

Dimensionado de intercambiadores de calor horizontales enterrados para instalaciones de energía geotérmica de muy baja entalpía. Un caso práctico.

Pino, J.^a, *, Martínez, M. A.^a, Andújar, J. M.^a, Barragán, A. J.^a, Aquino, A.^a, Enrique, J. M.^a

^a Centro de Investigación en Tecnología, Energía y Sostenibilidad (CITES), Universidad de Huelva, Campus "La Rábida", Huelva, España.

To cite this article: Pino, J., Martínez, M.A., Andújar, J.M., Barragán, A.J., Aquino, A., Enrique, J. M. 2023. Sizing of horizontal buried heat exchangers, for very low enthalpy geothermal energy facilities. A case study. XLIV Jornadas de Automática, 138-143. <https://doi.org/10.17979/spudc.9788497498609.138>

Resumen

En la actualidad, un parámetro fundamental para el correcto dimensionamiento de las instalaciones de energía geotérmica de muy baja entalpía (VLGE), sobre todo en aquellas con enterramiento horizontal, es conocer el valor correcto de la difusividad térmica (α) del terreno (ratio entre la capacidad de conducción y la capacidad térmica, expresada en m^2/s) a la profundidad a la que se realiza el enterramiento del intercambiador geotérmico. Son numerosos los métodos utilizados para su cálculo, tanto de forma teórica y aproximada, como de forma más exacta, a través de costosos ensayos realizados en el propio terreno donde se va a enterrar el intercambiador. Raramente el cálculo teórico se aproxima a la realidad, provocando que la instalación diseñada nunca llegue a funcionar de forma correcta. Esto es especialmente grave si la instalación va situada, como es habitual, debajo del edificio o vivienda, pues no admite actuaciones de mejora a posteriori. Este trabajo demuestra de forma práctica, con un ejemplo real, como la utilización de un sistema de medición de temperatura del terreno in situ, de muy bajo costo, como el diseñado y expuesto en el artículo, proporciona una herramienta útil y precisa para el dimensionado correcto de este tipo de instalaciones. El método desarrollado se compara con el teórico y se cuantifica el error.

Palabras clave: temperatura del suelo, energía geotérmica de muy baja entalpía, difusividad térmica, transferencia de calor del suelo.

Sizing of horizontal buried heat exchangers, for very low enthalpy geothermal energy facilities. A case study.

Abstract

Currently, a fundamental parameter for the correct sizing of very low enthalpy geothermal energy (VLEGE) facilities especially in those with horizontal burial, is to know the right value of the thermal diffusivity (α) of the ground (ratio between the conduction capacity and the thermal capacity, expressed in m^2/s) at the depth at which the geothermal heat exchanger is to be buried. Numerous methods are used for its calculation, both theoretical and approximate, as well as more accurate, through costly tests carried out in the ground where the exchanger is to be buried. Rarely does the theoretical calculation come close to reality, causing the designed facility to never work properly. This is especially serious if the facility is located, as is usual, under the building or dwelling, as it does not allow for subsequent improvement actions. This work demonstrates in a practical way, with a real example, how the use of a very low-cost in situ ground temperature measurement system, such as the one designed and presented in the article, provides a useful and accurate tool for the right sizing of this type of facilities. The developed method is compared with the theoretical one, and the error is quantified.

Keywords: ground temperature, very low enthalpy geothermal energy (VLEGE), thermal diffusivity, ground heat transfer.

1. Introducción

La energía geotérmica de muy baja entalpía (*very low enthalpy geothermal energy*, VLEGE) procede del calor acumulado en las capas más superficiales de la corteza terrestre. Una instalación de VLEGE es aquella que intercambia este calor con el terreno para ser aprovechado, generalmente para climatización, pues la temperatura de intercambio es de tan solo unas pocas decenas de grados. Se demuestra que conforme se va profundizando desde la superficie, la temperatura del suelo se va aproximando a la temperatura media ambiente del lugar (Andújar et al., 2016), de modo que aproximadamente a partir de 10 m de profundidad y hasta 30 m (a partir de esta profundidad, la temperatura se incrementa a razón de 3 °C por cada 100 metros (Buzăianu et al., 2015; Graf et al., 2016) la temperatura del suelo es constante durante todo el año e igual a la temperatura media ambiente del lugar. Así, por ejemplo, en un clima subtropical como el español, donde, en general, la temperatura media anual es benigna, la VLEGE puede ser una fuente excelente de energía renovable para climatización. Esto es, si se es capaz de llevar calor desde el suelo a la vivienda en invierno y, al revés, calor desde la vivienda al suelo en verano, se garantiza una temperatura ambiente en la vivienda próxima a la media anual del lugar. Dependiendo de la misma, el apoyo térmico necesario y, por tanto, el gasto energético necesario, para conseguir la temperatura de confort en la vivienda, puede ser de sólo unos pocos grados. Como ejemplo, en una ciudad donde la temperatura media anual sea de 20° C, una instalación de VLEGE correctamente dimensionada, enterrada a solo 5 m de profundidad, puede proporcionar a una vivienda una temperatura ambiente todo el año de 20° C \pm 2° C (Andújar et al., 2016).

