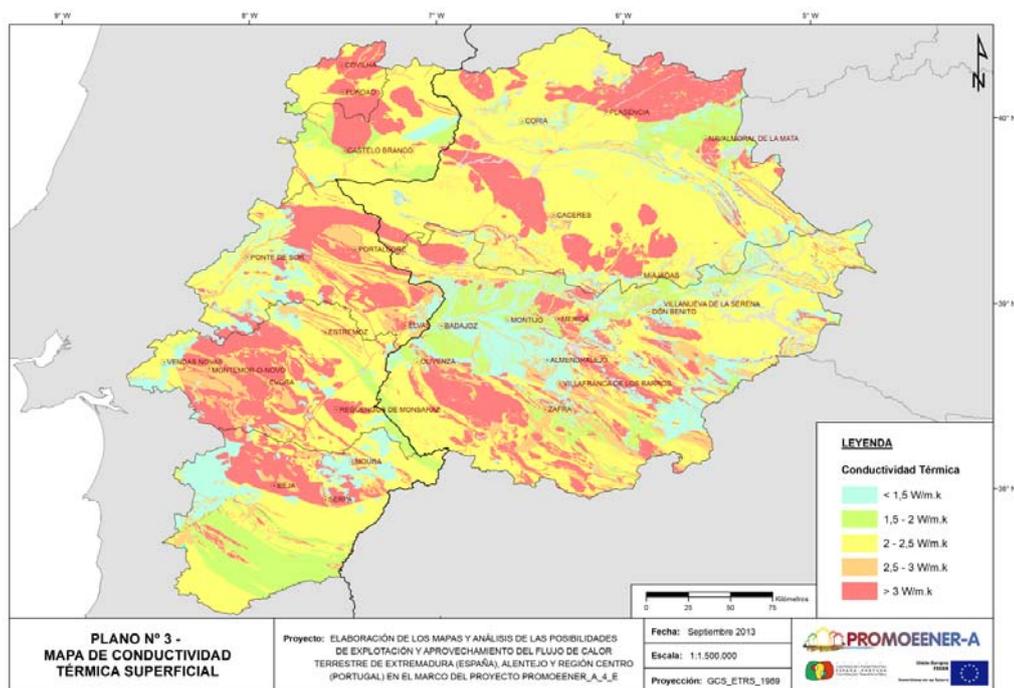


GUIA METODOLÓGICA DE APROVECHAMIENTO DE RECURSOS GEOTÉRMICOS DE MUY BAJA TEMPERATURA



Octubre, 2013



PROGRAMA
COOPERACIÓN TRANSFRONTERIZA
ESPAÑA ~ PORTUGAL
COOPERAÇÃO TRANSFRONTEIRIÇA
2 0 0 7 - 2 0 1 3

Unión Europea
FEDER
Invertimos en su futuro



INDICE

	Pág.
1. INTRODUCCIÓN	1
2. BOMBA DE CALOR GEOTÉRMICA	5
3. SISTEMAS DE EXTRACCIÓN DE CALOR DEL SUBSUELO	8
3.1 SISTEMAS ABIERTOS	8
3.2 SISTEMAS CERRADOS	9
3.3 PILOTES GEOTÉRMICOS.....	15
3.4 OTROS SISTEMAS.....	17

1. INTRODUCCIÓN

El recurso geotérmico se define como la fracción de la energía geotérmica que puede ser aprovechada de forma técnica y económicamente viable. Incluye tanto los recursos actualmente conocidos cuyo aprovechamiento resulta factible, como los que podrían serlo en un futuro relativamente próximo. El concepto de recurso geotérmico incluye desde el calor que puede encontrarse en los horizontes más superficiales del suelo, hasta el almacenado en rocas situadas a profundidades que sólo pueden alcanzarse mediante técnicas de perforación petrolífera.

Los recursos geotérmicos se clasifican según su nivel térmico –o lo que es lo mismo, su entalpía–, factor que condiciona claramente su aprovechamiento. En la bibliografía pueden encontrarse clasificaciones realizadas según distintos rangos de temperatura. Los admitidos por la *Plataforma Tecnológica Española de Geotermia* (GEOPLAT), elaborados siguiendo las últimas tendencias, son los siguientes:

- **Recursos geotérmicos de alta entalpía** ($T > 150\text{ }^{\circ}\text{C}$). Se encuentran principalmente en zonas con gradientes geotérmicos elevados y se sitúan a profundidades muy variables (suelen oscilar entre 1.500 y 3.000 m). Están constituidos por vapor seco –en muy pocos casos– o, más frecuentemente, por una mezcla de agua y vapor, y su aprovechamiento fundamental es la producción de electricidad.
- **Recursos geotérmicos de media entalpía** ($T: 100\text{ }^{\circ}\text{C} - 150\text{ }^{\circ}\text{C}$). Suelen localizarse en zonas con un gradiente geotérmico elevado a profundidades inferiores a los 2.000 m y, en cuencas sedimentarias, a profundidades comprendidas entre 3.000 y 4.000 m. Su temperatura permite el uso para la producción de electricidad mediante ciclos binarios. También pueden aprovecharse para uso térmico en calefacción y refrigeración en sistemas urbanos y en procesos industriales.
- **Recursos geotérmicos de baja entalpía** ($T: 30\text{ }^{\circ}\text{C} - 100\text{ }^{\circ}\text{C}$). Se localizan habitualmente en zonas con un gradiente geotérmico normal a profundidades entre 1.500 y 2.500 m, o a profundidades inferiores a los 1.000 m en zonas con un gradiente geotérmico más elevado. Su explotación se destina básicamente a usos térmicos para calefacción/climatización y ACS urbanos y para diferentes procesos industriales. Los fluidos geotérmicos raras veces se utilizan directamente; lo más frecuente es el aprovechamiento mediante intercambiadores y/o bombas de calor. Suelen requerir una demanda importante de energía calorífica en las proximidades.

Recursos geotérmicos de muy baja entalpía ($T < 30\text{ }^{\circ}\text{C}$). Las temperaturas de estos recursos, generalmente próximas a la media anual del lugar donde se captan, corresponden a la energía térmica almacenada en las aguas subterráneas, incluidas las provenientes de labores mineras y drenajes de obras civiles, siempre para uso exclusivamente energético y no consuntivo del agua, y en el subsuelo poco profundo (normalmente, a menos de 200 m, incluyendo las captaciones de calor asociadas a elementos constructivos de la edificación). En este último caso, la energía renovable puede captarse de manera muy eficiente, dada la estabilidad térmica del subsuelo frente a la oscilación estacional del ambiente como

consecuencia de la transmisión de calor hacia las zonas más externas de la corteza. Dicha transmisión hace posible que, a partir de 10-15 m de profundidad, la temperatura del terreno se mantenga prácticamente estable durante todo el año. Su aplicación se centra en los usos directos del calor: aporte energético a sistemas de ventilación, calefacción y refrigeración de locales y/o procesos, con o sin utilización de una bomba de calor.

En la figura 1 se presentan diferentes tipos de explotación de yacimientos geotérmicos en un esquema de la IGC.

