

Intercambiadores geotérmicos verticales

GUILLERMO LLOPIS TRILLO (*) y CARLOS LÓPEZ JIMENO (*)

RESUMEN Los sistemas de bombas de calor conectadas al terreno se aplican a la climatización y a la producción de agua caliente sanitaria en edificios por su elevada eficiencia energética. En las áreas urbanas de los principales países europeos los más utilizados son los que incluyen intercambiadores geotérmicos verticales. Su uso en España, si se compara con países de nuestro entorno, es bastante reducido.

Se describe su funcionamiento, sus ventajas respecto a otros intercambiadores de calor subterráneos, los equipos y materiales que se emplean en su construcción, los medios de transferencia térmica que usan, y se hace un pronóstico sobre el futuro de su utilización en nuestro país.

BOREHOLE HEAT EXCHANGERS

ABSTRACT Ground source heat pump systems are applied to air conditioning and domestic hot water in buildings for its high energetic efficiency. In urban areas of major European countries, the most commonly used are those that include borehole heat exchangers. Their use in Spain, compared with its surrounding countries, is quite small.

Here it is described their functioning system, their advantages over other geothermal heat exchangers, their equipment and materials used in their construction, their means of thermal transfer, and it is done a prediction about the future of their use in our country.

Palabras clave: Bombas de calor, Sistemas geotérmicos cerrados, Sondas geotérmicas, Sondeos, Relleno del sondeo, Fluidos portadores de calor, Dimensionamiento, Tubos de polietileno.

Keywords: Ground source heat pumps, Closed loop ground source systems, Borehole heat exchangers, Geothermal drills, Drill grouting, Ground heat exchanger circulating fluids, Sizing, Polyethylene pipes.

1. INTRODUCCIÓN

Los sistemas de climatización que emplean bombas de calor acopladas al terreno, también llamadas bombas de calor geotérmicas, son considerados como los más eficientes energéticamente, y la tecnología que emplean como la más apropiada para ser instalada en edificios residenciales, comerciales, industriales y públicos.

El acoplamiento, o conexión al terreno, se realiza por mediación de intercambiadores de calor subterráneos y, entre estos, los más utilizados en áreas urbanas de países donde esta tecnología está más arraigada son los intercambiadores verticales o sondas geotérmicas.

El propósito de este artículo es hacer una descripción somera de sus ventajas y limitaciones, de los equipos y materiales con los que se construyen, y de los medios de transferencia térmica que emplean.

2. BOMBAS DE CALOR GEOTÉRMICAS

Las sucesivas crisis de la energía que ha padecido el mundo desde mediados de los años setenta del siglo XX, como conse-

cuencia de las alzas de los precios del petróleo, ha llevado a muchos particulares y empresas, para poder reducir sus facturas energéticas, a tomar en consideración una energía que está en todas partes, debajo de nuestros pies, en todos los países del mundo, la *energía geotérmica superficial*, y a muchos gobiernos, con el propósito de reducir el consumo de energías importadas y disminuir la emisión de contaminantes atmosféricos, a incentivar la adquisición por los primeros de sistemas de bombas de calor geotérmicas para sus hogares y edificios, paliando en alguna medida los mayores costes de inversión que comporta su implantación.

Una bomba de calor geotérmica puede proporcionar entre 3 y 5 kW de energía térmica para calefacción, refrigeración y producción de agua caliente sanitaria, por cada kW de energía eléctrica consumida por el motor del compresor, bombas de circulación de los fluidos, termostatos, sensores, ventiladores, etc., lo cual conduce a ahorros de energía que comparados con sistemas de calefacción convencionales de gas-oil, gas o electricidad, pueden representar entre un 30 y un 70%.