Para el correcto dimensionado de una instalación de VLEGE, es fundamental conocer con la mayor precisión posible la tasa de intercambio de calor del terreno con los colectores utilizados como intercambiadores. Esto es, siendo la temperatura del suelo en dos ubicaciones de igual temperatura media anual, análoga a la misma profundidad, el correcto dimensionado de una instalación VLEGE puede ser muy diferente en ambos casos. La razón es que para cada ubicación depende de la relación entre la conducción del terreno respecto al calor que almacena, esto es, qué tanto domina el fenómeno conductivo sobre el de almacenamiento. El parámetro que informa sobre esta propiedad del terreno es la difusividad térmica (α , m²/s) (Parker W. J. et al., 1961), con lo cual es un parámetro clave para el correcto dimensionado de una instalación de VLEGE. En consecuencia, los dos parámetros fundamentales a tener en cuenta para un diseño VLEGE, son la temperatura del suelo a la profundidad z que se posicionen los colectores y la difusividad térmica del terreno a esa profundidad (α_z).

Dado que la difusividad térmica del suelo depende del tipo de suelo, de la densidad y del contenido de agua, la gama de valores que puede tomar es muy amplia. Esto conlleva a que la difusividad térmica tome valores distintos según la zona donde se encuentre. Por ejemplo, (Taylor & Ashcroft, 1972) obtuvieron en sus estudios que la difusividad térmica de la tierra varía desde 1,72 \times 10⁻⁶ m²/s a 3 \times 10⁻⁶ m²/s; sin embargo, (Hillel, 1982) determinó que para un suelo arenoso con una

densidad de 1,46 \times 10³ kg/m³, la difusividad térmica varía entre 0,3 \times 10⁻⁶ m²/s a 1,1 \times 10⁻⁶ m²/s.

Por otro lado, la medida de la difusividad térmica del suelo no es fácil, pues si bien puede hacerse con precisión en laboratorio a partir de una probeta del suelo (Fujii et al., 2009) o, en el terreno, mediante un test de respuesta térmica (Gehlin, 2002), ambos procedimientos son lentos, caros e imprácticos desde el punto de vista de una instalación de VLEGE que va asociada al ritmo de una construcción (edificio, vivienda, etc.).

En virtud de lo anterior, se ha realizado mucha investigación tendente a encontrar una forma rápida, práctica y barata que permita medir o estimar la difusividad térmica con una precisión razonable. Así, (Koo & Song, 2008) realizaron una estimación de la difusividad térmica (α) comparando los datos de temperatura medidos en diferentes pozos, con una ecuación diferencial en derivadas parciales del tipo parabólica, que describía la distribución del calor (o variaciones de la temperatura) en una región del suelo, a lo largo del transcurso del tiempo. Otro análisis teórico puede encontrarse en (Ciriello et al., 2015).

En lo que se refiere a la medida de la temperatura del suelo, se suelen utilizar sondas de temperatura. Así por ejemplo, (Smerdon et al., 2003) relacionan la tasa de cambio de temperatura media en cada nivel de profundidad de una sonda enterrada, con la temperatura del aire en la superficie. Por otro lado, (Vidal et al., 2012) proponen una sonda de temperatura enterrada a dos metros de profundidad. Esta sonda consiste en sensores de temperatura del tipo Pt100, ubicados a 50 cm uno de otro.

En la práctica, lo que se suele hacer es utilizar datos de conductividad térmica tabulados procedentes de medidas y cálculos más o menos empíricos. Así, la Tabla 1 (Hillel, 1982) muestra, en función del tipo de terreno, un rango de valores de la conductividad térmica, capacidad calorífica volumétrica y difusividad térmica. Por supuesto, esto son datos aproximados, pues un terreno puede tener una composición y compactación a una profundidad, y variar considerablemente a otra. Más aún, si entra en juego la humedad o incluso una corriente de agua.

