

DETERMINACIÓN DE LA INFLUENCIA DEL TERRENO EN LA VALORACIÓN TÉCNICA Y ECONÓMICA DE LA INSTALACIÓN GEOTÉRMICA MEDIANTE SOFTWARE EED Y GEO2

Autor(es) de la comunicación: FERNÁNDEZ BELLVER, Pedro ⁽³⁾; MONTES PONCE DE LEÓN, Julio ⁽³⁾; ESTEBAN LÓPEZ, Gonzalo ⁽²⁾ y GARCIA MARTINEZ, Francisco Javier ⁽¹⁾.

⁽¹⁾ Diputación de Granada, ⁽²⁾ Agencia Provincial de la Energía de Granada (Diputación de Granada) ⁽³⁾ Universidad Internacional Menéndez Pelayo.

Palabras clave: Geotérmica, Sondeos, Conductividad Térmica, EED, GEO2, Energía, Granada.

Resumen: El interés de este trabajo radica en la falta de estudios de tipo técnico-económico que valoren las propiedades del subsuelo en el dimensionado de instalaciones geotérmicas para climatización. El intercambio de calor con el subsuelo es muy importante en estas instalaciones ya que condiciona el funcionamiento de la instalación en su totalidad. De ahí la importancia de estudiar los parámetros que rigen el intercambio térmico en el subsuelo. Este intercambio viene influido por cuatro factores fundamentales: **la conductividad térmica, la capacidad térmica volumétrica, la difusividad y el grado de humedad del terreno**. Dichos parámetros determinan la superficie necesaria de intercambio térmico para el correcto funcionamiento de la bomba geotérmica.

El estudio se centra en el cálculo de la longitud de intercambiador necesaria para una instalación tipo para diferentes litologías en el subsuelo. Esto se realiza mediante el modelado con EED (Earth Energy Designer) y mediante un estudio económico generalizado que pone de manifiesto el grado de relación existente entre el tipo de terreno y la viabilidad económica de la instalación. Así mismo se desarrollan los conceptos de calor específico y conductividad térmica del suelo y se introducen nociones básicas sobre los tipos de intercambiadores geotérmicos.

1. TEXTO PRINCIPAL

a. INTRODUCCIÓN

La aplicación de la geotermia para climatización y ACS se encuadra dentro del objetivo del ahorro energético por una serie de razones y ventajas concretas. El Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE) plasmó este hecho en un estudio sobre el consumo energético en la vivienda. De este estudio se han obtenido los datos para realizar el siguiente gráfico:

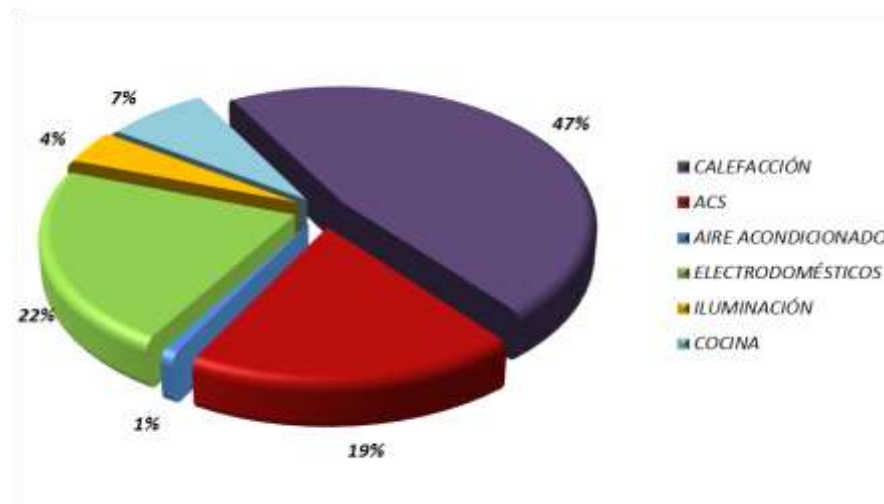


Gráfico 1; Fuente: Datos del IDAE. Análisis de consumo energético en la vivienda.

Como se puede observar, más del 60% del consumo energético final en una vivienda corresponde a calefacción, aire acondicionado y ACS.

