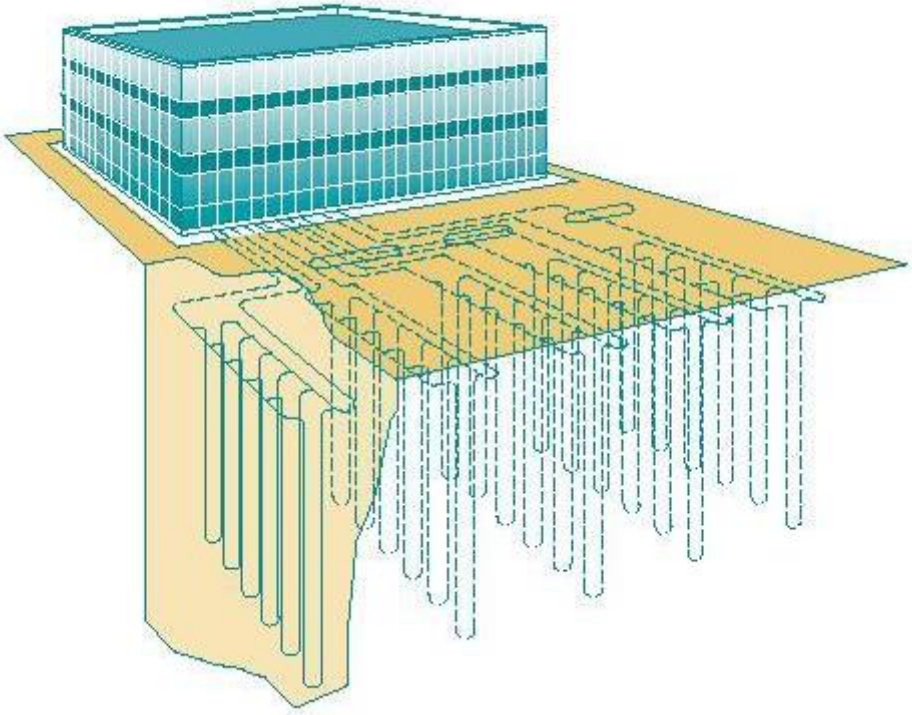
UIMP
Universidad Internacional
Menéndez Pelayo

CSIC
Consejo Superior de Investigaciones Científicas

INSTALACIONES DE BCG PARA CLIMATIZACIÓN Y ACS.

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



Máster: Energías renovables, pilas de combustible e hidrógeno (2012-2013)

Proyecto Fin de Máster (UIMP-CSIC)

Autor: **Pedro Fernández Bellver.**

Director: **D. Julio Montes Ponce de León.**

Agradecimientos:

A D. Julio Montes, por su tiempo, entusiasmo, trabajo y dedicación en la dirección de este proyecto y a los técnicos de GRUPO CIAT, por haberme proporcionado las herramientas necesarias.

RESUMEN

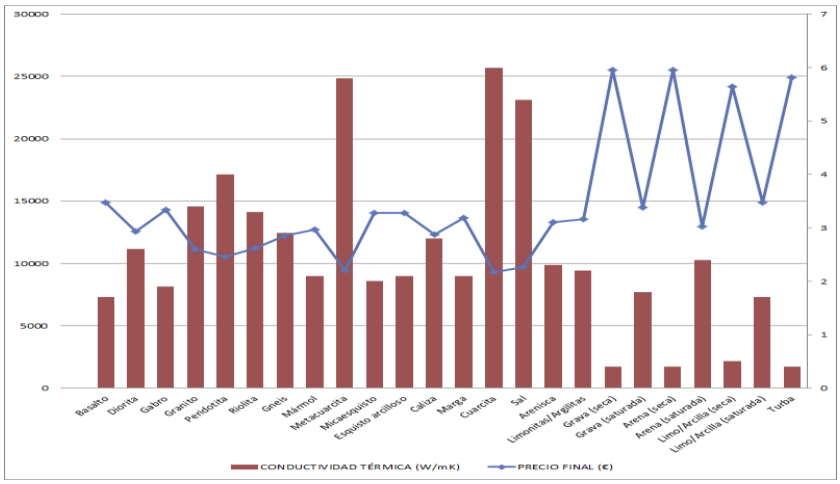
El interés de este proyecto radica en la falta de estudios de tipo técnico-económico que valoren las propiedades del subsuelo en el dimensionado de instalaciones geotérmicas para climatización.

En este proyecto se desarrollan una serie de apartados que ponen de manifiesto la importancia de la geotermia en el ámbito de la climatización como energía renovable de futuro. La climatización geotérmica consiste en transmitir energía térmica del subsuelo a una edificación cuando sea necesario un aporte de calor (calefacción), y, en transportar calor del interior de la edificación a las capas superficiales de la Tierra cuando se pretenda refrigerar la estancia, utilizando una bomba de calor. Se consigue así un importante ahorro energético y económico, además de tratarse de una energía en sí completamente limpia.

El intercambio de calor con el subsuelo es muy importante en estas instalaciones ya que condiciona el funcionamiento de la instalación en su totalidad. De ahí la importancia de estudiar los parámetros que rigen el intercambio térmico en el subsuelo.

Este intercambio viene influido por cuatro factores fundamentales: la conductividad térmica, la capacidad térmica volumétrica, la difusividad y el grado de humedad del terreno. Dichos parámetros determinan la superficie necesaria de intercambio térmico para el correcto funcionamiento de la bomba geotérmica.

El estudio se centra en el cálculo de la longitud de intercambiador necesaria para una instalación tipo para diferentes litologías en el subsuelo. Esto se realiza mediante el modelado con EED (Earth Energy Designer) y mediante un estudio económico generalizado que pone de manifiesto el grado de relación existente entre el tipo de terreno y la viabilidad económica de la instalación.



Previamente se exponen los conceptos necesarios para el desarrollo del estudio: principios que rigen las bombas de calor geotérmicas, componentes y coeficiente de operación. Así mismo se desarrollan los conceptos de calor específico y conductividad térmica del suelo y se introducen nociones básicas sobre los tipos de intercambiadores geotérmicos.

Por último se incluye el dimensionado de una vivienda real con el software Geo2 desarrollado por el GRUPO CIAT.

ABSTRACT

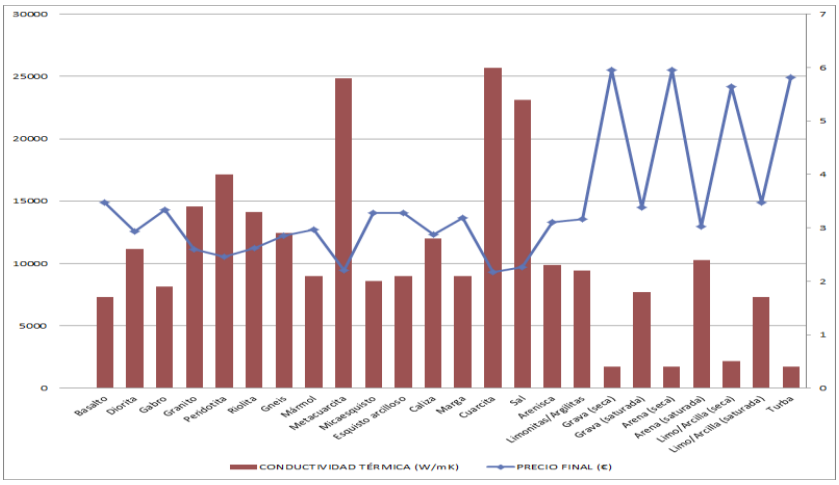
The interest of this project lies in the lack of studies of technical-economic to value subsoil properties dimensioning geothermal installations for climatization.

This project will develop a series of sections that highlight the importance of geothermal energy in the field of HVAC and renewable energy future. Geothermal air conditioning is to convey subsurface thermal energy to a building when necessary heat input (heating), and in transport heat from inside the building to the surface layers of the Earth when it is intended to cool the room, using a heat pump. This achieves a significant energy and cost savings, in addition to being a completely clean energy itself.

Heat exchange with the ground is very important in these facilities because it affects the operation of the installation in its entirety. Hence the importance of studying the parameters governing the heat transfer in the subsurface.

This exchange is influenced by four factors: the thermal conductivity, volumetric heat capacity, diffusivity and water content of the soil. These parameters determine the heat transfer area required for the proper operation of the geothermal pump.

The study focuses on the calculation of the length necessary for installation exchanger for different types in the subsurface lithology. This is done by modeling with EED (Earth Energy Designer) and by a widespread economic study highlights the degree of relationship between the terrain and the economic viability of the facility.



Previously outlines the concepts required for the development of the study: principles governing geothermal heat pumps, components and coefficient of performance. Also develop the concepts of specific heat and thermal conductivity of the soil and introducing basic notions about the types of geothermal heat exchangers.

Finally it includes the dimensioning of real housing Geo2 software developed by GRUPO CIAT.

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN 8
2. OBJETIVOS 12
3. PRINCIPIOS BÁSICOS DE LAS BCGs 13
4. COMPONENTES GENERALES DE BCGs 17
5. CÁLCULO DEL COEFICIENTE DE OPERACIÓN (COP) 19
5.1. Cálculo de cargas térmicas de calefacción (INVIERNO). 20
5.1.1. Carga térmica por transmisión. 20
5.1.2. Carga térmica por ventilación o infiltración de aire exterior. 20
5.2. Cálculo de las cargas térmicas de refrigeración (VERANO). 21
5.2.1. Cargas sensibles. 21
5.2.1.1. Cargas por transmisión a través de cerramientos opacos. 21
5.2.1.2. Cargas por transmisión a través de cerramientos traslucidos. 21
5.2.1.4. Carga sensible por ventilación o infiltración de aire exterior. 22
5.2.1.5. Carga sensible por ocupación del local. 22
5.2.1.6. Cargas generadas por la iluminación del local. 23
5.2.1.7. Cargas generadas por las máquinas presentes en el local. 23
5.2.2. Cargas latentes. 23
5.2.2.1. Carga latente por ventilación o infiltración de aire exterior. 23
5.2.2.2. Carga latente por ocupación del local. 23
5.3. Elección BCG (variación COP). 24
6. CALOR ESPECÍFICO Y CONDUCTIVIDAD TERMICA DEL SUELO 26
7. INTERCAMBIADOR GEOTÉRMICO. NOCIONES. 27
7.1. TIPOS DE INTERCAMBIADORES GEOTÉRMICOS 29
7.1.1. Colectores horizontales enterrados. 29
7.1.2. Sondas geotérmicas. 30
7.1.3. Sondeos de captación de agua someros. 30
7.1.4. Cimientos geotérmicos. 31
8. CÁLCULO DE LA LONGITUD DE INTERCAMBIADOR GEOTÉRMICO VERTICAL 31
9. ESTUDIO ECONÓMICO 40
10. APLICACIÓN GEOTÉRMICA CON GEO2 46
11. CONCLUSIONES 55
12. REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFÍA 57

1. INTRODUCCIÓN

La crisis de la energía es una de las amenazas permanentes en el estado del bienestar que caracteriza a la sociedad moderna. Dicha amenaza está fundamentada en largos años de dependencia, en los que las sociedades avanzadas han basado sus fuentes de energía en derivados de los combustibles fósiles. Después de una época de franca preponderancia, el carbón ya ha sido desplazado de los lugares principales de producción de energía, trasladando a otras fuentes de energía sus características de fuente exclusiva, en especial a los hidrocarburos.

En este sentido y en el marco de las energías renovables se encuadra la geotermia como fuente de aprovechamiento energético dado su gran potencial de aplicación. Este recurso se encuentra distribuido por la superficie del planeta en su totalidad. Si bien es cierto que sólo en determinadas zonas podrá aprovecharse el calor procedente del interior de la tierra para generación de energía eléctrica. No se incluye en el presente proyecto una descripción y explicación de los diferentes tipos de aprovechamiento de la energía geotérmica.

En el presente proyecto se pretende abordar el uso de la energía geotérmica de muy baja entalpía. Este recurso se encuentra uniformemente distribuido por la superficie terrestre y es aprovechable en cualquier punto del planeta para su utilización en climatización y ACS (agua caliente sanitaria) en todo tipo de edificaciones. En este sentido, y por motivos que se explicarán más adelante, es muy interesante el estudio de su aprovechamiento tanto energético como económico.

De este hecho ya se han percatado distintos organismos a nivel mundial y en la actualidad se está intentando dar un empuje a la geotermia de muy baja entalpía. Por ejemplo, este hecho es manifiesto tal como se puede observar en el siguiente comunicado del "Comité de las Regiones" de la Unión Europea:

"30.6.2007 C 146/11 Diario Oficial de la Unión Europea

Aprobado en su 68 Pleno celebrado los días 13 y 14 de febrero de 2007 (sesión del 13 de febrero)

Dictamen del Comité de las Regiones «Política de la vivienda y política regional»

… a la hora de crear infraestructuras de vivienda, los planificadores deben considerar desde un principio opciones sostenibles desde el punto de vista

medioambiental. Por ejemplo, la instalación de sistemas de calefacción geotérmica para el agua no sólo resulta eficiente desde el punto de vista energético, sino que reducirá los costes de la calefacción…"

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

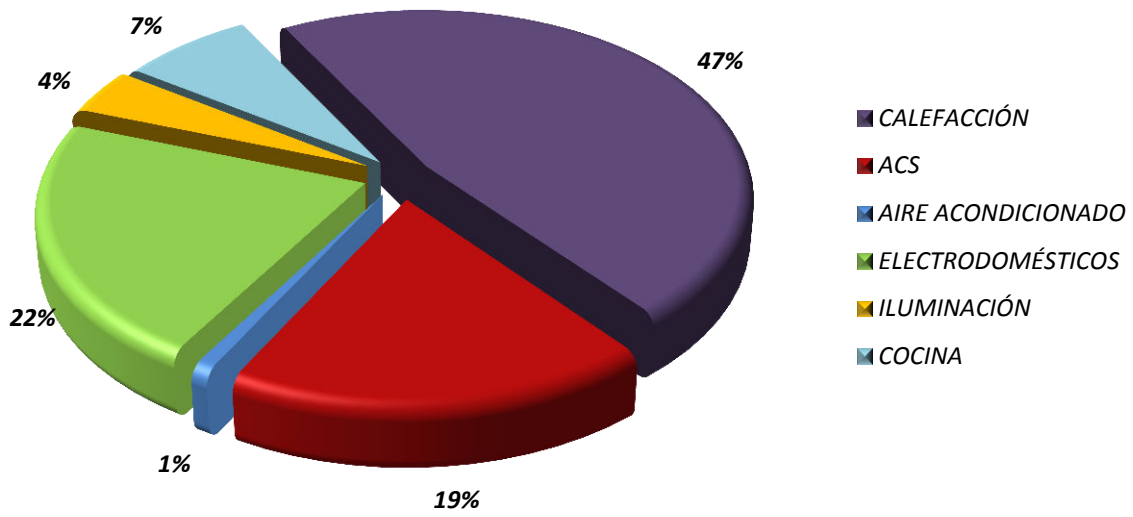


Gráfico 1; Fuente: Datos del IDAE. Análisis de consumo energético en la vivienda.

Como se puede observar, más del 60% del consumo energético final en una vivienda corresponde a calefacción, aire acondicionado y ACS. Por tanto se debe procurar minimizar en la medida de lo posible el gasto que suponen estos sistemas. En este contexto la geotermia para climatización cuenta con muchas ventajas respecto a otras tecnologías como la solar térmica, por ejemplo.

La energía geotérmica para climatización aprovecha una bomba de calor (BCG) para intercambiar calor con el subsuelo según los requerimientos térmicos de la vivienda.