En base al análisis llevado a cabo, el problema que aborda este trabajo y ahí radica su novedad, es encontrar un método rápido, fiable y barato que permita la medida de la difusividad térmica del suelo a una profundidad z , (α_z), adaptado a los requerimientos de una obra en construcción. Como se verá, trabajar con un dato erróneo puede dar lugar a una instalación de VLEGE ineficiente, lo cual como se ha dicho, no suele ser solucionable a posteriori.

2. Materiales y métodos

2.1. Hardware desarrollado

El objetivo de la investigación consistió en el diseño e implementación de un dispositivo que, junto a una metodología, también diseñada, permitiera de forma fiable, barata y adecuada a los tiempos de una obra en construcción, la determinación de la difusividad térmica del terreno. Para ello se experimentó in situ en el recinto del Centro de Investigación en Tecnología, Energía y Sostenibilidad (CITES) de la Universidad de Huelva.

Tabla 1: Conductividad térmica, capacidad calorífica volumétrica y difusividad térmica para diferentes tipos de suelo.

Tipo de roca	Conductividad térmica (W/mK)			Capacidad térmica volumétrica (MJ/m ³ K)	Difusividad térmica (10 ⁻⁶ m ² /s)		
	Min.	Typic.	Max.		Min.	Typic.	Max.
Basalto	1,2	1,7	2,3	2,6	0,5	0,65	0,88
Diorita	2	2,6	2,9	2,9	0,6	0,90	1
Gabro	1,7	1,9	2,5	2,6	0,65	0,73	0,96
Granito	2,1	3,4	4,1	3	0,7	1,13	1,37
Peridotita	3,8	4	5,3	2,7	1,41	1,48	1,96
Gneiss	1,9	2,9	4	2,4	0,79	1,21	1,67
Marmol	1,3	2,1	3,1	2	0,65	1,05	1,55
Mica	1,5	2	3,1	2,2	0,68	0,91	1,41
Esquisto sedimentario	1,5	2,1	2,1	2,5	0,6	0,84	0,84
Caliza	2,5	2,8	4	2,4	1,04	1,17	1,67
Marga	1,5	2,1	3,5	2,3	0,65	0,91	1,52
Cuarcita	3,6	6	6,6	2,2	1,64	2,73	3
Sal	5,3	5,4	6,4	1,2	4,42	4,5	5,33
Arenisca	1,3	2,3	5,1	2,8	0,46	0,82	1,82
Limolitas y argilitas	1,1	2,2	3,5	2,4	0,46	0,92	1,46
Grava seca	0,4	0,4	0,5	1,6	0,25	0,25	0,31
Grava saturada de agua	1,8	1,8	1,8	2,4	0,75	0,75	0,75
Arena seca	0,3	0,4	0,55	1,6	0,19	0,25	0,34
Arena saturada de agua	1,22	3,8	5,4	2,07	0,59	1,85	2,62
Arcilla/limo seco	0,4	0,5	1	1,6	0,25	0,31	0,62
Arcilla/limo saturado de agua	0,9	1,7	2,3	3,4	0,26	0,50	0,68
Turba	0,2	0,4	0,7	3,8	0,05	0,10	0,18

En la Figura 1 se muestra la distribución teórica de la temperatura respecto a la profundidad en el subsuelo del CITES a lo largo de las cuatro estaciones del año. Se puede observar cómo todas las curvas convergen alrededor de los 20 °C a unos 15 metros, esta temperatura coincide con la media anual del lugar.

El experimento consistió en primera instancia, en diseñar, implementar y enterrar una sonda de temperatura hasta 16 metros de profundidad, utilizando para ello una barrena de 96 milímetros de diámetro, que perforó el terreno. La sonda de temperatura (Figura 2), se construyó con un tubo de PVC de 16 metros de longitud y 25 mm de diámetro. En su interior, se colocaron 19 sensores de temperatura (ST1-ST19). Estos sensores poseen salida digital y protocolo de comunicación 1-Wire® (Andújar et al., 2010).

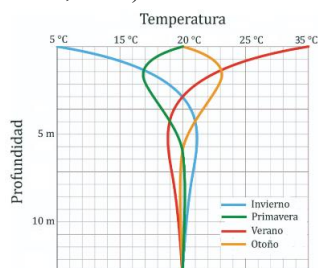


Figura 1: Distribución natural teórica de la temperatura del suelo en el CITES. Adaptado de Girodgeotermia.com.

Los STs están espaciados 50 cm los primeros dos metros de profundidad y, a partir de ahí, un metro, hasta los dieciséis de profundidad. Los sensores están adheridos a un anillo de metal para favorecer la transmitancia térmica entre el terreno y el sensor (Figura 2). Todas las conexiones del bus con cada sensor de temperatura están embutidas en un gel de tipo polimérico, aislante y auto sellante, que envuelve todo el espacio y garantiza una protección IP68.