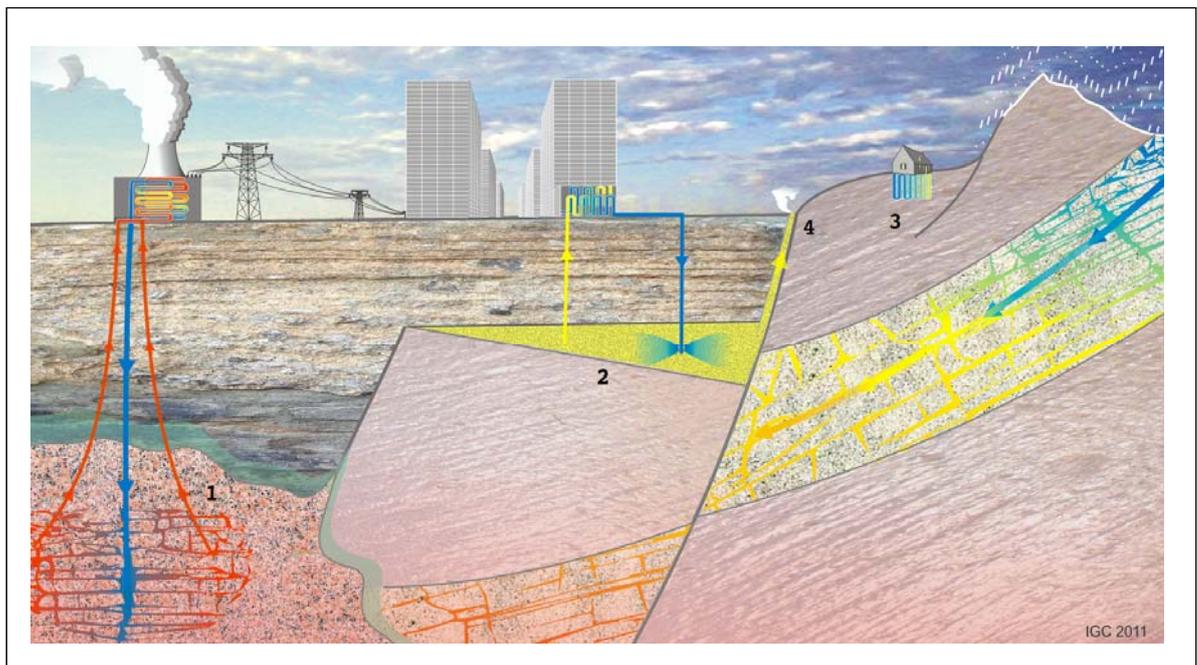


Figura 1. Ejemplo de tipos de explotación de yacimientos geotérmicos. 1) De alta temperatura tipo roca seca, se inyecta agua fría y mediante un ciclo combinado se obtiene electricidad. 2) De media temperatura, de un acuífero profundo se extrae agua caliente para climatización de distrito. 3) De baja temperatura, mediante un intercambiador de calor enterrado se explota la inercia térmica del terreno para climatizar una casa. 4) Representa una manifestación termal originada por un proceso de circulación de agua: infiltración en una zona de carga, transición lenta por un acuífero profundo y descarga rápida a través de la falla de contacto entre cuenca y basamento (fuente IGC, 2011).

La temperatura media del aire en la superficie del área PROMOEENER está comprendida en el rango de 9,5 °C en las zonas más elevadas al nordeste de la provincia de Cáceres, hasta los 17,5 °C al sur del Baixo Alentejo. Sin embargo la temperatura media en gran parte del área está comprendida en un margen más estrecho de 14-16,5 °C. Esta temperatura media, considerada en la superficie de la Tierra debe tener un valor medio próximo a los 15 °C. Pero su fluctuación a lo largo del año es grande, pudiendo tener variaciones estacionales de más de 20 °C entre enero-diciembre y julio-agosto. Estas variaciones estacionales llegan a afectar a los 10-12 metros de profundidad.

También las variaciones diarias de temperatura en el aire afectan al subsuelo, si bien alcanza una menor profundidad debido a la corta duración del ciclo (12 horas). Se tiene constancia que a 0,5-1 metro de profundidad se producen fluctuaciones diarias de temperatura.

Se considera que es a partir de los 15-20 metros de profundidad aproximadamente donde la temperatura del subsuelo se mantiene constante todo el año. Y a partir de esta profundidad la temperatura aumenta en función del gradiente geotérmico, pero manteniendo constante para una misma profundidad.

Por ello, dada esta estabilidad térmica se considera que el subsuelo en sus primeros 100-200 metros es un buen medio para proporcionar y almacenar energía térmica.

De acuerdo con los estudios ejecutados en el marco del proyecto PROMOEENER, la temperatura a 50 metros de profundidad se encuentra en el rango de 16-20 °C, y a 100 metros en el rango de 18-21 °C. Estas temperaturas constantes durante todo el año suponen la disponibilidad de un importante potencial de energía geotérmica somera generalizada en el área PROMOEENER, gracias a las importantes características térmicas de los materiales geológicos existentes en el subsuelo de la misma. Los estudios realizados asignan a una gran mayoría del territorio una capacidad de cesión de calor superior a 60 vatios térmicos por metro de sondeo o perforado (figura 2) y una conductividad térmica superficial superior a 2 W/m.°C (figura 3).