La BCG, cuyo funcionamiento se detallará más adelante, extrae calor del subsuelo terrestre, para poder calentar un fluido de alta compresibilidad y bajo punto de

vaporización (circuito secundario), con el objeto de transmitir ese calor a una instalación en invierno, invirtiendo el proceso en verano. Así, aprovecha un foco de temperatura constante a lo largo del ciclo de operación, lo que produce un aumento de los rendimientos de la bomba (COP) y, por tanto, un ahorro importante en el uso de la energía que finalmente repercute en un ahorro económico.

El mejor rendimiento de este tipo de bombas se basa, no tanto en una diferencia en su tecnología o componentes, sino en el aprovechamiento de un sencillo principio de la termodinámica mediante la gestión energéticamente sostenible y eficiente del terreno como manantial térmico. Esto hace que aumente el llamado COP (Coeficient of Performance) de la máquina. El COP es el número de kW térmicos que se obtienen por kW eléctrico consumido. Este concepto se explicará en detalle más adelante.

Desde el punto de vista de flujos de calor, las bombas de calor que solamente operan para calefacción (o en “modo invierno”) realizan una extracción permanente de calor del terreno, que se contrarresta por el calor que aporta el Sol. En sistemas que operan para calefacción y refrigeración, es necesario además tener en cuenta el balance energético del suelo, es decir, la diferencia entre el calor aportado y extraído del terreno para la aplicación en diferentes momentos. En un sistema perfectamente balanceado (igual cantidad de calor extraído o aportado al terreno), el suelo opera meramente como un buen almacén de calor entre la estación fría y caliente, siendo ésta la situación ideal desde el punto de vista de diseño y dimensionado. Otro factor de diseño primordial es la existencia de demandas térmicas “pico” o a corto plazo que pueden requerir el dotar al sistema de BCG de una capacidad de intercambio suplementaria.

En esta línea cabe señalar que las ventajas de las BCG son múltiples, ya que aúnan el concepto de ahorro y eficiencia (entre el 40% y el 60% de la energía primaria que se utiliza en climatización, según el sistema con el que se compare). También se trata una fuente de energía renovable y tiene múltiples ventajas en cuanto a integración arquitectónica, facilidad de mantenimiento y escasez de ruido. Adicionalmente, son sistemas basados en tecnologías bien conocidas y, por consiguiente, su introducción puede basarse en gran medida en elementos ya disponibles en el mercado. Finalmente, la BCG destaca por su capacidad de integrarse con otras fuentes de energía renovables, a las que complementa (más que sustituye) y que puede ayudar en el desarrollo de estas.

Sin embargo, nuestro país se cuenta entre las naciones en las que tradicionalmente estos sistemas han tenido menos desarrollo, situación poco acorde, tanto con el potencial de dicha fuente como con el impulso que ha tenido en otros países del mundo.

En España, el desconocimiento y la falta de legislación, la heterogeneidad de sus condiciones climatológicas y de suelo, entre otros factores, han supuesto hasta años recientes una barrera importante para los sistemas de BCG, a pesar de que, por lo dicho anteriormente, su aplicación puede resultar idónea desde el punto de vista técnico. Esta situación se ha venido invirtiendo, con lentitud al principio y a más velocidad últimamente, ante los enormes retos a los que se enfrenta el país desde el punto de vista energético.

Por esto, el Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE) destaca el incipiente despegue de los aprovechamientos geotérmicos de muy baja temperatura a través de la bomba de calor como solución a la obligatoriedad, fijada por el Código Técnico de la Edificación, de emplear una energía renovable para la producción de agua caliente sanitaria. Asimismo estas instalaciones permiten, como herramienta de ahorro energético en la edificación que son, mejorar la calificación energética del edificio, etiquetado obligatorio por la aplicación del R.D. 47/2007 de certificación energética de edificios.

Entretanto, ya hay cierto número de experiencias, tanto en el ámbito científico como comercial, en la implantación de BCG en diferentes zonas en nuestro país, de manera que nos encontramos en un momento de cambio que nos puede acercar rápidamente al nivel en que se encuentran otros países europeos.

2. OBJETIVOS

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

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

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

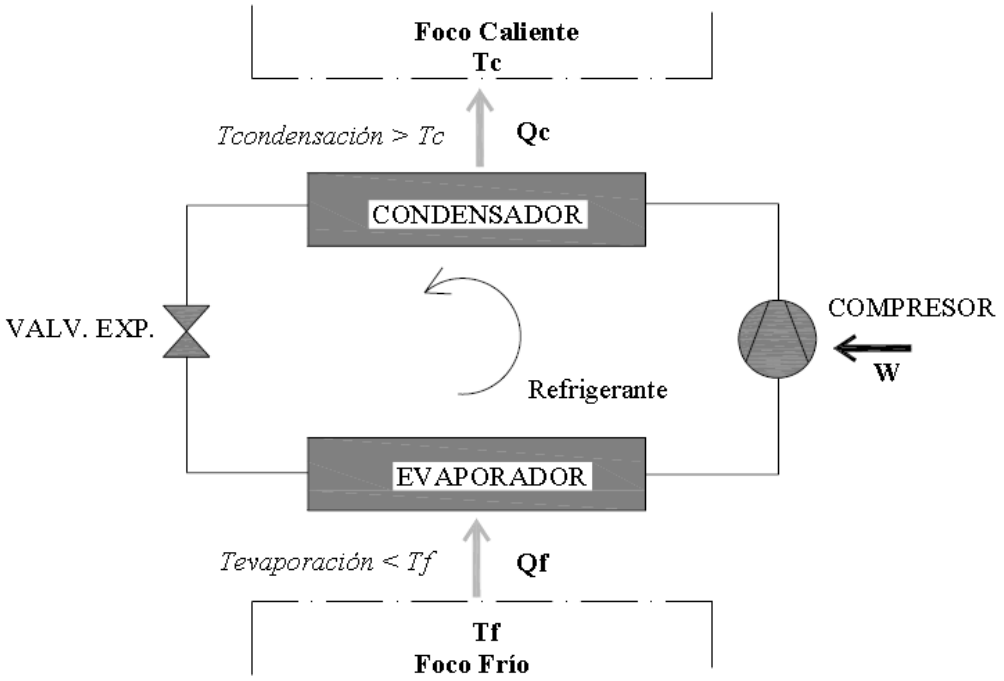
Este estudio tiene en cuenta, principalmente, la influencia que tiene el terreno en la transferencia de calor. Es evidente que habrá terrenos que serán más favorables que otros a la hora de intercambiar el calor. En este sentido, una mayor longitud de sonda requerirá también una mayor inversión. Por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

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

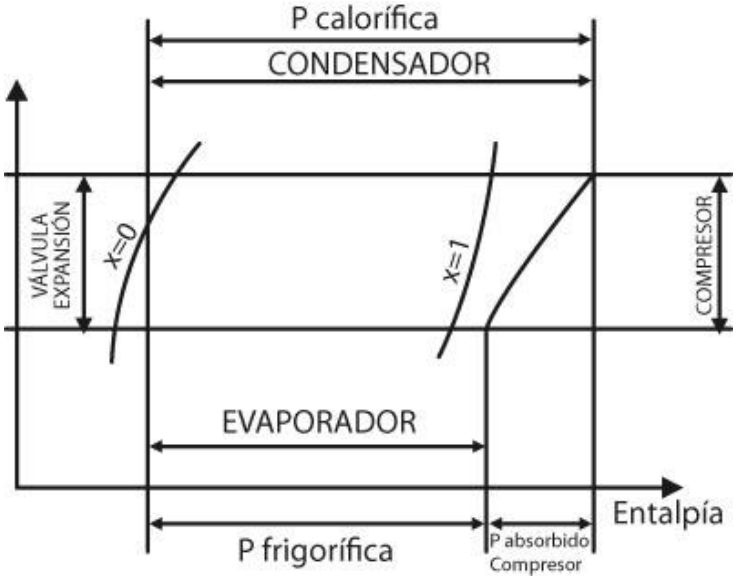
Para esto se hará uso de un tipo de software de dimensionado disponible actualmente. Concretamente los programas utilizados serán EED (Earth Energy Designer) y Geo2 (desarrollado por el grupo CIAT), los cuales serán debidamente explicados en sus correspondientes apartados.

3. PRINCIPIOS BÁSICOS DE LAS BCGs

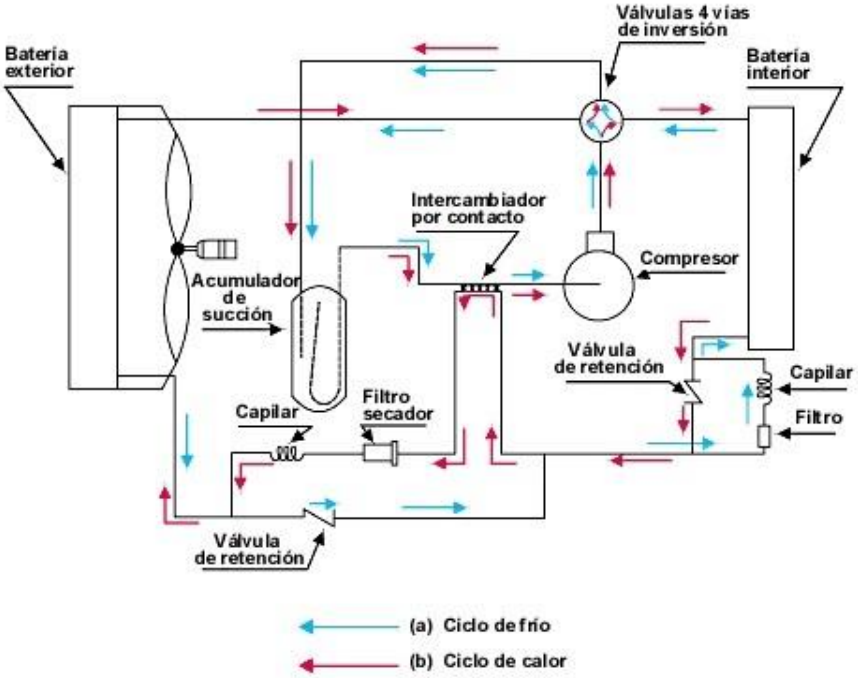
Una bomba de calor es una máquina que transfiere el calor desde un foco frío (Tf) a otro caliente (Tc) utilizando una cantidad de trabajo (W) relativamente pequeña en función de la diferencia de temperaturas entre el foco frío y el foco caliente, de acuerdo con el principio de Carnot. Como se observa en la figura, los componentes de la bomba de calor son: el compresor, que comprime un gas refrigerante aumentando su presión y temperatura mediante el consumo de energía eléctrica, el condensador, donde el refrigerante condensa a una temperatura mayor que la del foco caliente y cede calor a éste, la válvula de expansión, que disminuye la presión del refrigerante y, por último, el evaporador, donde el refrigerante se evapora a una temperatura menor que la del foco frío, extrayendo calor del mismo.



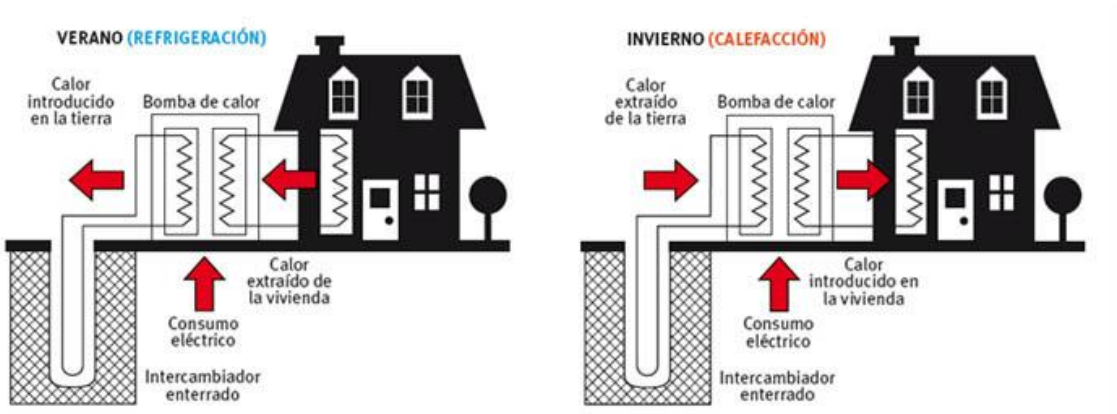
En el ciclo frigorífico teórico representado en el diagrama de Mollier se puede observar que la energía frigorífica cedida por la fuente fría al evaporador más la energía consumida por el compresor es igual a la energía cedida por el condensador a la fuente caliente.



En una bomba de calor, concretamente en las BCGs, se puede invertir el sentido del flujo tanto para suministrar calor como para suministrar frío. Esto se debe a que estas bombas cuentas con una válvula inversora que regula el flujo y hace circular el fluido de intercambio por un circuito o por otro según se requiera. De esta forma, no sólo proporciona calefacción y ACS, sino que también es capaz de funcionar como máquina de frío. El esquema general de funcionamiento de una bomba de calor se este tipo sería el siguiente:



De esta manera, la bomba funcionaría extrayendo calor del terreno y suministrándolo a la vivienda en invierno y extrayendo calor de ésta y transmitiéndolo al terreno en verano. En la siguiente imagen se puede ver cómo serían estos dos ciclos:



Expresando el rendimiento de la máquina como la potencia calorífica o frigorífica obtenida dividida entre la potencia absorbida por el compresor, obtenemos las ecuaciones siguientes, donde al rendimiento del equipo en modo calor se le denomina COP (Coefficient of Performance) y en modo frío, EER (Efficiency Energy Rate).

$$COP = \frac{\dot{Q}_c}{\dot{W}} = \frac{\dot{Q}_f + \dot{W}}{\dot{W}} = EER + 1$$

El rendimiento teórico de la máquina varía según la temperatura de trabajo (temperatura de los focos frío y caliente), independientemente de las eficiencias mecánicas y térmicas de sus distintos componentes.

$$COP = \frac{T_c}{T_c - T_f}$$

$$EER = \frac{T_f}{T_c - T_f}$$

Sobre el rendimiento real influyen otros muchos factores, entre ellos la degradación debida al funcionamiento a carga parcial, que depende del comportamiento de la bomba de calor en el arranque y del ratio de encendido/apagado del equipo en la instalación. Como se deduce de las ecuaciones anteriores, cuanto mayor sea la temperatura del foco

frío y menor la del foco caliente, mejor rendimiento del ciclo frigorífico se obtiene en el equipo, respetando siempre los límites impuestos por la válvula de expansión. Por ejemplo, una bomba de calor aire-agua trabaja en invierno con una temperatura (Tf) igual a la temperatura del aire exterior, por lo que cuando la temperatura exterior es más baja, para conseguir una determinada temperatura de confort en calefacción (Tc), el rendimiento del sistema disminuye. De modo inverso, cuando la bomba de calor aire-agua trabaja en refrigeración, cuando la temperatura exterior es más elevada (Tc), conseguir una temperatura de confort determinada (Tf), implica un rendimiento menor. Las bombas de calor acopladas al terreno trabajan con un foco de intercambio de calor, el subsuelo, de temperatura estable a lo largo del ciclo de funcionamiento, lo que produce una mejora del rendimiento del ciclo frigorífico de la máquina.

