



ETSICCP
GRADO EN OBRAS
PÚBLICAS



UPV
Valencia

**Proyecto de Instalación Geotérmica de
Muy Baja Entalpía Destinada a
Refrigeración de Vivienda Unifamiliar**

**Trabajo
Fin De Grado**

Autor:

Alejandro Pérez Ramírez de Arellano

Tutor:

D.Luis Oria Domenech

Año:

Julio 2015

ÍNDICE

ÍNDICE	2
1 PRESENTACIÓN	1
1.1 OBJETO DEL TRABAJO DE FIN DE GRADO	1
1.2 JUSTIFICACIÓN Y MOTIVACIÓN	2
1.3 ESTRUCTURA DEL DOCUMENTO	3
2. GEOTERMIA Y FUNDAMENTOS FÍSICOTÉCNICOS PARA SU APROVECHAMIENTO.....	4
2.1 NOCIONES BÁSICAS DE GEOTERMIA	4
2.1.2 La energía geotérmica.	4
2.1.2 La geotermia de muy baja entalpía. Aspectos a considerar	6
2.1.3 Consideraciones acerca de la energía geotérmica en el panorama energético actual.....	7
2.2 FUNDAMENTOS TÉRMICOS DEL TERRENO	10
2.2.1 Propiedades térmicas del terreno, con relevancia en el problema.	10
2.2.2 Gradiente térmico del terreno	14
2.2.2 Estimación de temperaturas en el terreno.	16
2.3 FUNDAMENTOS FÍSICO-TÉCNICOS DE APROVECHAMIENTO ENERGÉTICO DEL TERRENO	17
2.3.1. Componentes a considerar en el aprovechamiento geotérmico en baja entalpía.	17
2.3.2 Bombas de calor.	18
2.3.3 Fundamentos de transmisión de calor	20
2.4 ELEMENTOS DE LA INSTALACIÓN.....	22
2.4.1 INTERCAMBIADORES EN SISTEMAS GEOTÉRMICOS.	23
2.4.1.1 Clasificación.....	23
2.4.1.2 Colectores Horizontales	24
2.4.1.3 Colectores verticales.....	25
2.4.1.4 Trayectorias del fluido.....	27
2.4.2 BOMBAS GEOTERMICAS	27
2.4.3 SISTEMAS DE CALEFACCIÓN/REFRIGERACIÓN EN VIVIENDAS.....	29

3.- ASPECTOS A CONSIDERAR EN EL DISEÑO DE UNA INSTALACIÓN GEOTÉRMICA DOMÉSTICA.....	30
3.1 FASES DEL DISEÑO	30
3.1.1 Fase previa	30
3.1.2 fase de definición de los aspectos geotérmicos	31
3.1.3 fase de elaboración del proyecto y diseño de la ejecución.	31
3.2 ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES TÉRMICAS DEL TERRENO	31
3.2.1 Estimación de las propiedades térmicas del terreno	32
3.2.1 Medición de los parámetros térmicos del terreno. TRT.....	32
3.3 CRITERIOS PARA EL DISEÑO DEL INTERCAMBIADOR	34
3.3.1 Dimensionamiento del intercambiador de calor enterrado	35
3.3.1.1 Método de cálculo VDI 4640	36
3.3.1.2 Método de cálculo IGSHA	37
3.4 CÁLCULO DE LA CARGA TÉRMICA.....	40
3.5 ELECCIÓN DE ELEMENTOS DEL SISTEMA.	45
3.5.1 Elección de la bomba de calor.....	45
3.5.2 Elección del fluido circulante	45
3.5.3 Elección de los tubos.....	46
3.5.4 Selección de la bomba de circulación	46
3.6. EJECUCIÓN DEL INTERCAMBIADOR DE CALOR VERTICAL	47
3.6.1 Perforaciones.....	47
3.6.2 Colocación de las sondas.....	49
3.6.3. Relleno de las sondas	51
3.7 REVISIÓN DE LA NORMATIVA DE APLICACIÓN A LOS PROYECTOS DE INSTALACIONES TÉRMICAS.....	52
3.7.1 Normativa básica	52
3.7.2 Exigencia de eficiencia energética.....	53
3.7.3 Aprovechamiento de energías renovables.	54
3.7.4 Limitaciones en sondeos para circuitos cerrados	55
4.- LA INSTALACIÓN DOMÉSTICA EN LA VIVIENDA RESIDENCIAL OBJETO DEL TRABAJO	56
4.1.- Descripción de la vivienda objeto de estudio.	56
4.2 Calculo de las cargas térmicas.	59
4.3 Elección del fluido refrigerador y de tuberías.	61
4.4 Dimensionamiento de la bomba de calor geotérmica.	63
4.5 Dimensionamiento del intercambiador.	65