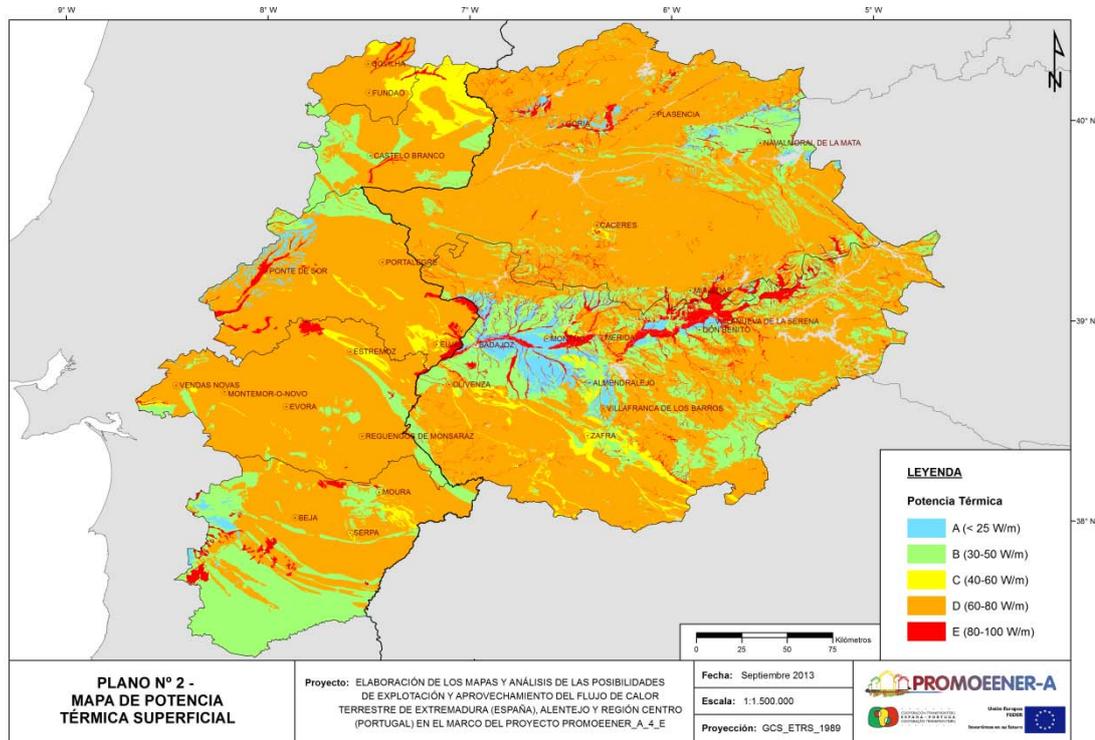
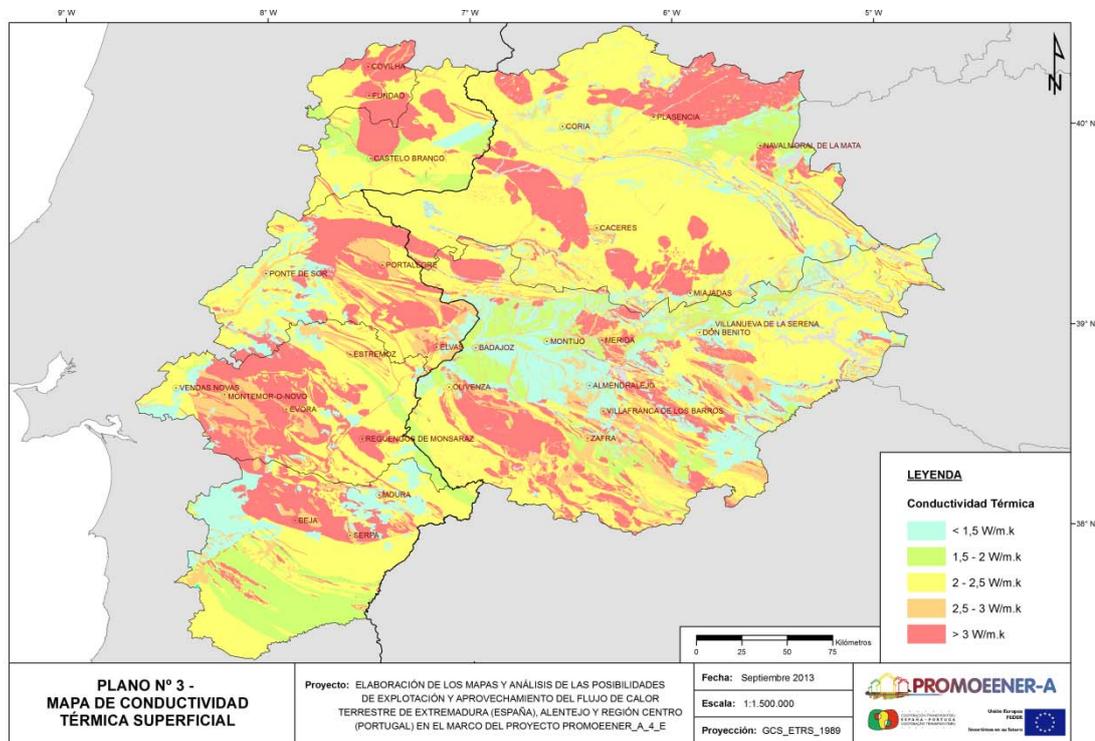
Las tecnologías para aprovechar esta energía almacenada en los primeros metros de la corteza terrestre son básicamente dos:

- *Bomba de calor geotérmica (GHP: Geothermal Heat Pump).*
- *Almacenamiento subterráneo de energía térmica (UTES: Underground Thermal Energy Storage).*

En ambos casos, las tecnologías desarrolladas para aprovechar el calor del subsuelo son función de la accesibilidad del recurso geotérmico, y pueden clasificarse en dos tipologías principales que, a su vez, incluyen diferentes subtipos:

- *Circuitos abiertos*, basados en el uso de aguas subterráneas extraídas de un acuífero para su aprovechamiento. En este caso, el agua subterránea es el medio de transporte del calor.
- *Circuitos cerrados*, cuyo fundamento es el empleo de un fluido –básicamente, agua con algún aditivo–, para extraer el calor de los materiales existentes a poca profundidad en el subsuelo. Implican la instalación de un intercambiador –vertical u horizontal– en el terreno para el aprovechamiento energético, cuya pared separa el fluido termoportador de la roca y del agua subterránea.

En la tabla 1 refleja un conjunto de datos de interés para valorar la importancia de los diferentes usos directos de la energía geotérmica a escala mundial, correspondientes al año 2010.


Figura 2

Figura 3

Usos	Año 2010		
	Capacidad instalada (MW _t)	Utilización (TJ/año)	Factor de capacidad*
Bomba de calor geotérmica	35.236	214.782	0,19
Calefacción de recintos	5.391	62.984	0,37
Calentamiento invernaderos	1.544	23.264	0,48
Calentamiento estanques acuicultura	653	11.521	0,56
Secado productos agrícolas	127	1.662	0,42
Usos industriales	533	11.746	0,70
Baño y natación	6.689	109.032	0,52
Refrigeración/fusión de nieve	368	2.126	0,18
Otros	41	956	0,73
Total	50.583	438.071	0,27

*Porcentaje equivalente de horas de funcionamiento anual a plena carga de un determinado tipo de instalación (p. ej., un factor de capacidad de 0,70 significa un 70% de horas/año de funcionamiento a plena carga, es decir, 6.132 horas/año equivalentes)

Tabla 1. Capacidad instalada, energía térmica utilizada y factor de capacidad correspondientes a usos directos de la energía geotérmica durante el año 2010

Fuente: Lund, J.W., & Others *Direct Utilization of Geothermal Energy 2010 Worldwide Review*. Proceedings World Geothermal Congress 2010 (Bali, Indonesia)

2. BOMBA DE CALOR GEOTÉRMICA

Una bomba de calor es una máquina que transfiere el calor desde un foco frío a otro caliente utilizando una cantidad de trabajo relativamente pequeña. Dado que, de forma natural, el calor fluiría en sentido contrario –del foco caliente al frío– hasta alcanzar un equilibrio de temperaturas, es necesario aportar energía para lo cual suele emplearse un compresor accionado por un motor. Las bombas de calor de uso más extendido están basadas en ciclos de compresión de un fluido refrigerante; sus componentes esenciales son los siguientes:

- El refrigerante: la sustancia que circula por la bomba de calor y que se encarga, alternativamente, de la absorción, transporte y liberación de calor.
- La válvula de inversión: controla la dirección del flujo del refrigerante en la bomba de calor.
- El evaporador: un intercambiador encargado de extraer el calor, en el cual el refrigerante absorbe el calor de su entorno y hierve para convertirse en vapor a baja temperatura.
- El compresor: comprime las moléculas del gas refrigerante, incrementando su temperatura.
- El condensador: un intercambiador encargado de ceder calor, en el que el refrigerante emite calor a su entorno y se transforma en un líquido.

- La válvula de expansión: libera la presión creada por el compresor.

La figura 4 refleja, mediante un esquema muy sencillo, el funcionamiento de una bomba de calor. La ventaja de estos dispositivos frente a otros sistemas reside, pues, en su capacidad para aprovechar la energía existente en el ambiente (foco frío) —en el aire, el agua o la tierra—, para proporcionar calor a las dependencias interiores (foco caliente) con una aportación relativamente pequeña de energía eléctrica. Cuando se realiza la transferencia de calor en sentido inverso, es decir, desde el recinto que requiere frío hacia el ambiente que se encuentra a temperatura superior, la bomba de calor trabaja en modo refrigeración.