Las bombas de calor geotérmicas utilizan el terreno como fuente y sumidero de calor en lugar del aire ambiente. Hasta escasos metros de profundidad aprovechan su mayor inercia térmica estacional, comparada con las condiciones climatológicas superficiales, y a partir de 20 m de profundidad, los niveles constantes de temperatura, independientes de la época del año, y crecientes con la profundidad a razón de unos 3,3°C cada 100 m, como consecuencia del gradiente geotérmico (Figura 1).

(*) Doctores Ingenieros de Minas, U.D. de Proyectos de Ingeniería. ETSI Minas. UPM.

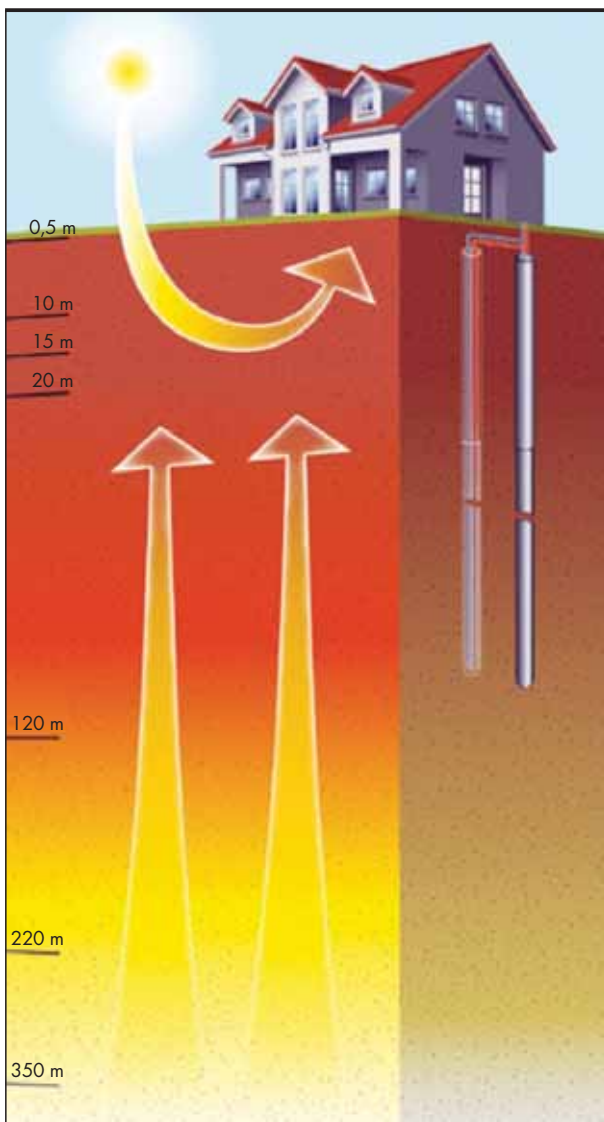


FIGURA 1. Radiación solar, flujo de calor geotérmico e intercambiadores geotérmicos verticales. Fuente: Géothermie. Suisse - énergie.

3. INTERCAMBIADORES GEOTÉRMICOS

La captación de calor del terreno, o la evacuación al mismo del calor de un edificio, la realiza un medio de transmisión de calor que circula por los intercambiadores subterráneos.

Atendiendo a la naturaleza de los intercambiadores, y excluyendo las cimentaciones termoactivas, el aprovechamiento de aguas drenadas por minas y túneles, y los colectores de calor ubicados en conducciones de aguas residuales, por considerarlos aprovechamientos complementarios, nunca desdeñables, de la función principal que deben cumplir las obras en las que se ubican, el resto se pueden clasificar en sistemas abiertos y sistemas cerrados, y dentro de éstos últimos diferenciar entre intercambiadores geotérmicos horizontales, inclinados y verticales.

En los sistemas geotérmicos abiertos el medio de transmisión térmica es agua subterránea que se capta por un pozo de bombeo, cede calor en un intercambiador de calor intermedio, que permite aislar las bombas de calor de aguas de mala calidad que podrían deteriorarlas, y se restituye al acuífero por un pozo de inyección alejado del primero y situado en el sentido de flujo del agua subterránea.