Suponiendo un suelo homogéneo con propiedades térmicas constantes, la temperatura a cualquier profundidad z puede calcularse a partir de la expresión siguiente, descrita por Kusuda y Achenbach:

$$T(z,t) = T_m - A_s e^{-z\sqrt{\frac{\pi}{365\,\alpha}}} \cos\left[\frac{2\pi}{365}\left(t - t_o - \frac{z}{2}\sqrt{\frac{365}{\pi\alpha}}\right)\right]$$

En esta ecuación, T (z, t) es la temperatura en ºC del suelo en el tiempo t a una profundidad z, Tm es la temperatura media anual del suelo en ºC (a una profundidad en donde no son perceptibles las variaciones de temperatura), As es la oscilación de la temperatura superficial en ºC, t es el tiempo en días, t_0 el desfase en días y α es la difusividad térmica del suelo en m^2/día. El valor de la oscilación anual (As) depende de la localización, del tipo de suelo y del contenido en agua. El desfase en días t_0 se refiere al desplazamiento de la temperatura superficial con la profundidad. Los valores de la difusividad térmica del suelo (α) dependen del tipo de suelo y del contenido de agua. El rango de valores para la difusividad térmica, de acuerdo con los trabajos de Givoni y Katz, varía desde 0,4 10^{-6} m^2/s hasta 1,08 10^{-6} m^2/s según sea el suelo seco o húmedo.

En el subsuelo la temperatura se va haciendo constante a medida que aumenta la profundidad pasando de estar condicionada por la temperatura atmosférica (a profundidades someras) a verse incrementada por el gradiente geotérmico terrestre (a profundidades mayores). En la siguiente tabla se muestran las variaciones de temperatura para los primeros metros de perforación y su variación a lo largo del año:

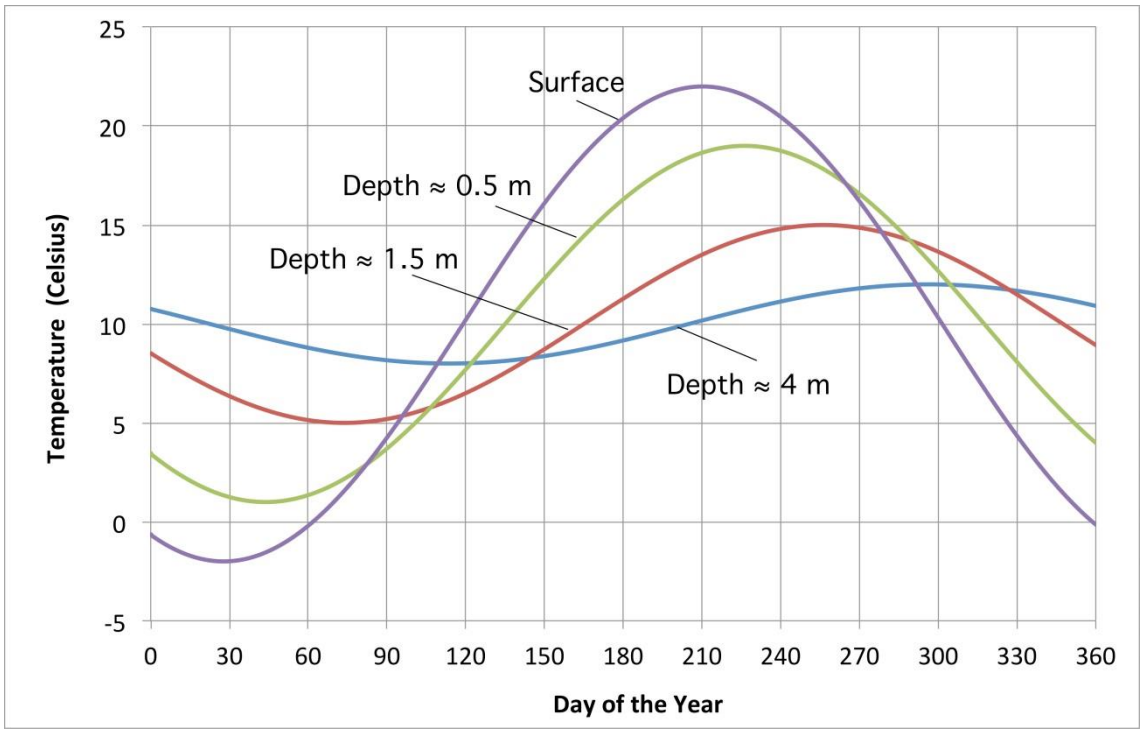
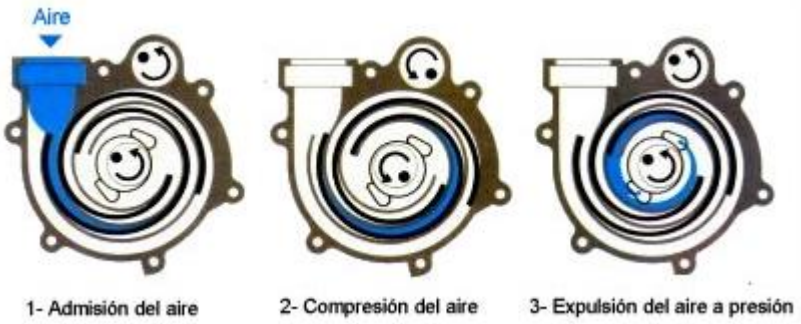


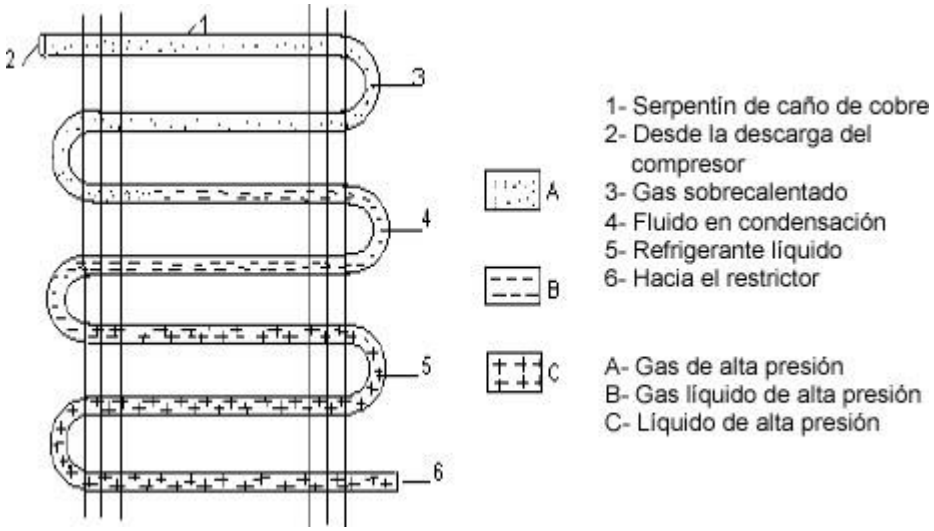
Gráfico 2: Variación anual de la temperatura con la profundidad.

4. COMPONENTES GENERALES DE BCGs

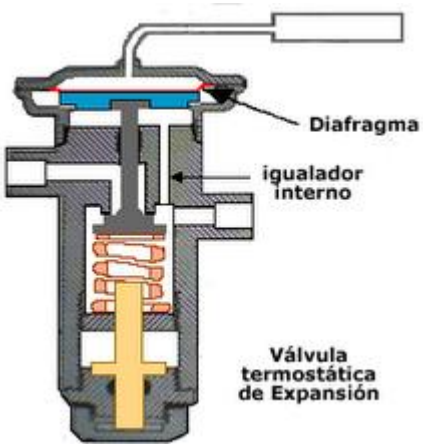
Compresor: ***Único elemento de la máquina que necesita para su funcionamiento consumir energía mecánica***. Es el elemento mecánico más complicado y delicado de la instalación, siendo objeto de inspecciones y verificaciones sistemáticas. Permite aumentar la presión del refrigerante en estado gaseoso y normalmente sobrecalentado (procedente del evaporador) hasta una presión que favorece el paso de estado gas a líquido en el condensador, cediendo calor al entorno. Esto se realiza a través de un intercambio de energía entre la máquina y el fluido en el cual el trabajo ejercido por el compresor es transferido a la sustancia que pasa por él convirtiéndose en energía de flujo, aumentando su presión y energía cinética impulsándola a fluir.



Condensador: Intercambiador de calor entre fluidos, de modo que mientras uno de ellos se enfría, pasando de estado gaseoso a estado líquido, el otro se calienta. **Por medio de una pérdida de calor causada por la condensación del fluido se consigue que el refrigerante pase al estado de líquido saturado**. Todo esto se produce manteniendo una temperatura y presión constantes.

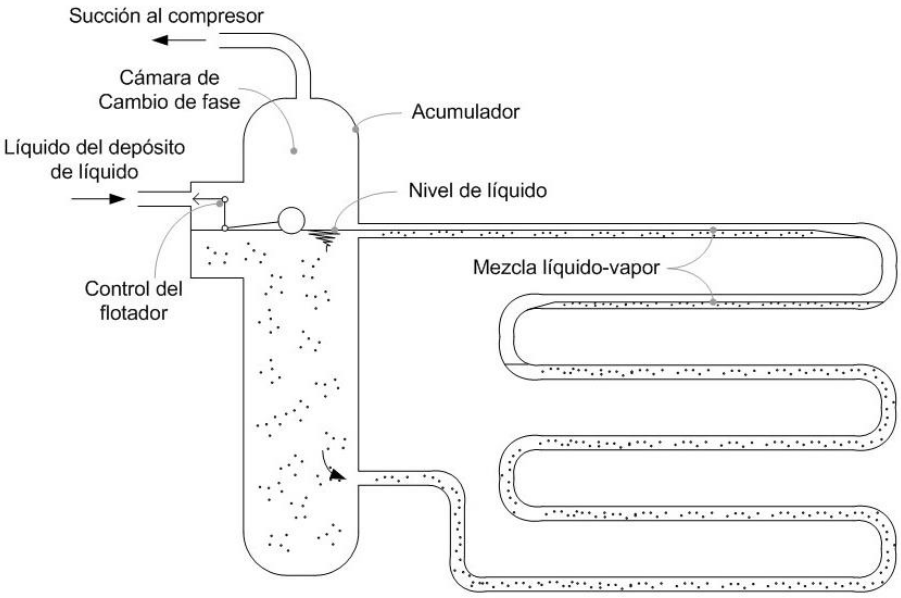


Válvula de expansión: Para ***volver a su estado inicial y repetir el ciclo de nuevo***, el refrigerante pierde presión y temperatura en la válvula de expansión, que tiene la capacidad de generar la caída de presión necesaria entre el condensador y el evaporador en el sistema. Este dispositivo regula el flujo másico del refrigerante en función de la carga térmica. El refrigerante que ingresa al evaporador de expansión directa lo hace en estado de mezcla líquido/vapor, ya que al salir de la válvula se produce una brusca caída de presión producida por la "expansión directa" del líquido refrigerante.



Evaporador: Es el elemento en el que se produce una ***absorción de calor del subsuelo en invierno y del sistema a refrigerar en verano***, evaporando el fluido de trabajo. Se trata de un intercambiador de calor donde el refrigerante, que después de la expansión se

encuentra como vapor húmedo, absorbe calor del medio ya sea aire, agua o cualquier otra sustancia, para cambiar el estado hasta que todo él se encuentre como gas. Cuanto mayor sea la fracción líquida del vapor húmedo, mayor será el efecto frigorífico. Este aporte de calor al refrigerante se realiza a presión y temperatura constante (idealmente).



5. CÁLCULO DEL COEFICIENTE DE OPERACIÓN (COP)

Uno de los parámetros más importantes a la hora de elegir una BCG es el COP, que se ha definido anteriormente. El COP no se mantiene constante a lo largo del ciclo de funcionamiento de la máquina, sino que varía en función de las temperaturas de los focos (frío y caliente). Este hecho implica que el COP variará según la época del año en la que trabaje la máquina. La ventaja de los sistemas de climatización geotérmica es que la temperatura de los sistemas que ceden calor en invierno (subsuelo) y el habitáculo que se refrigera en verano, mantienen la temperatura prácticamente constante a lo largo del día, así como los espacios a los que se transporta el calor

El proceso de acondicionamiento geotérmico de una vivienda unifamiliar requiere un estudio que contemple las cargas térmicas de la estructura tanto para calefacción como para refrigeración, tomando como referencia las temperaturas de confort tanto en verano como en invierno. También se deberían calcular las necesidades de ACS de la vivienda.

5.1. Cálculo de cargas térmicas de calefacción (INVIERNO).

El método para el cálculo de las necesidades de calefacción contempla la existencia de dos cargas térmicas, la carga térmica por transmisión de calor a través de los cerramientos hacia los locales no climatizados o el exterior, y la carga térmica por enfriamiento de los locales por la ventilación e infiltración de aire exterior en los mismos, así como la influencia del ángulo de orientación de la vivienda.

5.1.1. Carga térmica por transmisión.

La carga térmica por transmisión se determina como sigue:

$$Q = C_o \times C_i \times K \times S \times (t_{\text{interior}} - t_{\text{exterior}})$$

Donde:

Q es la carga térmica por transmisión (kcal/h)

Co es el coeficiente de orientación del muro

Ci es el coeficiente de intermitencia de la instalación

K es el coeficiente global de transmisión de calor del muro (kcal/h m^2 ºC)

S es la superficie del muro expuesta a la diferencia de temperaturas en m^2

$t_{interior}$ la temperatura proyectada en el local calefactado (ºC)

$t_{exterior}$ es la temperatura del exterior o local no calefactado

5.1.2. Carga térmica por ventilación o infiltración de aire exterior.

La carga térmica por ventilación o infiltración de aire exterior se determina como sigue:

$$Q = V \times N \times 0{,}29 \times (t_{\text{interior}} - t_{\text{exterior}})$$

Donde:

V es el volumen del local a calefactor (m^3)

N es el número de renovaciones horarias (1/h)

0,29 es el calor específico del aire en base al volumen (kcal/m^3 ºC)

$t_{interior}$ la temperatura proyectada en el local calefactado (ºC)

$t_{exterior}$ es la temperatura del aire exterior (ºC)

5.2. Cálculo de las cargas térmicas de refrigeración (VERANO).

En la época de demanda de frío se prevé la existencia de cargas térmicas sensibles, debidas a la diferencia de temperatura y a la radiación térmica, y cargas latentes, debidas a la aportación de humedad al aire.

5.2.1. Cargas sensibles.

5.2.1.1. Cargas por transmisión a través de cerramientos opacos.

Esta carga térmica por transmisión se calcula como sigue:

$$Q = K \times S \times DTE$$

Donde:

Q es la carga térmica por transmisión (kcal/h)

K es el coeficiente global de transmisión de calor del muro (kcal/h m^2 ºC)

S es la superficie del muro expuesta a la diferencia de temperaturas en m^2

DTE es la diferencia de temperaturas, corregida según la orientación del muro y su peso

5.2.1.2. Cargas por transmisión a través de cerramientos traslucidos.

La carga térmica por transmisión a través de cerramientos traslucidos no se corrige en función de la orientación dado que la radiación solar se cuantifica como carga aparte. Se obtiene como:

$$Q = K \times S \times \Delta t$$

Donde:

Q es la carga térmica por transmisión (kcal/h)

K es el coeficiente global de transmisión de calor del muro (kcal/h m^2 ºC)

S es la superficie del muro expuesta a la diferencia de temperaturas en m^2

Δt es la diferencia de temperaturas entre la cara exterior del cerramiento y la cara interior

2.1.3. Cargas térmicas por radiación solar.

La radiación solar atraviesa las superficies traslucidas y transparentes e incide sobre las superficies interiores de los locales, calentándolas, lo que a su vez incrementa la temperatura del ambiente interior. Las cargas por radiación se obtienen como:

$$Q = S \times R \times f$$

Donde:

Q es la carga térmica por radiación solar (kcal/h)

S es la superficie traslucida expuesta a la radiación en m^2

R es la radiación solar que atraviesa un vidrio sencillo en $kcal/h \cdot m^2$, tabulada para cada latitud

f es el factor de corrección de la radiación en función del tipo de vidrio, efecto de sombras, etc...

