

ANEJO 4:

ENERGÍA GEOTÉRMICA

El objeto del presente Anejo es introducir de forma breve la energía geotérmica de baja entalpía y las diferentes tecnologías con las que compete. Asimismo, se describe el funcionamiento básico de una bomba de calor y de un intercambiador geotérmico.

Finalmente se exponen las tecnologías existentes en la actualidad para los intercambiadores geotérmicos, haciendo una comparación de las mismas entre sus respectivas ventajas e inconvenientes.

Contenido

1	OBJETO.....	2
2	MOTIVACIÓN E INTRODUCCIÓN A LA ENERGÍA GEOTÉRMICA DE BAJA ENTALPÍA.....	3
3	BOMBAS DE CALOR.....	5
3.1	BOMBA DE CALOR GEOTÉRMICA.	11
3.1.1	CUESTIONES MEDIOAMBIENTALES PARA LAS BOMBAS DE CALOR GEOTÉRMICAS.....	15
3.1.1.1	ALIMENTACIÓN ENERGÉTICA DE LA BOMBA DE CALOR. 15	
3.1.1.2	FLUIDO DE TRABAJO PARA EL CIRCUITO PRIMARIO. 16	
3.1.1.3	MATERIALES PARA EL INTERCAMBIADOR GEOTÉRMICO. 17	
3.1.2	SISTEMAS ABIERTOS, POZOS GEOTÉRMICOS.....	18
3.1.3	SISTEMAS CERRADOS, INTERCAMBIADORES GEOTÉRMICOS.	23

1 OBJETO.

El objeto del presente Anejo es introducir de forma breve la energía geotérmica de baja entalpía y las diferentes tecnologías con las que compite. Asimismo, se describe el funcionamiento básico de una bomba de calor y de un intercambiador geotérmico.

Finalmente se exponen las tecnologías existentes en la actualidad para los intercambiadores geotérmicos, haciendo una comparación de las mismas entre sus respectivas ventajas e inconvenientes.

2 MOTIVACIÓN E INTRODUCCIÓN A LA ENERGÍA GEOTÉRMICA DE BAJA ENTALPÍA.

La energía de baja entalpía consiste en aprovechar la inercia térmica del terreno para mejorar la eficiencia de sistemas de climatización o bombas de calor. Con ello es posible mejorar la eficiencia, con un ahorro de entre un 40% y un 60% de la energía primaria que se utiliza para climatización, según la Guía Técnica de Sistemas de Bomba de Calor Geotérmica del Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía.

Estas características, junto con su fácil implementación y versatilidad, hacen que la energía geotérmica de baja entalpía sea perfecta para el autoconsumo, a diferencia de la energía geotérmica de alta entalpía, la cual se reserva para yacimientos geotérmicos o zonas con una elevada actividad tectónica, donde mediante sondeos profundos (a más de 100 metros de profundidad) es posible aprovechar el calor interno terrestre.

La motivación de este trabajo fin de grado tiene su origen en la necesidad actual de transformar el sector energético, iniciando el camino hacia la transición energética y la descarbonización atmosférica. La energía geotérmica de baja entalpía puede desempeñar un papel muy importante en esta transición, pues es una energía limpia, ilimitada, continua y de fácil acceso, la cual está poco explotada en nuestro país. El siguiente extracto de la Guía Técnica de Sistemas de Bomba de Calor Geotérmica del Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía, corrobora lo anterior:

La geotermia se encuentra entre las fuentes de energías renovables menos explotadas en nuestro país, situación que generalmente se ha venido justificando por el escaso potencial de desarrollo que, supuestamente, presenta esta forma de aprovechamiento energético. Esta apreciación supone en realidad un error, al confundir la parte con el todo; en este caso, la geotermia de alta temperatura (asociada a grandes gradientes geotérmicos y a la producción eléctrica) con la geotermia en su conjunto. (Asociación Técnica Española de Climatización y Refrigeración (ATECYR)., 2012, pág. 5).

A todo ello hay que añadir que, mediante este tipo de energía, se reduce, aunque sea en pequeña proporción, la dependencia de combustibles fósiles como el gas natural. Por tanto, también se reduce la sensibilidad económica y fuerte correlación entre economías de países y sectores, convirtiendo a los países que incorporen estas tecnologías en economías menos proclives a sufrir crisis económicas, como fueron la subida de precios del Gas natural en Europa o la crisis del petróleo de 1973, que tuvo una repercusión mundial.

Las cimentaciones termoactivas son una forma de aprovechar la estructura y excavación de la cimentación para implementar un circuito cerrado de intercambio geotérmico y así reducir costes de construcción.

Aunque su instalación es bastante sencilla y barata, dada la escasa profundidad de la excavación (entre 5 y 100 metros) y la simplicidad técnica, es necesario un estudio previo de las condiciones geotécnicas del terreno para asegurar la viabilidad económica del proyecto.

3 BOMBAS DE CALOR.

Una bomba de calor aprovecha los principios de la termodinámica para conseguir un flujo de calor a partir de una diferencia de temperaturas entre un foco frío y un foco caliente, en el sentido inverso al normal, donde el calor fluye del foco caliente al foco frío, mediante la ayuda de un pequeño aporte de energía por parte del compresor, pues de lo contrario se violaría el tercer principio de la termodinámica.

La ventaja de las bombas de calor reside en que el aporte de energía que debemos entregar es pequeño en relación a la energía extraída, siendo habituales valores de entre 2 y 5 veces mayor la energía útil a la consumida.