5.- CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS	70
5.1.- Algunos apuntes sobre el balance económico y energético.	70
5.1.1 Balance económico.	70
5.1.2 Balance energético.	71
5.1.3 Presupuesto y comparativas sistema actual contra el geotérmico.	72
5.1.3.1 Presupuesto.	72
5.1.3.2 Comparativa sistema actual contra el geotérmico.	74
5.2.- Mejora energética en la vivienda unifamiliar	78
5.3.- Elementos medioambientales que fundamentan la elección de esta tecnología. Ventajas e inconvenientes	79
5.3.1 Ventajas	79
5.3.2 inconvenientes	81
5.4 Reflexiones personales y perspectivas futuras.	81
6. BIBLIOGRAFÍA	83
7. ANEXOS
7.1 Anexo 1: programa Ce3x
7.2 Anexo 2: mapa geológico 1:50.000, Serie magna
7.3 Anexo 3: mapas hidrográficos de la zona
7.4 Anexo 4: características de la bomba (guía CIAT) y otros dispositivos.	..
8- ANEXO PLANOS

1 PRESENTACIÓN

Hoy en día nuestra sociedad se encuentra ante numerosas amenazas, entre ellas podemos señalar las demandas de consumo asociadas al aumento de la población mundial, con el paralelo agotamiento de los recursos naturales y el fuerte impacto que se ha venido provocando sobre el medio ambiente. Todas estas amenazas requieren de respuestas científico-tecnológicas que precisan de sus respectivos estudios y soluciones. El uso eficiente de la energía es un aspecto esencial, de ahí la búsqueda de nuevas alternativas para la obtención de energía y el control de emisiones contaminantes.

Siempre hemos utilizado los recursos que la Tierra nos ha proporcionado: la madera, el carbón, el gas, el petróleo, son fuentes de energía que nos han ayudado a subsistir y desarrollarnos, pero son recursos limitados y finitos, cuya explotación está provocando grandes efectos sobre el medio ambiente y sobre nuestra salud. A fin de intentar revertir estos efectos en estos últimos años se están desarrollando nuevas formas de aprovechamiento energético: las energías renovables. Las más conocidas son la hidroeléctrica, la solar y la eólica. Sin embargo hay una gran variedad de energías renovables menos conocidas mejor que van cogiendo cada vez mayor importancia, la energía mareomotriz, la biomasa, la energía de las olas y por último la de nuestro estudio, la energía geotérmica.

En Europa, y más en concreto en nuestro país, somos grandes importadores energéticos, por lo que es muy necesario realizar un gran esfuerzo para implantar soluciones que disminuyan la dependencia energética exterior, que resulten más eficientes que las tradicionales y contribuyan efectivamente a la reducción de emisiones de gases contaminantes, minimizando así su efecto en el cambio climático.

1.1 OBJETO DEL TRABAJO DE FIN DE GRADO

El objeto del presente proyecto es estudiar, diseñar y aplicar una instalación de climatización para una vivienda unifamiliar, situada en el municipio de Paterna, Valencia, España, para ello se va a recurrir a la utilización de una nueva energía renovable y sostenible: la energía geotérmica. Esta fuente cual proviene del calor del interior de la tierra y proporciona diferentes vías de aprovechamiento en diferentes intervalos: muy baja, baja, media y alta temperatura. En este trabajo se profundizará en la energía de muy baja temperatura o entalpía (su contenido en calor).

