infinita (ICSM)

El modelo considera el proceso de transferencia radial de calor desde un cilindro hueco e infinito rodeado de un medio continuo, homogéneo e isótropo, en el cual, la transferencia de calor ocurre por conducción pura. Si se considera que el radio del cilindro hueco e infinito es r_b , el cambio de temperatura ΔT en un punto ubicado a una distancia r de la fuente cilíndrica infinita puede calcularse con la Ec. 8 (Ingersoll *et al.*, 1948; Carslaw y Jaeger, 1959). En la Ec. 8 $J_0(-)$ y $J_1(-)$ se refieren a las funciones Bessel de primera especie de orden 0 y 1, mientras que $Y_0(-)$ y $Y_1(-)$ son las funciones Bessel de segunda especie de orden 0 y 1, respectivamente. Si se considera un valor de distancia radial r igual al radio de la pila de energía r_b , la función-g para una fuente cilíndrica infinita $G_{ICSM}(t)$ se puede calcular de acuerdo con la Ec. 9.

$$G_{ICSM}(t) = \frac{1}{\pi^2 r_b \lambda} \int_0^{\infty} (e^{-\alpha u^2 t} - 1) \frac{J_0(ur_b)Y_1(ur_b) - Y_0(ur_b)J_1(ur_b)}{u^2 [J_1^2(ur_b) + Y_1^2(ur_b)]} du \quad (9)$$

3.3 Fuente lineal finita (FLSM)

Cuando se requiere calcular la transferencia de calor para periodos mayores a un año, se recomienda emplear el modelo de fuente lineal finita. Este modelo considera la transferencia radial de calor por conducción en un medio continuo, homogéneo e isótropo debida a una fuente lineal finita de longitud H ubicada a una distancia D de la superficie del suelo. Si la temperatura superficial es constante e igual a la temperatura inalterada del suelo T_g , el cambio de temperatura ΔT en un punto ubicado a una distancia radial r de la fuente lineal finita y a una profundidad z de la superficie queda definido por la Ec. 10, donde $erfc(-)$ representa la función de error complementaria (Zeng *et al.*, 2002).

Si se considera un valor de distancia radial r igual al radio de la pila de energía r_b y un valor de $D = 0$, es posible calcular la función- g para una fuente lineal finita $G_{FLSM}(t)$ a partir de la Ec. 11. Sin embargo, en este caso el valor de $G_{FLSM}(t)$ varía con la profundidad z del punto de análisis. Para simplificar los análisis, en la práctica suele considerarse el valor promedio a lo largo de fuente de calor, tal como se indica en la Ec. 12.

4 CASO DE ESTUDIO

4.1 Localización del sitio

El sitio de estudio se localiza en la zona costera del estado de Jalisco. El clima en la zona es cálido sub-húmedo con lluvias en verano. El otoño, invierno y primavera son secos y cálidos, sin cambio térmico invernal bien definido. De acuerdo con la base de datos del Servicio Meteorológico Nacional (SMN, 2020), la temperatura ambiente media del sitio es 26.2°C, con valores extremos mensuales promedio

de 39.0°C en abril y 9.1°C en enero (Fig. 1). Estas condiciones sugieren que un hipotético sistema de pilas de energía debería proveer mayoritariamente enfriamiento a la edificación.

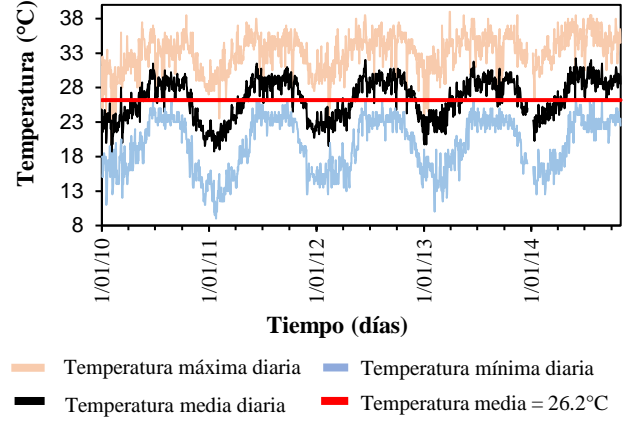


Figura 1. Variación de la temperatura ambiente en el sitio de estudio.