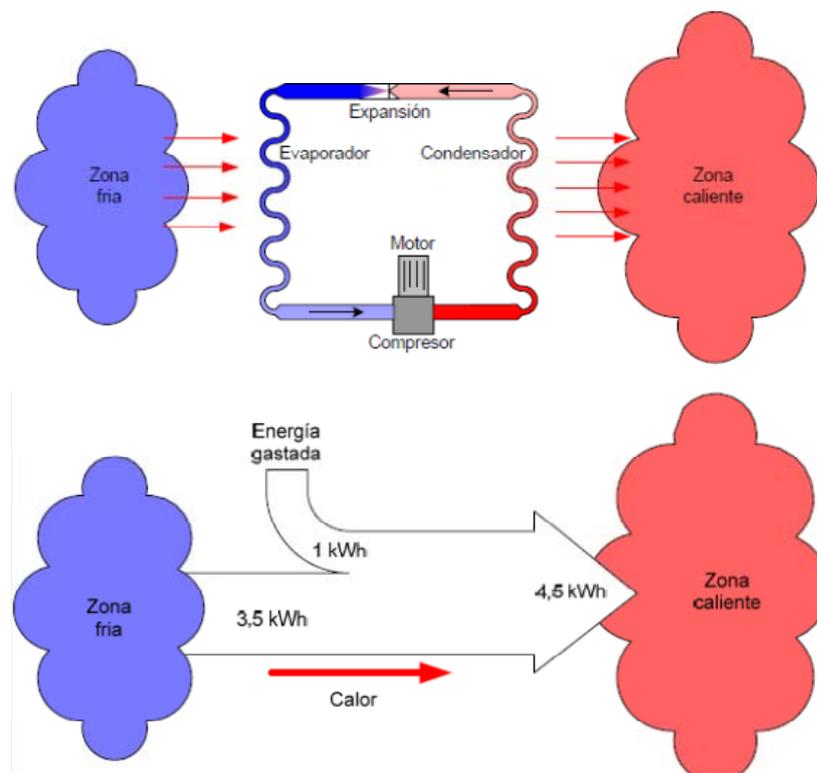


Figura 4. Componentes básicos (a) y balance de energía (b) de una bomba de calor por compresión en régimen de calentamiento

Fuente: *Guía Técnica de Bombas de Calor Geotérmicas*. FENERCOM (2009)

Como cifras básicas de referencia se puede afirmar que, para una bomba de calor que opera en régimen de calefacción, por cada kWh de trabajo del compresor se introducen en el espacio a calentar 4,5 kWh de calor, de los cuales 3,5 kWh proceden del terreno.

El rendimiento o eficiencia energética de la bomba de calor es el ratio que indica la relación entre la energía térmica producida por la bomba de calor y la energía eléctrica consumida para suministrarla. En modo calefacción, el rendimiento de la bomba o COP (*Coefficient of Performance*) vendría, pues, definido como la cantidad de calor que se introduce en el recinto por cada kWh consumido en el compresor, es decir:

$$COP = \frac{Q_1}{W}$$

En modo refrigeración, el rendimiento de la bomba o EER (*Energy Efficiency Ratio*) vendría definido como la cantidad de calor que se consigue extraer del recinto a refrigerar por cada kWh consumido en el compresor, es decir:

$$EER = \frac{Q_2}{W}$$

En síntesis, la bomba de calor geotérmica extrae, pues, calor del subsuelo a una temperatura relativamente baja, aumentándola, mediante el consumo de energía eléctrica, para posibilitar su uso posterior en sistemas de calefacción. Asimismo, existe la opción de invertir el proceso en verano, inyectando en la tierra el calor absorbido en la refrigeración de la instalación a climatizar. Esta tecnología representa, en la mayoría de los casos, la única posibilidad de aprovechamiento de los recursos de muy baja entalpía ($T < 30\text{ }^{\circ}\text{C}$) asociados a la denominada *geotermia somera*, presentes prácticamente bajo cualquier terreno, y es, sin duda, la que mejor se adapta a las necesidades de climatización de edificios. Según el Departamento de Energía de Estados Unidos, la bomba de calor geotérmica utiliza entre un 25% y un 50% menos de electricidad que los sistemas convencionales de calefacción y refrigeración, reduciendo el consumo energético –y las emisiones asociadas– de un 45% a un 70%, si se comparan con éstos.

Según se indicó anteriormente, los sistemas que conectan la bomba de calor geotérmica con el subsuelo son, básicamente, de dos tipos: abiertos o cerrados, si bien existen otras modalidades que se describirán posteriormente. Su elección dependerá de diversos factores, tales como las características geológicas e hidrogeológicas del terreno, dimensiones y uso de la superficie disponible, existencia de fuentes potenciales de calor y demanda de calefacción y refrigeración de los edificios. La tabla 2 ofrece un resumen de las ventajas e inconvenientes de los sistemas abiertos (sondeos de extracción de aguas subterráneas) y los sistemas cerrados que emplean intercambiadores de calor verticales.

SISTEMA ABIERTO (Sondeos de extracción de aguas subterráneas)	SISTEMA CERRADO (Intercambiadores de calor verticales)
Transporte de calor desde el subsuelo al pozo o viceversa por diferencia de presión (bombeo).	Transporte de calor desde el subsuelo al pozo o viceversa por diferencia de temperatura.
Ventajas: <ul style="list-style-type: none"> Alta capacidad con un coste relativamente bajo Temperatura de la fuente de calor relativamente alta / bajo nivel de la fuente fría. 	Ventajas: <ul style="list-style-type: none"> Sin mantenimiento regular. Seguro. Puede utilizarse prácticamente en cualquier lugar.
Desventajas: <ul style="list-style-type: none"> Mantenimiento de los pozos. Requiere de un acuífero con suficiente rendimiento. La composición del agua debe ser investigada. 	Desventajas: <ul style="list-style-type: none"> Capacidad limitada por pozo. Temperatura de la fuente de calor relativamente baja / alto nivel de la fuente fría.

Tabla 2. Ventajas e inconvenientes de los sistemas abiertos y cerrados

Fuente: *Geotrainet training manual for designers of shallow geothermal systems*. GEOTRAINET, EFG, Brussels 2011

3. SISTEMAS DE EXTRACCIÓN DE CALOR DEL SUBSUELO

3.1 Sistemas Abiertos

Se caracterizan porque el agente portador del calor es el agua subterránea que actúa, además, como medio para el intercambio del mismo. Estos sistemas precisan, al menos, de dos sondeos: uno de extracción y otro de inyección. El rendimiento de los sondeos de extracción debe ser el necesario para garantizar a largo plazo el flujo nominal necesario para el funcionamiento de las bombas de calor asociadas al sistema; ello supone del orden de de 0,25 m³/h por cada kW de potencia térmica. Dicho rendimiento dependerá de las características geológicas locales. En el caso de que el conocimiento previo de estas últimas fuese insuficiente, sería necesario perforar un primer sondeo con el fin de realizar los oportunos ensayos de bombeo o, incluso, la aplicación de técnicas geofísicas; dicho sondeos se emplearía posteriormente como pozo de extracción o inyección.

La calidad del agua subterránea puede tener una influencia considerable en el diseño y operación de la planta, especialmente en el caso de los pozos, por lo que debe ser objeto de una investigación previa.

Las aguas con un potencial rédox bajo y las que presentan contenidos apreciables de hierro y manganeso, deben ser objeto de especial atención con el fin de prevenir incrustaciones, al igual que la de pH elevado, para evitar la precipitación de carbonatos. Asimismo, debe valorarse el riesgo de corrosión de la instalación asociado a su contenido salino. En tal sentido, todos los elementos metálicos que entren en contacto con el agua subterránea, tales como bombas sumergidas, tuberías, accesorios y válvulas, intercambiadores de calor, etc. deberán ser resistentes a la corrosión. También podría ser necesaria la instalación de filtros para proteger los intercambiadores.