La Figura 3 muestra el canal de instrumentación y control diseñado para la adquisición de las medidas de temperatura de la sonda, el cual es una actualización del realizado en (Andújar et al., 2016).



Figura 2: Distribución de los sensores a lo largo del tubo de PVC en los primeros 3 metros.

Atendiendo a la Figura 3, los 19 STs se conectan vía bus 1-Wire®, que es un bus de bajo coste para comunicaciones digitales sobre cable de par trenzado. Cada ST tiene un único código de 64 bits, por lo que es posible conectar varios STs a un mismo bus 1-Wire® de forma rápida, simple y barata. Utilizando el código de cada ST, se obtiene la medición de temperatura de cada sensor desde el sistema de adquisición, procesamiento de datos y visualización, que no es más que un PC con una tarjeta de adquisición de datos conectado a internet. Como interface de usuario, se utiliza un instrumento virtual desarrollado al efecto. En este caso, por estar dentro de la cobertura de la red wifi del CITES, la sonda de temperatura es un dispositivo más conectado. No obstante, para actuaciones reales en obra, donde no haya esta facilidad de conexión, el sistema está preparado para trabajar vía GSM/GPRS.

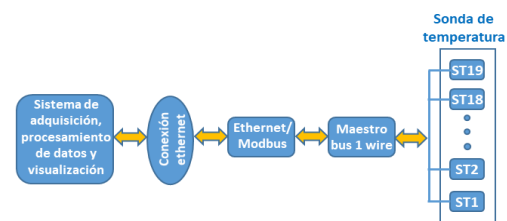


Figura 3: Diagrama de bloques del sistema desarrollado para medir la temperatura del suelo.

Los datos obtenidos de la sonda, son exportados a un archivo de texto plano para su almacenamiento y posterior análisis.

2.2 Metodología de la medición

Expresiones que proporcionan la temperatura del suelo a cualquier profundidad z hay muchas en la literatura, por ejemplo la que se obtiene en (Sepaskhah & Boersma, 1979) a partir de la solución de la ecuación del calor. Sin embargo, el problema de todas estas expresiones es que precisan del conocimiento de la difusividad térmica a esa profundidad (α_z). La investigación desarrollada por los autores, afronta el problema desde otro punto de vista, esto es, si gracias al sistema desarrollado presentado en 2.1, es posible conocer con precisión la temperatura del suelo a una profundidad dada, y se conoce la composición del suelo, determinado en los ensayos geotécnicos necesarios y preceptivos en cualquier construcción, se puede calcular perfectamente la difusividad térmica del terreno. Este fue el procedimiento llevado a cabo en (Andújar et al., 2016) que dio lugar a la expresión (1).

$$\alpha_z = \frac{\pi}{T} \left(\frac{z}{\ln \frac{T_p}{T_z - T_m}} \right)^2 \quad (1)$$

La ecuación (1) informa que es posible calcular la difusividad del terreno a la profundidad z en metros a partir de:
 T : Los ciclos anuales de la temperatura del suelo en superficie y próximo a ella, como es el caso de la profundidad de interés de la VLEGE, siguen un patrón de función armónica simple. Por tanto, T representa el periodo de la senoide del ciclo de temperatura anual: $3,1557 \times 10^7$ s.

T_p : Pico de la onda de temperatura en superficie. Por ejemplo, si la temperatura media del mes más frío es de 10°C y del mes más caluroso de 35°C , $T_p = 12,5^\circ\text{C}$.

T_z : Temperatura medida por la sonda desarrollada a la profundidad z .

T_m : Temperatura media en el sitio.

Así pues, aplicando (1) con los datos obtenidos con la sonda de temperatura desarrollada, se calculó el α_z del terreno a la profundidad $z = 4$ m. El valor obtenido fue de $1,4966 \times 10^{-6}$ m²/s.

3. Caso de estudio

En lo que sigue, se expone un ejemplo de dimensionado de una instalación VLEGE real con enterramiento horizontal. Teniendo en cuenta que el objetivo de este artículo no es el diseño preciso de una instalación VLEGE, sino poner de manifiesto el efecto que tiene en ello una elección incorrecta del coeficiente de difusividad, se va a utilizar como metodología de diseño la, quizás, más usual en la práctica. En concreto, la aconsejada por la *International Ground Source Heat Pump Association* (IGSHPA, 2023).