4.2 Estratigrafía y propiedades térmicas del sitio de estudio

Las condiciones del subsuelo de la zona costera de la Ciudad (Jalisco) se obtuvieron a partir de los trabajos de exploración que incluyen tres sondeos mixtos de 50 a 70 m de profundidad, en los cuales se combinaron la técnica de hincado de cono eléctrico en suelos blandos y SPT en estratos de mayor consistencia. Las exploraciones indicaron que la estratigrafía del sitio está conformada por depósitos aluviales residuales y sedimentos de playa, con un nivel freático ubicado a 2.6 m de profundidad (Fig. 2).

$$\Delta T(z, t) = \frac{q}{4\pi\lambda} \int_D^{D+H} \left(\frac{erfc\left(\frac{\sqrt{r^2 + (z-h)^2}}{2\sqrt{at}}\right)}{\sqrt{r^2 + (z-h)^2}} - \frac{erfc\left(\frac{\sqrt{r^2 + (z+h)^2}}{2\sqrt{at}}\right)}{\sqrt{r^2 + (z+h)^2}} \right) dh \quad (10)$$

$$G_{FLSM}(z, t) = \frac{1}{4\pi\lambda} \int_0^H \left(\frac{erfc\left(\frac{\sqrt{r^2 + (z-h)^2}}{2\sqrt{at}}\right)}{\sqrt{r^2 + (z-h)^2}} - \frac{erfc\left(\frac{\sqrt{r^2 + (z+h)^2}}{2\sqrt{at}}\right)}{\sqrt{r^2 + (z+h)^2}} \right) dh \quad (11)$$

$$G_{FLSM}(t) = \frac{1}{4\pi\lambda H} \int_0^H \int_0^H \left(\frac{erfc\left(\frac{\sqrt{r^2 + (z-h)^2}}{2\sqrt{at}}\right)}{\sqrt{r^2 + (z-h)^2}} - \frac{erfc\left(\frac{\sqrt{r^2 + (z+h)^2}}{2\sqrt{at}}\right)}{\sqrt{r^2 + (z+h)^2}} \right) dh dz \quad (12)$$

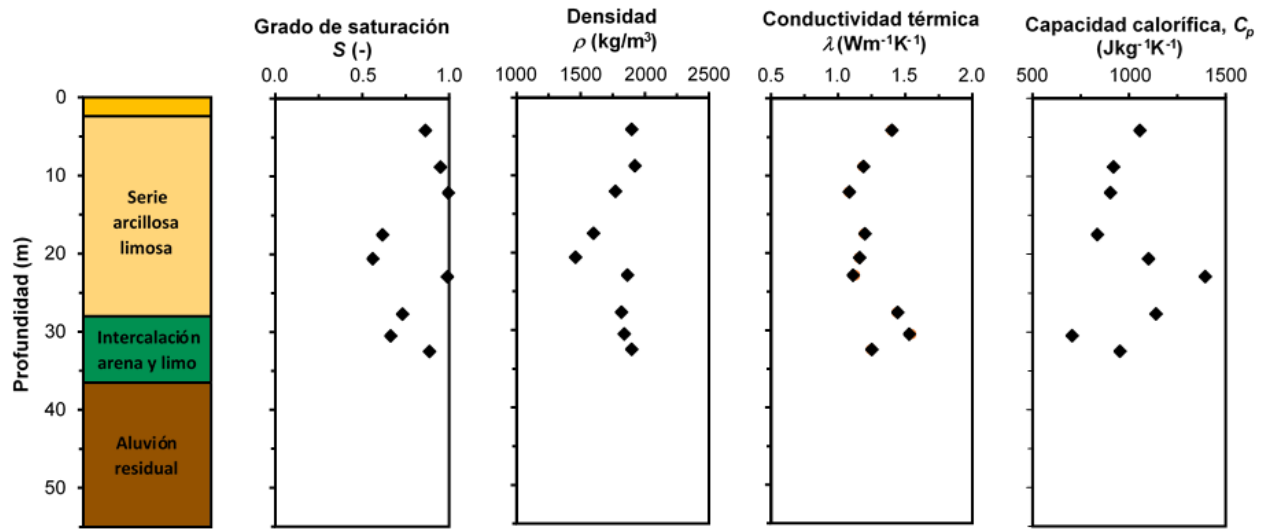


Figura 2. Estratigrafía del sitio de estudio y propiedades geotérmicas (López Acosta *et al.*, 2022).

Para determinar las propiedades del suelo se efectuaron ensayos de consistencia, contenido de finos y granulometría. Adicionalmente, se realizaron 11 ensayos triaxiales UU y siete de consolidación. Asimismo, se realizaron ensayos de aguja térmica en muestras inalteradas, a partir de los cuales se definieron las propiedades geotérmicas del sitio (Fig. 2).