La bomba de calor se compone principalmente de un evaporador, un condensador, una válvula de expansión y un compresor. En el interior del sistema circula un fluido refrigerante que cambia de estado conforme recorre el circuito, siendo en el cambio de estado donde se realiza el intercambio de energía a temperatura constante, en el circuito ideal. Sin embargo existen pérdidas de energía y, por tanto, variaciones en la presión y temperatura a la entrada y salida del evaporador y condensador.

El sistema funciona con flujo en ambos sentidos, para calefacción o para refrigeración. A continuación se describe brevemente su funcionamiento.

- **Modo calefacción:**

- **Fase 1- EVAPORADOR**

El fluido refrigerante, que tiene una temperatura de evaporación relativamente baja, pasa de estar en fase líquida a una fase líquido-gas en su paso por el evaporador, absorbiendo el calor del ambiente, pues se encuentra a una temperatura menor a la exterior.

- **Fase 2- COMPRESOR**

El fluido circula hacia el compresor, donde se incrementa la presión y temperatura, llegando a la fase gaseosa.

- **FASE 3- CONDENSADOR**

El gas a una temperatura mayor a la del interior de la vivienda, cede calor, bajando su entalpia y produciendo la condensación para volver a la fase líquido-gas.

- **FASE 4- VÁLVULA DE EXPANSIÓN**

Posteriormente, la válvula de expansión expande el fluido, disminuyendo la presión y la temperatura hasta llegar a la fase líquida, reiniciando el circuito.

El resultado es un flujo de calor desde el foco frío (ambiente exterior) al foco caliente (ambiente interior).

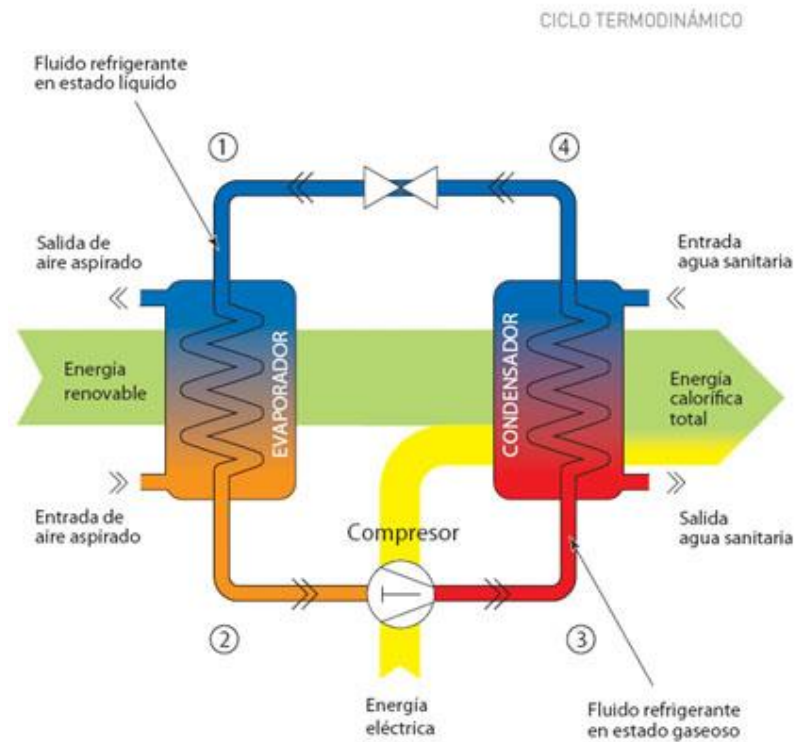


Figura 4. 1. Esquema del circuito de una bomba de calor. (<https://www.caloryfrio.com/calefaccion/bomba-de-calor/bomba-de-calor.html>).

- **Modo refrigeración:**

En el modo refrigeración, el funcionamiento es el inverso al del modo calefacción.

- **Fase 1- CONDENSADOR**

El fluido refrigerante se encuentra en estado gaseoso a una temperatura mayor a la del ambiente exterior, por lo que cede energía e inicia el proceso de condensación para llegar a la fase líquido-gas.

- **Fase 2- VÁLVULA DE EXPANSIÓN**

El fluido en estado de líquido-gas atraviesa la válvula de expansión de cuatro vías, que permite invertir el sentido de circulación, haciendo que se reduzca la presión y temperatura, alcanzando la fase líquida.

- **Fase 3- EVAPORADOR**

El fluido en fase líquida a una temperatura inferior a la del ambiente interior absorbe energía calorífica del interior de la vivienda, volviendo de nuevo a la fase líquido-gas.

- **Fase 4- COMPRESOR**

El compresor eleva la presión y temperatura hasta llegar a la fase gaseosa y así reiniciar el ciclo.

Existen diversos tipos de bombas de calor, una forma de clasificarlas sería atendiendo al medio exterior que utilizan para intercambiar el calor dentro y fuera del edificio que se pretende climatizar. Los principales tipos de bombas de calor existentes son: las aerotérmicas, la geotérmica y las hidrónicas.

Las bombas de calor aerotérmicas son sistemas aire-aire o agua-aire (haciendo referencia al medio que se emplea para intercambiar el calor con el medio exterior e interior), mientras que las hidrónicas son sistemas aire-agua o agua-agua, donde se aprovecha el flujo de calor para calentar o enfriar un sistema de tuberías de agua distribuidas por el edificio, que se suelen disponer en forma de suelo radiante/refrescante, ventiloconvectores o radiadores de baja o alta temperatura.

