

## 2. Bombas de calor geotérmicas

El uso de la energía geotérmica en ámbito doméstico en su aplicación para climatización es relativamente reciente. Este hecho se debe al elevado coste inicial de perforación en comparación con el coste inicial de un sistema convencional.

Una bomba de calor geotérmica o bomba de calor con intercambiador enterrado es una bomba de calor convencional a la cual se le acopla un intercambiador bajo tierra para mejorar las condiciones de operación de la máquina.

### 2.1. Bombas de calor y principio de funcionamiento

Antes de definir lo que es una bomba de calor se van a definir algunos principios necesarios para comprender el funcionamiento de una bomba de calor.

El principio de Carnot explica la eficiencia térmica de máquinas térmicas reversibles e irreversibles:

- La eficiencia térmica de una máquina térmica irreversible es siempre menor que la eficiencia térmica de una máquina térmica totalmente reversible que funciona entre los mismos depósitos de calor.
- Las eficiencias térmicas de dos máquinas térmicas totalmente reversibles que funcionan entre los mismos dos depósitos de calor son iguales.

Según el segundo principio de la termodinámica *es imposible que una máquina frigorífica extraiga calor de un foco caliente y lo ceda todo a un foco frío, sin recibir trabajo desde el exterior* [2]

Ahora sí se puede definir una bomba de calor como *una máquina térmica que permite transferir energía en forma de calor de un foco a otro, y según se requiera.*

Según el ciclo de Carnot se puede transferir calor, de forma ideal, desde un foco caliente a uno frío de forma espontánea, generando trabajo, pero para transferir una cierta cantidad de calor desde un foco frío a un foco caliente, se requiere un aporte de energía. Esto se conoce como el ciclo inverso de Carnot.

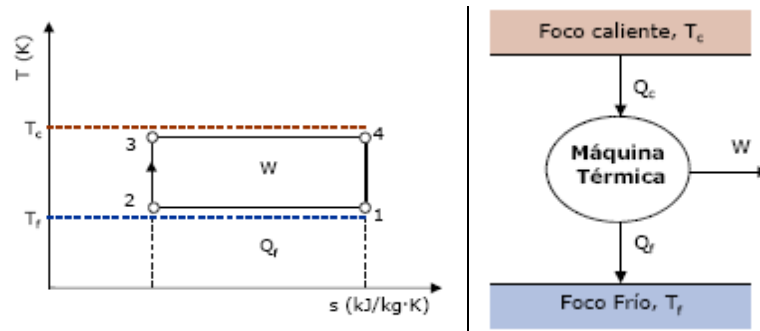


Figura 2.1. Ciclo de Carnot.

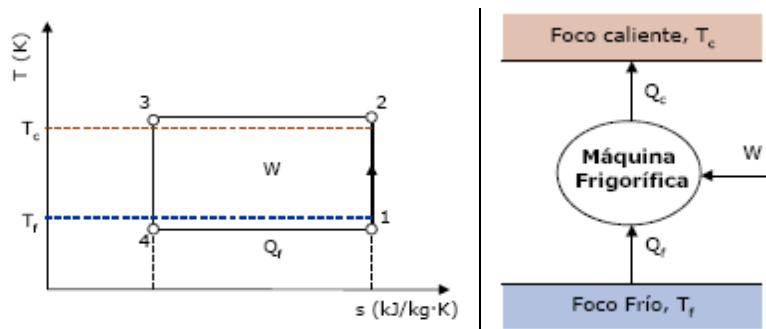


Figura 2.2. Ciclo inverso de Carnot.

En el proceso del ciclo inverso de Carnot se tienen las siguientes fases o procesos:

- 1-2: Compresión adiabática y reversible: isentrópica.
- 2-3: Evacuación de calor isoterma.
- 3-4: Expansión adiabática y reversible: isentrópica.
- 4-1: Absorción de calor isoterma.

Este proceso se realiza generalmente por medio de compresión de gases refrigerantes.

El calor se transporta a través de un fluido en el interior del ciclo de Carnot en sistemas de calefacción (ciclo inverso de Carnot en sistemas de refrigeración). Este fluido circula por la acción de un compresor a través de un circuito cerrado. El fluido llamado refrigerante tiene la propiedad de cambiar de fase absorbiendo o cediendo calor, propiedad que se utiliza para intercambiar calor entre una zona y otra a través de este fluido. Cuando el refrigerante pasa de líquido a gas absorbe calor, y cuando pasa de gas a líquido lo cede.