4.3 Descripción de la pila de energía

La pila de energía considerada en los análisis térmicos corresponde a un elemento de cimentación circular de concreto de 80 cm de diámetro y 48 m de profundidad equipado con cuatro bucles en U conectados en serie (Fig. 3). Los bucles se formaron con tubería de polietileno de alta densidad (PEAD) con un diámetro exterior $d_o = 2.67$ cm y un diámetro interior $d_i = 2.19$ cm. En la Figura 4 se muestra el detalle del arreglo de tuberías en la sección transversal de la pila con los cuatro bucles en U.

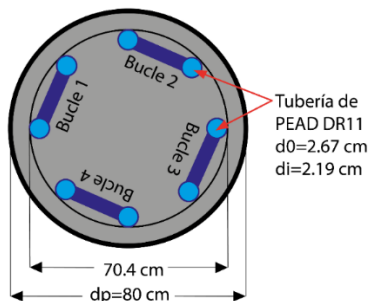


Figura 3. Arreglo de cuatro bucles en U en la pila de energía (adaptado de López Acosta *et al.*, 2022).

La Tabla 1 presenta los parámetros utilizados para la modelación analítica del comportamiento térmico de la pila de energía. Como fluido de circulación dentro de las tuberías se asumió agua con una tasa de flujo de 15 l min^{-1} (4 gpm), que es un valor típico de trabajo para bombas de calor geotérmico (Kavanaugh y Rafferty, 2014).

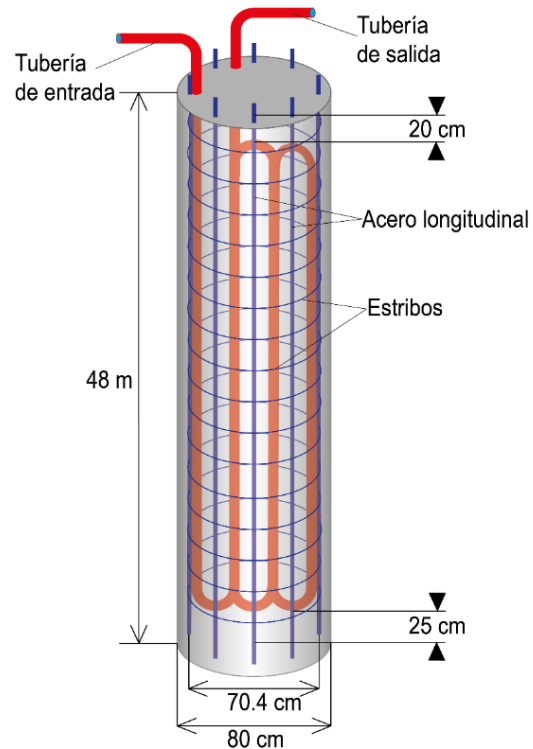


Figura 4. Sección longitudinal de la pila.

La Figura 5 muestra el perfil de cargas térmicas para un edificio típico ubicado en zona costera de Jalisco escalado para una pila de energía. Las cargas térmicas positivas indican inyección de calor al suelo (enfriamiento de la edificación), mientras que cargas térmicas negativas indican extracción de calor del suelo (calentamiento de la edificación).

Tabla 1. Parámetros empleados en el análisis

Elemento	Parámetro	Símbolo	Valor	Unidades
Suelo	Conductividad térmica del suelo	λ_g	1.26	$\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$
	Capacidad calorífica específica del suelo	$C_{p,g}$	990	$\text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$
	Densidad del suelo	ρ_g	1800	kg m^{-3}
	Difusividad térmica	α_g	7.1×10^{-7}	m^2s^{-1}
	Temperatura inalterada del suelo	T_g	26.2	$^{\circ}\text{C}$
Tubería (PEAD)	Radio interno de tubería	r_i	0.01095	m
	Radio externo de tubería	r_o	0.01335	m
	Conductividad térmica de la tubería	λ_p	0.45	$\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$
Agua	Conductividad térmica del agua	λ_w	0.58	$\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$
	Capacidad calorífica específica del agua	$C_{p,w}$	4185.5	$\text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$
	Densidad del agua	ρ_w	998	kg m^{-3}
	Tasa de flujo	F	15	l min^{-1}
Pila (concreto)	Conductividad térmica de la pila	λ_b	1.4	$\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$
	Capacidad calorífica específica de la pila	$C_{p,b}$	4100	$\text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$
	Densidad de la pila	ρ_b	2400	kg m^{-3}