5.2.1.4. Carga sensible por ventilación o infiltración de aire exterior.

La carga térmica sensible por ventilación o infiltración de aire exterior se determina como sigue:

$$Q = V \times 0{,}29 \times \Delta t$$

Donde:

Q es la carga térmica sensible por ventilación o infiltración (kcal/h)

V es el caudal de aire infiltrado o de ventilación (m^3/h)

0,29 es el calor específico del aire en base al volumen ($kcal/m^3$ ºC)

Δt es la diferencia de temperatura entre el ambiente exterior y el interior (ºC)

5.2.1.5. Carga sensible por ocupación del local.

Esta carga se determina en multiplicando una valoración del calor sensible emitido por la persona tipo por el número de ocupantes previstos para el local. La cantidad de calor emitido por persona se puede consultar en el RITE.

5.2.1.6. Cargas generadas por la iluminación del local.

Se considerará que la potencia íntegra de la lámpara se transformará en calor sensible; en el caso de las lámparas de descarga se incrementará el valor obtenido en un 25% para tener en cuenta el cebador y el balasto.

5.2.1.7. Cargas generadas por las máquinas presentes en el local.

Se considerará que la potencia íntegra de las máquinas se transformará en calor sensible:

$$Q = Pot(Kw) \times 860$$

Donde:

Q es la carga térmica por maquinaria (kcal/h)

Pot es la potencia de las lámparas (Kw)

5.2.2. Cargas latentes.

5.2.2.1. Carga latente por ventilación o infiltración de aire exterior.

La carga térmica latente por ventilación o infiltración de aire exterior se determina como sigue:

$$Q = V \times 0{,}72 \times \Delta w$$

Donde:

Q es la carga térmica latente por ventilación o infiltración de aire (kcal/h)

V es el caudal de aire infiltrado o de ventilación (m^3/h)

0,72 es el producto de la densidad estándar del aire (1,2 kg/m^3) por el calor latente de vaporización del agua (0,6 kcal/g).

Δw es la diferencia de humedad absoluta entre el ambiente exterior y el interior (ºC)

5.2.2.2. Carga latente por ocupación del local.

Esta carga se determina en multiplicando una valoración del calor latente emitido por la persona tipo por el número de ocupantes previstos para el local. La cantidad de calor emitido por persona ocupante se puede consultar en el RITE.

5.3. Elección BCG (variación COP).

El cálculo de las cargas térmicas de la edificación permite establecer las necesidades térmicas tanto para calefacción como para refrigeración. Según estas necesidades se establece la potencia mínima que debe suministrar la bomba para satisfacer los requerimientos térmicos. Tomando la potencia necesaria mayor se procede a escoger la máquina, que deberá suministrar como mínimo dicha potencia.

En la ficha técnica de la máquina se proporcionan los datos necesarios para poder llevar a cabo la elección en función de la potencia buscada. Por ejemplo la ficha técnica de la gama AGEO+ suministrada por el grupo CIAT informa sobre las siguientes características:

AGEO+		20H	30H	40H	50H	40HT	50HT	65HT	80HT	100HT	120HT
Potencia calorífica a 10/7 °C 30/35 °C	kW	7.39	9.43	11.5	15.31	11.3	16.06	19.83	24.46	30.9	36.34
Potencia absorbida	kW	1.45	1.88	2.29	3.04	2.17	3.21	3.88	4.71	5.7	7.06
COP*		5.1	5.02	5.02	5.04	5.21	5	5.11	5.19	5.42	5.15
Potencia calorífica a 10/7 °C 40/45 °C	kW	7	8.93	10.89	14.[illegible]9	10.7	15.2	18.77	23.15	29.25	34.4
Potencia absorbida	kW	1.74	2.35	2.87	3.79	2.72	4.01	4.85	5.89	7.12	8.82
COP*		4.02	3.8	3.8	3.82	3.94	3.79	3.87	3.93	4.11	3.9
Potencia calorífica a 0/-3 °C 30/35 °C	kW	5.36	6.93	8.45	11.25	[illegible]3	11.8	14.57	17.97	23.14	26.7
Potencia absorbida	kW	1.42	1.78	2.18	2.89	2.06	3.06	3.69	4.48	5.74	6.71
COP**		3.77	3.89	3.88	3.89	4.02	3.86	3.95	4.01	4.03	3.98
Potencia calorífica a 0/-3 °C 40/45 °C	kW	5.1	6.56	8	10.65	7.86	11.17	13.79	17.01	22.26	25.27
Potencia absorbida	kW	1.76	2.23	2.72	3.61	2.58	3.[illegible]1	4.61	5.6	7.11	8.4
COP**		2.9	2.94	2.94	2.95	3.05	2.93	2.99	3.04	3.13	3.01
Alimentación eléctrica		230 V - monofásica - 50 Hz + T + N				40[illegible] V - trifásica - 50 Hz + T + N					
Potencia sonora ***	dB(A)	53		54	57	54	57	58	59	61	63

AGEO+

Potencia calorífica a 10/7 °C 30/35 °C	kW	15.31
Potencia absorbida	kW	3.04
COP*		5.04

Tomando como ejemplo una máquina con una potencia térmica de 15.31 kW se observan los datos necesarios en principio para la elección de la bomba. Según la ficha técnica esta máquina tiene un COP de 5.04. En la práctica las máquinas con un COP superior a 4 se consideran muy eficientes. Este COP está calculado como COP certificado NFPAC bajo el n.° NF 414-627, que utiliza una temperatura de 35ºC de entrega. Sin embargo este dato variará a lo largo del año en función de la variación de temperaturas y las cargas térmicas del edificio.

Lo primero que hay que hacer para calcular la variación del COP es definir las condiciones de trabajo más desfavorables a las que será sometida la bomba en función del emplazamiento de la edificación. Para esto se toman los datos de temperaturas máximas y mínimas del último periodo de años. Los datos se pueden obtener de múltiples fuentes. Por ejemplo se pueden tomar de AEMET, aunque su registro sólo llega hasta el período 2007/2008. También la norma UNE 100001 (Condiciones para proyectos de climatización) tiene un registro que establece las temperaturas mínimas y máximas para cada zona del territorio español. Tomando los datos de AEMET para Madrid, por tomar un ejemplo, se obtiene la siguiente tabla de la que se tomarán los valores más desfavorables:

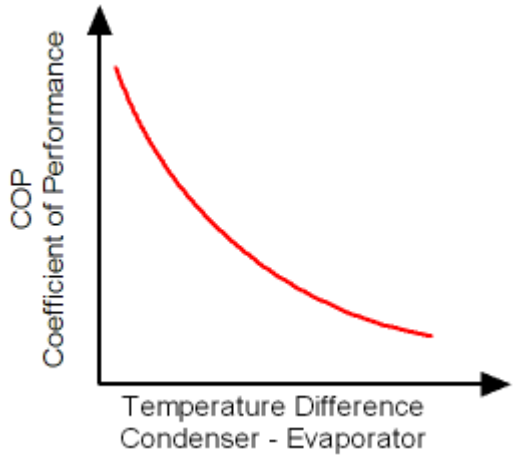
Tª MÁXIMA	MES	Tª MÍNIMA	MES
38	Agosto 08	**2.8**	Diciembre 07
3.9	Agosto 07	**-1.5**	Enero 07
37.6	Julio 06	**-2.8**	Enero 06
38	Agosto 05	**-6.1**	Enero 05
38.4	Agosto 04	**-2.6**	Marzo 04

Se deben fijar también las temperaturas de confort tanto para invierno como para verano. Estas son 22ºC en invierno y 24ºC en verano en el interior de la vivienda.

Las temperaturas sombreadas en la tabla de máximas y mínimas serán las que marcarán las condiciones de trabajo más severas para el compresor. Esto se debe a que la potencia eléctrica consumida por el compresor será mayor cuanto mayor sea la diferencia de temperaturas entre el foco caliente y el foco frío. Por ejemplo, esta bomba en modo calefacción requerirá una potencia para elevar la temperatura de -5ºC en el foco frío (circuito primario) a la temperatura de confort (35ºC en el secundario si se trata de suelo radiante para una temperatura de confort de 22ºC) mayor que si la temperatura en el foco frío fuera de 10ºC. De igual manera ocurrirá en verano para refrigerar. De esta forma, cuanto mayor sea la barrera térmica mayor será la potencia requerida y disminuirá el COP ya que, por definición, es la potencia térmica de la bomba (o la potencia del compresor) entre la potencia eléctrica consumida; tal como muestra la expresión de cálculo del COP que se vio anteriormente y que se resume en la siguiente expresión:

$$COP = \frac{\text{Calor cedido por el condensador}}{\text{Trabajo suministrado por el compresor}}$$

Esto se debe a que la temperatura de impulsión se debe elevar y así aumentan las diferencias de temperaturas entre evaporador y condensador. De esa forma el COP de la BCG disminuirá tal y como se muestra en la siguiente figura:



6. CALOR ESPECÍFICO Y CONDUCTIVIDAD TERMICA DEL SUELO

Las principales propiedades que marcan las características térmicas son su calor específico y su conductividad térmica. Al tratarse de materiales heterogéneos, su composición influirá en gran manera en las propiedades térmicas. Entender estos fenómenos es importante a la hora del estudio del comportamiento del suelo en una instalación geotérmica.

El calor específico del suelo define la cantidad de calor necesario para que la unidad de masa de un suelo aumente un grado su temperatura en condiciones isobáricas. Los componentes minerales del suelo tienen calores específicos muy semejante, entorno al 1,9 $MJ/m^3 \cdot ºC$, que se diferencian claramente de los calores específicos de la materia orgánica (2,47 $MJ/m^3 \cdot ºC$) y el agua (4,19 $MJ/m^3 \cdot ºC$), así el calor específico de un suelo variará notoriamente según su contenido en humedad. Los suelos húmedos se calentarán más lentamente que los secos, pero mantendrán más el calor, reduciendo las variaciones de temperatura en el suelo.

Para considerar la distribución de calor a lo largo del suelo, habrá que considerar la conductividad térmica. La conductividad térmica es una propiedad física de los materiales que mide la capacidad de conducción de calor. En otras palabras la conductividad

térmica es la capacidad de una sustancia de transferir la energía cinética de sus moléculas a otras moléculas adyacentes o a sustancias con las que no está en contacto. La conductividad térmica de las partículas del suelo es mayor que la del agua y mucho mayor que la del aire. Habitualmente los suelos son muy porosos y estos vacíos pueden albergar aire o agua. En consecuencia el grado de humedad, el grado de empaquetamiento y porosidad condicionarán fuertemente las características térmicas del suelo. De esta forma los suelos húmedos, en los que hay un desplazamiento del aire por el agua, conducen mejor el calor que los secos (en los que existe un mayor volumen de vacíos). En un suelo humedecido se conduce el calor más rápidamente a capas más profundas.

Según diversos estudios se pueden diferenciar cuatro zonas distintas según la variación de la temperatura del terreno con la profundidad. La primera zona, o zona superficial, comprende desde la superficie de la tierra hasta la profundidad de un metro, y es una zona donde la temperatura del terreno es muy sensible a cambios en las condiciones ambientales. La segunda zona es la que se extiende hasta unas profundidades entre 8 y 20 metros, según el tipo de terreno, y donde la temperatura del terreno es cercana a la temperatura media anual ambiental, pero influenciada por las variaciones climáticas estacionales. La tercera zona, que alcanza hasta profundidades de 50 metros aproximadamente, presenta una temperatura constante a lo largo del año. Por último, a profundidades superiores a los 50 metros, la temperatura aumenta con la profundidad del terreno con un gradiente medio de 0,03ºC/m como consecuencia del gradiente geotérmico (temperaturas en la corteza terrestre debidas al flujo de calor interior).

Según un estudio realizado por INGEOSOLUM en 2006/2007 la distribución de la temperatura en el suelo de Madrid alcanza su equilibrio térmico a 16ºC y 5m de profundidad durante todo el año.

7. INTERCAMBIADOR GEOTÉRMICO. NOCIONES.

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

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

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

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

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

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

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

Donde:

L_{cap} es la longitud del captador de calor (superficie/tiempo de contacto)

Q es el calor a disipar o captar por el terreno

T_s es la temperatura del suelo

T_f es la temperatura del fluido de intercambio, generalmente agua glicolada

Cap es la morfología y tipo del material captador

R_s es la resistencia térmica del terreno (inversa de la conductividad térmica)

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

7.1. TIPOS DE INTERCAMBIADORES GEOTÉRMICOS

Existen varios tipos de intercambiadores que se utilizan en climatización geotérmica y que varían en función del tipo de instalación. Éstos son:

Colectores horizontales enterrados.

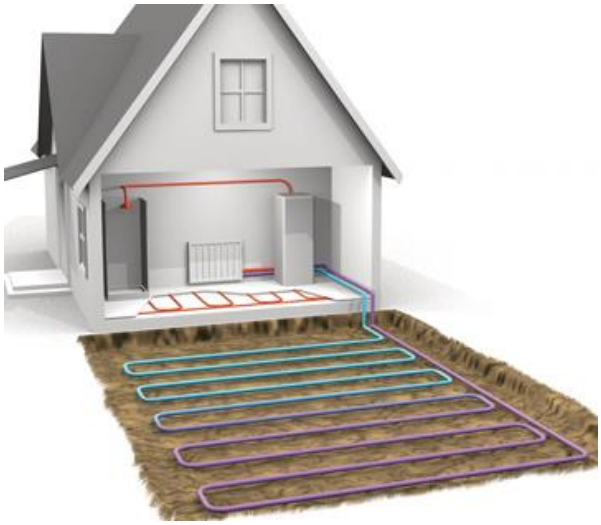
Sondas geotérmicas.

Sondeos de captación de agua someros.

Cimientos geotérmicos.

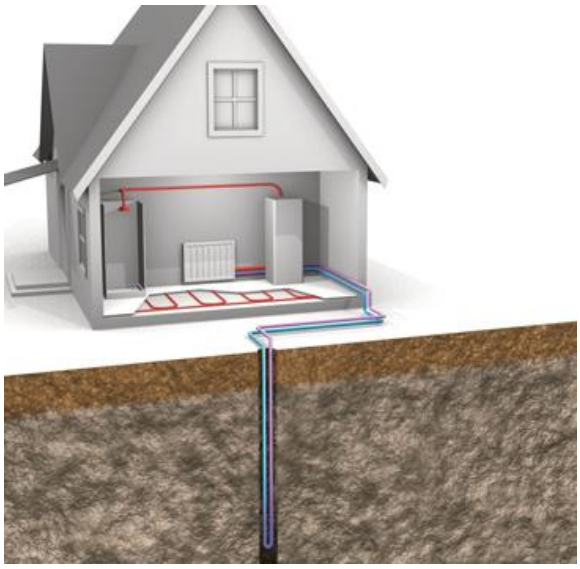
7.1.1. Colectores horizontales enterrados.

Se trata de tubos de polietileno enterrados a la misma profundidad y que adoptan diferentes morfologías. En el caso de un captador horizontal, las principales dimensiones a tener en cuenta son: superficie ocupada, profundidad de los tubos y separación entre tubos. Puede tratarse de un tubo con diversas configuraciones o de un serpentín enterrado (slinky).