Las bombas de calor tienen una particularidad con respecto a las máquinas de refrigeración, y es que poseen una válvula capaz de intercambiar los focos frío y caliente, por lo que hace posible tanto la refrigeración como la calefacción.

## **2.2. Intercambiadores enterrados**

Un intercambiador enterrado es un intercambiador de calor que se encuentra bajo tierra. En el campo de aplicación de la climatización geotérmica recibe el nombre de captador o captador enterrado y el intercambio se realiza directamente con la tierra que se encuentra alrededor del intercambiador.

Estos intercambiadores generalmente son tuberías fabricadas en polietileno de alta densidad, material de gran resistencia y durabilidad, en una sola pieza. Por estos conductos circulará el fluido caloportador, principalmente agua o agua glicolada.

La capacidad de intercambio de calor depende del tipo de terreno, de la longitud y material del intercambiador, de la utilización y el tipo de material de relleno que se coloque entre las tuberías del intercambiador y el suelo, así como de la separación entre las tuberías.

Es posible hacer un estudio sobre todas las variables para obtener una configuración óptima que maximice el intercambio minimizando la inversión, dependiendo de la aplicación de que se trate.

## **2.3. Aplicaciones**

Las aplicaciones de las bombas de calor geotérmicas son muy amplias. En el campo de la refrigeración – calefacción, se puede aplicar tanto en sistemas con distribución convencional de aire como en suelos radiantes. Otro uso muy importante es la generación de agua caliente sanitaria. En piscinas climatizadas también es posible usar este sistema. En climas muy fríos se puede utilizar como sistema para derretir nieve o hielo. En procesos industriales se puede emplear para enfriar agua.

En el proyecto que nos ocupa, nos centraremos en la climatización, sin importar demasiado el sistema de distribución o absorción del calor del local a climatizar, ya que el análisis se realizará en el tramo exterior del sistema: el sistema de intercambiadores enterrados.

## **2.4. Ventajas de las bombas de calor geotérmicas**

Actualmente la energía geotérmica se considera rentable, de alta eficiencia y fiable.

Estudios ajenos al que ocupa este proyecto aseguran que la energía geotérmica en combinación con bombas de calor para uso en climatización aumenta la eficiencia energética hasta en un 50%. Estos datos conllevarían a determinar que las bombas de calor geotérmicas sean económicamente ventajosas, existiendo además subvenciones que podrían llegar hasta el

40% de la inversión. Además se afirma que los costes de mantenimiento se reducen frente a los sistemas convencionales.

El intercambiador enterrado es generalmente el componente más caro del sistema geotérmico y es altamente dependiente del coste de mano de obra y las condiciones de perforación según el emplazamiento.

Las bombas de calor acopladas a tierra son más fiables que las convencionales en el sentido de que al intercambiador enterrado no se tiene acceso desde el exterior y por lo tanto está más preservado, en cambio puede verse atacado por animales y agentes químicos del subsuelo. Además al no estar en contacto con el aire exterior mantiene el aire dentro de los edificios más limpio y libre de polen, contaminantes externos, esporas de hongos y otros alérgicos.

Es una realidad que es una tecnología ampliamente desarrollada y extendida fuera de España, donde el clima es verdaderamente frío, no siendo esto una condición excluyente.

Al margen de estas ventajas existen limitaciones en España tales como el desconocimiento de la tecnología, el elevado coste inicial y el aumento de complejidad respecto a los sistemas convencionales. Los sistemas geotérmicos tienen un alto grado de complejidad en el diseño y la ejecución.

## **2.5. Tipos de intercambiadores**

Los captadores enterrados en el subsuelo se pueden clasificar tanto en función del fluido que los recorre como en función de la orientación en la que están dispuestos.

### **2.5.1. Según fluido**

Dependiendo del tipo de fluido que recorre los captadores geotérmicos se tienen captadores recorridos por refrigerante, o captadores recorridos por agua glicolada.