El método IGSHPA para el diseño de intercambiadores enterrados está basado en la teoría de la fuente lineal de Kelvin (Carslaw & Jaeger, 1959), la cual viene a decir que el colector se comporta como una fuente lineal en un medio homogéneo con propiedades térmicas constantes donde, la variación de

temperatura alrededor de la fuente lineal en el espacio y el tiempo, se debe exclusivamente al flujo radial de calor.

El caso de estudio es una vivienda de 90 m^2 con semisótano que estaría ubicada en el CITES, con objeto de poder hacer uso de los valores medidos en esta investigación. Respecto de la profundidad de enterramiento de los colectores de la instalación VLEGE, se optará por la opción más barata, esto es, aprovechar la excavación necesaria en obra para la construcción de la vivienda con semisótano, lo cual implica una profundidad de 4 m sobre la que se ubicará la losa de hormigón, encima de la cual se construirá la vivienda. El caso de estudio analizará dos escenarios de dimensionado, el usual, esto es, conocido el tipo de terreno aplicar los valores de la Tabla 1, y el propuesto en esta investigación en base al conocimiento de la temperatura del terreno.

En base a las muestras de terreno obtenidas mediante la barrena que permitió enterrar la sonda, el tipo de terreno de la Tabla 1 que más se próxima al encontrado, es arena saturada de agua. Para este suelo, la difusividad térmica varía entre los $0,59 \times 10^{-6}$ m²/s y los $2,62 \times 10^{-6}$ m²/s. Por tanto, se utilizará el valor intermedio de $\alpha_{4m(tablas)} = 1,85 \times 10^{-6}$ m²/s. Recordar que, según esta investigación $\alpha_{4m(medida)} = 1,4966 \times 10^{-6}$ m²/s.

Aplicando pues la metodología IGSHPA y el método ASHRAE (Kavanaugh S.P., et al., 1997) concretado para una bomba de calor geotérmica práctica (teniendo en cuenta su potencia de calefacción y refrigeración, así como sus COP respectivos en cada modo), la longitud del tubo intercambiador con el terreno de la VLEGE se calcula para calefacción y refrigeración mediante las expresiones (2) y (3), respectivamente.

$$L_{cal} = \frac{P_{cal} \frac{COP_{cal} - 1}{COP_{cal}} \cdot (R_t + R_s \cdot F_{uso(cal)})}{T_{L(4m)} - T_{MIN}} \quad (2)$$

$$L_{ref} = \frac{P_{ref} \frac{COP_{ref} + 1}{COP_{ref}} \cdot (R_t + R_s \cdot F_{uso(ref)})}{T_{MAX} - T_{H(4m)}} \quad (3)$$

Donde:

L_{cal} y L_{ref} (m) son, respectivamente la longitud del colector necesario para calefacción y refrigeración.

P_{cal} y P_{ref} (W) son, respectivamente, las potencias de la bomba de calor en calefacción y refrigeración.

COP_{cal} y COP_{ref} (adimensional) son, respectivamente los COP de la bomba de calor en calefacción y refrigeración.

R_t (m.K/W) es la resistencia térmica de las paredes del material con el que están hechas las tuberías del colector.

R_s (m.K/W) es la resistencia térmica de los intercambiadores, que depende del tipo de tubería, del tipo de suelo, del tipo de configuración del intercambiador de calor enterrado y del tiempo de funcionamiento de éste. Este valor es el inverso de la conductividad térmica k (W/ m.K).

$F_{uso(cal)}$ y $F_{uso(ref)}$ (adimensional) son, respectivamente, el factor de uso de la bomba en calefacción y refrigeración. Esto es, el calor que se va a extraer del suelo en modo calefacción y el que se va a inyectar al suelo en modo refrigeración. El factor de uso influye de forma notable en el valor de R_s . Para su cálculo hay que conocer el valor de la carga térmica de calefacción y de refrigeración, el número de horas mensuales de uso, la situación de la vivienda, etc. En este ejemplo se ha

utilizado un valor de 0,1199 en calefacción y de 0,176 en refrigeración.

T_L y T_H son, respectivamente, la temperatura media mensual mínima y máxima del terreno a 4 m. En este caso, han sido medidas por la sonda de temperatura y tienen un valor de 15,56°C y 24,02°C, respectivamente

T_{MIN} es la temperatura mínima media de diseño del líquido calor-portante a la entrada/salida del colector geotérmico, salida/entrada de la bomba de calor.

T_{MAX} es la temperatura máxima media de diseño del líquido calor-portante a la entrada/salida del colector geotérmico, salida/entrada de la bomba de calor.