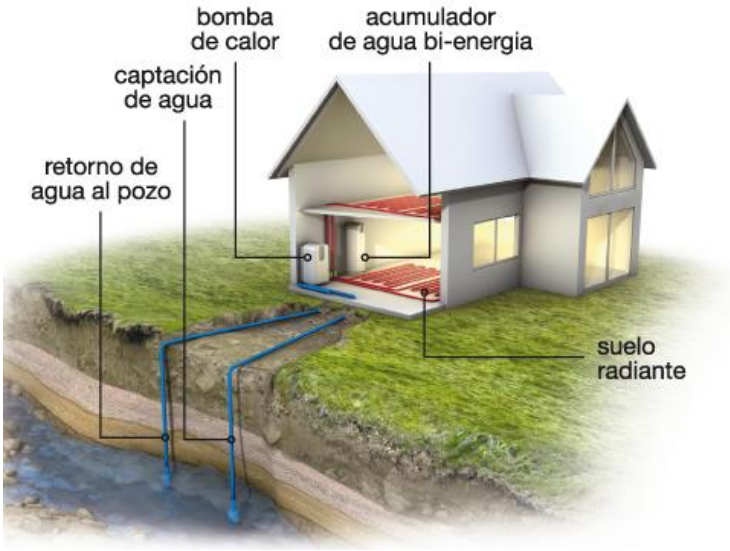
7.1.2. Sondas geotérmicas.

Se trata de perforaciones verticales en las que se introduce el tubo intercambiador. La longitud de estas perforaciones varía en función de varios parámetros que se estudiarán más tarde. En el caso de requerir mayores potencias, por tratarse de grupos de viviendas o de edificios de grandes dimensiones, puede recurrirse al empleo de campos de sondas geotérmicas.



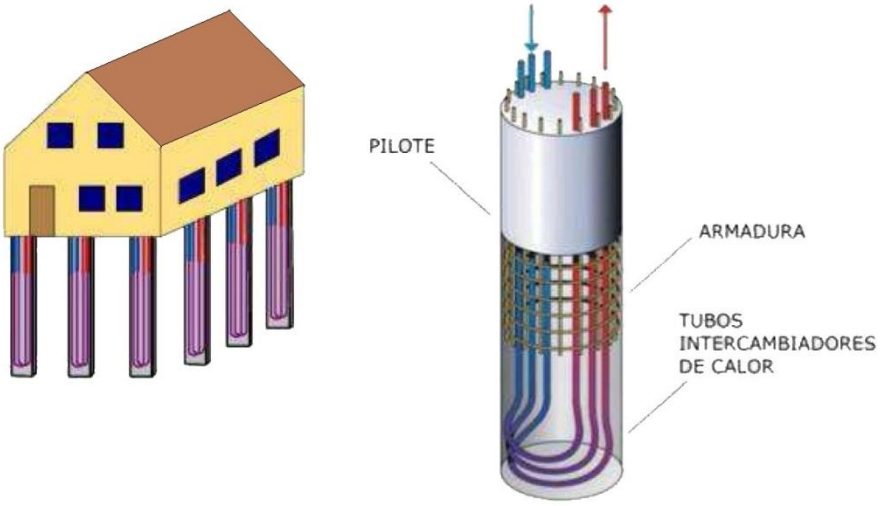
7.1.3. Sondeos de captación de agua someros.

Es posible la utilización del agua de acuífero procedente de la capa freática en emplazamientos donde ésta exista. Con una bomba sumergida que conduce el agua a la bomba de calor para, una vez extraída su energía y enfriada, ser devuelta a la capa freática por un pozo de reinyección, o ser vertida a un cauce fluvial.



7.1.4. Cimientos geotérmicos.

En esta modalidad el intercambiador va introducido o rodea a la estructura de la cimentación. Actualmente es una de las más utilizadas para calentar edificios de grandes dimensiones en invierno y para enfriarlos en verano, por mediación del almacenamiento subterráneo estacional de calor y de frío, recibiendo diferentes denominaciones: cimientos geotérmicos, energéticos o termo-activos, geo-estructuras, pilotes intercambiadores de calor…



8. CÁLCULO DE LA LONGITUD DE INTERCAMBIADOR GEOTÉRMICO VERTICAL

A continuación se va a realizar el estudio de la longitud necesaria para el intercambiador de calor considerando una sonda vertical y teniendo en cuenta las conductividades térmicas de los materiales. Para hacerlo se va a utilizar el programa EED (Earth Energy Designer) que permite modelizar el tipo de terreno en función de sus características.

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

EED se basa en estudios de parámetros con un modelo de simulación numérica (SBM), que proporciona soluciones analíticas del flujo de calor para varias configuraciones basándose en un patrón de perforación y en la geometría del campo de captadores (g-functions). Las g-functions dependen de la separación entre los pozos de sondeo en la superficie del suelo y la profundidad de cada pozo. En el caso de sondeos inclinados también hay una dependencia con el ángulo de inclinación. Los valores de g-functions obtenidos de las simulaciones numéricas se almacenan en un archivo de datos.

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

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

En primer lugar se deben conocer dichos parámetros. Existen bastantes estudios y tablas de los que se pueden extraer las características de los materiales. Para este estudio se va a utilizar la tabla de valores de conductividad y capacidad térmica para distintos tipos de materiales que proporciona Paud, D. (Getohermal energy and heat storage. 2002).

TIPO DE MATERIAL	CONDUCTIVIDAD TÉRMICA (W/mK)			CAPACIDAD TÉRMICA VOLUMÉTRICA (MJ/m^3K)
	Mín.	Med.	Máx.	
ROCAS MAGMÁTICAS				
Basalto	1,3	1,7	2,3	2,3-2,6
Diorita	2	2,6	2,9	2,9
Gabro	1,7	1,9	2,5	2,6
Granito	2,1	3,4	4,1	2,1-3,0
Peridotita	3,8	4	5,3	2,7
Riolita	3,1	3,3	3,4	2,1
ROCAS METAMÓRFICAS				
Gneis	1,9	2,9	4	1,8-2,4
Mármol	1,3	2,1	3,1	2
Metacuarcita	5,8	5,8	5,8	2,1
Micaesquisto	1,5	2	3,1	2,2
Esquisto arcilloso	1,5	2,1	2,1	2,2-2,5
ROCAS SEDIMENTARIAS				
Caliza	2,5	2,8	4	2,1-2,4
Marga	1,5	2,1	3,5	2,2-2,3
Cuarcita	3,6	6	6,6	2,1-2,2
Sal	5,3	5,4	6,4	1,2
Arenisca	1,3	2,3	5,1	1,6-2,8
Limonitas/Argilitas	1,1	2,2	3,5	2,1-2,4
NO CONSOLIDADAS				
Grava (seca)	0,4	0,4	0,5	1,4-1,6
Grava (saturada)	1,8	1,8	1,8	2,4
Arena (seca)	0,3	0,4	0,8	1,3-1,6
Arena (saturada)	1,7	2,4	5	2,2-2,9
Limo/Arcilla (seca)	0,4	0,5	1	1,5-1,6
Limo/Arcilla (saturada)	0,9	1,7	2,3	1,6-3,4
Turba	0,2	0,4	0,7	0,5-3,8
OTROS MATERIALES				
Bentonita	0,5	0,6	0,8	3,9
Hormigón	0,9	1,6	2	1,8
Hielo (-10ºC)		2,32		1,87
Plástico (PE)		0,39		
Aire (0-20ºC, seco)		0,02		0,0012
Acero		60		3,12
Agua (+10ºC)		0,58		4,19

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

A partir de los datos de conductividad térmica y la capacidad térmica volumétrica se puede calcular el valor de difusividad térmica del terreno ya que se relaciona con los anteriores a través de la siguiente expresión:

$$\alpha = \frac{\kappa}{\rho c_p}$$

La difusividad térmica se define como el ratio entre la capacidad de conducción del terreno y la capacidad térmica del terreno. Se mide en m^2/s. Como ya se señaló en el apartado 3, el rango de valores para la difusividad térmica, de acuerdo con los trabajos de Labs y Harrington (1982), va desde 0,36 10^{-6} m^2/s hasta 0,8 10^{-6} m^2/s, según sea el suelo seco o húmedo, mientras que Givoni y Katz seleccionaron como valores límites 0,4 10^{-6} m^2/s para suelo seco y 1,08 10^{-6} m^2/s para suelo húmedo.

Como se puede observar en la expresión anterior, la difusividad es directamente proporcional a la conductividad térmica (k) e inversamente proporcional a la densidad y al calor específico del material. Para hallar las difusividades se han tomado los valores medios de conductividad térmica y de capacidades térmicas volumétricas y se han introducido en la fórmula anterior.

La capacidad térmica volumétrica de un material se diferencia del calor específico en que está determinado por el volumen del material, mientras que el calor específico está basado en la masa del material. Se puede obtener la capacidad calorífica volumétrica de una substancia al multiplicar el calor específico por su densidad.

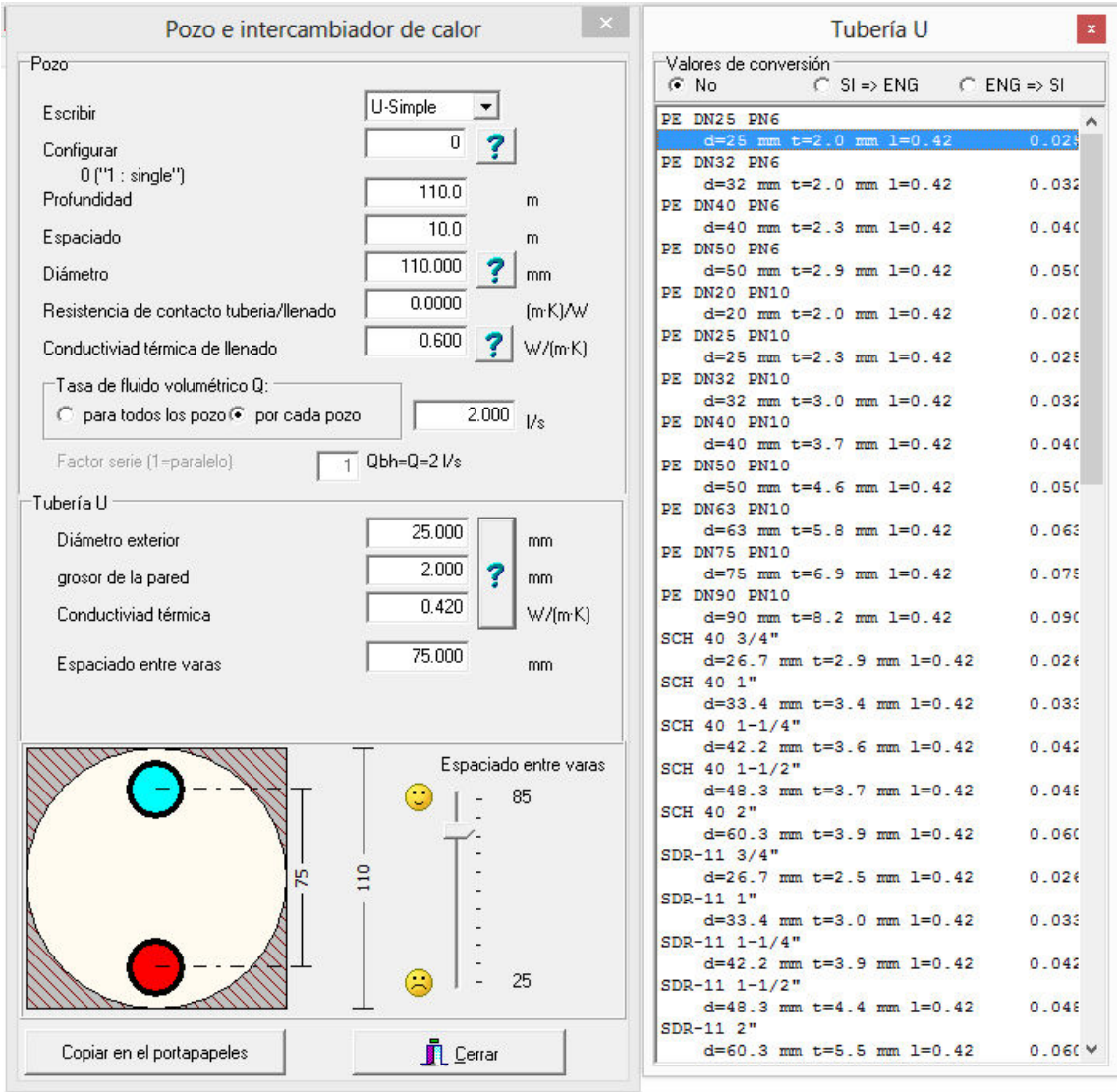
Por tanto, sustituyendo los valores medios de la tabla anterior y variando las unidades correctamente se obtiene la tabla siguiente con los valores de difusividad térmica para distintos tipos de terrenos:

TIPO DE MATERIAL	DIFUSIVIDAD TÉRMICA (cm^2/s)
ROCAS MAGMÁTICAS	
Basalto	0,007
Diorita	0,009
Gabro	0,007
Granito	0,014
Peridotita	0,015
Riolita	0,016
ROCAS METAMÓRFICAS	
Gneis	0,013
Mármol	0,011
Metacuarcita	0,028
Micaesquisto	0,009
Esquisto arcilloso	0,009
ROCAS SEDIMENTARIAS	
Caliza	0,012
Marga	0,009
Cuarcita	0,028
Sal	0,045
Arenisca	0,010
Limonitas/Argilitas	0,010
No consolidadas	0,000
Grava (seca)	0,003
Grava (saturada)	0,008
Arena (seca)	0,003
Arena (saturada)	0,009
Limo/Arcilla (seca)	0,003
Limo/Arcilla (saturada)	0,007
Turba	0,002
OTROS MATERIALES	
Bentonita	0,002
Hormigón	0,009
Hielo (-10ºC)	0,012
Plástico (PE)	0,000
Aire (0-20ºC, seco)	0,167
Acero	0,192
Agua (+10ºC)	0,001

Tabla 2: Valores calculados de difusividad.

Con estos valores se pueden empezar a dimensionar con EED. Para empezar hay que fijar los parámetros para poder trabajar sólo con las características del terreno e ir variándolas para ver con qué longitud habría que dimensionar la sonda geotérmica. Para este caso se va a considerar una configuración simple que constará de un único pozo con una sonda simple en U para una potencia de 9 kW y 1800 h de utilización sólo para calefacción. Como intercambiador se utilizará un tubo de PE, concretamente el PE 25 PN 6, bastante habitual en estas instalaciones.