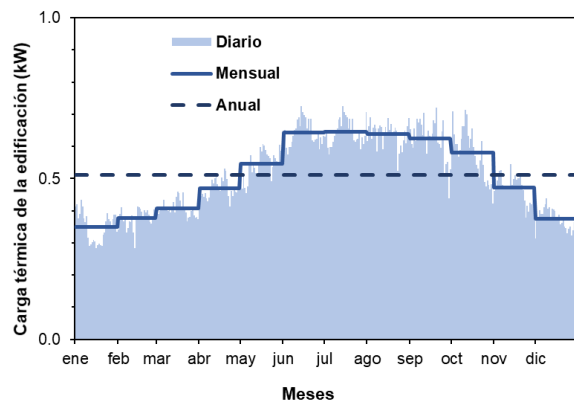


Figura 5. Gráfica de cargas térmicas durante un año

4.4 Consideraciones adicionales para la modelación analítica del comportamiento térmico de una pila de energía

Los métodos analíticos utilizados para calcular la temperatura en el fluido y en la periferia de la pila de energía consideran que el elemento trabaja de forma individual. El sistema está propuesto para operar en los meses de máxima temperatura, inyectando calor al suelo (enfriamiento de la edificación). Para ello, se ingresa el fluido a la pila a una temperatura mayor a la temperatura inalterada del suelo, este recorre los bucles intercambiando energía térmica con el suelo que lo rodea y finalmente regresa a la superficie a una temperatura menor. Se considera que la bomba de calor opera a su máxima eficiencia a una temperatura de 31°C (valor típico). Así, es importante verificar que el aumento de temperatura debido a la operación del sistema no exceda ese valor.

Los modelos de fuente lineal infinita (ILSM), fuente lineal finita (FLSM) y fuente cilíndrica infinita (ICSM) se programaron en lenguaje R para determinar la variación de

temperatura en el fluido intercambiador de calor y en la periferia de la pila de energía.

5 RESULTADOS DEL ANÁLISIS

En las Figuras 6 y 7 se muestran los cambios de temperatura en el fluido de entrada, salida y el promedio medido durante un año. Se observa que, en los días de carga térmica máxima, se produce un aumento de temperatura de hasta 5.4°C . Así, considerando una temperatura inicial de 26.2°C (temperatura media ambiente), se obtiene una temperatura máxima en el fluido igual a 31.6°C . De estos resultados se advierte que, durante la operación del sistema existe un incremento de temperatura respecto a la temperatura de referencia. Siendo los meses de mayor carga térmica el periodo donde se presentan las temperaturas máximas, tanto en la entrada como en la salida del fluido.

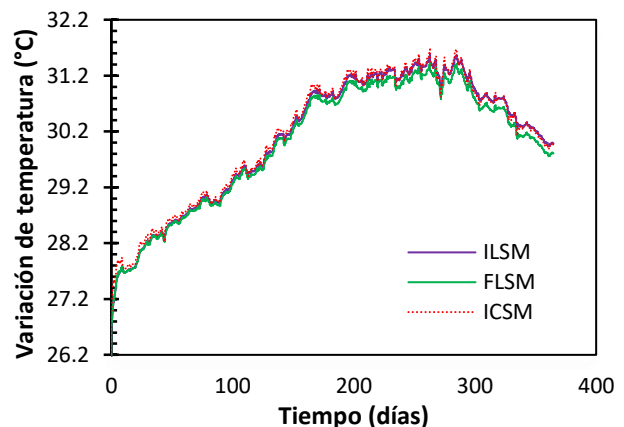


Figura 6. Variación de temperatura en el fluido de entrada durante un año de funcionamiento. Nota: ILSM = Modelo de fuente lineal infinita; FLSM = Modelo de fuente lineal finita; y ICSM = Modelo de fuente cilíndrica infinita.