Las bombas de calor geotérmicas pueden ser del tipo tierra-aire o tierra-agua, donde se dispone un intercambiador geotérmico enterrado, en caso de tratarse de un circuito cerrado, o mediante pozos de agua, en caso de tratarse de un circuito abierto.

Las bombas de calor aerotérmicas son las más comúnmente utilizadas, pues se suelen emplear como aires acondicionados, que son de fácil y económica instalación. Sin embargo, son menos eficientes que el resto, pues el aire tiene menor inercia térmica que el agua o la tierra, y aunque estos últimos conllevan elevados costes de mantenimiento y/o instalación, se ven compensados en el largo plazo, reduciendo los costes totales en comparación con las bombas de calor aerotérmicas.

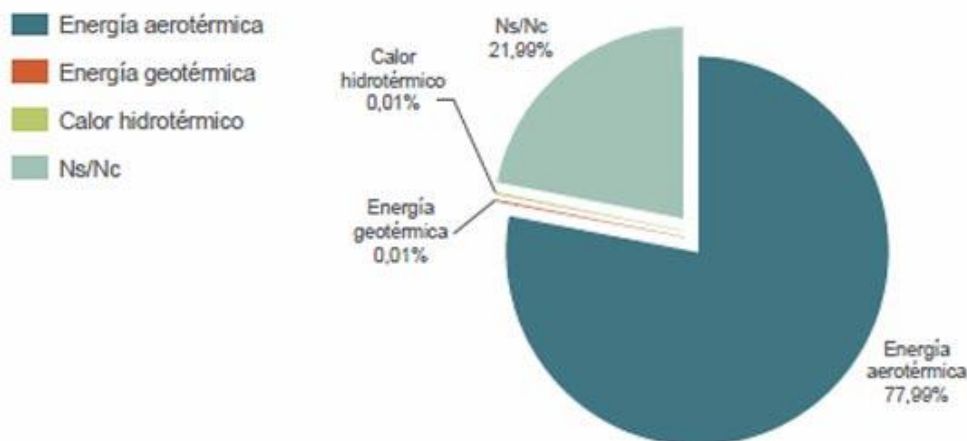


Figura 4. 2. Distribución en el uso de los diferentes tipos de energía térmica de baja entalpía. Fuente: <https://blog.caloryfrio.com/bombas-de-calor-tipos-aplicaciones/>.

Las bombas de calor pueden ser estudiadas según el ciclo de Carnot, publicado por Sadi Carnot en 1824 en el libro “Réflexions sur la puissance motrice du feu et sur les machines propres à développer cette puissance”, donde se afirma que el rendimiento ideal de cualquier máquina térmica, únicamente depende de la diferencia de temperaturas entre los dos focos térmicos en los que trabaja, pudiéndose éste expresar mediante la siguiente expresión matemática:

$$\eta = 1 - \frac{T_f}{T_c} \quad (4.1)$$

Sin embargo, una máquina térmica real nunca podrá llegar al rendimiento de Carnot, debido a las pérdidas de energía y a que realmente se trata de un proceso irreversible, siendo el rendimiento ideal de Carnot el límite superior.

3.1 BOMBA DE CALOR GEOTÉRMICA.

Las bombas de calor geotérmicas son más eficientes que las bombas de calor comunes aire/aire, ya que aprovechan la inercia térmica del terreno para incrementar la temperatura del evaporador en invierno y disminuirla en verano, de tal forma que la eficiencia del sistema aumenta, y por tanto, se reduce el consumo energético del compresor.

Este comportamiento se puede representar en un diagrama presión-entalpía o diagrama de Mollier, donde la isoterma 4-1 correspondiente a la temperatura del foco frío, se ve desplazada hacia arriba por influencia del intercambiador geotérmico y, por ende, se permite un mayor intercambio de calor proveniente del terreno, almacenado tras la irradiación solar, que será descontado del trabajo que ha de realizar el compresor para elevar la temperatura.

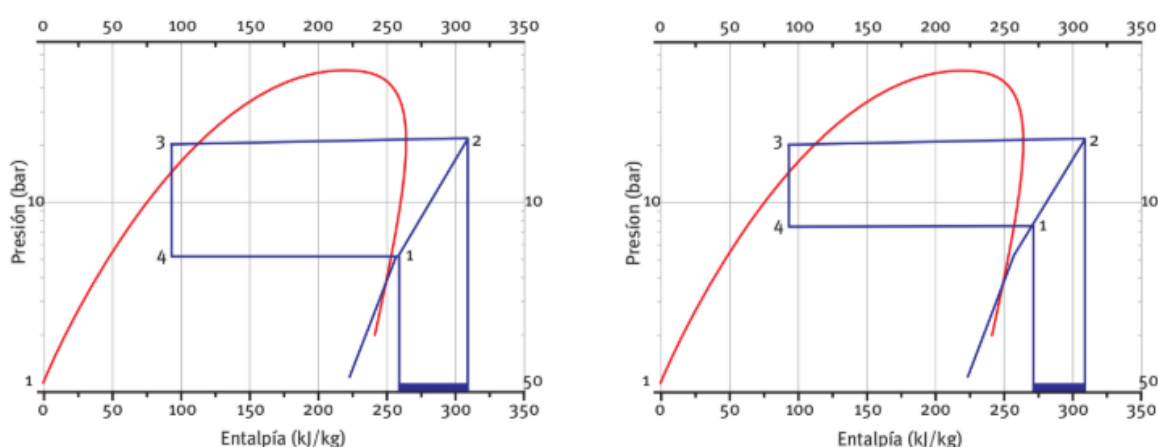


Figura 4. 3. Diagrama presión-entalpía. Guía Técnica de Sistemas de Bomba de Calor Geotérmica del Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía. Figura 3.2.