Por esto, el Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE) destaca el incipiente despegue de los aprovechamientos geotérmicos de muy baja temperatura a través de la bomba de calor como solución a la obligatoriedad, fijada por el Código Técnico de la Edificación, de emplear una energía renovable para la producción de agua caliente sanitaria. Asimismo estas instalaciones permiten mejorar la calificación energética del edificio.

Por todo ello el presente trabajo viene motivado principalmente por la falta de estudios que traten el intercambio de calor y las características del terreno de un modo técnico, desde el punto de vista de la eficiencia en dicho intercambio, y teniendo en cuenta la viabilidad técnica y económica de las instalaciones.

Se pretende realizar una descripción general de los principales conceptos que intervienen en la transferencia de calor entre el terreno, los intercambiadores geotérmicos y su entorno. Esto es posible gracias a los aportes que ofrecen la geología, la geotecnia, la hidráulica y la termodinámica. Ya que la orientación de las partículas, el tipo de suelo, su densidad, el tamaño de los poros de su estructura interna, el flujo de agua en el terreno, entre otras propiedades, condicionan la transferencia de calor en el terreno.

Concretamente se pretende analizar cómo influyen las características de conductividad térmica de los distintos materiales a la hora de dimensionar el intercambiador de calor para una bomba de calor geotérmica así como la profundidad a la que ha de colocarse dicho intercambiador, lo que determinará en gran medida la potencia de extracción específica de la bomba de calor.

Este estudio tiene en cuenta, principalmente, la influencia que tiene el terreno en la transferencia de calor. Es evidente que habrá terrenos que serán más favorables que otros a la hora de intercambiar el calor. En este sentido, una mayor longitud de sonda requerirá también una mayor inversión. Por ello el tipo de terreno donde se asiente la edificación condicionará en gran medida el precio de la instalación. Un terreno favorable podría garantizar el retorno de la inversión en un periodo de tiempo corto y el éxito de la instalación; mientras que uno desfavorable podría no hacerla rentable económicamente.

Por tanto, el objetivo principal de este proyecto es estudiar la influencia de los distintos tipos de terreno en la longitud de una sonda vertical para geotermia de muy baja entalpía para ver su repercusión en el coste de la instalación.

Para esto se hará uso de un tipo de software de dimensionado disponible actualmente. Concretamente los programas utilizados serán EED (Earth Energy Designer) y Geo2 (desarrollado por el grupo CIAT), los cuales serán debidamente explicados en sus correspondientes apartados.

b. BOMBA DE CALOR GEOTÉRMICA, BCG.

Una bomba de calor es una máquina que transfiere el calor desde un foco frío (T_f) a otro caliente (T_c) utilizando una cantidad de trabajo (W) relativamente pequeña en función de la diferencia de temperaturas entre el foco frío y el foco caliente, de

acuerdo con el principio de Carnot. La bomba funcionaría extrayendo calor del terreno y suministrándolo a la vivienda en invierno y extrayendo calor de ésta y transmitiéndolo al terreno en verano. En la siguiente imagen se puede ver cómo serían estos dos ciclos:

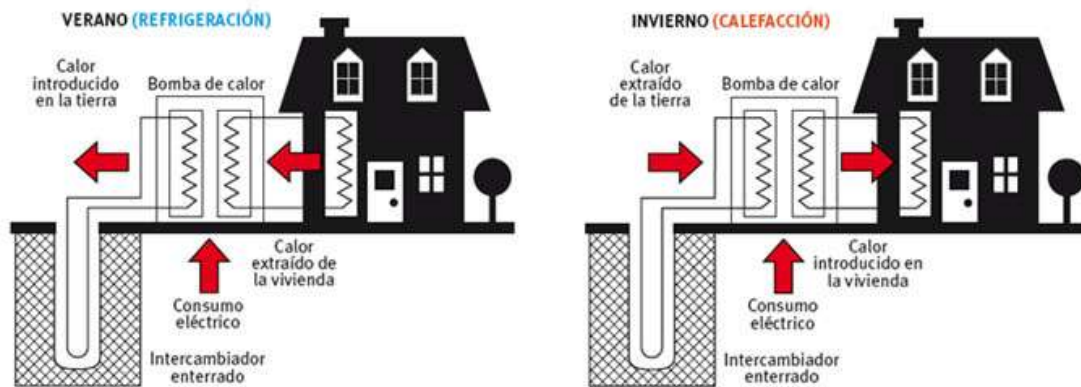


Gráfico 2; Fuente: GREENHEISS.

http://www.greenheiss.com/Geotermia/Tipos_Aplicaciones.asp. Tipos y aplicaciones.

c. CALOR ESPECÍFICO Y CONDUCTIVIDAD TÉRMICA.