3.1 Bomba de calor

En función del lugar de la instalación, requerimientos de confort térmico, calidad de aislamientos de vivienda, usos, ocupación y superficie, se calculan los requerimientos de potencia calorífica y frigorífica, así como el rango de temperaturas de entrada en ciclos de frío y calor del líquido

$$T_{salida(cal)} = T_{entrada(cal)} - \frac{P_{cal} \frac{COP_{cal} - 1}{COP_{cal}}}{C_{esp} \cdot Q} \quad (4)$$

$$T_{salida(ref)} = T_{entrada(ref)} + \frac{P_{ref} \frac{COP_{ref} + 1}{COP_{ref}}}{C_{esp} \cdot Q} \quad (5)$$

Donde:

$T_{salida(cal)}$ y $T_{salida(ref)}$ son, respectivamente, las temperaturas de salida del fluido calor-portante de la bomba en calefacción y refrigeración.

$T_{entrada(cal)}$ y $T_{entrada(ref)}$ son, respectivamente, las temperaturas de entrada del fluido calor-portante de la bomba en calefacción y refrigeración. Para que el COP de la bomba sea el máximo, interesa que en calefacción sea el más alto posible (12 °C según la Tabla 2); sin embargo, en refrigeración, interesa el más bajo (30 °C según la Tabla 2).

P_{cal} y P_{ref} (W) son, según la Tabla 2, 9,5 kW y 13,5 kW respectivamente.

COP_{cal} y COP_{ref} son, según la Tabla 2, 5 y 4 respectivamente.

C_{esp} es el calor específico del fluido calor-portante. Por ser de uso común se utilizará el etilenglicol, cuyo $C_{esp} = 2408,62$ J/kg °C (Guasch, 2023).

Q es el caudal volumétrico de la bomba, expresado en l/s. Según la Tabla 2, serían 3000 l/h, que equivalen a 0,83 l/s.

Con estos datos, y aplicando (4) y (5), se obtienen:

$$T_{salida(cal)} = 12 \text{ °C} - \frac{9450 \text{ W} \frac{5-1}{5}}{2408,62 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{°C}} \left(\frac{3000 \frac{\text{l}}{\text{h}}}{3600 \text{ s}} \right)} = 8,21 \text{ °C} \quad (6)$$

$$T_{salida(ref)} = 30 \text{ °C} + \frac{13500 \text{ W} \frac{4+1}{4}}{2408,62 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{°C}} \left(\frac{3000 \frac{\text{l}}{\text{h}}}{3600 \text{ s}} \right)} = 38,41 \text{ °C} \quad (7)$$

Con estos valores, aplicando (8) y (9), se obtienen T_{MIN} y T_{MAX}

$$T_{MIN} = \frac{T_L + T_{salida(cal)}}{2} = \frac{12 \text{ °C} + 8,21 \text{ °C}}{2} = 10,11 \text{ °C} \quad (8)$$

calor-portante en la bomba. Aplicando los criterios descritos en (Fernández Cordón, et al., 2001) para la climatización de la vivienda caso de estudio, se puede emplear una bomba geotérmica de las características de la Tabla 2.

Tabla 2: Características bomba geotérmica

Parámetro	Valor
P_{cal}	9,5 kW
P_{ref}	13,5 kW
COP_{cal}	5
COP_{ref}	4
Caudal	3000 l/h
Rango T_{MIN} de entrada del fluido a la bomba	[9-12] °C
Rango T_{MAX} de entrada del fluido a la bomba	[30-35] °C

La Tabla 2 muestra las temperaturas de entrada del fluido calor-portante a la bomba de calor, sin embargo, para el cálculo de la longitud necesaria del colector se precisa conocer las temperaturas de salida, con objeto de calcular las medias T_{MIN} y T_{MAX} (ecuaciones (2) y (3)). Las temperaturas de salida de la bomba de calor se calculan mediante (4) y (5).

$$T_{MAX} = \frac{T_H + T_{salida(ref)}}{2} = \frac{30 \text{ °C} + 38,41 \text{ °C}}{2} = 34,21 \text{ °C} \quad (9)$$

La resistencia de la tubería, que es característica de los tubos a las distintas presiones de trabajo, (Hellström, 1991), viene dada por:

$$R_t = \frac{\ln(D_o/D_i)}{2\pi k_p} \quad (10)$$

donde

D_o es el diámetro exterior del tubo, D_i el diámetro interior del tubo y k_p es la conductividad térmica del material del tubo, en W/m·K,

Por ejemplo, para tubería de PE100 PN10 DN (Ø40 mm), $R_t = 0,0645$ K/(W/m)