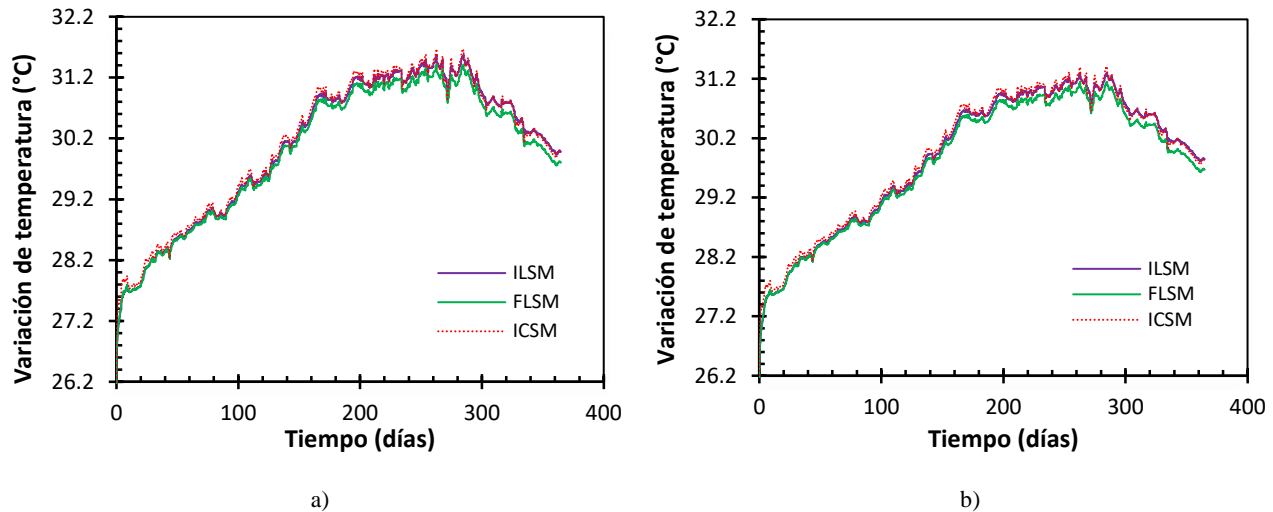


Figura 7. Variaciones de temperatura promedio durante un año de funcionamiento calculadas en: a) salida del fluido, y b) la periferia de la pila. Nota: ILSM = Modelo de fuente lineal infinita; FLSM = Modelo de fuente lineal finita; y ICSM = Modelo de fuente cilíndrica infinita.

En la Figura 8 se muestran a detalle los valores máximos de la variación de temperatura promedio obtenidos con los modelos de fuente lineal infinita (ILSM), lineal finita (FLSM) y cilíndrica infinita (ICSM). Los modelos ILSM y ICSM presentan variaciones de temperatura similares, que son mayores que las calculadas con el modelo de fuente lineal finita (FLSM). Esto se debe a que, para escalas de tiempo pequeñas, los modelos infinitos desprecian la presencia del suelo circundante y las implicaciones que tiene la extensión finita en un intercambiador de calor real. Asimismo, los modelos de fuente infinitos (lineal y cilíndrico infinitos) tienden a ser más conservadores.

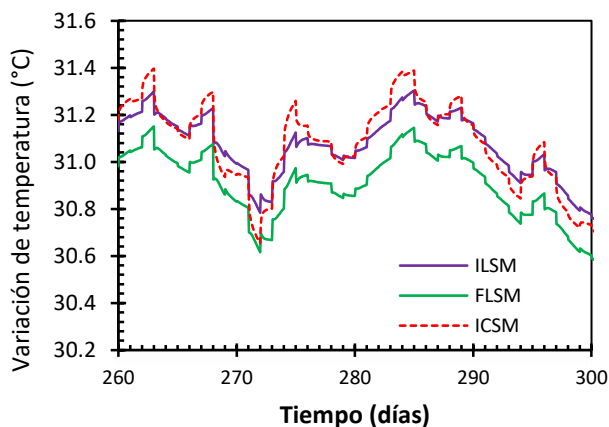


Figura 8. Valores máximos de la variación de temperatura promedio en el fluido. Nota: ILSM = Modelo de fuente lineal infinita; FLSM = Modelo de fuente lineal finita; ICSM = Modelo de fuente cilíndrica infinita.

De forma análoga, empleando los modelos de ILSM, FLSM y ICSM se calculó la variación de temperatura en la periferia de la pila. En la Figura 9a se muestran los valores obtenidos a lo largo de un año. Se observa que, el incremento máximo se presenta en los meses donde existe mayor carga térmica y tiene un valor igual a 4.5°C .