La figura 5 ofrece un sencillo esquema de aplicación de un sistema abierto al caso de una vivienda unifamiliar. Estos sistemas, bastante difundidos en España –sobre todo en zonas con acuíferos aluviales con buenas productividades y niveles piezométricos someros–, son sencillos, con bajos costes de inversión y elevados rendimientos, aunque con el inconveniente de que su explotación está sujeta a una tramitación administrativa compleja y dilatada.

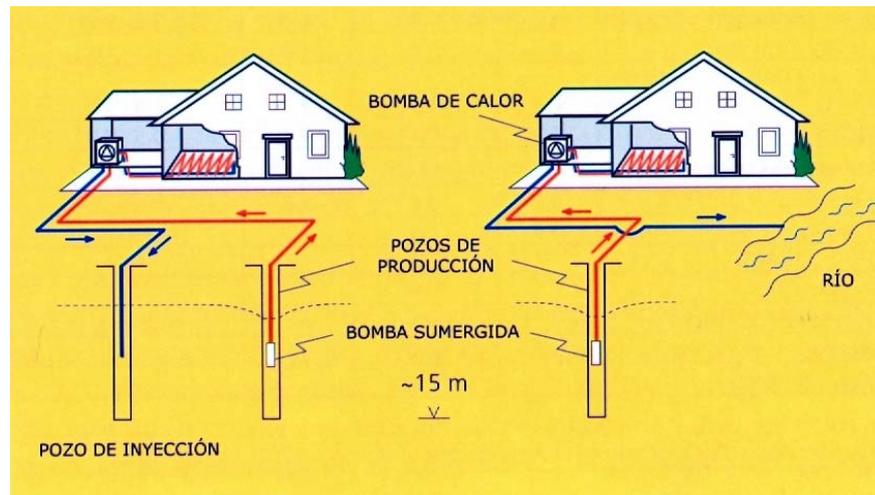


Figura 5. Diagramas de funcionamiento de una bomba de calor geotérmica en sistema abierto
 Fuente: Llopis Trillo, G.; Rodrigo Angulo, V. *Guía de la Energía Geotérmica*. Comunidad de Madrid. 2008

3.2 Sistemas Cerrados

Se basan en el empleo de intercambiadores enterrados que aprovechan el calor acumulado en los materiales de los niveles más superficiales de la corteza terrestre. En el interior de dichos intercambiadores circula, en circuito cerrado, un fluido termoportador –en los sistemas abiertos era el agua subterránea–, que cede la energía captada del subsuelo a la bomba de calor y viceversa. Obviamente, en estos sistemas las propiedades térmicas del terreno desempeñan un papel esencial.

Los múltiples factores que definen el diseño de los intercambiadores de calor enterrados hacen factibles distintas variantes para un mismo sistema, entre las que debe seleccionarse la que mejor se adecúe al proyecto que se pretenda realizar, así como la que proporcione el máximo rendimiento de la instalación al menor coste posible. El mercado ofrece diversos programas comerciales de diseño de estos dispositivos; entre ellos, el propuesto por la International Ground Source Heat Pump Association (IGSHPA) puede considerarse como una buena referencia metodológica, y como tal fue escogido por el IDAE para su *Guía técnica de diseño de sistemas de bomba de calor geotérmica*.

Las especificaciones de la bomba de calor fijan varios parámetros de diseño del intercambiador de calor enterrado, en la medida en que determinan el calor intercambiado con el suelo y el caudal circulante por el intercambiador, además de fijar el rendimiento del sistema (COP) de acuerdo con sus curvas características de potencia-temperatura. La selección de la bomba de calor se realiza a partir de un cálculo de cargas térmicas de acuerdo a las exigencias de diseño y dimensionado especificadas en el Reglamento de Instalaciones Térmicas (RITE).

Los intercambiadores de calor en circuito cerrado suelen clasificarse en dos grupos según su disposición en el terreno: horizontales y verticales.

- **Intercambiadores horizontales.** Son los sistemas cerrados más fáciles de instalar, si bien para alcanzar el rendimiento proyectado requieren de superficies de terreno suficientemente amplias. Por ello, muy rara vez se utilizan en las instalaciones urbanas o suburbanas mientras que, en entornos rurales o en regiones de baja densidad de desarrollo, estos intercambiadores pueden tener ventajas sobre los colectores geotérmicos verticales. De hecho, la mayoría de los proyectos basados en intercambiadores horizontales se refieren a viviendas unifamiliares o a pequeñas instalaciones comerciales, mientras que los sistemas verticales son apropiados para grandes instalaciones, puesto que permiten una perfecta integración en la edificación sin comprometer grandes superficies de terreno.

En los sistemas horizontales, la realización de complejos análisis térmicos para diseñar los colectores no resulta justificada, entre otros motivos debido a que las mediciones de temperatura a corto plazo resultan, en estos casos, escasamente útiles, por cuanto están fuertemente condicionadas por las variaciones estacionales. En la práctica, la información que es imprescindible conocer para diseñar un sistema de colectores horizontales es, básicamente, la siguiente:

- Energía térmica que se necesita importar y exportar anualmente para satisfacer la demanda.
- Promedios de temperatura, radiación solar global, lluvia y nieve en la zona.
- Características del suelo.
- Productividad térmica estimada del suelo y posibilidad de mejorarla.
- Adecuación de la superficie de terreno disponible para proporcionar un rendimiento aceptable de la bomba de calor geotérmica.

Los intercambiadores horizontales pueden clasificarse de diferentes modos. Considerando el número de tubos, los hay sencillos, dobles, etc. y, según la dirección del fluido, se construyen en serie o en paralelo (figura 6). Asimismo, hay que citar las configuraciones tipo *slinky*, una variante de la horizontal consistente en disponer la tubería formando bucles o espiras, al objeto de poder instalar la mayor longitud de intercambiador con la menor excavación posible.

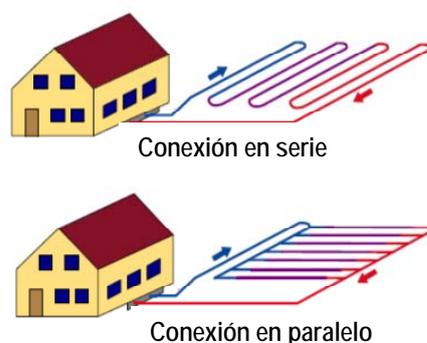


Figura 6. Sistema cerrado con intercambiador de calor horizontal en serie y en paralelo

Fuente: Mands, E., Sanner, B. *Shallow Geothermal Energy*. UBeG GbR, Zum Boden 6, D-35580 Wetzlar

En estas distribuciones con alta densidad de tuberías, lo habitual es retirar completamente la capa superficial del terreno, colocar las conducciones y, finalmente, cubrirlas con la tierra retirada. En el Norte de Europa y de América, donde el terreno es más barato, se prefiere un circuito más amplio, con tuberías situadas en zanjas (figura 7).