Para llevarlo a cabo se examinarán, en primer lugar, las bases científicas y tecnológicas de su aprovechamiento profundizando en lo que es la energía geotérmica. Será necesario también revisar las técnicas de intercambio geotérmico y los procedimientos más efectivos para el cálculo de los equipamientos e instalaciones. Se examinarán las diversas alternativas y sus requerimientos de espacio disponible, coste-beneficio, etc. Como solución más comercial, en el ámbito residencial con que se ejemplifica, se adoptará el intercambiador vertical. El estudio e completará con el estudio al resto de elementos: circuitos y bombas geotérmicas.

Sentadas las bases científico-tecnológicas, y una vez revisados tanto el marco normativo como los aspectos comerciales, se pasará a la aplicación práctica, consistente en el estudio de las necesidades de calefacción y refrigeración para conocer la cantidad de energía en las situaciones más desfavorables en una residencia privada. Una vez conocido las necesidades energéticas, se fundamentará la elección de las alternativas técnicas siguiendo las normas consolidadas: la alemana VDI 4640 o la norma americana IGSHPA y se dimensionarán los requerimientos energéticos a suministrar en el contexto de ubicación de la residencia. Para ello se evaluarán los datos de uno de los focos de la máquina térmica y se debe entonces completar con los elementos correspondientes al otro foco basado en el terreno lo que precisa un conocimiento del mismo, y diseñar el circuito necesario. Se utilizará el software Geo2 de GEOCISA.

Para finalizar será necesario hacer una propuesta para la elección de los equipos y materiales así como completar con un estudio del ahorro energético y del ahorro económico del sistema geotérmico comparado con un sistema convencional.

1.2 JUSTIFICACIÓN Y MOTIVACIÓN

La sociedad moderna solicita en el ámbito residencial de calefacción y refrigeración para el confort de sus ocupantes, estas demandas suponen un mayor consumo energético en las viviendas. La satisfacción de las mismas ha pasado en gran parte, hasta ahora por un consumo no sostenible de combustibles fósiles, con la consiguiente emisión de gases de efecto invernadero y ha dado lugar a un progresivo encarecimiento en las facturas energéticas. Estas demandas se amplifican considerablemente con el crecimiento económico mundial y con la difusión de estándares de vida que demandan cada vez más confort, lo que se traduce en un incremento de las necesidades energéticas para climatización de edificios.

El trabajo ingenieril incorpora con intensidad el reto de la satisfacción sostenible de estas demandas. Sin embargo en el aprovechamiento geotérmico queda mucho por hacer pues se da un insuficiente desarrollo en nuestro entorno, a pesar de su gran potencial. De acuerdo con esto, el presente trabajo permite conocer mejor los fundamentos de implantación de dicha energía siendo este un sector de interés

personal y de gran importancia para nuestra sociedad y nuestro devenir, no solo en el ámbito general sino también en el ámbito de la construcción, se puede implantar esta tecnología en las empresas de prefabricados o en las fábricas de los distintos materiales, para así reducir costes. Así como impulsar proyectos muy diversos para su aprovechamiento lo que supone un interés profesional indudable.

1.3 ESTRUCTURA DEL DOCUMENTO

El presente documento, memoria del trabajo de fin de grado, se ha estructurado como sigue.

Se comienza por enmarcar este trabajo y se explican los conceptos básicos sobre geotermia lo que incluye tanto una explicación de lo que significa la geotermia como los principales fundamentos físicos del aprovechamiento energético. Además se pasa revista a los conceptos de bomba de calor y transmisión de calor.

En segundo lugar se describe brevemente el estado actual de la tecnología. Es decir los métodos de intercambio del terreno, colectores, sondeos, etc.

A continuación se revisan aspectos normativos y las variables esenciales a considerar en el los diseños de instalaciones geotérmicas residenciales, en nuestro entorno.