Se requiere un caudal comprendido entre 150 y 200 l/h por kW de potencia térmica que se precise, que ese caudal esté garantizado por un periodo de unos 25 años para poder amortizar las instalaciones, y contar con la autorización del Organismo de Medio Ambiente competente, o Aguas correspondiente. Condiciones no siempre factibles en muchos lugares del país.

En los intercambiadores de calor en sistema cerrado el medio de transmisión de calor es agua, o agua con un anticongelante, que circula en circuito cerrado por el interior de unos tubos de pequeño diámetro, generalmente de polietileno (Figura 2).

En modo calefacción, el fluido portador de calor capta energía térmica del terreno, cede calor a un fluido frigorífico en el evaporador de la bomba de calor, se enfría y retorna al subsuelo. El compresor comprime el gas frigorífico y eleva su temperatura. El gas cede calor en el condensador al fluido de calefacción del edificio y retorna al estado líquido. Pierde presión en una válvula de expansión, se enfría, y comienza un nuevo ciclo.

Los intercambiadores geotérmicos horizontales se colocan en zanjas o en amplias excavaciones, a profundidades comprendidas entre 1,2 y 1,5 m en suelos con poca pendiente.

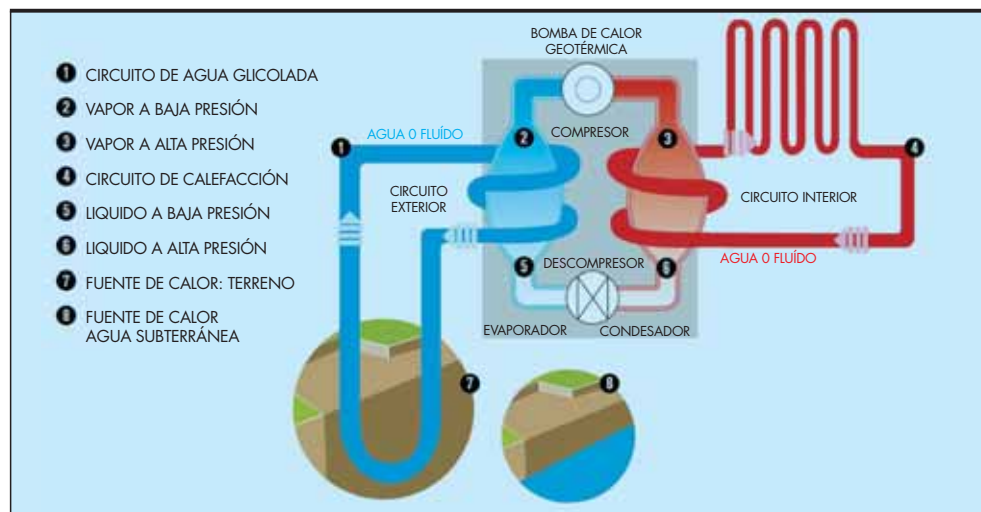


FIGURA 2. Esquema de funcionamiento de una BCG en modo calefacción. Fuente: France Géothermie.



FIGURA 4. Tendido de colectores para conectar siete sondas geotérmicas dobles en una nave industrial en Colmenar Viejo (Madrid). Fuente: Geoter.

FIGURA 3. Esquema de sonda geotérmica doble con tubo central para cementación y lastre suspendido del pie de sonda. Fuente: HakaGerodur.

Son los más fáciles y más económicos de instalar, pero requieren una extensión de terreno comprendida entre 1,5 y 3 veces la superficie habitable a calentar, dependiendo de la calidad de los aislamientos de la edificación.

Ese espacio solo se podrá dedicar a huerto o jardín sin árboles cuyas raíces podrían dañar los tubos de polietileno del intercambiador. No se puede impermeabilizar para que la radiación solar, el viento y el agua de lluvia que se infiltre en el suelo produzcan la regeneración térmica del mismo.