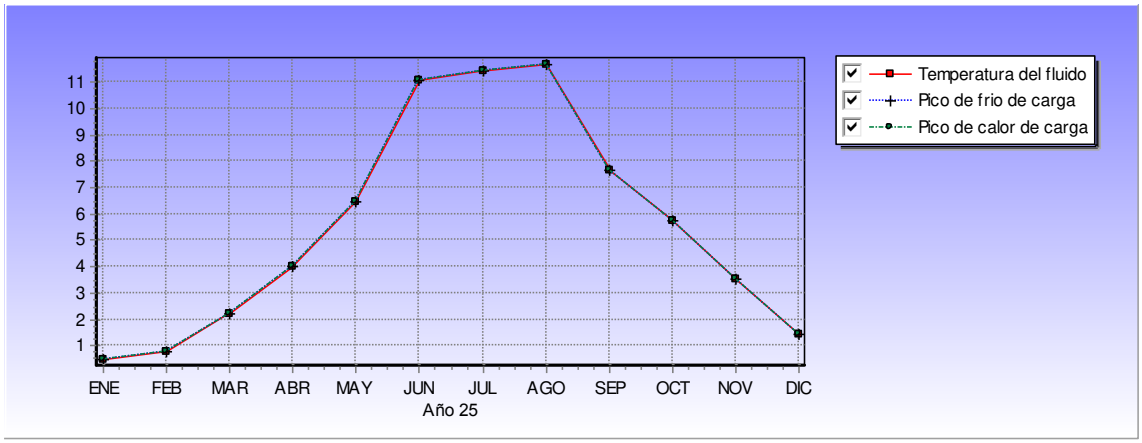
Para fijar estos parámetros se utiliza la ventana de datos de pozo e intercambiador de calor:

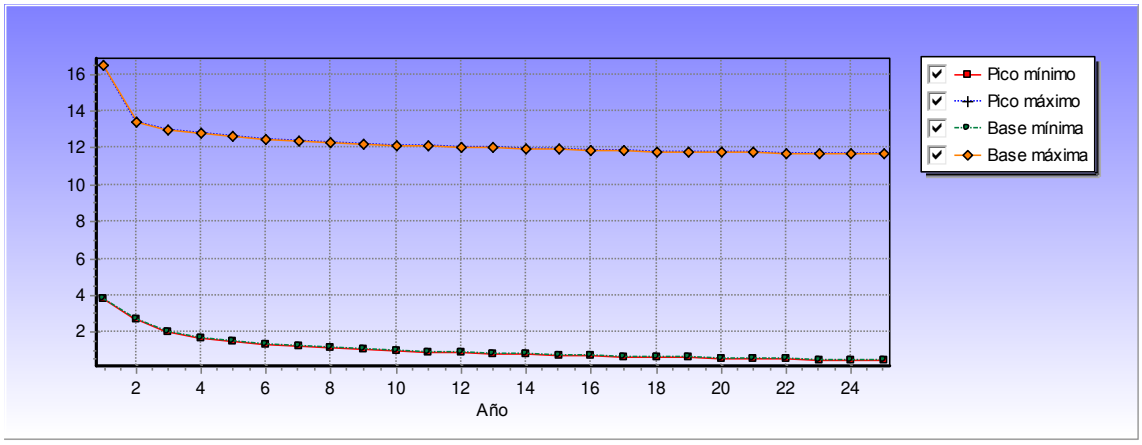


También se puede escoger el fluido de intercambio. Lo más habitual es utilizar agua con anticongelante en distintas proporciones según el punto de congelación. En este caso se tratará de agua (70%) con etilenglicol (30%).

Lo último que se introducen son las cargas térmicas tanto para calefacción como para refrigeración y ACS. En este caso se considerarán sólo las cargas de calefacción.

A partir de aquí existen diversas opciones. En primer lugar se puede ver cómo evolucionará la temperatura del fluido en cualquiera de los años para los que se ha hecho la simulación (25 años) o para el conjunto de los años, tal como se muestra a continuación:





Pero lo más interesante es la tabla de datos de diseño de la instalación, en la que aparecen todos los parámetros de diseño utilizados y el cálculo de cargas base y pico para el periodo de vida de la instalación. Al comienzo de esta tabla se encuentra el ***dato de la profundidad de pozo*** que calcula el programa, tal como se muestra en la imagen:

Datos de diseño de la última simulación (SONDAS GEOTÉRMICAS EED.OU...

Archivo Modo de edición Fuente

```
EED Version 3.13 DEMO  www.buildingphysics.com
  Archivo de entrada:C:\Users\Pedro\Desktop\Proyecto Fin de Master\EED\
  Este archivo de salida:SONDAS GEOTÉRMICAS EED.OUT  Fecha: 24/05/2013

Notas de memoria para el proyecto
[]

DATOS RÁPIDOS
  Coste                                  -
  Número de pozos                        1
  Profundidad del pozo                   83.61 m
  Longitud total del pozo                83.61 m


                Datos de diseño
                ===============

Suelo

  Conductividad térmica del suelo        1.700 W/(m·K)
  Capacidad calórica del suelo           2.400 MJ/(m³·K)
  Tempratura de la superficie del suelo  13.90 °C
  Flujo de calor geotérmico              0.0800 W/m²

POZO

  Configuración:                         0 ("1 : single")
  Profundidad del pozo                   83.61 m
  Espaciado entre pozos                  10.00 m
  Instalación pozo                       SINGLE-U
  Diámetro pozo                          110.00 mm
  Diámetro Tuberia-U                     25.000 mm
  Grosor Tuberia-U                       2.000 mm
  Conductivida térmica tubería-U         0.420 W/(m·K)
```

Para hallar las distintas longitudes de pozo se ha simulado la misma instalación para distintos tipos de terreno introduciendo los diferentes valores de conductividad térmica y de capacidad térmica volumétrica en el programa. Así se ha podido realizar la siguiente tabla:

TIPO DE MATERIAL	LONGITUD SONDA VERTICAL (m)
ROCAS MAGMÁTICAS	
Basalto	83,61
Diorita	64,33
Gabro	78,00
Granito	55,28
Peridotita	50,89
Riolita	56,47
ROCAS METAMÓRFICAS	
Gneis	61,00
Mármol	65,23
Metacuarcita	41,52
Micaesquisto	76,21
Esquisto arcilloso	76,21
ROCAS SEDIMENTARIAS	
Caliza	62,08
Marga	73,87
Cuarcita	40,85
Sal	43,51
Arenisca	70,30
Limonitas/Argilitas	71,94
NO CONSOLIDADAS	
Grava (seca)	162,06
Grava (saturada)	80,85
Arena (seca)	162,72
Arena (saturada)	67,90
Limo/Arcilla (seca)	151,65
Limo/Arcilla (saturada)	83,44
Turba	157,43
OTROS MATERIALES	
Bentonita	127,08
Hormigón	87,87
Hielo (-10ºC)	72,36
Plástico (PE)	
Aire (0-20ºC, seco)	261,67
Acero	27,50
Agua (+10ºC)	134,07

Tabla 3: Profundidades de sondeo con EED.

9. ESTUDIO ECONÓMICO

El coste total de una instalación geotérmica viene determinado por el coste de los equipos y el coste de instalación de cada uno de los sistemas que la componen. Una parte importante de este coste corresponde a la BCG y a los subsistemas de climatización que se incluyan.

Una de las partidas más importantes es la obra de instalación del subsistema de intercambio de calor, ya sea intercambiador vertical u horizontal.

En este apartado se va a ver cómo varía el precio del subsistema de intercambio en función de la profundidad de pozo que se requiera.

Para la instalación considerada anteriormente sería necesaria la ejecución de un sondeo vertical con una profundidad variable según los metros obtenidos en el cálculo de la longitud de intercambiador vertical hecho con EED.

Los sondeos que se realizan para instalaciones geotérmicas entran en conjunto de sondeos mecánicos. En este tipo de sondeos se extrae el material del subsuelo a través de una perforación con un diámetro pequeño, entre 65 mm y 140 mm. Esto se hace bien de forma continua para poder analizarlo, o bien en forma de material amorfo, obteniendo así un material del subsuelo triturado y sin consistencia denominado “ripios”.

Existen diferentes tipos de sondeos verticales. Cada uno está destinado a un objetivo y a unas características técnicas del suelo concretas. El sistema de perforación vendrá determinado por la profundidad de la perforación, el diámetro de perforación y entubación (en su caso) y la litología del terreno. De forma general se pueden distinguir los siguientes tipos de sondeos mecánicos verticales:

-Sondeo a presión, con punta abierta o hueca, y maciza o cerrada. Se realiza en suelos blandos.

-Sondeo a percusión o golpeo, en suelos cementados o duros. Se utiliza un trépano o una cuchara dejándola caer desde una altura suficiente. El trépano se utiliza para atravesar bolos, grava gruesa, arcilla compacta o capas delgadas de roca. El detritus se extrae mediante circulación de agua. La cuchara se utiliza en suelos arcillosos más blandos y en arenas. Es un cilindro hueco que permite la entrada de suelo. Si éste es arenoso, lleva un dispositivo que impide la caída del suelo en la extracción.

-Sondeo a rotación con barrena helicoidal, maciza o hueca. Se puede utilizar si el terreno es relativamente blando y cohesivo, y no se encuentran capas cementadas, gravas, o roca en toda la profundidad de realización del sondeo. Si se utiliza barra helicoidal hueca, es posible la toma de muestras inalteradas y la realización de ensayos "in situ" por el interior de la sonda.

-Sondeo a rotación con extracción de testigo continuo, con o sin agua, mediante baterías simples o dobles que llevan en su borde inferior una corona cortadora de widia o diamante. Sirven para todo tipo de suelos o rocas, aunque pueden tener problemas de abrasión de la corona, o acodalamiento al atravesar bolos o gravas gruesas. El agua utilizada para favorecer la perforación y eliminar el detritus, puede desmenuzar suelos parcialmente cementados, rocas blandas o alteradas, y areniscas poco cementadas. Por ello conviene en estos casos la utilización de tubo o batería doble.

-Sondeo mediante métodos destructivos, como trépano, martillo o tricono. Se emplean si en el desarrollo de un sondeo no interesa obtener las propiedades geotécnicas de determinadas capas duras o de material granular grueso, bien porque se conozcan suficientemente, o por otras razones.

El método de mayor utilización en España es el del sondeo helicoidal con sonda hueca, seguido por el sondeo a rotación con extracción de testigo continuo.

A la hora de la ejecución de un sondeo hay que tener en cuenta varios parámetros que influirán en el precio final de éste. En España el metro lineal de sondeo cuesta una media de 100 €, con mano de obra incluida (generalmente tres operarios). A este precio hay que sumar un canon que se paga a hacienda y que depende del emplazamiento y del objetivo del sondeo (varía entre 700 € y 4000 €), el coste del ingeniero de minas o geólogo que supervisa el sondeo (aproximadamente 300 €/día) y el montaje del sondeo (precio variable según empresa). Además, el precio final se incrementará por el IVA, el coste del agua necesaria para la realización del sondeo y el desplazamiento del material extraído del sondeo. Habitualmente se deben pagar también los gastos de desplazamiento y manutención de operarios y personas que trabajen durante el periodo de ejecución del sondeo. Estos datos los proporcionan las diferentes empresas a modo orientativo, y los precios están puestos teniendo en cuenta los problemas que pueda haber durante la ejecución.

Para poder comparar los costes para los distintos sondeos se va a considerar que no hay gastos por manutención de los operarios ni de agua para los lodos del sondeo. El canon de hacienda será de 1000 €. El precio de transporte y montaje será de 2000 € (valor

medio) incluyendo el transporte de material posterior a la finalización del sondeo. Estos precios establecen un coste de base de 3000 €.

En las siguientes tablas se muestran los costes desglosados y los costes finales según el tipo de terreno a perforar. El ingeniero de minas o geólogo presente cobrará 300 €/día. Se realizarán los cálculos considerando una velocidad de perforación de 30 m/día (velocidad habitual). Se aplicará el IVA de tipo general del 21% ya que un sondeo geotérmico no se incluye en el ámbito de obra nueva (10%).

TIPO DE MATERIAL	LONGITUD SONDA VERTICAL (m)	LONGITUD SONDEO (m)	COSTE POZO (€)	COSTE GEÓLOGO (€)	COSTE TOTAL OBRA (€) COSTE GEÓLOGO+COSTE POZO+COSTE BASE	PRECIO FINAL (€) IVA 21 %
ROCAS MAGMÁTICAS						
Basalto	83,61	84	8400,00	900,00	12300,00	14883,00
Diorita	64,33	65	6500,00	900,00	10400,00	12584,00
Gabro	78,00	79	7900,00	900,00	11800,00	14278,00
Granito	55,28	56	5600,00	600,00	9200,00	11132,00
Peridotita	50,89	51	5100,00	600,00	8700,00	10527,00
Riolita	56,47	57	5700,00	600,00	9300,00	11253,00
ROCAS METAMÓRFICAS						
Gneis	61,00	62	6200,00	900,00	10100,00	12221,00
Mármol	65,23	66	6600,00	900,00	10500,00	12705,00
Metacuarcita	41,52	42	4200,00	600,00	7800,00	9438,00
Micaesquisto	76,21	77	7700,00	900,00	11600,00	14036,00
Esquisto arcilloso	76,21	77	7700,00	900,00	11600,00	14036,00
ROCAS SEDIMENTARIAS						
Caliza	62,08	63	6300,00	900,00	10200,00	12342,00
Marga	73,87	74	7400,00	900,00	11300,00	13673,00
Cuarcita	40,85	41	4100,00	600,00	7700,00	9317,00
Sal	43,51	44	4400,00	600,00	8000,00	9680,00
Arenisca	70,30	71	7100,00	900,00	11000,00	13310,00
Limonitas/Argilitas	71,94	73	7300,00	900,00	11200,00	13552,00
NO CONSOLIDADAS						
Grava (seca)	162,06	163	16300,00	1800,00	21100,00	25531,00
Grava (saturada)	80,85	81	8100,00	900,00	12000,00	14520,00
Arena (seca)	162,72	163	16300,00	1800,00	21100,00	25531,00
Arena (saturada)	67,90	68	6800,00	900,00	10700,00	12947,00
Limo/Arcilla (seca)	151,65	152	15200,00	1800,00	20000,00	24200,00
Limo/Arcilla (saturada)	83,44	84	8400,00	900,00	12300,00	14883,00
Turba	157,43	158	15800,00	1800,00	20600,00	24926,00
OTROS MATERIALES						
Bentonita	127,08	128	12800,00	1500,00	17300,00	20933,00
Hormigón	87,87	89	8900,00	900,00	12800,00	15488,00
Hielo (-10ºC)	72,36	73	7300,00	900,00	11200,00	13552,00
Plástico (PE)			0,00	0,00	0,00	0,00
Aire (0-20ºC, seco)	261,67	262	26200,00	2700,00	31900,00	38599,00
Acero	27,50	28	2800,00	300,00	6100,00	7381,00
Agua (+10ºC)	134,07	135	13500,00	1500,00	18000,00	21780,00

Tabla 4: Cálculo económico de sondeos.

TIPO DE MATERIAL	PRECIO FINAL (€) IVA 21 %
ROCAS MAGMÁTICAS	
Basalto	14883,00
Diorita	12584,00
Gabro	14278,00
Granito	11132,00
Peridotita	10527,00
Riolita	11253,00
ROCAS METAMÓRFICAS	
Gneis	12221,00
Mármol	12705,00
Metacuarcita	9438,00
Micaesquisto	14036,00
Esquisto arcilloso	14036,00
ROCAS SEDIMENTARIAS	
Caliza	12342,00
Marga	13673,00
Cuarcita	9317,00
Sal	9680,00
Arenisca	13310,00
Limonitas/Argilitas	13552,00
NO CONSOLIDADAS	
Grava (seca)	25531,00
Grava (saturada)	14520,00
Arena (seca)	25531,00
Arena (saturada)	12947,00
Limo/Arcilla (seca)	24200,00
Limo/Arcilla (saturada)	14883,00
Turba	24926,00
OTROS MATERIALES	
Bentonita	20933,00
Hormigón	15488,00
Hielo (-10ºC)	13552,00
Plástico (PE)	0,00
Aire (0-20ºC, seco)	38599,00
Acero	7381,00
Agua (+10ºC)	21780,00

Tabla 5: Precio final sondeos.

En la tabla siguiente se muestran las distintas litologías ordenadas en orden creciente según el coste del sondeo geotérmico. En rojo están señalados los materiales que no conforman ninguna litología, y en verde se han señalado las litologías más comunes y que más fácilmente se pueden encontrar.