Figura 7. Sistema cerrado con intercambiador de calor horizontal de un bucle
 Fuente: Mands, E., Sanner, B. *Shallow Geothermal Energy*. UBeG GbR, Zum Boden 6, D-35580 Wetzlar

Las tuberías, normalmente de polietileno, de 25 a 40 mm de diámetro, por las que circula el líquido de intercambio térmico –agua o agua glicolada– se instalan en zanjas a una profundidad mínima de 0,90 metros, en disposiciones que incluyen hasta seis tubos por zanja, si bien lo habitual es que sólo se coloquen dos.

Para solventar los problemas de espacio que, en ocasiones, se plantean con este tipo de colectores, se han desarrollado unos intercambiadores de calor especiales especialmente adecuados para sistemas que trabajan con bombas de calor para usos en calefacción y refrigeración. Un tipo de estos intercambiadores, los de tipo *slinky* antes citados, se basa en la colocación de bobinas de polietileno en el terreno, extendiendo las sucesivas espiras e intercalando tierra seleccionada o arena (figura 8). Dichas espiras pueden disponerse horizontalmente, en una zanja ancha, o verticalmente, en una zanja estrecha.

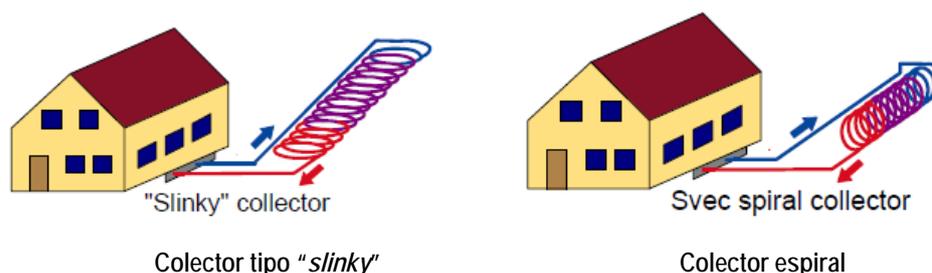


Figura 8. Sistemas cerrados con intercambiadores de calor de tipo bobina
 Fuente: Mands, E., Sanner, B. *Shallow Geothermal Energy*. UBeG GbR, Zum Boden 6, D-35580 Wetzlar

La incidencia de la radiación solar sobre la superficie terrestre constituye el principal medio de recarga térmica de estos sistemas, por lo que es importante no cubrir la superficie situada por encima de las tuberías situadas en el terreno. Normalmente, estos sistemas tienen un coste inferior al que supone la perforación de sondeos, pero presentan el

inconveniente de requerir una considerable superficie con espesores *ripables* superiores a 1 metro, lo que no siempre es fácil de conseguir, además de estar sometidos a importantes variaciones de temperatura y humedad que afectan al rendimiento estacional. La figura 9 ofrece algunas imágenes de intercambiadores horizontales enterrados.



Intercambiador horizontal de lazo simple



Intercambiador horizontal en bucles de tipología *slinky* horizontal

Figura 9. Intercambiadores horizontales

Fuente: *Guía técnica de diseño de sistemas de bomba de calor geotérmica* (IDAE – 2008)

- **Intercambiadores verticales.** Los sistemas cerrados con intercambiador vertical requieren la perforación de sondeos de profundidad variable –normalmente, entre 60 y 200 metros– y pequeño diámetro –de 10 a 20 cm–, en los que se introducen colectores de calor –un doble tubo en el caso más sencillo– por los que circula el fluido termoportador. Estos dispositivos verticales de captación de calor se denominan **sondas geotérmicas** (figura 10).

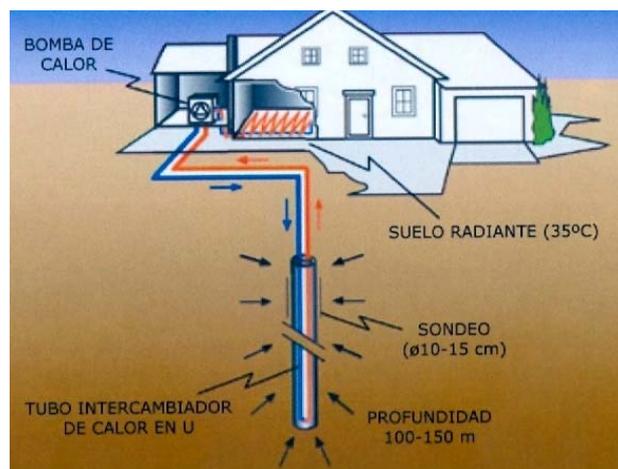


Figura 10. Sonda geotérmica

Fuente: Llopis Trillo, G.; Rodrigo Angulo, V. *Guía de la Energía Geotérmica*. Comunidad de Madrid. 2008.

La transferencia de calor entre el fluido termoportador y el terreno circundante depende de la disposición del circuito, del calor transferido por convección en los conductos y de las propiedades térmicas de los distintos materiales implicados en el proceso térmico. Las resistencias térmicas asociadas con estos diferentes elementos pueden agruparse en dos: la resistencia térmica entre el fluido portador de calor y la pared del pozo –comúnmente denominada como *resistencia térmica del pozo*–, y la resistencia térmica del terreno que rodea a dicha pared. Es importante señalar que la influencia del tipo seleccionado de intercambiador de calor del pozo es baja en comparación con la influencia del terreno circundante.

La fuente de recarga de la energía térmica captada por los intercambiadores verticales es, en la zona superficial, la radiación solar y, en la zona inferior, el flujo de calor geotérmico, con cierta influencia, en su caso, del agua subterránea circulante o de las aguas percoladas. Durante el funcionamiento de la bomba de calor geotérmica, se registra un descenso de la temperatura del terreno en torno al sondeo, al que hay que unir el derivado de la resistencia térmica del propio sondeo antes mencionada, del que son responsables el material de relleno del mismo y las paredes del intercambiador.

Para reducir las pérdidas de temperatura en los sondeos, éstos deben rellenarse con algún material que favorezca la transmisión de calor a los tubos captadores situados en su interior, además de la circulación del agua que pudiera haber en el terreno debido a la existencia de algún nivel freático a poca profundidad, o bien a la presencia de aguas someras procedentes de filtraciones de agua de lluvia. Teniendo en cuenta que la presencia de agua en el terreno aumenta considerablemente la capacidad para transmitir el calor geotérmico, en el caso de que en el sondeo no la haya, lo más recomendable es un relleno de gravas, arenas permeables u otros materiales térmicamente mejorados para incrementar la conductividad térmica y disminuir las referidas pérdidas.

Para el diseño de una sonda geotérmica, se requiere el conocimiento previo de la conductividad térmica del terreno, la humedad natural del suelo, la presencia o no de aguas subterráneas y el tipo de requerimientos de la instalación prevista. Además, resulta clave la potencia de extracción de calor por metro lineal de sonda. En los casos en que se precisan potencias mayores a las habituales –entre 20 y 70 W/m–, pueden emplearse **campos de sondas geotérmicas**, en número de 4 a 50 y profundidades que oscilan entre 50 y 200 metros, dependiendo de la potencia requerida y de las condiciones geológicas locales. Los colectores de las sondas pueden disponerse junto a las edificaciones o debajo de ellas, o bien pueden situarse en el exterior, en zanjas realizadas en el terreno (figura 11). Los campos de sondas geotérmicas pueden constituir una base adecuada para los sistemas de almacenamiento subterráneo de energía térmica, a los que se hará referencia más adelante.