El ahorro de energía que supone el incremento de temperatura en el evaporador, cuando el sistema se encuentra en modo calefacción, se puede extraer del siguiente gráfico, donde se muestra el Coefficient of Performance en función de la temperatura del evaporador en grados Celsius, donde se ha supuesto una temperatura del condensador de 31°C, una demanda calorífica de 21 KW y un compresor de tipo scroll, con parámetros típicos para tales potencias y temperaturas, con el fluido de trabajo R410A.

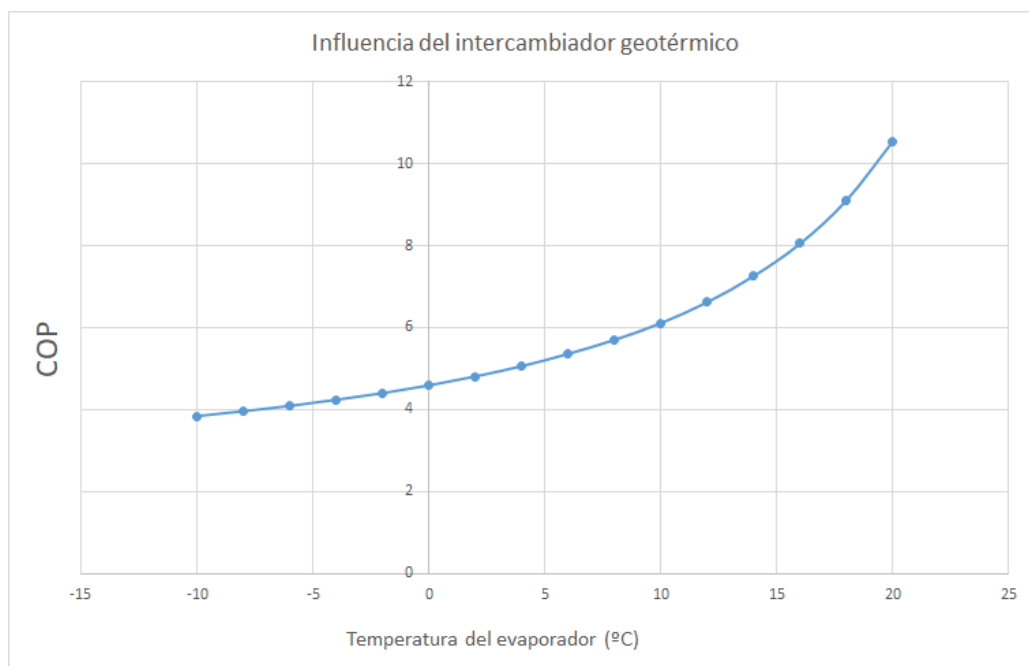


Figura 4. 4. Aumento del COP en modo calefacción, conforme aumenta la temperatura del evaporador, por efecto del intercambiador geotérmico. Elaboración propia.

Sabiendo que el terreno se encuentra a una media anual de aproximadamente 15°C a partir de unos 10 metros de profundidad, se puede estimar el ahorro energético que se obtendría para cada situación. En el caso de que la temperatura exterior sea de 5°C, el COP sería de 5.2 aproximadamente, mientras que si utilizamos un intercambiador geotérmico que mantenga la temperatura del agua a 12°C, el COP sería de 6.62. De donde se deduce que la bomba de calor aerotérmica realiza un trabajo energético un 27.3% superior al de la bomba de calor geotérmica, para los datos considerados.

La bomba de calor geotérmica realiza un trabajo energético un 21.5% inferior al de la bomba de calor aerotérmica (1-1/1.273), para los datos considerados. Sin embargo, este valor aumenta conforme aumenta la temperatura del evaporador.

Cabe destacar que una bomba de calor puede funcionar en el sentido de circulación inverso al de calefacción, funcionando en modo refrigeración, donde el foco caliente es el interior de la vivienda y el foco frío el terreno.

Las bombas de calor geotérmicas cuentan con un circuito primario o circuito exterior, formado por el intercambiador geotérmico, ya sea cerrado o abierto, y un circuito secundario o circuito interior. En la siguiente imagen se muestra un esquema de lo anterior.