Las principales propiedades que marcan las características térmicas de un terreno son su calor específico y su conductividad térmica. Al tratarse de materiales heterogéneos, su composición influirá en gran manera en las propiedades térmicas. El calor específico del suelo define la cantidad de calor necesario para que la unidad de masa de un suelo aumente un grado su temperatura en condiciones isobáricas. Los componentes minerales del suelo tienen calores específicos muy semejantes, entorno al $1,9 \text{ MJ/m}^3 \cdot ^\circ\text{C}$, que se diferencian claramente de los calores específicos de la materia orgánica ($2,47 \text{ MJ/m}^3 \cdot ^\circ\text{C}$) y el agua ($4,19 \text{ MJ/m}^3 \cdot ^\circ\text{C}$), así el calor específico de un suelo variará notoriamente según su contenido en humedad. Los suelos húmedos se calentarán más lentamente que los secos, pero mantendrán más el calor, reduciendo las variaciones de temperatura en el suelo.

Para considerar la distribución de calor a lo largo del suelo, habrá que considerar la conductividad térmica. La conductividad térmica de las partículas del suelo es mayor que la del agua y mucho mayor que la del aire. Habitualmente los suelos son muy porosos y estos vacíos pueden albergar aire o agua. En consecuencia el grado de

humedad, el grado de empaquetamiento y porosidad condicionarán fuertemente las características térmicas del suelo. De esta forma los suelos húmedos, en los que hay un desplazamiento del aire por el agua, conducen mejor el calor que los secos (en los que existe un mayor volumen de vacíos). En un suelo humedecido se conduce el calor más rápidamente a capas más profundas.

d. INTERCAMBIADOR GEOTÉRMICO Y CÁLCULO DE LA LONGITUD NECESARIA (EN INTERCAMBIADOR GEOTÉRMICO VERTICAL)

Es evidente el papel que los intercambiadores de calor primarios, que más bien se podrían definir como captadores del calor geotérmico o receptores del calor de climatización, juegan en el rendimiento del sistema, en cualquiera de sus versiones de funcionamiento, con más trascendencia en el caso de la refrigeración, al ser más reducido su COP, lo que obliga a prestar más atención a dichos intercambiadores exteriores.

En efecto, la capacidad de intercambiar calor con la fuente de energía geotérmica dependerá de las características del terreno, como ya se ha visto con anterioridad. Pero éstas son las que la naturaleza ha impuesto y deben considerarse inamovibles. Lo que sí puede modificarse es la capacidad del intercambiador para absorber o ceder el calor, y éste dependerá de las necesidades de la bomba de calor geotérmica calculadas y de su rendimiento (COP).

En realidad, son dos las variables que influirán en la optimización del intercambio de calor en los captadores:

- Una de ellas es el material de fabricación de los mismos. Quizás la mejor conductividad de calor conocida sea la de materiales metálicos; pero, al estar constituidos los captadores por simples tubos, generalmente de poca sección para mejorar el contacto del fluido con las paredes de dicho tubo, los problemas de corrosión que la agresividad del terreno produce, supondrían un elevado coste de mantenimiento. Por ello, y dada la amplia gama de variedades de plásticos derivados del petróleo en el mercado, se elige, en la mayoría de los casos, un intercambiador del tipo PVC o alguno de la familia

de los propilenos, que une una buena conducción del calor a una flexibilidad que facilita su instalación.