Estas circunstancias hacen que su utilización se circunscriba, casi exclusivamente, al sector residencial en grandes parcelas.

Los intercambiadores geotérmicos inclinados reúnen los inconvenientes de los horizontales y de los verticales. Por un lado se precisa un terreno espacioso para que los sondeos no invadan parcelas ajenas, y por otro es necesario utilizar maquinaria de perforación y materiales de relleno o para cementación de los sondeos, lo cual encarece su instalación.

4. INTERCAMBIADORES GEOTÉRMICOS VERTICALES

Consisten en dos tubos, generalmente de polietileno, unidos en sus extremos inferiores por una pieza en U del mismo material, o por cuatro tubos, unidos de dos en dos, por sendas piezas en U, constituyendo sondas geotérmicas simples o dobles, que se alojan en el interior de sondeos verticales, de alrededor de 150 mm de diámetro (Figura 3).

La profundidad de los sondeos suele oscilar entre 100 y 200 m, por lo que la influencia de la radiación solar y demás circunstancias meteorológicas superficiales sobre la temperatura del terreno, es insignificante comparada con el flujo de calor geotérmico.

Comparados con los intercambiadores horizontales, son más caros, pero a cambio ofrecen las siguientes ventajas:

- La superficie ocupada por los sondeos y los colectores horizontales que conectan las sondas con las bombas de calor situadas en los edificios es muy pequeña y, además, puede impermeabilizarse o dedicarse a cualquier uso (Figura 4).
- Los costes de mantenimiento son muy bajos y no se deterioran con el paso del tiempo. Un intercambiador geotérmico vertical bien construido tiene una vida útil de 50 años.
- Proporcionan una potencia de extracción de calor específica de entre 30 y 70 W/m de sondeo, dependiendo de las características del terreno y de su conductividad térmica.
- Por término medio se precisa, aproximadamente, 1 m de sondeo, por cada m² de superficie habitable a calentar.
- La potencia de extracción de energía térmica del terreno puede llegar a ser muy elevada, pues las limitaciones existentes, relativas a la profundidad máxima que puede alcanzar un sondeo geotérmico sin que sea considerado una