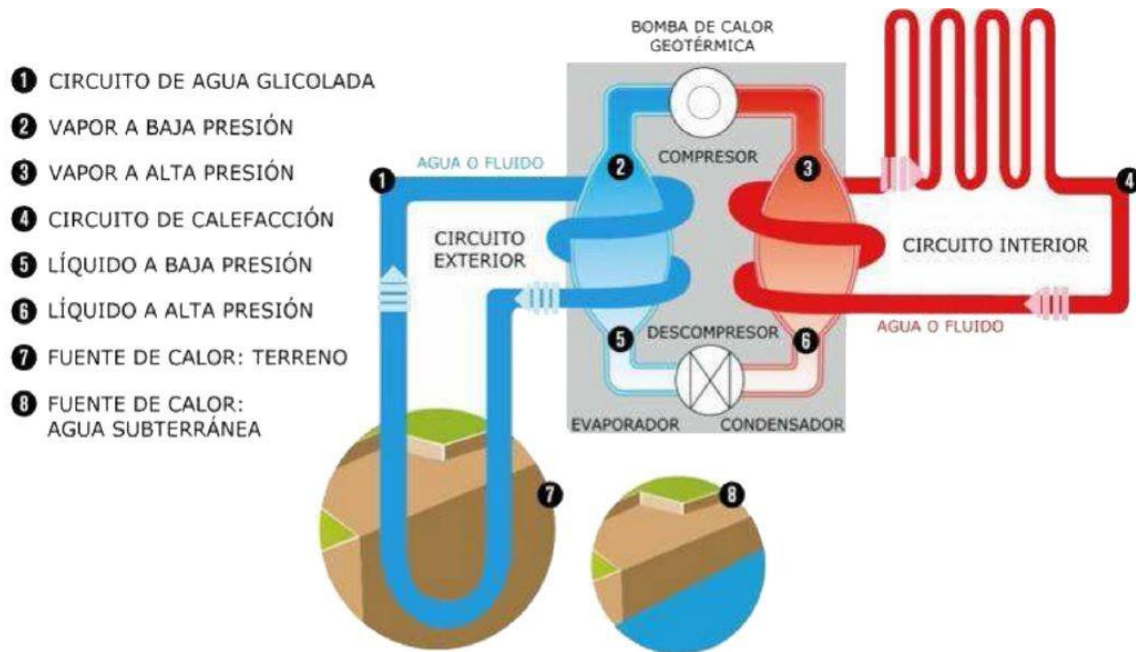


Figura 4. 5. Esquema de una bomba de calor geotérmica. (<https://www.veranoinstalaciones.com/que-es-una-bomba-de-calor-geotermica.html>).

El principal inconveniente de las bombas de calor con respecto a las calderas de gas tradicionales, radica en que no tienen la misma velocidad de respuesta y capacidad para elevar la temperatura cuando se desee, por lo que su uso está destinado a mantener la climatización de la vivienda a una temperatura constante o como complemento para la calefacción.

En este trabajo se pretende diseñar un sistema geotérmico cuya función sea la de mantener una temperatura interior en torno a 21°C y, así reducir el consumo de energía, tanto en invierno para la calefacción, como en verano para los sistemas de refrigeración, tales como el aire acondicionado.

3.1.1 CUESTIONES MEDIOAMBIENTALES PARA LAS BOMBAS DE CALOR GEOTÉRMICAS.

3.1.1.1 ALIMENTACIÓN ENERGÉTICA DE LA BOMBA DE CALOR.

La energía geotérmica de baja entalpía es una energía limpia y renovable, sin embargo, esto depende de diversos factores, entre los que se encuentran: la fuente de suministro de energía que utilicemos para el compresor de la bomba de calor, el líquido del circuito primario, en caso de que se use anticongelante, el gas para el circuito secundario y los materiales empleados en su fabricación.

Para el suministro de energía del compresor, lo ideal sería utilizar una fuente de energía verde; por ejemplo, mediante la instalación de paneles fotovoltaicos en la cubierta de la vivienda, lo que además de suponer un beneficio en términos medioambientales, también conlleva un ahorro de energía a largo plazo, pues los costes de inversión son rápidamente amortizados al encontrarnos en una región como la comunidad valenciana, donde las horas de sol y el alto coste de la energía a nivel nacional, hacen que el autoconsumo sea una alternativa con un alto rendimiento económico.

Los anticongelantes más utilizados en bombas de calor geotérmicas son el propilenglicol y etilenglicol, mezclados en una cierta proporción con agua. Para un diseño respetuoso con el medio ambiente, será conveniente asegurar en caso de fuga la no dispersión del fluido mediante esorrentía superficial o mediante infiltración hacia acuíferos, que puedan derivar al medio acuático.

3.1.1.2 FLUIDO DE TRABAJO PARA EL CIRCUITO PRIMARIO.

Para la elección del fluido del circuito secundario será conveniente descartar aquellos que supongan un peligro para el medio ambiente y/o para la salud pública. Las sustancias más polucionantes para la atmósfera terrestre son los clorofluorocarbonos (CFC) empleados en sistemas de refrigeración, los cuales aumentan el impacto sobre la capa de ozono.

Ante el alto riesgo de fugas, el criterio medioambiental se convierte en una prioridad, prevaleciendo ante los criterios técnicos o económicos, por lo que se prescindirá de fluidos comunes para bombas de calor geotérmicas tales como el R22 por su elevado impacto medioambiental, en su lugar, se escogerá para el diseño de la bomba de calor, fluidos como el R410a o el R407c. Estos fluidos de trabajo son el mejor sustituto para el R22, provocando un impacto ambiental mucho menor.

3.1.1.3 MATERIALES PARA EL INTERCAMBIADOR GEOTÉRMICO.

Los materiales más utilizados para los tubos son el polietileno normal, el reticulado y el polibutileno. Estos dos últimos tienen un coste más elevado que el polietileno normal, por lo que su uso se restringe a situaciones en las que la temperatura supera los 40°C-50°C, ya que sus propiedades mecánicas a elevadas temperaturas son más estables que para el polietileno normal. En el caso práctico de este trabajo, dado que la finalidad del sistema será una climatización a una temperatura de 21°C, se escogerá como material para los tubos del intercambiador geotérmico polietileno normal.