#### **2.5.1.1. Captadores recorridos por refrigerante**

Este tipo de captadores son tuberías de cobre recubiertas con una capa de polietileno. Al ser refrigerante el fluido de trabajo, estos captadores pueden operar tanto como evaporadores, absorbiendo calor del terreno, funcionando así la instalación en régimen de calefacción, como condensadores, cediendo calor al terreno, siendo el régimen en este caso de refrigeración. Este tipo de captadores se usa generalmente en sistemas de captación horizontal. Éste se explicara en epígrafes posteriores.

### **2.5.1.2. Captadores recorridos por agua glicolada**

En los sistemas de agua glicolada, los captadores son de material plástico, tal como el polietileno reticulado o de alta densidad. Por el interior de los captadores fluye una mezcla de agua con glicoles, sustancias que evitan la congelación del agua en caso de sufrir caídas de temperatura por debajo de los cero grados centígrados. Este sistema es válido tanto para sistemas de captación horizontal como para sistemas de captación vertical. También es posible que sean recorridos por agua, minimizando los costes, siempre que la temperatura no vaya a bajar hasta puntos de congelación.

### **2.5.2. Según orientación**

Los captadores geotérmicos se pueden clasificar en función de su disposición en el terreno. En esta diferenciación existen dos tipos: horizontales y verticales. Ambos son sistemas cerrados, también se tendrá en consideración un sistema abierto vertical, que usa agua freática como fluido de trabajo.

#### **2.5.2.1. Captadores horizontales**

Los captadores horizontales son generalmente captadores recorridos por refrigerante. Este tipo de captadores se instalan a una profundidad superior a 1,5m e inferior a 5m, entre las fuentes consultadas se observan discrepancias en este dato, siendo el mostrado el que engloba a todos los demás intervalos propuestos. A diferencia de los verticales, requieren una gran superficie de implantación, entre 1,5 y 2 veces la superficie a climatizar.

Al estar a poca profundidad, los sistemas horizontales deben tener la superficie exterior libre para evitar la saturación del terreno y por lo tanto mantener una buena transferencia de calor entre el colector y el terreno, ya que el flujo térmico irá en dirección radial al colector y, por lo tanto, en dirección vertical. Debido a la poca profundidad, los captadores pueden verse influenciados por la temperatura exterior.

Debido a que el coste de excavación es una fracción muy alta del coste total de la instalación geotérmica, obviando los elementos comunes entre la instalación geotérmica y la convencional, el sistema de colectores horizontal es en gran medida más barato que el sistema vertical, que se comentará en el próximo punto.

Los sistemas horizontales pueden estar compuestos de sondas lineales formando un lazo cerrado, o de sondas espirales, formando igualmente un lazo cerrado. Los intercambiadores geotérmicos pueden estar compuestos de más de un lazo en su configuración. En el caso de

instalarse varios lazos, deben situarse a más de 60cm de distancia unos de otros, evitándose así influencias entre lazos.

Los sistemas horizontales son de uso doméstico, empleándose en viviendas unifamiliares, residencias y locales que dispongan de terreno para evitar la saturación anteriormente mencionada. El ejemplo de las casas unifamiliares ilustra bien el uso del jardín como superficie libre de disipación.

El calor disipado por los colectores horizontales es del orden de 10W por metro de captador.

Un ejemplo de captadores horizontales se puede ver en la Figura 2.3.

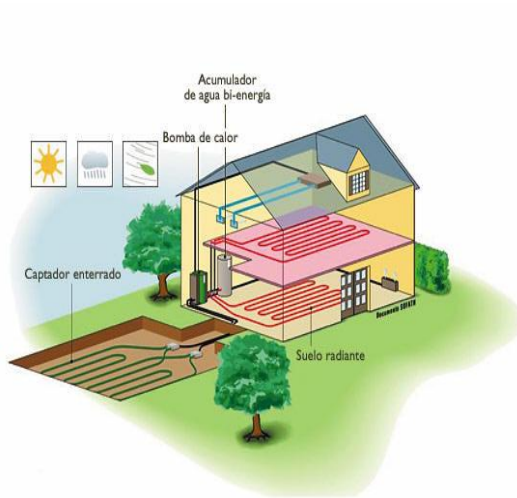


Figura 2.3. Captador horizontal.