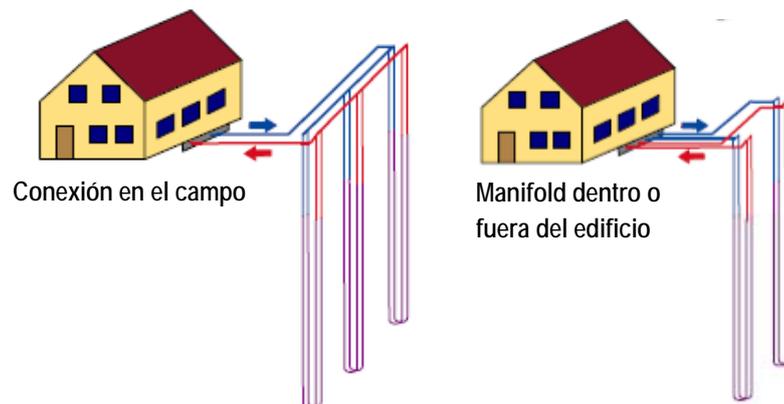


Figura 11. Intercambiadores verticales en sondas (sondas geotérmicas)

Fuente: Mands, E.; Sanner, B. *Geothermal Heat Pumps*. UBeG GbR, Zum Boden 6, D-35580 Wetzlar.

Las instalaciones que disponen de bomba de calor acoplada a circuitos cerrados con intercambiadores verticales son de dimensiones muy variadas: desde viviendas unifamiliares con un solo intercambiador de 60-100 m de profundidad hasta grandes edificios que requieren campos con un importante número de sondas geotérmicas de hasta 200 m de profundidad.

Para el diseño de intercambiadores verticales conectados a instalaciones individuales o de pequeño tamaño puede recurrirse a tablas, datos empíricos y normas generales (las hay en Suiza y Alemania), mientras que, en el caso de instalaciones de mayor envergadura, es necesario calcular el número y la longitud de los dispositivos necesarios para lo que existen diversos programas en el mercado. Para un número considerable de instalaciones de pequeña envergadura –por ejemplo, una comunidad de 60 viviendas unifamiliares con dos sondas geotérmicas por vivienda–, cuanto menor sea la distancia entre perforaciones, mayor deberá ser la profundidad de los intercambiadores.

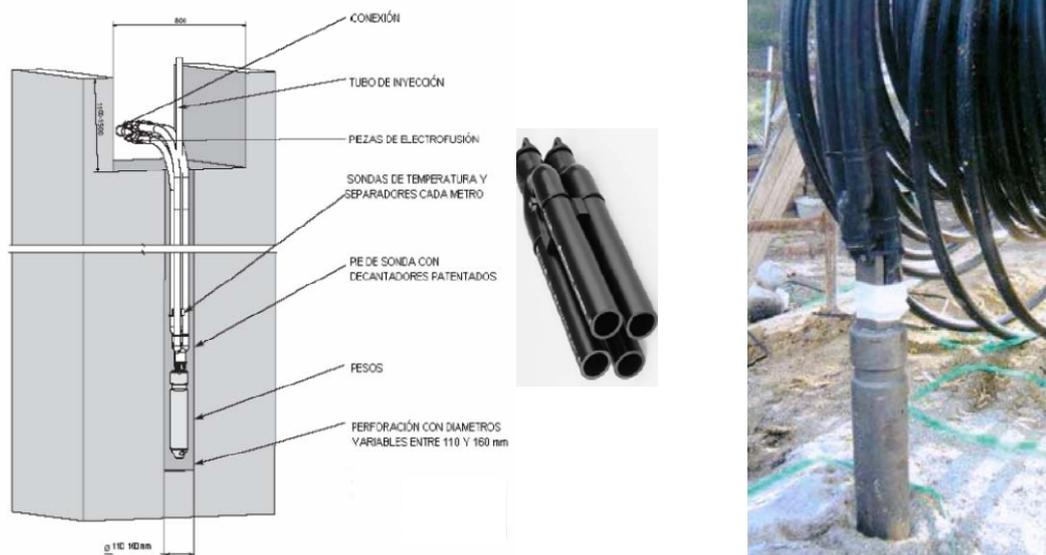
Los tubos captadores a instalar en el interior del sondeo pueden presentar distintas configuraciones que, básicamente, se ajustan a los siguientes tipos básicos:

- **Con tubos en U.** El sistema de captación consiste en un par de tubos unidos en su base mediante un codo de 180°, cuyas salidas se conectan al circuito primario de las bombas de calor geotérmicas. En cada sondeo pueden instalarse, dependiendo de su diámetro de perforación, hasta cuatro de estos pares de tubos en U, existiendo también la posibilidad de dar a estos pares un mayor recorrido a lo largo de varias sondas. La ventaja de esta configuración es el bajo coste del material de los tubos, circunstancia que ha contribuido a que los intercambiadores verticales de este tipo sean los más utilizados en Europa.

- **Con tubos coaxiales.** El sistema de captación, en su disposición más simple, consta de dos tubos concéntricos de diferente diámetro. Existen configuraciones más complejas que incluyen un mayor número de tubos colectores.

Los intercambiadores de calor del pozo suelen suministrarse prefabricados, Están formados por tuberías de polietileno o polipropileno, cuyo diámetro varía normalmente entre 3/4" (25 mm) y 2" (63 mm), en función del caudal circulante y la longitud del circuito (ver imágenes de la figura 12). Su instalación habitualmente corre a cargo de la propia empresa de perforación.

La estabilidad de la temperatura en el subsuelo, hecho ya señalado con anterioridad, permite el aprovechamiento de la energía térmica transmitida desde el interior de la Tierra hasta las capas más superficiales de la corteza terrestre, mediante los captadores ubicados en las perforaciones. Esta circunstancia y el bajo índice de ocupación del terreno que presenta este sistema se muestran como las principales ventajas del mismo. Su principal inconveniente son los costes iniciales de implantación.



Fuente: European Geothermal Energy Council

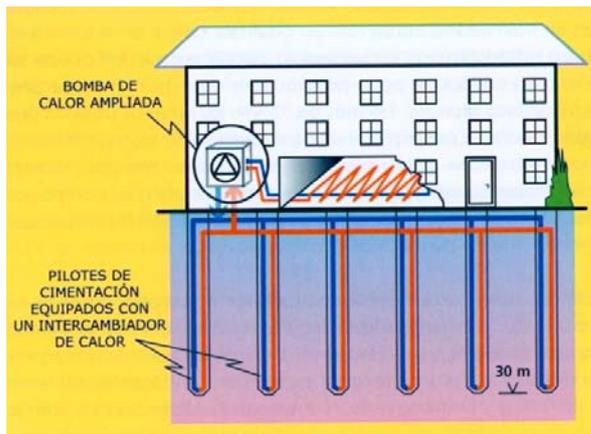
Fuente: *Guía Técnica de Bombas de Calor Geotérmicas*. FENERCOM (2009)

Figura 12. Imágenes de intercambiadores de calor verticales

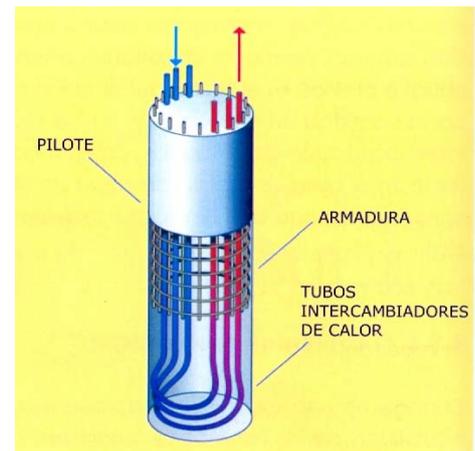
3.3 Pilotes Geotérmicos

Reciben también el nombre de *cimientos geotérmicos*, *energéticos* o *termoactivos*, *geoestructuras* o *pilotes intercambiadores de calor*. Constituyen una variante de los sistemas cerrados, que aprovecha las estructuras de cimentación profunda de los edificios para captar y disipar la energía térmica del/al terreno. En este caso, los propios pilotes de la cimentación – piezas de hormigón armado– actúan como sondas geotérmicas, lo que convierte a la estructura en un campo de sondas (figura 13). Los pilotes utilizados pueden ser prefabricados o montados *in situ*, con diámetros que varían entre 40 cm y más de 1 m. También puede aplicarse en zapatas, losas, muros pantalla, etc.