El fluido de trabajo para el circuito primario suele ser agua o agua mezclada con anticongelante. En este caso no se utilizará anticongelante, pues su uso es de interés cuando existe riesgo de congelación, siendo necesaria su instalación en caso de que la temperatura baje por debajo de 5°C para las temperaturas medias diarias de los mínimos anuales.

3.1.2 SISTEMAS ABIERTOS, POZOS GEOTÉRMICOS.

En el caso de aplicación, podemos observar a partir del perfil geomecánico, que el nivel freático se encuentra a una profundidad de 2.5 metros, por lo que se ha de valorar la implementación de un circuito abierto para el circuito primario.

Las principales desventajas de los sistemas geotérmicos en circuitos abiertos son:

- Existe una dependencia de las condiciones geológicas del lugar, que pueden comprometer la viabilidad del proyecto.
- Es necesario realizar pozos de extracción, con su correspondiente bomba de circulación y, por tanto, es necesario implementar mecanismos para monitorear y controlar el sistema, que aumentan el coste de inversión y mantenimiento.
- Se puede generar un flujo de agua que requiere una autorización.
- La calidad del agua puede influir en la vida útil de la instalación y es posible que sean necesarias revisiones periódicas para evitar problemas por obstrucciones y/o corrosión.

Las principales ventajas de los sistemas geotérmicos en circuitos abiertos son:

- La eficiencia del sistema es mucho mayor que en circuitos cerrados, al no ser necesario el intercambio de calor.
- Es posible utilizar el agua extraída para otros usos.
- Los metros de perforación necesarios son mucho menores que en sistemas cerrados.

(a) Sistemas de pozos verticales

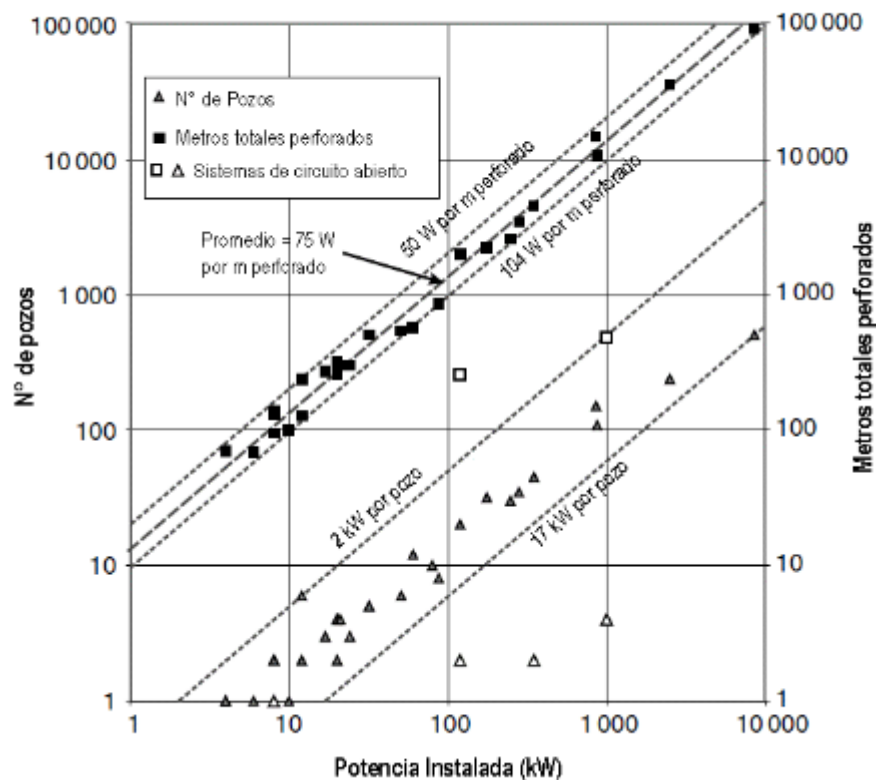


Figura 4. 6. Costes para profundidades de perforación para diferentes sistemas. CLIMATIZACIÓN DE EDIFICIOS POR MEDIO DEL INTERCAMBIO DE CALOR CON EL SUBSUELO Y AGUA SUBTERRÁNEA. ASPECTOS A CONSIDERAR EN EL CONTEXTO LOCAL. MARCO ANTONIO SEISDEDOS SÁEZ.