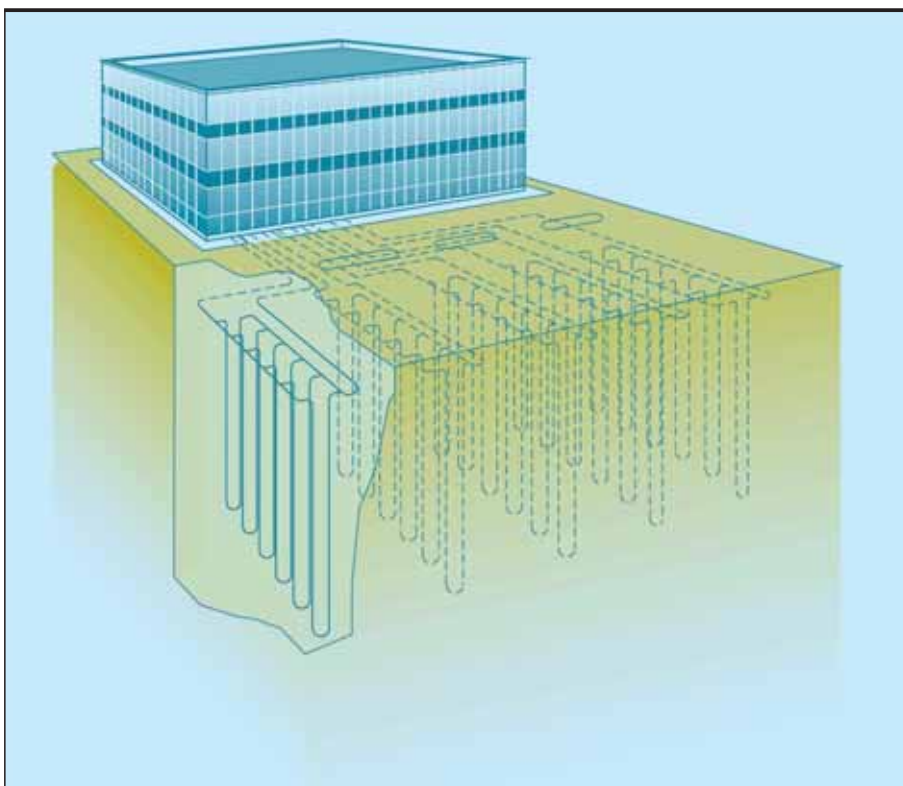


FIGURA 5. Esquema de un campo de sondas geotérmicas para un edificio comercial. Fuente: Canada Natural Resources.

explotación minera, sometida a concesión administrativa, se obvian perforando un conjunto de sondeos mas cortos, convenientemente espaciados, constituyendo lo que se denomina un campo de sondas geotérmicas (Figura 5).

- No presentan las servidumbres de los intercambiadores horizontales, pudiendo instalarse debajo de las edificaciones a las que prestan servicio (Figura 6).

Las únicas limitaciones que atañen a las sondas geotérmicas son las relacionadas con las distancias mínimas de separación con otros elementos constructivos y objetos, pudiendo citar:

- De cimentaciones, pozos, fosas sépticas, saneamientos: 2 ó 3 m, según países.
- De conducciones enterradas no hidráulicas: 0,7 ó 1,5 m, según países.
- De árboles y límites de parcela: 5 m.
- Entre sondeos geotérmicos: 6 m en Alemania, 10 m en Francia, para sondeos de hasta 100 m de profundidad.

5. SONDEOS GEOTÉRMICOS

El diámetro de un sondeo geotérmico depende del diámetro de los tubos de la sonda y de su número, dos o cuatro. Normalmente está comprendido entre 150 y 180 mm.

No debe ser muy grande, pues la sonda podría retorcerse durante su introducción en el pozo, ni muy pequeño, pues quedaría poco espacio anular entre los tubos y las paredes del sondeo, para poder efectuar un relleno con material granular o una cementación correctos.

Las profundidades que pueden alcanzar están condicionadas por las capacidades de los equipos de perforación que se utilizan y por las disposiciones en materia de legislación minera y de protección de aguas subterráneas.



FIGURA 6. Perforación a rotación con circulación directa de lodos en un edificio en rehabilitación en Madrid. Fuente: Eneres.



FIGURA 7. Descenso de una perforadora a una excavación.
Fuente: Termoterra.

En España suelen estar comprendidos entre 100 y 200 m, en otros países, como Francia y Alemania, los sondeos de mas de 100 m de profundidad están sometidos al Código Minero y a la Ley de Minas, respectivamente, y precisan de una concesión administrativa.

Los equipos de perforación que se utilizan suelen ser de pequeñas dimensiones, montados sobre orugas con zapatas de goma, y con un ancho no mayor de 2 m para que puedan entrar en parcelas de viviendas ya construidas con accesos estrechos, y facilitar su descenso en excavaciones de edificios suspendidos del brazo de una grúa (Figura 7).

También existen equipos mas compactos, montados sobre orugas de goma, con 0,8 m de anchura, que permiten realizar perforaciones desde garajes y sótanos.

Dependiendo de las características del terreno se pueden utilizar diferentes sistemas de perforación.

En terrenos duros, competentes y estables, como pizarras, granitos, calizas, etc., se emplean sistemas a rotoperCUSión con martillo en fondo y una sola unidad de rotación. Permiten revestir con una tubería recuperable los primeros 15 ó 20 m de terreno alterado, si fuese necesario.

En terrenos inestables, como arenas y gravas, en los que podrían derrumbarse las paredes del sondeo, se utilizan sistemas a rotación con circulación directa de lodos.