- Otra variable, o mejor expresado, un par de variables interrelacionadas, como son el tiempo de contacto del intercambiador con el terreno y la superficie de contacto con el mismo, serán determinantes para el dimensionamiento de los captadores. Para una cantidad determinada de calor a intercambiar, a mayor tiempo de intercambio, menor superficie será precisa y viceversa. En realidad los tubos captadores son de una sección estándar por razones de mercado y las dos variables tiempo-superficie de contacto, se aúnan en el cálculo de la longitud del tubo captador.

Esta longitud será una función del calor capaz de ser absorbido o cedido por el terreno, de las temperaturas del suelo y del fluido intercambiador, de la resistencia térmica del terreno y de las características conductivas del material del que está compuesto el tubo captador. Puede formularse una función F, tal que:

$$L_{cap} = F (Q, T_s, T_f, Cap, R_s)$$

Donde:

- L_{cap} es la longitud del captador de calor (superficie/tiempo de contacto)
- Q es el calor a disipar o captar por el terreno
- T_s es la temperatura del suelo
- T_f es la temperatura del fluido de intercambio, generalmente agua glicolada
- Cap es la morfología y tipo del material captador
- R_s es la resistencia térmica del terreno (inversa de la conductividad térmica)

En cada caso, y para cada aplicación, puede ser más conveniente un tipo de tubos captadores que otro, de las muchas variedades que existen en el mercado, dependiendo el diseño final de las variables que se acaban de exponer.

Teniendo en cuenta todos estos perceptos iniciales, se realiza el estudio de la longitud necesaria para el intercambiador de calor considerando una sonda vertical y teniendo en cuenta las conductividades térmicas de los materiales. Para hacerlo se

utiliza el programa EED (Earth Energy Designer) que permite modelizar el tipo de terreno en función de sus características.

EED es un programa para el diseño de sondas geotérmicas. Cuenta con una amplia base de datos y se pueden variar diversos parámetros, lo que hace de EED una herramienta útil en el trabajo diario de ingeniería para el diseño del sistema de intercambio de la bomba (GSHP) y de almacenamiento térmico del pozo. En proyectos grandes y complejos, EED permite calcular el tamaño aproximado del pozo y variar su diseño antes de iniciar el análisis más detallado. Incluso para los proyectos pequeños vale la pena utilizar EED en lugar de los procedimientos de cálculo tradicionales. EED cuenta con una base de datos para distintas configuraciones de hasta 1.200 pozos. Y las cargas térmicas anuales pueden variar entre unos pocos MWh/año hasta varios TWh/año.

También es capaz de calcular las temperaturas del líquido intercambiador a partir de valores mensuales de las cargas térmicas y ver su evolución a lo largo del periodo de vida de la instalación.

Con la ayuda de este software se va a estudiar cómo varía la profundidad necesaria de un pozo en función de los parámetros térmicos del suelo.

TIPO DE MATERIAL	CONDUCTIVIDAD TÉRMICA (W/mK)			CAPACIDAD TÉRMICA VOLUMÉTRICA (MJ/m ³ K)
	Min.	Med.	Max.	
ROCAS MAGMÁTICAS				
Basalto	1,3	1,7	2,3	2,3-2,6
Diorita	2	2,6	2,9	2,9
Gabro	1,7	1,9	2,5	2,6
Granito	2,1	3,4	4,1	2,1-3,8
Peridotita	3,9	4	5,3	2,7
Riolita	3,1	3,3	3,4	2,1
ROCAS METAMÓRFICAS				
Onice	1,9	2,8	4	1,8-2,4
Mármol	1,3	2,1	3,1	2
Metacuarcita	5,8	5,8	5,8	2,1
Micasquistos	1,5	2	3,1	2,2
Esquistos arcillosos	1,5	2,1	2,1	2,2-2,5
ROCAS SEDIMENTARIAS				
Caliza	2,5	2,8	4	2,1-2,4
Marga	1,5	2,1	3,5	2,2-2,3
Cuarcita	3,6	6	6,8	2,1-2,2
Sal	5,3	5,4	6,4	1,2
Aréncia	1,3	2,3	5,1	1,6-2,8
Limonitas/Argilitas	1,1	2,2	3,5	2,1-2,4
SUELOS				
Grava (seca)	0,4	0,4	0,5	1,4-1,6
Grava (saturada)	1,6	1,6	1,6	2,4
Arena (seca)	0,3	0,4	0,8	1,3-1,6
Arena (saturada)	1,7	2,4	5	2,2-2,9
Limo/Arcilla (seca)	0,4	0,5	1	1,5-1,8
Limo/Arcilla (saturada)	0,8	1,7	2,3	1,6-3,4
Turba	0,2	0,4	0,7	0,5-3,8
OTROS MATERIALES				
Bentonita	0,5	0,6	0,8	3,9
Hormigón	0,9	1,6	2	1,6
Hielo (-10°C)		2,32		1,87
Plástico (PE)		0,39		
Aire (0-20°C, seco)		0,02		0,0012
Aceite		0,0		3,12
Agua (+10°C)		0,58		4,19