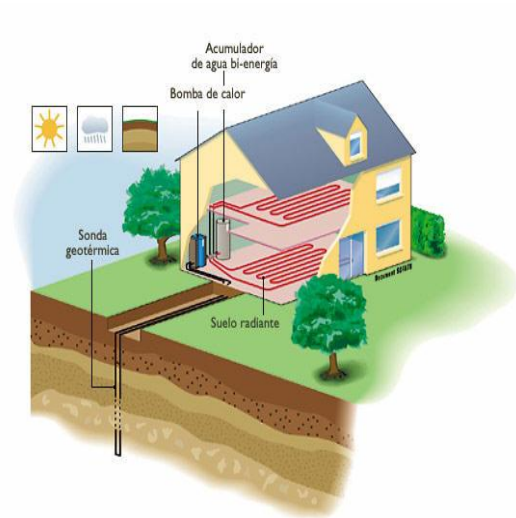


Figura 2.4. Captador vertical.

En las configuraciones horizontales no espirales, el área mínima necesaria para un hogar medio es aproximadamente 2000 m<sup>2</sup>. La profundidad mínima a la que se enterraran las tuberías será de 1,2 metros, salvo excepciones (Figura 2.9.).

En función del tipo de configuración horizontal se tendrán ciertos parámetros típicos. En las figuras, N determina el número de secciones en paralelo. Según *ASHRAE Handbook — HVAC Applications* [9], para las distintas configuraciones que se tendrán en cuenta los valores típicos serán los que se describen a continuación.

*Horizontal 1*

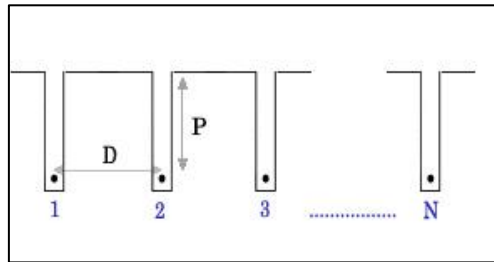


Figura 2.5

<b>D</b>	0,8 m
<b>P</b>	1,2 m

Tabla 2.1

*Horizontal 2*

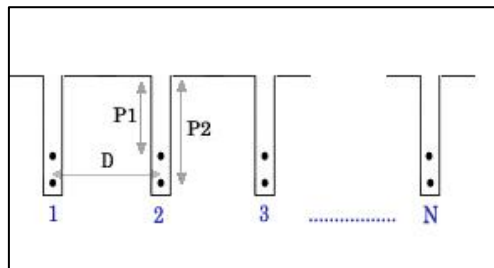


Figura 2.6

<b>D</b>	0,8 m
<b>P<sub>1</sub></b>	1,2 m
<b>P<sub>2</sub></b>	1,8 m

Tabla 2.2

*Horizontal 3*

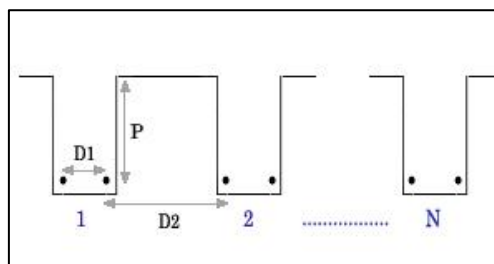


Figura 2.7.

<b>D<sub>1</sub></b>	0,6 m
<b>D<sub>2</sub></b>	0,8 m
<b>P</b>	1,5 m

Tabla 2.3

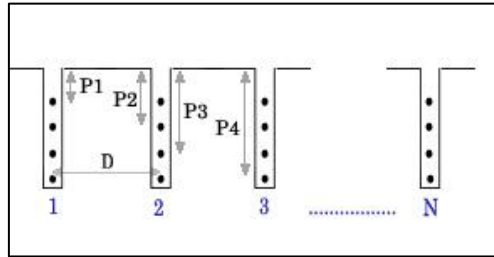
**Horizontal 4**

Figura 2.8.

<b>D</b>	0,8 m
<b>P<sub>1</sub></b>	1,2 m
<b>P<sub>2</sub></b>	1,5 m
<b>P<sub>3</sub></b>	1,8 m
<b>P<sub>4</sub></b>	2,1 m

Tabla 2.4

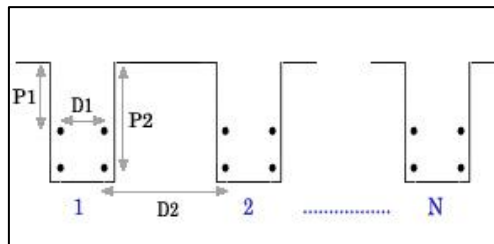
**Horizontal 5**

Figura 2.9.