En los últimos años se han desarrollado equipos de perforación específicos para la instalación de sondas geotérmicas, que proporcionan elevados rendimientos en cualquier tipo de terreno y permiten abaratar el coste de perforación (Figura 8).

Se trata de equipos con doble unidad de rotación. La unidad superior arrastra al varillaje interior con el martillo en fondo, o con una herramienta de corte, mientras que la unidad inferior arrastra la tubería de revestimiento del sondeo de forma simultánea. Las dos unidades giran en sentido contrario, lo cual facilita la extracción de los detritos y elimina el riesgo de pérdida de la sarta interior.

Van dotadas de triple mordaza, para facilitar la manipulación y extracción de la tubería de revestimiento, y de un sistema de evacuación de detritos.

Los detritos de perforación, a medida que se producen, y los lodos de sondeo, si llegan a emplearse, se recogen en contenedores adecuados, y son trasladados a lugares de vertido apropiados.



FIGURA 8. Perforadora con doble unidad de rotación y manguera para descarga de detritos en un contenedor. Fuente: Comacchio.

6. SONDAS GEOTÉRMICAS

El material mas usado para los tubos de las sondas geotérmicas es el polietileno de alta densidad por ser uno de los plásticos mas comunes y mas baratos. No es tóxico, es impermeable y flexible, y ofrece buena resistencia térmica, química y al impacto.

Los tubos se fabrican por extrusión, sin costuras. Se suministran en rollos, con las piezas en U que constituyen los pies de sonda soldados por electrofusión, con longitudes estándar que alcanzan la longitud total de un sondeo desde el fondo hasta la boca, diámetros exteriores normalizados de 16, 25, 32 y 40 mm, y espesores de pared adaptados a la presión de trabajo.

En la recepción en obra de las sondas se comprueba el marcado, la documentación técnica que las acompaña, se revisa que no presenten rasguños o fisuras ocasionados durante el transporte y manipulación, y se someten a una prueba de estanqueidad, con aire o con agua, y a una prueba de caudal para comprobar que no hay ninguna resistencia extraña en su interior.

Se rellenan con agua, o con agua y anticongelante, antes de su introducción en el sondeo, para evitar que los tubos puedan aplastarse por diferencias de presión entre el interior y exterior de los tubos en caso de existir agua o lodos de sondeo, o cuando se realice la cementación.



FIGURA 9. Pies de sondas geotérmicas y espaciadores. Fuente: BRGM.



FIGURA 10. Introducción de una sonda geotérmica doble con un slangman. Fuente: EDASU.

Para facilitar el descenso en el sondeo se cuelga un lastre en el pie de sonda, que quedará perdido en el fondo.

La sonda geotérmica y el tubo de polietileno de 25 mm de diámetro que se va a emplear para cementar el sondeo se bajan con sumo cuidado, colocando regularmente espaciadores, centradores y abrazaderas de plástico, para que los tubos queden lo mas verticalmente posible y separados unos de otros (Figura 9).

La introducción se realiza colocando los rollos de sonda en un tambor o carrusel giratorio y empleando un torno equipado de freno, o una guía mecánica accionada eléctricamente, que permite que los tubos avancen o retrocedan evitando atascos (Figura 10).

Antes de introducir el relleno se somete al intercambiador a una prueba de presión. En caso de no superarla todavía se está a tiempo de izarlo a superficie y reemplazarlo por otro.

7. RELLENO DEL SONDEO

El espacio anular que queda entre las tuberías del intercambiador y las paredes del hueco del sondeo se rellena con arena silícea calibrada o se hueco con una suspensión de cemento, bentonita y arena silícea al objeto de lograr un buen contacto térmico entre los tubos de la sonda y el terreno, de cerrar el sondeo desde la superficie, para evitar la entrada de contaminantes exteriores, y sellar los acuíferos que hayan podido ser atravesados durante la perforación.