3.2. Dimensionamiento del intercambiador

Para realizar el dimensionamiento de la longitud del intercambiador a enterrar, hay que utilizar (2) y (3). De todos los parámetros, el que aún no se conoce es el valor de la resistencia térmica del intercambiador, R_s . Aplicando la ley de Fourier de transferencia de calor (Busso et al., 2000), y sabiendo que la conductividad térmica del terreno (k), es la inversa de R_s , a partir de (11) se obtienen los valores de R_s .

$$k = c \cdot \alpha \quad (11)$$

Donde c es la capacidad de calor volumétrico de terreno, que se obtiene de la Tabla 1, en este caso $c = 2,07$ MJ/m³ °C y α es la difusividad térmica en m²/s. Tal como se ha apuntado con anterioridad, el propósito de este trabajo es comparar el resultado obtenido en el cálculo de la longitud del intercambiador, bien si se utiliza el valor teórico de α , al que llamamos $\alpha_{4m(tablas)} = 1,85 \times 10^{-6}$ m²/s, o bien el obtenido a través de las temperaturas de la sonda a 4m de profundidad, $\alpha_{4m(medida)} = 1,4966 \times 10^{-6}$ m²/s.

A partir de (11):

$$R_{S(\alpha 4m \text{ (tablas)})} = \frac{1}{2,07 \frac{MJ}{m^3 \cdot ^\circ C} \cdot 1,85 \times 10^{-6} \frac{m^2}{s}} = 0.2611 \frac{m^\circ C}{W} \quad (12)$$

$$R_{S(\alpha 4m \text{ (medida)})} = \frac{1}{2,07 \frac{MJ}{m^3 \cdot ^\circ C} \cdot 1,4966 \times 10^{-6} \frac{m^2}{s}} = 0.3228 \frac{m^\circ C}{W} \quad (13)$$

Por tanto, en refrigeración, aplicando (3), las longitudes obtenidas serán, de 182,92 m, si se aplica el método del valor teórico o de 200,9 m, si se aplica el valor obtenido con las mediciones de temperatura. Esto supone un error del 8,9 %.

De igual forma, si se realizan los cálculos para calefacción, mediante (2), se obtiene que, para el valor de la difusividad aplicando las tablas, la longitud del intercambiador es de 162,4 m, y con las mediciones de temperatura, la longitud es de 179,52 m. Esto supone un error del 17,8 %. Como de los 2 valores obtenidos en el dimensionado del intercambiador (calefacción y refrigeración), siempre se elige el mayor, habría que comparar realmente los 200,9 m frente a los 182,92 m, lo que supone un error del 8,96%.

Estos tubos se enterrarán a 4m de profundidad, por toda la superficie de la planta de la casa. En ambos casos, tanto en calefacción como en refrigeración, el sistema obtenido utilizando el valor teórico, está subdimensionado. El problema estriba, en que una vez enterrado el tubo, el edificio se coloca encima, por lo que no es accesible o reparable. Este error va a perdurar toda la vida útil de la instalación y tendrá que ser suplido con más aporte de energía eléctrica a la instalación, lo que supone un gran gasto económico a muy largo tiempo, que podría haber sido subsanado en la fase de diseño.

4. Conclusiones

En el diseño e implementación de instalaciones de geotermia y más concretamente en las de muy baja entalpía (VLEGE) con enterramiento horizontal, es fundamental conocer con exactitud el valor de la difusividad térmica del terreno (α_z) a la profundidad z a la que se desea enterrar el tubo del intercambiador geotérmico. Normalmente se utiliza un valor de difusividad obtenido a partir de datos teóricos, en función de la composición del terreno.

En este trabajo, fruto de estudios anteriores, se propone una metodología para el cálculo del valor de la difusividad térmica, utilizando una sonda de temperatura que ha estado enterrada en el terreno donde se va a colocar la infraestructura geotérmica, y a partir de estos datos, hacer un cálculo mucho más exacto del valor de la difusividad y por ende de la longitud del intercambiador. Esto se ha mostrado de forma práctica con un ejemplo. Hay que hacer notar, que una vez enterrado el intercambiador horizontal, normalmente entre 3 y 5 m, lo más normal es que se construya el edificio encima, con lo cual, cualquier error en el cálculo del dimensionado, ya es para siempre.

En la actualidad, el sistema aquí expuesto se está mejorando, midiendo no sólo la temperatura sino también la humedad del terreno, ya que se pretende incorporar el parámetro lluvia, para obtener un valor mucho más aproximado de la difusividad térmica. También se está

procurando que los períodos de toma de muestras sean lo más cortos posible, en torno a 1 mes aproximadamente, con casi la misma fiabilidad.