Este sistema se basa en insertar en la totalidad o en una parte de los pilotes, una red de tubos de polietileno, propileno o PVC en forma de conductos en U, por los que se hace circular agua con un anticongelante, que se conectan en circuito cerrado a una bomba de calor o a una máquina de refrigeración. En cada pilote, sujetos a la armadura metálica de éste, pueden situarse varios pares de tubos independientes, que convergen en superficie en un colector común. Una vez colocada la armadura del pilote en la excavación, éste se rellena con hormigón, de forma maciza o dejando el centro hueco.



Sistema de cimentaciones energéticas



Tubos intercambiadores de calor integrados en un pilote para cimentación

Figura 13. Pilotes geotérmicos

Fuente: Llopis, G.; Rodrigo, V. *Guía de la Energía Geotérmica*. Comunidad de Madrid. 2008

La red de tubos intercambiadores constituye la alimentación a la bomba de calor geotérmica –una o varias, en función de las necesidades del edificio–, conformando la instalación de climatización e, incluso, de agua caliente sanitaria.

Para realizar un proyecto de cimentación termoactiva es preciso integrar esta tecnología dentro de la propia planificación de la obra desde el primer momento. Asimismo, es necesario conocer en detalle las condiciones mecánicas del suelo, las características hidrogeológicas del emplazamiento así como los distintos sistemas de cimentación a utilizar. Para lograr el máximo aprovechamiento del recurso geotérmico, se debe realizar una simulación tridimensional de todas las condiciones dinámicas que intervienen en el proyecto, así como realizar un estudio energético detallado del proyecto geotérmico completo, incluyendo la bomba de calor y los restantes subsistemas.

Esta tecnología que, años atrás, solo se utilizaba en viviendas individuales y plurifamiliares, es, en la actualidad, una de las más empleadas para calentar y refrigerar edificios de grandes dimensiones. Ofrece, como ventajas, un considerable ahorro de trabajo, al desarrollarse de forma conjunta los proyectos de climatización y de construcción, así como de espacio, al situarse todo el circuito de intercambio debajo del edificio a climatizar. Su principal inconveniente es la dificultad –prácticamente, imposibilidad– que presenta la reparación de los tubos captadores una vez instalado y hormigonado el pilote. Por este motivo, lo habitual es

sobredimensionar el número de pares de tubos captadores para, en caso de que alguno quede inutilizado, contar con el mínimo necesario para garantizar el suministro de calor a las bombas geotérmicas.

También es posible embutir tubos captadores que alimenten bombas de calor geotérmicas en estructuras de sostenimiento lateral o de bóveda de túneles de ferrocarriles subterráneos que circulan bajo grandes ciudades, con el objetivo de climatizar las propias estaciones o los edificios situados en zonas próximas.

3.4 Otros Sistemas

En este grupo se incluyen los sistemas que no pueden calificarse, de forma categórica, como abiertos o cerrados. Sería el caso de los *pozos de tipo columna* y de los aprovechamientos de aguas de minas y túneles.

- **Pozos de tipo columna.**- El agua se bombea desde un pozo y, tras abandonar la bomba de calor, se devuelve al mismo a través de la grava que rellena el anular del sondeo (figura 14). Los pozos de este tipo necesitan alcanzar cierta profundidad para que el aporte de energía sea suficiente para que el agua no se congele, de modo que, en la mayoría de las instalaciones, las perforaciones tienen varios cientos de metros de profundidad. Se conocen ejemplos en Europa (Suiza y Alemania) y en EEUU. Considerando los costes perforación, esta tecnología no resulta adecuada para pequeñas instalaciones.

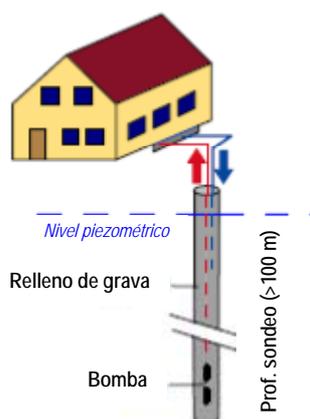


Figura 14. Pozo tipo columna

Fuente: Mands, E.; Sanner, B. *Geothermal Heat Pumps*. UBeG GbR, Zum Boden 6, D-35580 Wetzlar

- **Aguas de minas y túneles.-** Se trata de aguas subterráneas procedentes de grandes obras de tunelación, que atraviesan macizos rocosos y cortan los correspondientes niveles. Por ello, su temperatura se mantiene constante durante todo el año y es fácilmente accesible. Estas aguas pueden llegar a constituir un potencial geotérmico importante, como sucede en Suiza, donde alcanzan, en grandes túneles, temperaturas de hasta 30 °C. Este país ofrece varios e interesantes ejemplos, como es, en la localidad suiza de Oberwald, el acceso oeste del túnel ferroviario de Furka, donde las aguas de éste (5.400 l/min de caudal y 16 °C de temperatura) se transportan por gravedad hasta la ciudad para su aprovechamiento en la climatización de apartamentos y de un centro deportivo. Igualmente, en Airolo, también en Suiza, el agua del túnel de la carretera de Gotthard (6.700 l/min a 17 °C) constituye la fuente de calor que alimenta una bomba geotérmica instalada para climatizar el centro de mantenimiento de la carretera.

Las antiguas explotaciones mineras subterráneas representan un caso particular de este tipo de aprovechamientos, pues muchas de ellas proporcionan aguas subterráneas con un considerable potencial geotérmico. Cabe citar, como ejemplo, el Proyecto Barredo, en Asturias, que prevé concentrar las aguas de varios pozos cerrados o en vías de cierre en un solo caudal, que se estima alcanzará los 10 hm³/año, a una temperatura de 20 °C, para uso en una bomba geotérmica destinada a la calefacción de instalaciones.

REFERENCIAS

European Geothermal Energy Council

Geotrained training manual for designers of shallow geothermal systems. GEOTRAINET, EFG, Brussels 2011

Guía Técnica de Bombas de Calor Geotérmicas. FENERCOM (2009)

Guía técnica de diseño de sistemas de bomba de calor geotérmica (IDAE – 2008)

Llopis Trillo, G.; Rodrigo Angulo, V. *Guía de la Energía Geotérmica.* Comunidad de Madrid. 2008

Lund, J.W., et al. *Direct Utilization of Geothermal Energy 2010 Worldwide Review.* Proceedings World Geothermal Congress 2010 (Bali, Indonesia)

Mands, E., Sanner, B. *Shallow Geothermal Energy.* UBeG GbR, Zum Boden 6, D-35580 Wetzlar