(b) Sistema de circuito cerrado con cañería espiral

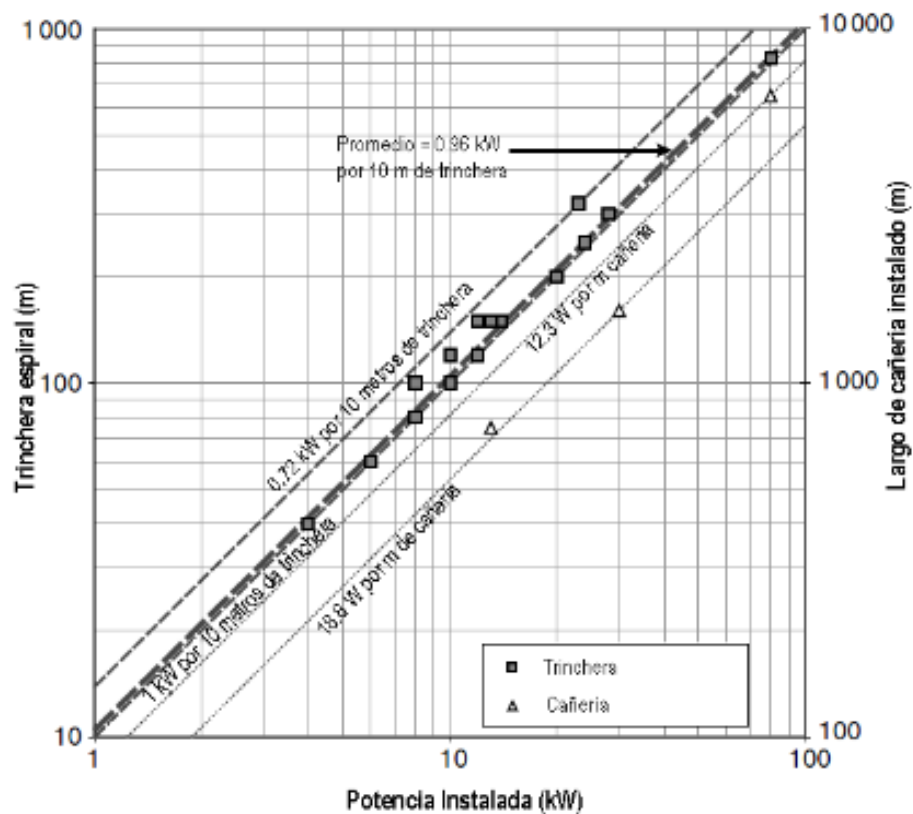


Figura 4. 7. Costes para longitudes de intercambiador para diferentes sistemas. CLIMATIZACIÓN DE EDIFICIOS POR MEDIO DEL INTERCAMBIO DE CALOR CON EL SUBSUELO Y AGUA SUBTERRÁNEA. ASPECTOS A CONSIDERAR EN EL CONTEXTO LOCAL. MARCO ANTONIO SEISDEDOS SÁEZ.

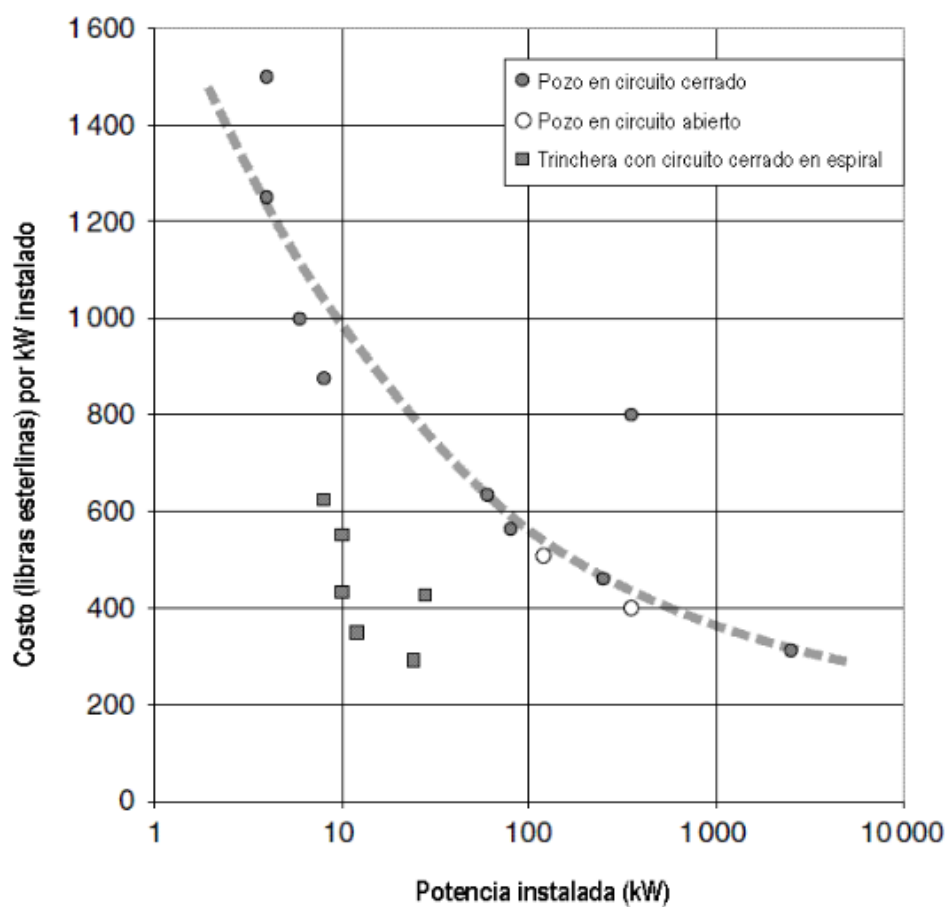


Figura 4. 8. Costes económicos para diferentes sistemas. CLIMATIZACIÓN DE EDIFICIOS POR MEDIO DEL INTERCAMBIO DE CALOR CON EL SUBSUELO Y AGUA SUBTERRÁNEA ASPECTOS A CONSIDERAR EN EL CONTEXTO LOCAL. MARCO ANTONIO SEISDEDOS SÁEZ.