Tabla 1: Valores de conductividad y capacidad térmica para distintos tipos de materiales. Fuente: Paud, D. Geothermal energy and heat storage. 2002

A partir de los diferentes datos disponibles en el estudio se ha calculado las necesidades longitudinales de sondeos geotérmicos según diferente litología para cubrir las mismas demandas energéticas. De esta manera, conociendo los precios estándar del sector se ha podido evaluar en un gráfico cómo se relacionan la conductividad térmica del terreno con el coste final estimado del sondeo geotérmico:

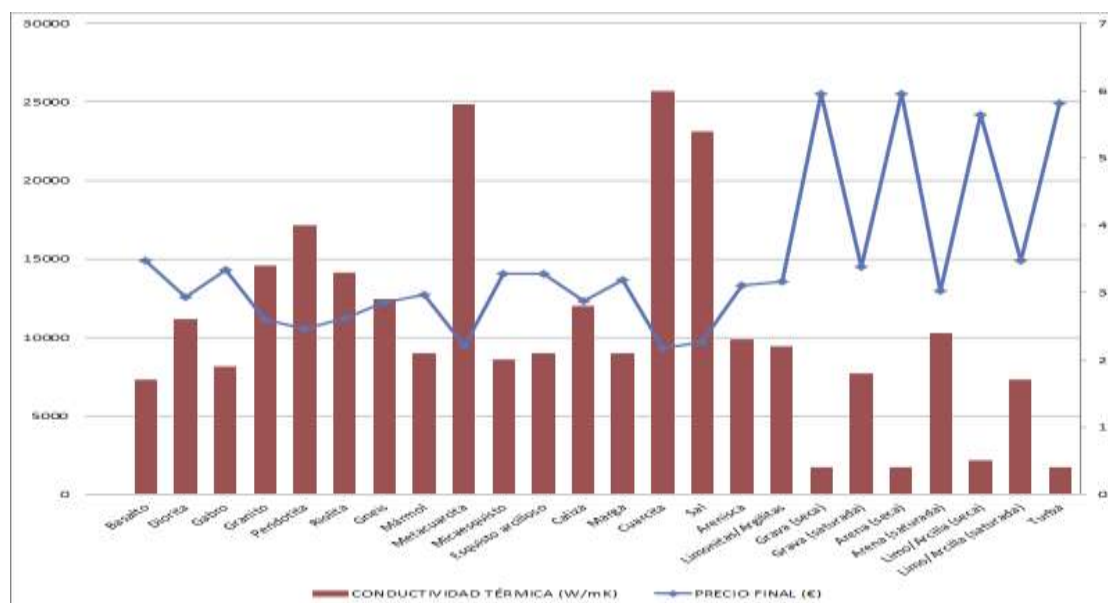


Gráfico 3; Fuente: Elaboración propia. Costes de sondeo frente a litología.

2. CONCLUSIONES

La geotermia para climatización es un recurso renovable que ofrece ventajas considerables frente a otros sistemas de climatización:

- Ambientalmente es una tecnología que no tiene emisiones de ningún tipo. Reduce el gasto energético y el consumo eléctrico al poseer elevados coeficientes de operación.
- Se trata de sistemas que poseen elevados coeficientes de operación gracias a que trabajan con un foco que mantiene su temperatura constante durante el ciclo de operación de la máquina. Al no estar sometida a fuertes variaciones atmosféricas de temperatura el COP se hace constante.
- La geotermia para climatización se basa en la disipación o absorción de calor en el subsuelo, por lo que se encuentra disponible en cualquier punto del planeta. Además se trata de una forma de intercambiar calor que está

disponible las 24 horas del día los 365 días del año, al no estar sujeta a fuentes de energía externas como la radiación solar, por ejemplo.