Referencias

- Andújar Márquez, J., Martínez Bohórquez, M. A., & Gómez Melgar, S. (2016). Ground Thermal Diffusivity Calculation by Direct Soil Temperature Measurement. Application to very Low Enthalpy Geothermal Energy Systems. *Sensors*, Vol. 16. <https://doi.org/10.3390/s16030306>
- Andújar, J. M., Martínez M. A., Medina, J. (2010). Device for obtaining the surface temperature of an object. Pat. WO2010061016, <https://patentscope.wipo.int/search/en/detail.jsf?docId=WO2010061016>
- Busso, A. J., Reuß, M., Müller, J., & Sogari, N. (2000). Almacenamiento subterráneo de energía térmica: resultados de un ensayo de respuesta térmica del subsuelo. *Avances en EERR y Medio Ambiente*, 4,2-3.
- Buzăianu, A., Csáki, L., Moşoiu, P., Popescu, G., Thorbjörnsson, I., Ragnarsdóttir, K. R., ... Goubmunson, D. (2015). Recent advances of the basic concepts in geothermal turbines of low and high enthalpy. *Trans Tech Publ*. Retrieved from <https://www.scientific.net/AMR.1114.233>
- Carslaw H S, Jaeger J C. (1959). *Conduction of Heat in Solids*. London Oxford University Press
- Ciriello, V., Bottarelli, M., Di Federico, V., & Tartakovsky, D. M. (2015). Temperature fields induced by geothermal devices. *Energy*, 93, 1896–1903. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.10.052>
- Fernández Córdón, J., Canto Casasola, V., Hernández Rodríguez, J., & Viciano Fernández, F. (2001). *Hogares y familias en Andalucía*. Instituto de Estadística de Andalucía.
- Fujii, H., Okubo, H., Nishi, K., Itoi, R., Ohyama, K., & Shibata, K. (2009). An improved thermal response test for U-tube ground heat exchanger based on optical fiber thermometers. *Geothermics*, 38(4), 399–406. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2009.06.002>
- Gehlin, S., (2002). *Thermal response test method development and evaluation*. Doctoral Thesis.
- Graf, S., Lanzerath, F., Sapienza, A., Frazzica, A., Freni, A., & Bardow, A. (2016). Prediction of SCP and COP for adsorption heat pumps and chillers by combining the large-temperature-jump method and dynamic modeling. *Applied Thermal Engineering*, 98, 900–909. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.12.002>
- Guasch. Características del líquido de refrigeración. Application note AN090903 c
- Hillel, D. (1982). *Introduction Soil Physics.pdf*. In *Introduction to Soil Physics*. Academic Press.
- Hellström, G. (1991). *Ground heat storage : thermal analyses of duct storage systems*. Doctoral Thesis (monograph), *Mathematical Physics*. 88-89
- International Ground Source Heat Pump Association (IGSHPA). Retrieved from <https://igshpa.org/>
- Kavanaugh, S.P, Rafferty, K. (1997), *Ground source heat pumps. Design of geothermal systems for commercial and institutional buildings*. USA: ASHRAE; 1997.
- Koo, M. H., & Song, Y. (2008). Estimating apparent thermal diffusivity using temperature time series: A comparison of temperature data measured in KMA boreholes and NGMN wells. *Geosciences Journal*, 12(3), 255–264. <https://doi.org/10.1007/s12303-008-0026-5>
- Parker, W. J., Jenkins, J., Butler, P., Abbot, L. (1961). Flash Method of Determining Thermal Diffusivity, Heat Capacity, and Thermal Conductivity. *Journal of Applied Physics*, 32, 1679–1684. <https://doi.org/10.1063/1.1728417>
- Sepaskhah, A., & Boersma, L. (1979). Thermal Conductivity of Soils as a Function of Temperature and Water Content 1. *DI.Sciencesocieties.Org*, 43(3), 439–444. Retrieved from <https://dl.sciencesocieties.org/publications/sssaj/abstracts/43/3/SS043003>
- Smerdon, J. E., Pollack, H. N., Enz, J. W., & Lewis, M. J. (2003). Conduction-dominated heat transport of the annual temperature signal in soil. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 108(B9), 1–6. <https://doi.org/10.1029/2002jb002351>
- Taylor, S., & Ashcroft, G. (1972). *Physical edaphology. The physics of irrigated and nonirrigated soils*. Retrieved from <https://www.cabdirect.org/cabdirect/abstract/19731901994>
- Vidal, A., Chavez, J., Lumbreras, J. A., Sánchez, A., Fernández, E., Viguera, M. O., ... Castellanos, A. (2012). Características del subsuelo y perfiles de temperatura para proyectos de enfriamiento pasivo en zonas costeras de México. *Uv.Mx*