TIPO DE MATERIAL	PRECIO FINAL (€) IVA 21 %
Plástico (PE)	0,00
Acero	7381,00
Cuarcita	9317,00
Metacuarcita	9438,00
Sal	9680,00
Peridotita	10527,00
Granito	11132,00
Riolita	11253,00
Gneis	12221,00
Caliza	12342,00
Diorita	12584,00
Mármol	12705,00
Arena (saturada)	12947,00
Arenisca	13310,00
Limonitas/Argilitas	13552,00
Hielo (-10ºC)	13552,00
Marga	13673,00
Micaesquisto	14036,00
Esquisto arcilloso	14036,00
Gabro	14278,00
Grava (saturada)	14520,00
Basalto	14883,00
Limo/Arcilla (saturada)	14883,00
Hormigón	15488,00
Bentonita	20933,00
Agua (+10ºC)	21780,00
Limo/Arcilla (seca)	24200,00
Turba	24926,00
Grava (seca)	25531,00
Arena (seca)	25531,00
Aire (0-20ºC, seco)	38599,00

Tabla 6: Sondeos ordenados por coste.

Como se puede observar, las litologías más favorables para la instalación de una sonda geotérmica son las metamórficas junto con algunas ígneas. Son también favorables los terrenos saturados o con bastante agua. Las litologías más habituales se encuentran desde el centro hacia abajo en la tabla.

No obstante hay que tener en cuenta que normalmente se encontrarán varias litologías en el sondeo. Aunque los sondeos para instalaciones de climatización geotérmica sean de poca profundidad, lo normal es encontrar tres o cuatro litologías diferentes en los primeros 100 m.

A continuación se presenta un gráfico que muestra cómo se relacionan la conductividad térmica del terreno con el coste final estimado del sondeo geotérmico.

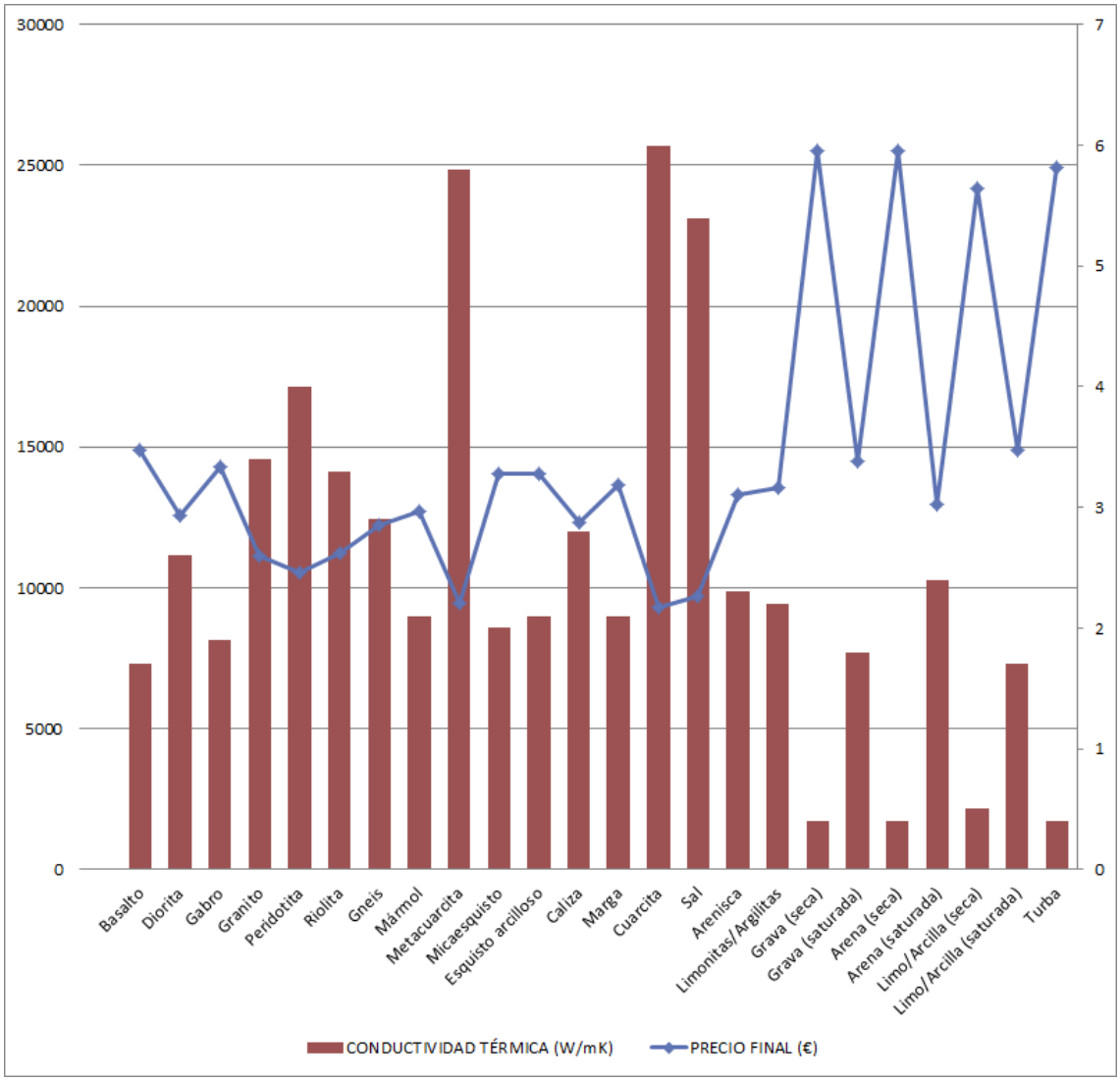


Gráfico 3: Variación del precio de sondeo con la conductividad térmica.

Como se puede observar a valores mayores de conductividades corresponden valores más bajos de coste final. Es decir, la conductividad térmica del terreno condiciona en gran medida el coste final de la instalación geotérmica.

10. APLICACIÓN GEOTÉRMICA CON GEO2

A continuación se va a realizar el dimensionado de una instalación real con el programa Geo2, software de cálculo para intercambiadores de calor enterrados acoplados a bombas de calor agua-agua desarrollado por el grupo CIAT en colaboración con el instituto de Ingeniería Energética de la Universidad Politécnica de Valencia en el marco del proyecto I+D GEC (Desarrollo de un programa de simulación energética de sistemas de climatización no convencionales), cofinanciado por la Agencia de Innovación y Desarrollo de Andalucía y por la Corporación Tecnológica de Andalucía.

Este programa es producto de la colaboración entre la empresa COMPAÑÍA INDUSTRIAL DE APLICACIONES TÉRMICAS S.A. y el INSTITUTO DE INGENIERÍA ENERGÉTICA DE LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA. El objetivo es ofrecer una ayuda a los instaladores, ingenieros y otros usuarios que estén interesados en aumentar el rendimiento de su sistema de calefacción y/o aire acondicionado ubicado en España, mediante un intercambiador enterrado. Surge como evolución del software previo GEOCIATESA, e introduce una serie de novedades frente al mismo.

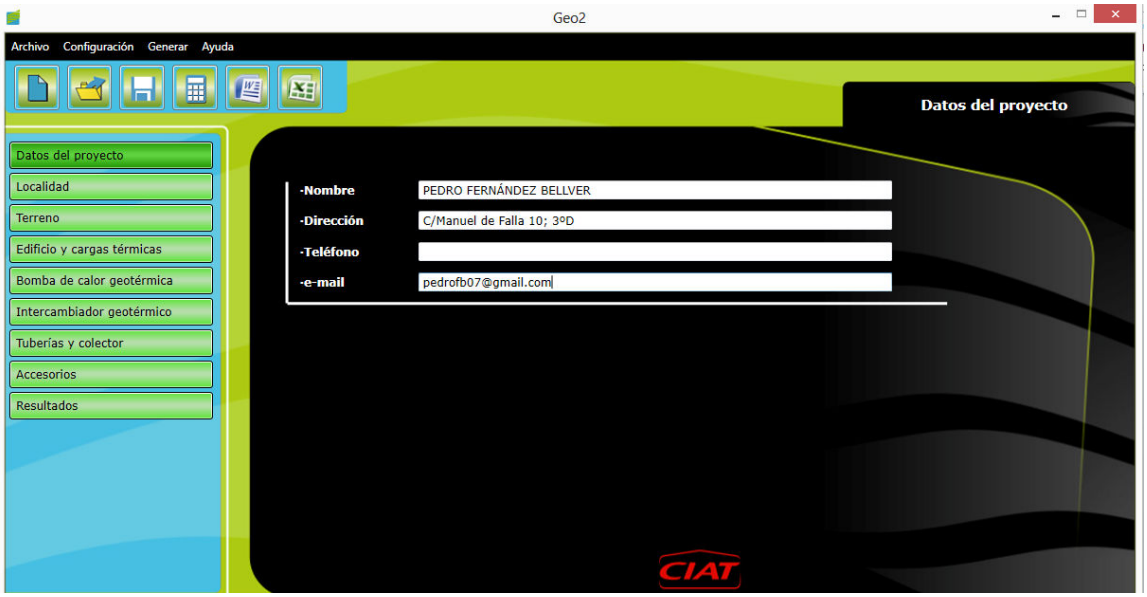
Geo2 es un programa de dimensionado de intercambiadores de calor enterrados acoplados a bombas de calor CIAT. Por tanto la salida principal del programa será la longitud necesaria de intercambio en función de la temperatura de salida de la bomba de calor, así como una serie de datos adicionales que pueden ayudar al diseñador a escoger la mejor opción. Algunos de estos datos de salida simplemente son leídos de las bases de datos de la bomba de calor seleccionada y ayudan al usuario en la definición del diseño óptimo, por ejemplo: EER (rendimiento en refrigeración), COP (rendimiento en calefacción), Pc (potencia calorífica), Pf (potencia frigorífica), Pa (potencia absorbida por compresores en la bomba de calor) y caudal nominal; y los otros son calculados como la longitud, el área y volumen afectados por el intercambiador enterrado y la pérdida de carga por fricciones.

Para generar estos resultados, Geo2 cuenta con bases de datos de bombas de calor CIAT (AGEO, AGEO CALEO y DYNACIAT), datos climáticos para España, así como

datos de suelos, tuberías y fluidos, entre otros. Otra información debe ser suministrada por el diseñador, como la definición de la configuración del intercambiador, los datos técnicos de las tuberías si no usa las del programa, datos del suelo si tiene la opción de dar una estimación más precisa a la del programa, las cargas térmicas máximas del edificio, los factores de uso del mes más desfavorables de calefacción y refrigeración si dispone de datos precisos (en caso contrario el programa los estima en función del tipo de edificio y la localidad), así como los datos requeridos para el cálculo de las pérdidas de presión en las tuberías.

Geo2 está diseñado siguiendo la metodología de cálculo propuesta en el Manual del *"International Ground Source Heat Pump Association*".

Al iniciar el programa lo primero que aparece es una ventana en la que se piden los datos del proyecto (datos del proyectista o diseñador).



A continuación se introducen los datos de emplazamiento de la edificación. La instalación que se pretende realizar es para una vivienda unifamiliar situada en la localidad de Maracena (Granada). Se trata de una parcela de 1000 m^2 en la que se emplaza la vivienda. Ésta cuenta con un sótano (200 m^2), planta baja (150 m^2), primera planta (150 m^2), segunda planta (150 m^2) y torreón (70 m^2).

Mapa
Tráfico
Manuel Herrera Arenas
Calle Rubén Darío
Calle Albatros
Calle Mercurio
Calle Colombina
Calle Sol
Plaza Elas Infante
Imágenes ©2013 DigitalGlobe, Cnes/Spot Image, Instituto de Cartografía de Andalucía, Datos de mapa ©2013 Google, basado en BCN IGN España
Informar de un error

Rubén Darío

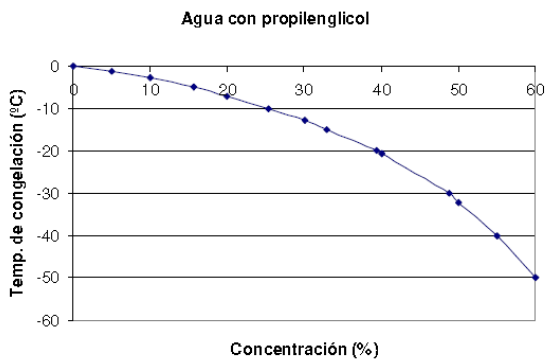
Geo2
Archivo
Configuración
Generar
Ayuda
Localidad
Datos del proyecto
Localidad
Terreno
Edificio y cargas térmicas
Bomba de calor geotérmica
Intercambiador geotérmico
Tuberías y colector
Accesorios
Resultados
-País
España
-Ciudad
Granada
CIAT

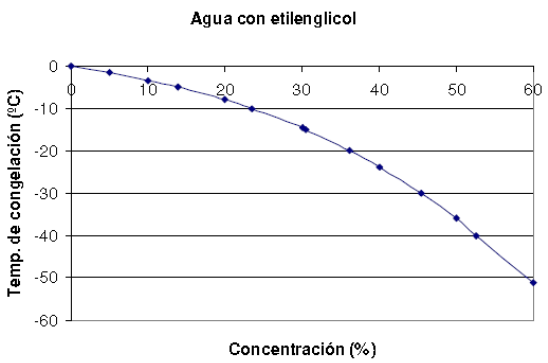
Los datos que se introducen en el programa a continuación son los correspondientes a la litología de los materiales sobre los que se asienta la vivienda. Para esto se toman los datos de un pozo de extracción de agua que, existe en la parcela. En este caso se trata de un terreno arcilloso relativamente húmedo. A la hora de cimentar la edificación las arcillas dan muchos problemas precisamente por el agua. Sin embargo, para la instalación geotérmica conviene que el terreno tenga cierta humedad ya que mejora la conductividad térmica de éste. Geo2 permite variar el grado de humedad del terreno en función de la humedad real que presente.

En la siguiente pestaña hay que introducir los valores calculados de las cargas térmicas de la vivienda y el factor de uso de la instalación. Las cargas se han calculado mediante el procedimiento descrito en el apartado 3.3 de este proyecto obteniéndose una potencia necesaria de 49 kW para calefacción y 37 kW para refrigeración.

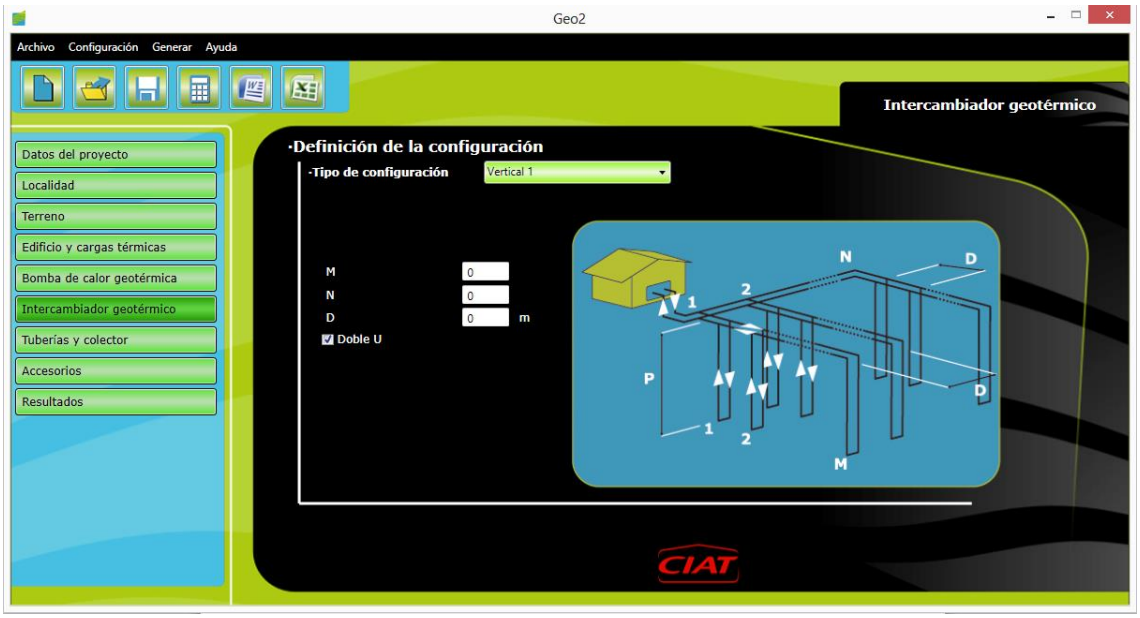
A continuación se procede a escoger la bomba de calor. Al ser un programa desarrollado por CIAT incluye las bombas fabricadas por ellos. También hay que escoger el fluido de intercambio.