Finalmente se pasa a aplicar lo tratado a un caso concreto de una vivienda particular situada en la población de Paterna. Esta aplicación incluye tanto los estudios previos, como el propio diseño y el estudio de los aspectos constructivos involucrados. Se tomarán como punto de partida datos climatológicos, la naturaleza del terreno, las características de la construcción, las eventuales demandas, etc. Todo ello permitirá tanto dimensionar el proyecto como planear su ejecución.

Se finaliza con el establecimiento de algunas conclusiones y perspectivas.

2. GEOTERMIA Y FUNDAMENTOS FÍSICOTÉCNICOS PARA SU APROVECHAMIENTO

2.1 NOCIONES BÁSICAS DE GEOTERMIA

2.1.2 La energía geotérmica.

La estructura en capas de la Tierra viene acompañada por la existencia de una diferencia térmica considerable, desde los 4000°C que se estima la temperatura del núcleo hasta los 15°C de media que podemos atribuir a la superficie.

El origen de esta diferencia térmica proviene de la riqueza energética inicial, presente en la constitución del planeta, la energía liberada en la concentración gravitatoria en la formación del mismo, también libera energía la solidificación de los materiales así como por la que se emite en los procesos nucleares de desintegración de isótopos radiactivos. Estos últimos aspectos están operando permanentemente y podemos considerar a todos los efectos una situación estacionaria de flujo de calor hacia la superficie.

El flujo de calor interno hace uso de los mecanismos de transferencia: conducción, convección y radiación y podemos estimarlo globalmente del orden de 42 10¹² J/s.

De lo expuesto se deduce la existencia de un gradiente térmico del orden de 1°C cada 33 metros, tal y como se comprueba por ejemplo con la actividad minera, que se examinará posteriormente junto con los aspectos relevantes que afectan a este trabajo.

La temperatura superficial media está condicionada por la existencia de atmósfera y la radiación solar. Esta radiación podemos estimarla 2 10¹⁷ J/s. La atmósfera contribuye con sus flujos de aire a realizar un proceso de redistribución energética en la superficie y debido a su composición química determina, el intercambio con el espacio, se alcanza así un equilibrio con el flujo solar. De resulta de estos equilibrios la capa más superficial del terreno alcanza una temperatura superficial media estable estimada en los 15°C.

Los cambios meteorológicos y las variaciones con las estaciones en la superficie modifican la temperatura exterior pero su impacto en la capa próxima a la superficie es prácticamente nulo debido a la elevada inercia que impone su masa y su calor específico. Lo que se pone de manifiesto en bodegas y cavernas.

De todo lo expuesto se puede deducir el concepto de energía geotérmica que en palabras del Consejo Europeo de la Energía Geotérmica resulta ser aquella energía

renovable almacenada en forma de calor por debajo de la superficie de la tierra. Esta definición excluye de su ámbito las masas de agua.

La extracción de esta energía precisa de un fluido que facilite el intercambio térmico, básicamente agua, y el aparataje necesario para las transferencias térmicas, entre el subsuelo y el exterior: bombas, válvulas, intercambiadores, etc. El tipo de aprovechamiento variará en función del rango de temperaturas del fluido geotermal, y de su caudal, en suma, de la entalpía por unidad de tiempo disponible. Entendemos por entalpía a la cantidad de energía térmica que el fluido, o el sistema en general, puede intercambiar con su entorno. Se mide en kJ/kg.

Así planteada, la energía geotérmica parece asociada preferentemente a la existencia de yacimientos energéticos por manifestaciones de alta temperatura relacionados con fuentes termales, vulcanismo, etc. Esta asociación prescinde de un estudio más detallado de los diferentes rangos de temperatura en que puede plantearse un aprovechamiento geotérmico. Con este propósito cabe distinguir diferentes grados de aprovechamiento del potencial entálpico según el rango de temperaturas del fluido geotérmico disponible.