El subsuelo es un medio básico, mientras que el ambiente atmosférico es ácido, por lo que al bombear agua subterránea a la superficie puede dar lugar a la desgasificación de CO₂, que produce la precipitación de minerales carbonatados como la calcita. También puede ocurrir la oxidación de metales solubles como el manganeso y hierro, dando lugar a la precipitación de óxidos o también oxihidróxidos de hierro y manganeso.

Estos fenómenos químicos comportan diversos riesgos:

- Los minerales pueden precipitar en el interior del evaporador de la bomba de calor.
- Los gases disueltos el cambio del ph del ambiente puede producir corrosión.
- La circulación del agua puede facilitar la formación de biofilms.

Para limitar los posibles riesgos, se ha de realizar un mantenimiento periódico, por lo que se ha de disponer de tubos de purga, así como mantener una presión alta para mitigar la desgasificación del CO₂. También se pueden añadir sustancias químicas oxidantes o reductoras para prevenir la formación de biofilms o la oxidación.

3.1.3 SISTEMAS CERRADOS, INTERCAMBIADORES GEOTÉRMICOS.

Existen diferentes tipologías para los intercambiadores geotérmicos de circuito cerrado, distinguiendo principalmente entre intercambiadores verticales e intercambiadores horizontales.

- **Intercambiadores verticales:**

Normalmente se usan en situaciones de poco espacio disponible. Los tubos se disponen en forma de U y pueden enterrarse directamente mediante sondas geotérmicas, o en el interior de un pilote. En estos casos hay que tener en cuenta la temperatura del terreno a largo plazo y el espaciamiento entre orificios.

Su principal desventaja son los costes de perforación.

Como ventajas, se puede destacar que normalmente se necesita una menor longitud de intercambiador y que no son excesivamente sensibles a las oscilaciones estacionales de temperatura.

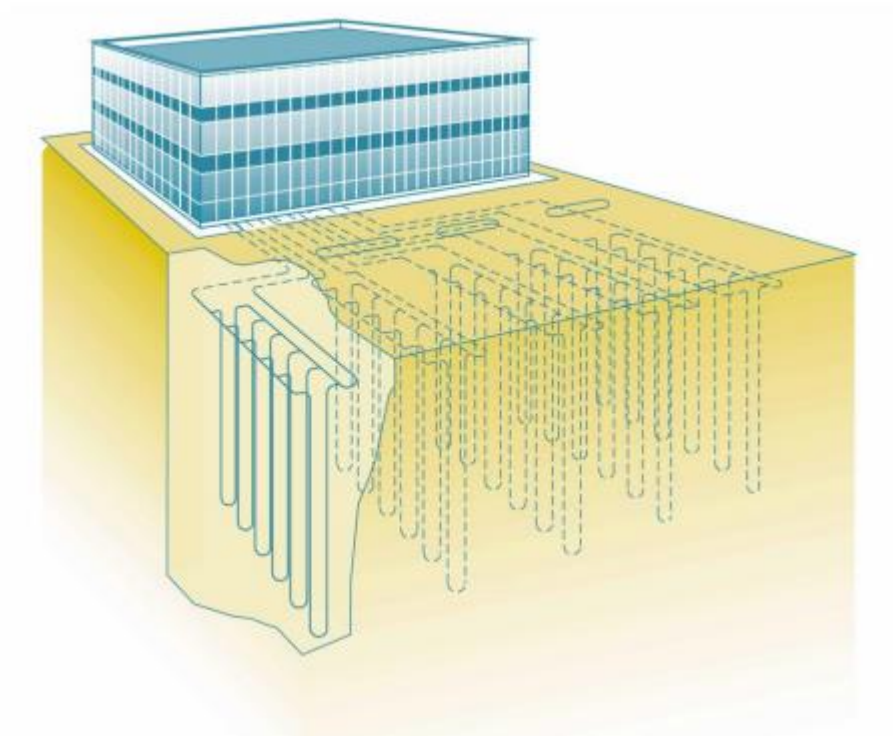


Figura 4. 9. Intercambiadores verticales. López Jimeno. El subsuelo como fuente de energía. Instalaciones Geotérmicas.

- **Intercambiadores horizontales.**

Pueden tener diferentes tipologías, como la disposición en zanja, en espiral, sumergidos o configuraciones híbridas.

Los intercambiadores horizontales en zanjas o trincheras, requieren mayor superficie de terreno y son sensibles a las variaciones estacionales de temperatura. Sin embargo, suelen tener un bajo coste y fácil instalación, aunque los tubos empleados requieran mayor protección que los verticales.



Figura 4. 10. Intercambiador horizontal en trinchera. Guía Técnica para el Diseño de Bombas de Calor Geotérmica del IDAE.

La configuración en espiral, o “Slinky”, ocupa menos espacio que la configuración en trincheras, pero requiere diámetros más pequeños y mayor consumo de potencia para el bombeo. Además requiere una mayor longitud de intercambiador y se limita el rendimiento del sistema al quedar huecos entre el intercambiador y el terreno, debido a su complicada geometría.



Figura 4. 11. Intercambiador horizontal en espiral. Guía Técnica para el Diseño de Bombas de Calor Geotérmica del IDAE.

Los intercambiadores sumergidos son menos sensibles a las variaciones de temperatura y no necesitan excavación del terreno, por lo que su coste se ve reducido y su eficiencia mejorada. Por el contrario requieren una correcta señalización y permisos, además de necesitar disponer de un lago, río o estanque cercano.



Figura 4. 12. Intercambiadores horizontales sumergidos. (www.waterfurnace.com).