<b>D<sub>1</sub></b>	0,6 m
<b>D<sub>2</sub></b>	0,8 m
<b>P<sub>1</sub></b>	0,9 m
<b>P<sub>2</sub></b>	1,2 m

Tabla 2.5

**2.5.2.2. Captadores verticales**

La profundidad de instalación de estos sistemas varía desde los 50 a los 150 metros de profundidad. Esta profundidad relativamente alta permite el uso del suelo que cubre el sistema de captación ya que, en este caso, la dispersión del flujo térmico no irá en dirección vertical, sino en dirección horizontal, no encontrándose obstáculo y no saturando así el terreno. La profundidad elevada evita la influencia de la temperatura exterior en el captador.

Las sondas son en forma de U de un material polimérico como el polietileno de alta densidad. En sistemas compuestos con más de una sonda, debe haber una separación mínima entre ellas de al menos 4,5 metros.



En contraposición a los sistemas horizontales, estos son de un coste elevado, por lo que se emplean en edificaciones de nueva construcción, insertando los colectores a la vez que los cimientos, reduciendo el coste de instalación del sistema de climatización.

El calor disipado por los colectores verticales es del orden de 50W por metro de captador.

Un ejemplo de captador vertical se puede observar en la Figura 2.4.

En función del tipo de captador existen unas dimensiones típicas para la disposición de los colectores enterrados.

Según *ASHRAE Handbook — HVAC Applications* [8], para las distintas configuraciones que se tendrán en cuenta los valores típicos serán los que se describen a continuación.

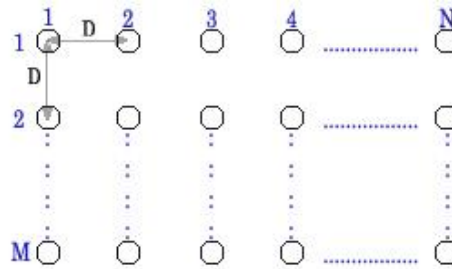


Figura 2.10 Configuración Vertical

En las configuraciones verticales, las tuberías deben tener un diámetro comprendido entre 20 y 40 mm y terminación en U. La profundidad a la que se introducen las tuberías no debe ser inferior a 15 metros ni superior a 180. La separación entre bucles, D en la figura 3.9, variará entre 4,5 y 8 metros, siendo el valor recomendado de 6 metros. Los parámetros N y M determinan el número de columnas y filas de pozos respectivamente. En la figura, cada círculo representa un pozo y en cada pozo se introducirán dos tubos, uno de ida y otro de vuelta unidos por una U en la parte inferior del pozo.

### 2.5.2.3. Captadores de agua freática

Los captadores de agua freática no son más que captadores verticales abiertos recorridos por agua, que toman agua de pozos subterráneos y la devuelven al terreno después de su uso.

## 2.6. Tipología de sistemas

Los sistemas que se utilizan actualmente se dividen en tres grupos. Estos grupos dependen del tipo de captadores que recorre el interior del local, y el tipo de los que recorren el exterior.

### 2.6.1. Refrigerante – Refrigerante

El primer grupo engloba los sistemas refrigerante – refrigerante, que son sistemas que tienen un intercambiador recorrido por refrigerante tanto en el interior como en el exterior del local, formando un ciclo frigorífico. Estos sistemas también son llamados de expansión directa. Son generalmente captadores horizontales.

El funcionamiento de estos sistemas es análogo a un sistema de climatización convencional, salvo que en estos, en régimen de verano, el condensador se encuentra enterrado en el exterior y el evaporador puede repartirse en consolas, colocarse a modo de suelo radiante, o de cualquier forma que permita distribuir el refrigerante hacia las zonas a climatizar. En régimen de invierno se invierte el ciclo y el condensador pasa a estar situado en el interior, cediendo calor al local, y el evaporador en el exterior, absorbiendo calor del subsuelo.

El sistema de este tipo en el cual el captador interior está actuando como suelo radiante está ilustrado en la Figura 2.11.