- a) De alta entalpía: corresponde a una **temperatura superior a 150 °C** lo que permite utilizar el vapor de agua en turbinas de producción de energía eléctrica.
- b) De media entalpía: rango de entre **90 y 150 °C**: Aprovechable para producir eléctrica mediante un intercambiador cuyo fluido se utiliza en la central eléctrica.
- c) De baja entalpía: rango entre **30°C y 90 °C**: En este rango no cabe el aprovechamiento para la producción eléctrica pero resulta muy útil para la calefacción residencial y de instalaciones productivas. Según su rango es útil en determinadas producciones industriales.

De muy baja entalpía: corresponde a una **temperatura inferior a 30 °C** lo que permite utilizarla en asociación con bombas de calor para refrigeración y calefacción. Se aprovecha la energía del terreno existente en rocas y en el agua del subsuelo, tanto en la zona no saturada como en la saturada, es decir el acuífero, las temperaturas involucradas se corresponden a una profundidad teórica de hasta unos 400 m.

Este trabajo se centra en este rango de muy bajas temperaturas, es por tanto una aproximación a la geotermia de muy baja entalpía.

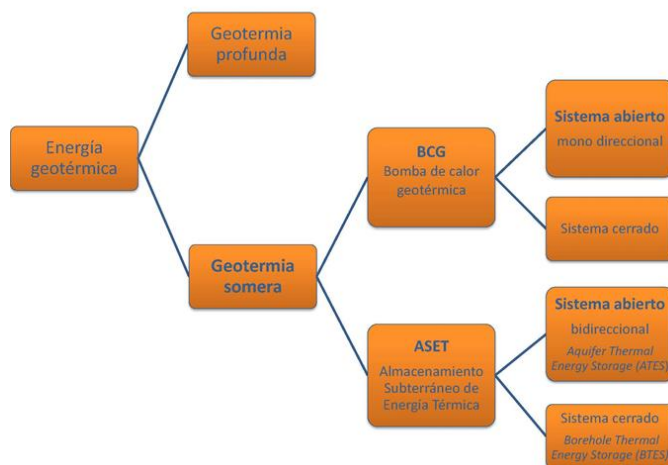


Figura 2.1: Fuente: M. Hendricks, 2013. Aspectos Tecnológicos e Hidrogeológicos de la Geotermia. AIH-GE. Barcelona

2.1.2 La geotermia de muy baja entalpía. Aspectos a considerar

El aprovechamiento del recurso geotérmico de muy baja entalpía requiere del uso de una bomba de calor, que emplee el terreno como uno de sus focos y el medio a climatizar como el otro foco. Cabe diferenciar entre diversas posibilidades la primera de ellas es la distinción entre sistemas de circuito abierto y de circuito cerrado. En los primeros hay una captación de un recurso hídrico que tras el intercambio energético es devuelto al origen. Este trabajo se centrará preferentemente en circuito cerrado en que se va a utilizar un fluido, básicamente agua, para el transporte de calor. No trataremos el prometedor campo de los cimientos termoactivos que utiliza la propia estructura y cimentación del edificio para ubicar el sistema de tuberías lo que supone una mayor eficacia y menor coste.

La rentabilidad económica se basa en la alta eficiencia energética de los ciclos termodinámicos que permite que el empleo de bombas de calor geotérmicas lo que hace que resulte viable desde el punto de vista económico. Por otra parte la naturaleza geotérmica de los mismos derivará en ventajas medioambientales tal y como se examinará con posterioridad.

A efectos de diseño el sistema geotérmico estará integrado, por tres subsistemas principales:

- Un **intercambiador de calor subterráneo**, (bucle subterráneo), que extrae calor del subsuelo o evacua el calor de un edificio.
- Una **bomba de calor**, o termo bomba, que transfiere el calor entre el intercambiador de calor subterráneo y el sistema de distribución de un edificio.

· **Un sistema de distribución** que encauza el calor o el frío las diferentes estancias de un edificio.