En la Figura 9b se muestran los valores máximos de temperatura obtenidos con los modelos de fuente lineal infinita (ILSM), fuente lineal finita (FLSM) y fuente lineal cilíndrica infinita (ICSM). Al igual que en el caso anterior (Figura 8), se observa que los modelos ILSM y ICSM tienen valores similares, mientras que el modelo FLSM supone valores ligeramente menores. En general, los modelos infinitos no consideran la longitud finita de la pila y el suelo que la rodea. Por lo tanto, el método de fuente lineal finita presenta una mejor estimación de la variación de temperatura real. Considerando la variación de temperatura en la periferia de la pila y la temperatura ambiente de referencia igual a 26.2°C , se determinó que la temperatura máxima en los meses de mayor demanda es igual a 30.7°C .

En la Figura 10 se observa la variación de temperatura en el fluido de entrada y salida obtenida con el modelo de fuente lineal finita (FLSM). La inyección de calor de la bomba se realiza con una temperatura que aumenta desde 26.2°C de referencia hasta 31.7°C en los meses de máxima demanda. Mientras que la extracción del fluido presenta una disminución de temperatura de hasta 0.5°C respecto a la temperatura entrada.

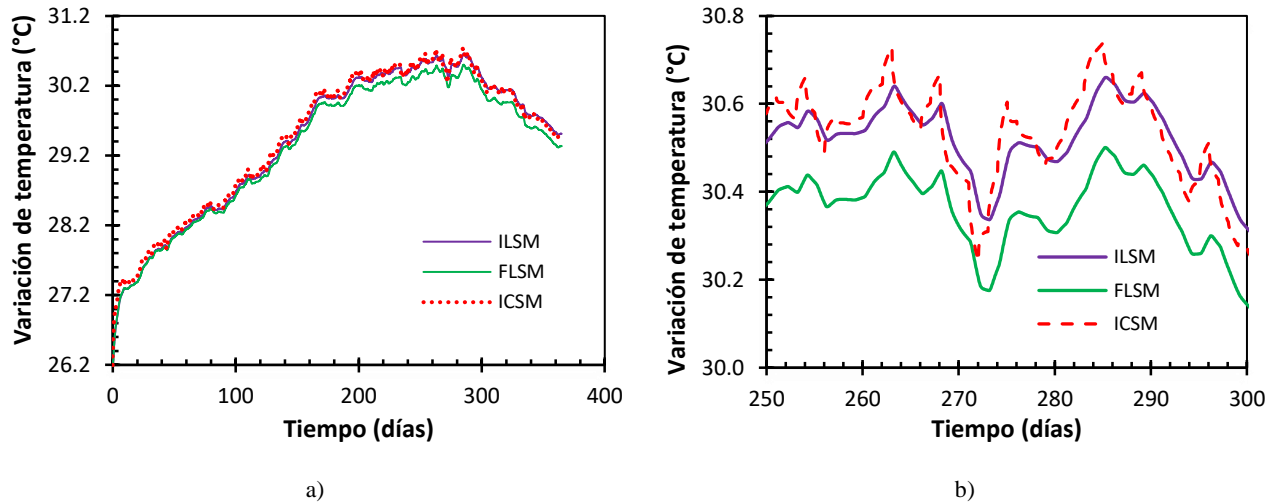


Figura 9. a) Variaciones de temperatura promedio durante un año de funcionamiento calculadas en la periferia de la pila, y b) valores máximos de la variación de temperatura en la periferia de la pila. Nota: ILSM = Modelo de fuente lineal infinita; FLSM = Modelo de fuente lineal finita; y ICSM = Modelo de fuente cilíndrica infinita.