La elección de un material para relleno o para cementación dependerá de las medidas que sea preciso tomar para preservar la calidad de las aguas subterráneas, no alterar su flujo, y evitar la intrusión de unos acuíferos en otros, si es que se han cortado varios.

La opción más empleada es la cementación, pues es la mejor forma de asegurar una unión física y químicamente estable, impermeable y duradera de la sonda geotérmica al terreno.

La cementación se realiza inyectando el mortero a presión desde la parte mas baja del sondeo, para que se rellene el espacio anular en sentido ascendente, evitando que queden huecos de aire que disminuirían la transmisión de calor.

Una vez cementado el sondeo se somete a la sonda a un ensayo de presión definitivo para comprobar que no existen fugas, y poder garantizar que, en condiciones normales de trabajo, la sonda geotérmica tendrá una vida útil de 50 años.

8. FLUIDOS CIRCULANTES

El medio de transferencia térmica que circula por los tubos del intercambiador geotérmico es agua o una mezcla acuosa con una sustancia anticongelante, que debe satisfacer los siguientes requisitos:

- Impedir la formación de hielo en el evaporador de la bomba de calor durante el funcionamiento del sistema geotérmico en modo calefacción.
- Proteger contra la corrosión los materiales que constituyen el circuito cerrado por el que circula.
- Ser biodegradable para no contaminar el agua subterránea en caso de fuga.

Los anticongelantes mas utilizados son los que se incluyen en la Tabla 1.

9. DIMENSIONAMIENTO

El dimensionamiento de un sistema geotérmico comienza por establecer las cargas de calefacción, refrigeración y agua caliente sanitaria del edificio, en función de las condiciones climatológicas locales, continúa con la elección de las instalaciones y equipos encargados de satisfacer esas demandas, y finaliza con la determinación de la ubicación, número, separación y profundidad de los sondeos en los que se van a alojar los intercambiadores geotérmicos verticales.

Para precisar esto último, en edificios del sector terciario con elevadas cargas térmicas, se recurre a realizar ensayos de respuesta térmica del terreno en uno o varios sondeos perforados al efecto (Figura 11).

El ensayo se lleva a cabo haciendo circular por los tubos del intercambiador, en circuito cerrado, el fluido caloportador calentado en superficie por una resistencia eléctrica, manteniéndolo

MEDIO	CONCENTRACIÓN	PROTECCIÓN CONTRA EL HIELO	OBSERVACIONES
Agua		0°C	• Más barato
Etilenglicol	20 a 33%	-10,4 a -19,3°C	• Tóxico • Precisa inhibidores de la corrosión
Propilenglicol	25 a 35%	-10,1 a -17,5°C	• No tóxico • No corrosivo • No inflamable • Muy viscoso • Más caro
Etanol	20 a 30%	-10,5 a -20,5°C	• Tóxico • Inflamable • Muy viscoso
Otros	• Metanol • Cloruros: sódico, cálcico, magnésico, potásico • Carbonatos: sódico, potásico		

TABLA 1. Medios de transferencia térmica.

dolo en movimiento de forma ininterrumpida durante un periodo de 50 a 60 horas, registrando el caudal, las temperaturas de entrada y de salida del fluido del sondeo y del equipo de calefacción, y la energía térmica suministrada.

Se obtiene la conductividad y la resistencia térmica efectivas del terreno, que incluyen la influencia de los tipos de roca atravesados, espesores de las diferentes capas, flujo de agua subterránea, relleno del sondeo y material de los tubos

El ensayo se complementa con la simulación por ordenador del comportamiento que tendría el terreno en el transcurso de los años de utilización del campo de sondas geotérmicas.

Para instalaciones de pequeña potencia térmica, como es el caso de viviendas unifamiliares, con un máximo de cuatro sondas, el coste que comporta el ensayo y la simulación por ordenador no compensa, actualmente, el ahorro que se obtendría de tener que perforar menos metros de sondeos y de instalar

menos metros de tubos de polietileno, que son unas de las partidas mas importantes del precio final de una instalación geotérmica para climatización.