Para este caso se ha optado por el modelo DYNACIAT ILG150V, que proporciona 50.8 kW para calefacción y 38 kW para refrigeración, con un COP medido de 4.34. Como fluido de intercambio se pondrá una mezcla de agua y etilenglicol al 30%, que por sus puntos de congelación y evaporación es adecuado para la zona climática donde se ubica la vivienda.





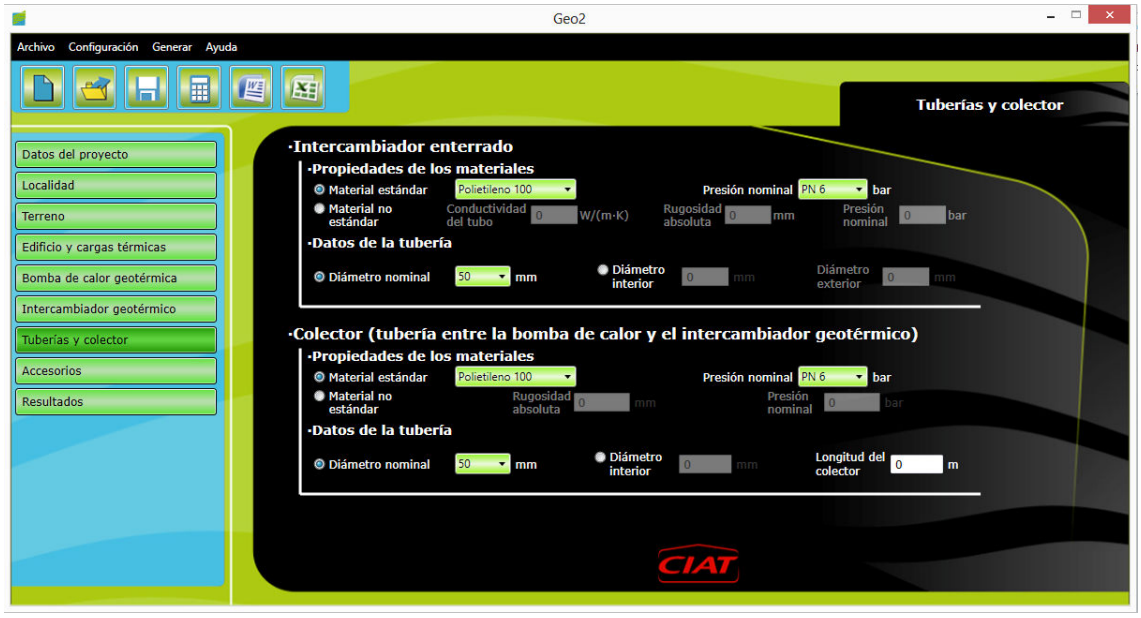
En la siguiente pestaña se configura el intercambiador geotérmico introduciendo la configuración y las distancias mínimas entre tubos. En esta pantalla el usuario puede seleccionar la configuración que desea para el intercambiador enterrado. Se dispone de 5 tipos de configuraciones horizontales y 1 tipo vertical con dos variantes (simple U y doble U).



En este caso se ha escogido una configuración de intercambiador vertical con U doble y con una distancia mínima entre sondas de 10 m. Se establece en 4 el número de sondas colocadas en configuración en planta cuadrada (2x2).

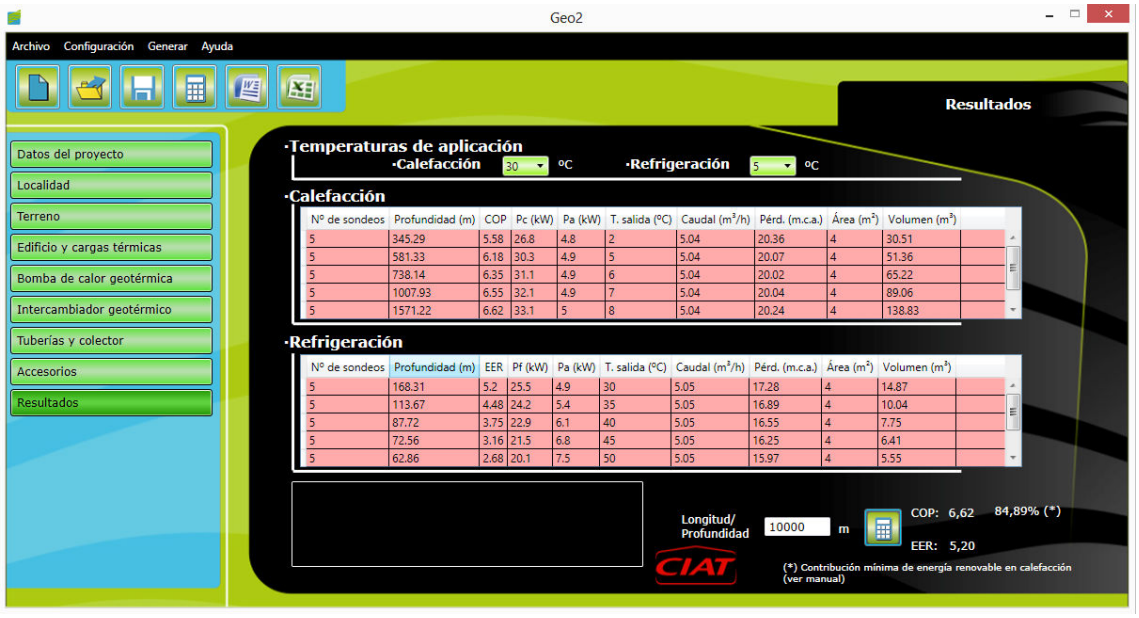
A continuación se deben introducir los datos del intercambiador enterrado y el colector (tuberías desde el intercambiador hasta la bomba de calor). Respecto a la elección de materiales estándar es preciso destacar que la base de datos que contiene el programa incluye los materiales más usados en este tipo de sistemas: polietileno (PE) y polibutileno (PB). El polietileno es el de mejores características, pero cuando se diseña un sistema para trabajar largos períodos de tiempo a una alta temperatura (mayor a 40 °C), se

recomienda utilizar polibutileno, ya que tiene un mejor comportamiento a mayores temperaturas. Si se usa polietileno a altas temperaturas su vida útil disminuye notablemente.



Para esta aplicación se ha optado por utilizar PE100 (tuberías de polietileno resistente) tanto para el intercambiador como para el colector que aumentarán la vida útil de la instalación y disminuirán los costes de mantenimiento. Estas tuberías trabajarán a una presión nominal de 25 bar. Se fija una longitud de colector de 100 m.

En la pestaña accesorios se pueden introducir datos concretos para la configuración de intercambiador y colector, como el número de codos, las reducciones en el diámetro de la tubería o la longitud del colector. Una vez introducidos los datos para el cálculo detallado de colector e intercambiador el programa calcula los parámetros necesarios y muestra la pantalla de resultados con distintas profundidades y distribuciones de pozos. Una de las cosas más interesantes de esta ventana es que calcula un COP en función de los datos precisos de la instalación y da un porcentaje de la contribución mínima de energía a la instalación.

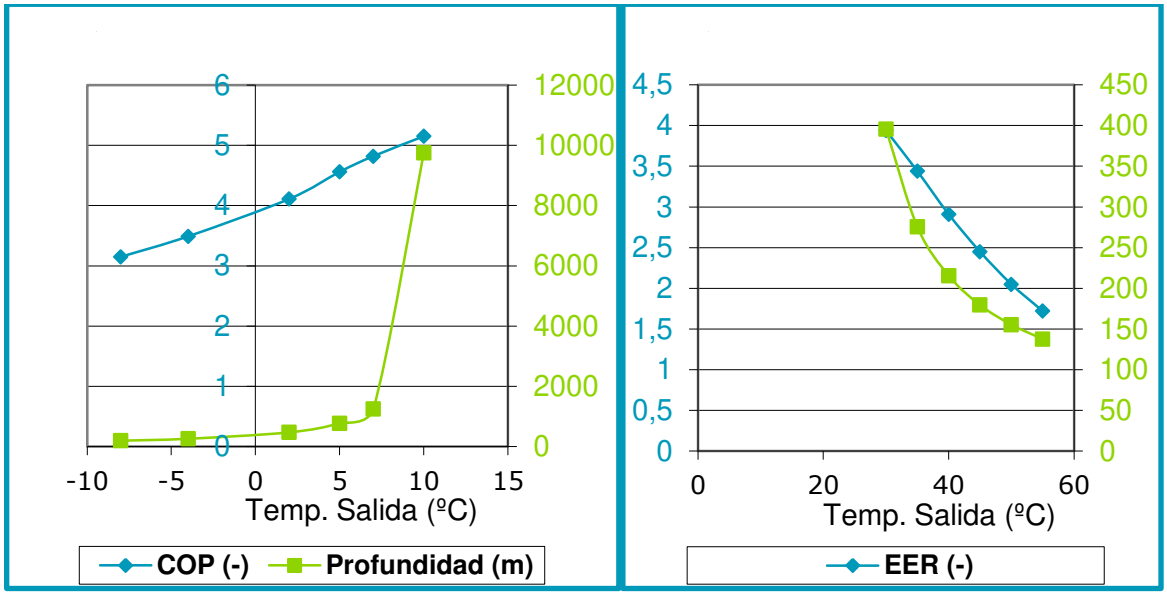


Una vez que se muestran estos resultados tabulados, el diseñador puede seleccionar un valor de longitud concreto para el cual el programa calcula los parámetros de funcionamiento en modo refrigeración (EER) y en modo calefacción (COP). Adicionalmente se realiza una primera aproximación de la contribución porcentual de carácter renovable.

Para este caso, se opta por una distribución de 4 pozos de 197 m consiguiendo un COP de 4.75. Establece también una contribución mínima de energía del 75%. No obstante avisa de que puede que la bomba no sea capaz de suministrar determinadas potencias pico y que podrían producirse sobrepresiones en los circuitos de intercambiador y colector. A partir de aquí se trata de variar los datos diseño del intercambiador hasta dar con la configuración más apropiada para la instalación. Los datos que se pueden variar son el número de pozos, la distancia mínima entre ellos, el material de los intercambiadores, los accesorios, el modelo de bomba… o cambiar a otro tipo de configuración de los colectores.

En este caso concretamente, la opción más apropiada sería poner dos bombas de calor dados los elevados requerimientos térmicos de la instalación en la vivienda. No obstante, el programa no alberga la posibilidad de incluir más de una bomba de calor. Esto se debe a que la vivienda objeto del estudio posee unas características excepcionales de tamaño y por ello tiene grandes requerimientos térmicos. La potencia necesaria según las cargas térmicas calculadas era de 50 kW mientras que lo habitual es que una vivienda unifamiliar necesite una potencia de unos 15 kW. Para viviendas unifamiliares o edificios más normales bastaría con una bomba de calor adaptada a la potencia necesaria y que se encontraría fácilmente en el mercado.

Una vez realizados los cálculos Geo2 permite generar dos documentos con los resultados de cálculo. Por un lado genera un informe de resultados en los que se resumen los principales parámetros de diseño del sistema, así como los resultados tabulados y los resultados concretos para la longitud seleccionada por el usuario. Por otra parte Geo2 permite generar una hoja de cálculo con los valores tabulados solución del problema, así como una serie de gráficas representativas.



11. CONCLUSIONES

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

-Ambientalmente es una tecnología que no tiene emisiones de ningún tipo. Reduce el gasto energético y el consumo eléctrico al poseer elevados coeficientes de operación, que reducen además el gasto económico por el coste de la electricidad.

-Se trata de sistemas que poseen elevados coeficientes de operación gracias a que trabajan con un foco que mantiene su temperatura constante durante el ciclo de operación de la máquina. Al no estar sometida a fuertes variaciones atmosféricas de temperatura el COP se hace constante. Por esto, son sistemas muy eficientes al trabajar a menor salto térmico que los sistemas convencionales.

-La geotermia para climatización se basa en la disipación o absorción de calor en el subsuelo, por lo que se encuentra disponible en cualquier punto del planeta. Además se trata de una forma de intercambiar calor que está disponible las 24 horas del día los 365 días del año, al no estar sujeta a fuentes de energía externas como la radiación solar, por ejemplo.

-Se trata de una tecnología robusta y duradera. Además la BCG no está sometida a las fuertes variaciones de temperatura ni está en contacto con el exterior, por lo que se prolonga su vida útil. El mantenimiento de estas instalaciones es escaso. El único elemento que debe mantener un control periódico es el compresor. La durabilidad y los bajos costes de mantenimiento son una ventaja importante frente a otros sistemas.

-Económicamente una instalación geotérmica supone mayor inversión que una instalación convencional, sin embargo los costes de mantenimiento de la instalación geotérmica, el ahorro de electricidad y la mayor vida útil de la bomba de calor por encontrarse dentro de la vivienda, hacen amortizable la inversión.

-Además, por estos motivos, este sistema de calefacción ha sido catalogado como energía renovable en el libro blanco de las energías renovables de la unión europea y, por tanto, se puede beneficiar de los distintos programas de subvenciones existentes.

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

Estas propiedades influyen notablemente en la superficie de intercambio para la instalación geotérmica. Esto repercute también en la valoración técnico-económica de la instalación. Así, una instalación geotérmica vertical cuyo intercambio de calor se produzca en grava seca necesitará una longitud de intercambiador 4 veces superior a uno realizado en cuarcitas (consultar tabla 3).

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

Como se ha visto, los terrenos que más favorecen el intercambio de calor son los cuarcíticos y metacuarcíticos. De esta forma, el sondeo para el intercambiador de calor en arena seca costaría más del doble que uno realizado en cuarcitas o metacuarcitas (consultar tabla 6).

12. REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFÍA

http://geothermal.marin.org

http://www.geothermal.org

http://iga.igg.cnr.it

http://www.atecyr.org

http://www.grupociat.es

http://www.gasnatural.com

http://www.idae.es

http://www.aemet.es

http://www.enertres.com

http://www.girodgeotermia.com

http://www.vaillant.es

http://www.thermia.com

http://www.igme.es

http://www.mityc.es

http://www.terraterm.es

http://www.googlenergy.com/

http://www.ingenierosindustriales.com/

Guía de la energía geotérmica de la comunidad de Madrid

Manual de geotermia IGME

Guía técnica para el diseño de sistemas de bomba de calor geotérmica IDAE

Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios (RITE)

Código Técnico de la Edificación (CTE)

Proyecto: *Climatización de una vivienda unifamiliar mediante una bomba de calor reversible con intercambio geotérmico*. Autor: Andrés Guerra Moya.

Proyecto: *Climatización geotérmica*. Autor: Carlos González Puente.

Proyecto: *Aprovechamiento de calor de baja temperatura en climatización*. Autor: Jorge Yago Meniz.

Proyecto: *Calefacción por bomba de calor geotérmica utilizando los refrigerantes de nueva generación*. Autor: Cristina Lázaro Lozano.

Proyecto: *Estudio de las aplicaciones de la energía geotérmica en España. Caso práctico para climatización de una vivienda unifamiliar*. Autor: Sergio Benítez Martín.

Proyecto: *Climatización geotérmica de un edificio.* Autor: Carlos Sanz Jimeno.