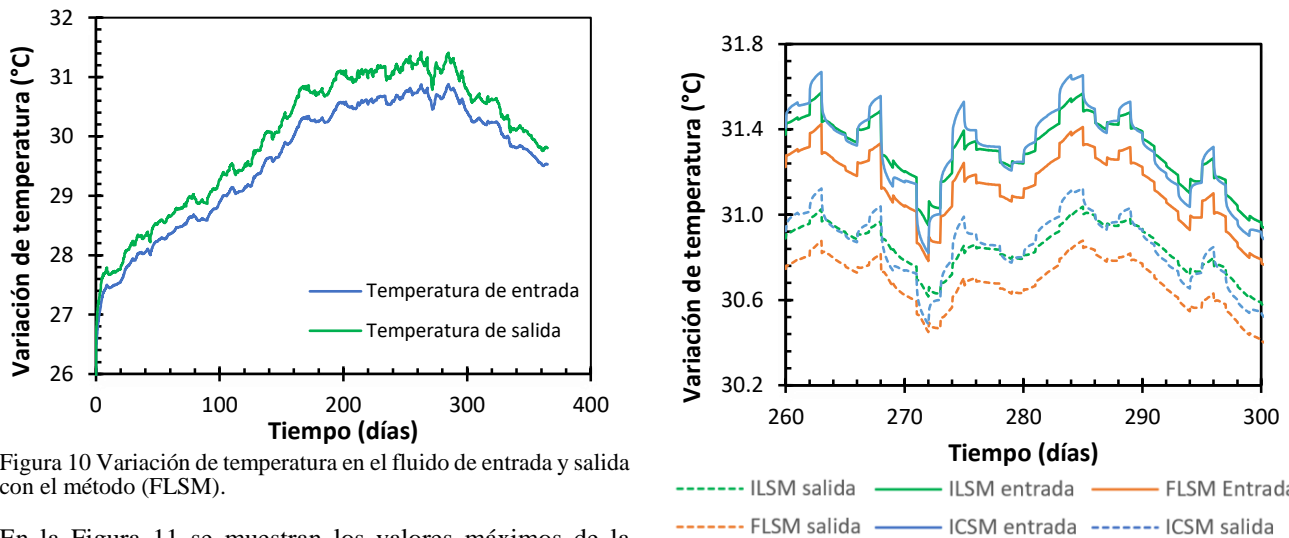


Figura 10 Variación de temperatura en el fluido de entrada y salida con el método (FLSM).

En la Figura 11 se muestran los valores máximos de la variación de temperatura en la entrada y salida del fluido, obtenidos con los modelos de fuente lineal infinita (ILSM), fuente lineal finita (FLSM) y fuente cilíndrica infinita (ICSM) respectivamente. Se observa que, la diferencia de temperatura en el fluido de salida respecto al de entrada es de 0.5 °C aproximadamente. Este cambio de temperatura se mantiene a lo largo de los 365 días y está relacionado directamente con el caudal del fluido portador de calor. La diferencia entre las temperaturas de entrada y salida es baja. Para aumentar el cambio de temperatura, es posible disminuir el caudal que alimenta el modelo, siempre y cuando éste pertenezca al rango recomendado por el fabricante de la bomba. También es posible realizar conexiones en serie de dos pilas o más, lo que multiplica la diferencia de temperatura y proporciona un mayor intercambio de calor. No obstante, esto produce un aumento en las pérdidas por fricción de la tubería, situación que debe ser tomada en cuenta.

Figura 11. Valores máximos de la variación de temperatura en el fluido de entrada y salida con los métodos (ILSM), (FLSM) y (ICSM). Nota: ILSM = Modelo de fuente lineal infinita; FLSM = Modelo de fuente lineal finita; y ICSM = Modelo de fuente cilíndrica infinita.

En la Figura 12 se muestra una gráfica con las temperaturas calculadas con el modelo de fuente lineal finita (FLSM), modificando el caudal a 5 lpm, lo que produce una disminución de temperatura en la salida del fluido de 2°C, esto resulta satisfactorio en cuanto a la eficiencia del sistema intercambiador de calor.

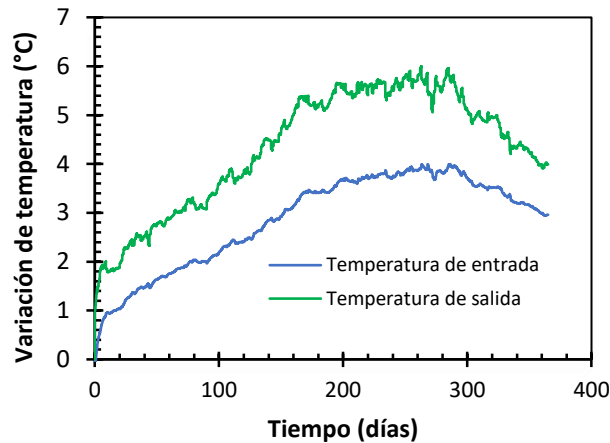


Figura 12 Variación de temperatura en el fluido de entrada y salida con el método FLSM (Modelo de fuente lineal finita).