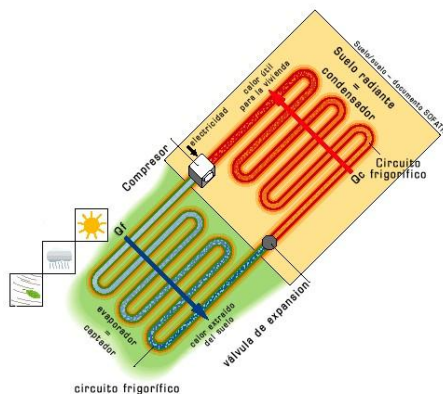


Figura 2.11. Refrigerante – Refrigerante.

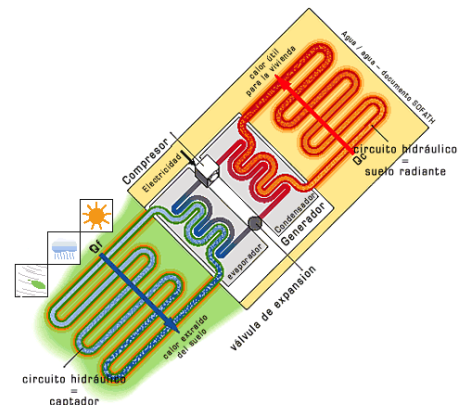


Figura 2.12. Agua – Agua.

### 2.6.2. Agua – Agua

El segundo grupo es muy similar al anterior. En este caso los intercambiadores están recorridos por agua glicolada y se conectan entre sí por un ciclo frigorífico intermedio. De modo que el intercambiador enterrado exterior absorbe o cede calor al terreno, cediéndolo o absorbiéndolo al condensador/evaporador de la máquina frigorífica, dependiendo del régimen de climatización. El intercambiador interior realiza la misma función invertida, es decir, cuando el captador exterior cede calor al terreno absorbiéndolo del condensador del ciclo frigorífico, el

captador interior cede calor al evaporador absorbiéndolo del local, siendo esta configuración en régimen de verano. Se ve ilustrado en la Figura 2.12.

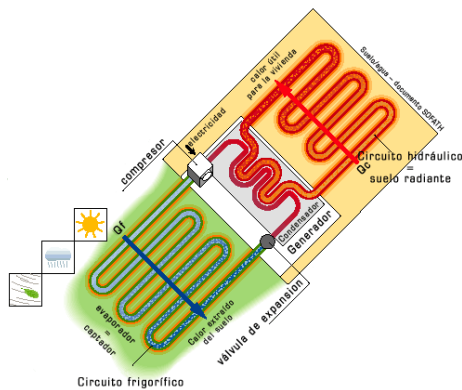


Figura 2.13. Refrigerante – Agua.

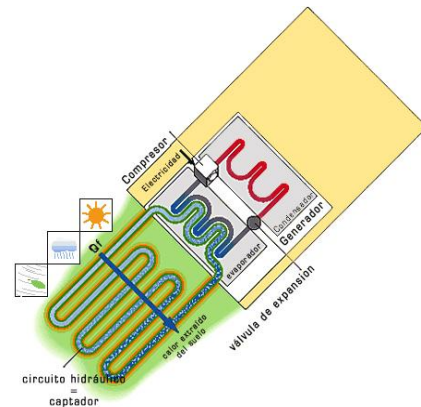


Figura 2.14. Agua – Refrigerante.

### 2.6.3. Refrigerante – Agua

Este último sistema es una mezcla de los dos anteriores, en el exterior se ubica el captador recorrido por refrigerante y en el interior un captador de agua glicolada. Se muestra un ejemplo en la Figura 2.13.

### 2.6.4. Agua - Refrigerante

El caso de agua – refrigerante es el inverso al anterior, empleándose un equipo autónomo conectado a un intercambiador enterrado recorrido por agua, utilizándose refrigerante en el lado interior del sistema e intercambiándose con aire que recorrerá el local y lo climatizará o recorrerá el propio refrigerante el local como en el primer caso, según sea necesario. En capítulos posteriores se analiza un catalogo técnico de un equipo autónomo condensado por tierra y el comportamiento de los distintos modelos frente a la variación de la temperaturas del agua en el lado del intercambiador enterrado y del aire del lado interior del equipo, tal como muestra la figura 2.14.