- Se trata de una tecnología robusta y duradera. Además la BCG no está sometida a las fuertes variaciones de temperatura ni está en contacto con el exterior, por lo que se prolonga su vida útil.
- Económicamente una instalación geotérmica supone mayor inversión que una instalación convencional, sin embargo los costes de mantenimiento de la instalación geotérmica, el ahorro de electricidad y la mayor vida útil de la bomba de calor por encontrarse dentro de la vivienda, hacen amortizable la inversión.

Las características del terreno determinan en gran medida la caracterización técnico-económica de las instalaciones de BCG. Las propiedades del suelo marcarán la forma en que se lleva a cabo el intercambio de calor. Influyen de manera especial la conductividad térmica, la capacidad térmica volumétrica, la difusividad y el grado de humedad. Normalmente las partículas sólidas del suelo poseen individualmente una conductividad mayor que la del agua. Sin embargo, el suelo no es un sólido homogéneo, sino que tiene multitud de poros y fracturas. Éstos pueden encontrarse rellenos de agua o de aire. En este caso el agua posee una conductividad mucho mayor que la del aire, por lo que suelos con mayor contenido en agua tendrán, globalmente, mejores propiedades para el intercambio de calor.

Estas propiedades influyen notablemente en la superficie de intercambio para la instalación geotérmica. Esto repercute también en la valoración técnico-económica de la instalación. Así, una instalación geotérmica vertical cuyo intercambio de calor se produzca en grava seca necesitará una longitud de intercambiador 4 veces superior a uno realizado en cuarcitas.

El sondeo es una parte muy importante en la valoración económica de una instalación de BCG. De forma muy genérica se puede decir que conlleva entre la mitad y un tercio del coste total de la instalación (este dato puede variar mucho en función de la instalación). Este hecho pone de manifiesto la importancia del estudio de las propiedades del suelo en los proyectos de climatización geotérmica, ya que el coste final de la instalación variará sustancialmente.

Como se ha visto, los terrenos que más favorecen el intercambio de calor son los cuarcíticos y metacuarcíticos. De esta forma, el sondeo para el intercambiador de calor en arena seca costaría más del doble que uno realizado en cuarcitas o metacuarcitas.

3. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS:

- ▾ RD1027/2007 “Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios (RITE)”
RD314/2006 “Código Técnico de la Edificación (CTE)”
Guerra Moya, A (2010). *Climatización de una vivienda unifamiliar mediante una bomba de calor reversible con intercambio geotérmico*. Proyecto Master Pilas de Combustible e Hidrógeno UIMP.
- González Puente, C (2009). *Climatización geotérmica*. Proyecto Master Pilas de Combustible e Hidrógeno UIMP.
- Yago Meniz, Jorge (2009). *Aprovechamiento de calor de baja temperatura en climatización*. Proyecto Master Pilas de Combustible e Hidrógeno UIMP.
- Lázaro Lozano, C (2009). *Calefacción por bomba de calor geotérmica utilizando los refrigerantes de nueva generación*. Universidad Carlos III de Madrid. Departamento de Ingeniería Térmica y de Fluidos.
- Benítez Martín, S (2011). *Estudio de las aplicaciones de la energía geotérmica en España. Caso práctico para climatización de una vivienda unifamiliar*. Departamento de Ingeniería Eléctrica. Escuela Politécnica. Universidad Carlos III de Madrid.
- Sanz Jimeno, C (2012). *Climatización geotérmica de un edificio*. Proyecto Master Pilas de Combustible e Hidrógeno UIMP.
- Guillermo Llopis Trillo, Vicente Rodrigo Angulo (2008). *Guía de la Energía Geotérmica*. FENERCOM.
- IGME/IDAE (2008). *Manual de geotermia*.
- IDAE (2010). *Guía técnica para el diseño de sistemas de BCG*.