Para este tipo de instalaciones se recurre a realizar un somero estudio geológico, hidrogeológico y de las condiciones climatológicas locales, y a asignar valores de conductividades térmicas de rocas obtenidos de fuentes bibliográficas.

A partir de esos valores, ya sea usando programas informáticos comerciales o del propio fabricante de la bomba de calor geotérmica que se va a instalar, o aplicando procedimientos de cálculo simplificados basados en fórmulas empíricas, o ábacos obtenidos de simulaciones realizadas por ordenador, conocidos en los países de los que proceden como “reglas del pulgar” y, mas eufemísticamente, como “reglas del arte”, se determina la longitud del intercambiador geotérmico y, consecuentemente, el número y profundidad de los sondeos que han de alojarlos.



FIGURA 11. Interior de un equipo para ensayo de respuesta térmica del terreno.
Fuente: Girod.

10. CONSIDERACIONES FINALES

Siete países europeos, Suecia, Alemania, Francia, Suiza, Austria, Finlandia y Noruega, por orden de importancia, contaban en el año 2007 con 670.000 bombas de calor geotérmicas en funcionamiento. Otros países como Irlanda, Reino Unido, Polonia, Italia y España, aunque sin datos disponibles, mostraban mercados en crecimiento.

Antes de aventurar el futuro que espera en España a las bombas de calor acopladas al terreno mediante sondas geotérmicas, conviene fijarse en las circunstancias que concurren en alguno de los países mencionados.

Suecia, con 310.000 unidades en funcionamiento, ocupa la primera posición europea, pero se podría argumentar que en ese país, al igual que en Finlandia y Noruega, los inviernos son mas fríos y prolongados que en nuestras latitudes, así que hay que recurrir a dos países más próximos con climatologías, sociedades y costumbres mas afines a las españolas como son Francia y Suiza.

En Francia se encontraban en funcionamiento 84.000 unidades en el año 2007, en gran parte debido a un conjunto de actuaciones llevadas a cabo, desde hace mas de una década, por la Agencia del Medio Ambiente y Gestión de la Energía (ADEME), el Servicio Geológico y Minero (BRGM) y la principal compañía eléctrica francesa (EDF).

Esas actuaciones están encaminadas a superar la desconfianza de los usuarios hacia las bombas de calor, pues debido a errores de diseño de los sistemas geotérmicos, mala calidad de

los equipos que se instalaron y bajos rendimientos obtenidos, el mercado estuvo prácticamente paralizado entre 1985 y 1995. Actualmente Francia es el tercer mercado europeo de bombas de calor geotérmicas por detrás de Alemania.

Suiza es el cuarto país en importancia con 52.000 unidades. Tiene una superficie equivalente al 8,2% de la de España y su población representa el 16% de la española.

Las dos terceras partes de los residentes suizos y gran parte de la industria están asentados, por razones topográficas y climatológicas, en la "Meseta Suiza", que ocupa alrededor del 30% de la superficie del país, tiene una altitud promedio de 580 m, y es una de las regiones mas pobladas de Europa.

Durante el año 2007 se perforaron en Suiza 1.400 km de sondeos geotérmicos superficiales para nuevas instalaciones de climatización en edificios.

Los referentes anteriores, el retraso que arrastra España en materia de aprovechamiento de energía geotérmica poco profunda, el apoyo que ofrecen entidades y administraciones públicas, entre las que cabe mencionar a la Fundación de la Energía y a la dirección General de Industria, Energía y Minas de la Comunidad de Madrid, el agotamiento y encarecimiento previsibles de los combustibles fósiles importados, y las condiciones de elevados precios y baja disponibilidad de suelo en la mayoría de las áreas urbanas del país, permiten augurar un crecimiento muy notable en el número de intercambiadores geotérmicos verticales que se instalen en España en los próximos años.