6 CONCLUSIONES

En este artículo se presentó una metodología basada en modelos analíticos para simular el comportamiento térmico de una pila de energía construida en el estado de Jalisco. Se analizó la variación de temperatura en el fluido conductor de calor de la pila de energía y su periferia mediante tres modelos analíticos: a) fuente lineal infinita (ILSM), b) fuente lineal finita (FLSM), y c) fuente cilíndrica infinita (ICSM). Los distintos modelos se programaron en lenguaje R. A continuación, se presentan las conclusiones derivadas de los análisis realizados:

- Se comprobó que los métodos analíticos de fuente lineal infinita y fuente cilíndrica infinita sobreestiman los valores máximos de temperatura. Dicho comportamiento se debe a que no consideran la longitud finita de la pila y el suelo que la rodea, llevando a soluciones conservadoras.
- Se demostró que la temperatura en el fluido y en las paredes de la pila aumenta cuando el sistema está trabajando durante los meses de máxima demanda energética.
- Finalmente, se verificó que la metodología descrita permite estimar adecuadamente el comportamiento térmico de pilas de energía y representa una importante herramienta para el diseño e implementación de esta tecnología en el país.

REFERENCIAS

- Bourne-Webb, P. J., Burlon, S., Javed, S., Kürten, S., y Loveridge, F. (2016). "Analysis and design methods for energy geostructures". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 65: 402-419.
- Carslaw, H. S. 1., y Jaeger, J. C. (1959). *Conduction of heat in solids*. Segunda edición. Oxford: Clarendon Press.
- Fadejev, J., Simson, R., Kurnitski, J. y Haghghat, F. (2017). "A review on energy piles design, sizing and modelling". *Energy*, 122: 390-407.

- Groot Viana, M. (2017). *Comportamiento Termodinámico de Pilotes Prefabricados*. [Tesis de doctorado, Universidad Politécnica de Valencia, España].
- Ingersoll, L. R. y Plass, H. J. (1948). "Theory of the Ground Pipe Heat Source for the Heat Pump". *ASHVE Transactions*, 54: 339-348.
- Ingersoll, L., Adler, F., Plass, H. e Ingersoll, A. C. (1951). "Theory of Earth Heat Exchangers for the Heat Pump". *ASHVE Transactions* 57: 167-188.
- Ingersoll, L. R., Zobel, O. J., e Ingersoll, A. C. (1954). *Heat Conduction with Engineering, Geological and Other Applications* (325 p). McGraw-Hill.
- Kavanaugh, S. y Rafferty, K. (2014). *Geothermal Heating and Cooling. Design of Ground-Source Heat Pump Systems*. ASHRAE: Atlanta, GA: 420 p.
- Laloui, L., Nuth M. y Vulliet L. (2015). Capítulo 16. *Experimental and numerical investigations of the behavior of a heat exchanger pile*. Ground Improvement Case Histories, Butterworth-Heinemann. 515-535.
- Laloui, L., y Rotta Loria, A. F. (2020). "Analysis and Design of Energy Geostructures. Theoretical Essentials and Practical Application". Academic Press.
- Li, M., y Lai, A. C. (2015). "Review of analytical models for heat transfer by vertical ground heat exchangers (GHEs): A perspective of time and space scales". *Applied Energy*, 151: 178- 191.
- López-Acosta N. P. y Barba-Galdámez D. F. (2022). Reporte fotográfico: Acompañamiento en la construcción de una pila de reacción equipada para funcionar como pila de energía para la ejecución de un Ensayo de Respuesta Térmica (TRT) en la zona costera del Estado de Jalisco.
- Loveridge, F. y Powrie, W. (2013). Temperature response functions (G-functions) for single pile heat exchangers. *Energy*, 57: 554-564.
- Loveridge, F., Powrie, W., y Nicholson, D. (2014). "Comparison of two different models for pile thermal response test interpretation". *Acta Geotechnica*, 9(3): 367-384
- Murphy, K. D., McCartney, J. S. y Henry, K. S. (2015). Evaluation of thermo- mechanical and thermal behavior of full-scale energy foundations. *Acta Geotechnica*, 10 (2): 179-195.
- Park, S., Lee, D., Choi, H. J., Jung, K. y Choi, H. (2015). Relative constructability and thermal performance of cast-in-place concrete energy pile: Coil-type GHEX (ground heat exchanger). *Energy*, 81: 56-66.
- Servicio Meteorológico Nacional – SMN. (2020). *Sistema de información climática CLICOM*. Recuperado el 4 de agosto de 2020 de <http://clicom-mex.cicese.mx/>.
- Spitler, J. D. y Bernier M. (2016). Vertical borehole ground heat exchanger design methods. *Woodhead Publishing*: 29-61.
- Zeng, H. Y., Diao, N. R., & Fang, Z. H. (2002). "A finite line-source model for boreholes in geothermal heat exchangers". *Heat Transfer - Asian Research*, 31(7): 558-567.