Para su definición y dimensionamiento es tanto necesario considerar los métodos de intercambio térmico con el terreno: Colectores horizontales enterrados, los sondeos geotérmicos, los sondeos de captación de aguas. El papel que eventualmente pudieran jugar los pozos geotérmicos. Etc.

Se hace necesario un buen conocimiento de las bombas geotérmicas. Y las propiedades del terreno para efectos de elaborar los balances energéticos con el terreno y evaluar su implicación en los diseños.

Por otra parte es preciso considerar la evaluación de las necesidades a cubrir, para dimensionar las instalaciones, etc.

2.1.3 Consideraciones acerca de la energía geotérmica en el panorama energético actual.

Antecedentes:

Desde tiempo inmemorial el hombre ha utilizado los recursos geotérmicos a su disposición, los afloramientos naturales en la superficie. No fue hasta el siglo XIX cuando el mayor nivel científico acerca del subsuelo y los avances técnicos posibilitaron los inicios de la exploración y explotación de las fuentes geotérmicas.

De la mano de las necesidades crecientes de energía propias de una sociedad más moderna el siglo XX asistió al despegue de aprovechamientos de mayor complejidad técnica resultando un hito la generación eléctrica en 1904 en Larderello, (Italia), en la industria del ácido bórico.

Aun contando con precedentes históricos no fue hasta 1930 en Reikjavik, (Islandia) que se consideró una tecnología viable para el aprovechamiento a gran escala en redes modernas de calefacción urbana que han tenido buenos desarrollos desde entonces. Hoy en Islandia, representa el 95% de redes de calefacción y se utilizan en numerosos países europeos, China, Rusia, Estados Unidos, Canadá, etc.

En instalaciones de muy baja entalpía constituye un hito la primera instalación con bomba de calor geotérmica en 1945, en Indianápolis, (EE.UU.). La tecnología a utilizar y sus esquemas básicos fueron recogidos extensamente en el texto "Methods of Earth Heat Recovery for the Heat Pump" en 1947, por Kemler, E.N.

La energía geotérmica goza de un reconocimiento cada vez mayor en el contexto internacional, y en concreto la referida a las muy bajas entalpías, de la mano de los sucesivos choques energéticos, el incremento de la atención al medioambiente y la necesidad creciente de la reducción de las emisiones de CO₂ a la atmósfera,

El empleo de bombas de calor geotérmicas se está desarrollando de forma creciente a nivel internacional y, en concreto, su implantación en Europa está experimentando un gran desarrollo. Siendo los países nórdicos y centroeuropeos los

más importantes impulsores. Se considera que en Suecia hay instaladas en el entorno de 400.000 bombas de calor..

Universalidad y disponibilidad

La energía geotérmica en el rango en que estamos interesados es de muy alta disponibilidad,. Esta regularidad es, por lo general, evaluable con seguridad en el momento del diseño en que se toma en consideración las características intrínsecas del subsuelo (gradiente geotérmico, permeabilidad de las rocas, etc.), por lo que se garantiza su carácter regular y estable. Se estima que si los coeficientes de disponibilidad de las centrales geotérmicas eléctricas son del 90% de media, lo habitual es que en redes de calefacción se alcance el 100% y en muy baja entalpía en sus diversas modalidades nos situamos en estos valores.

Por otra parte no está localizado como los combustibles fósiles sino que se cuenta con una amplia distribución y en concreto la energía geotérmica de muy baja entalpía es una energía local, para consumir sobre el propio terreno. No requiere de características excepcionales del terreno lo que permite catalogarla de amplísima disponibilidad. Es independiente de condiciones meteorológicas y ambientales lo que le dota de continuidad y estabilidad.

Sostenibilidad

Es una energía renovable que, en el caso de muy baja entalpía mantiene un consumo apreciablemente menor frente a las tecnologías alternativas para la calefacción y refrigeración. Por lo que su uso supone una respuesta local, ecológica y eficiente para reducir costes energéticos. Es limpia en tanto: no contribuye a la emisión de gases de efecto invernadero. Si bien no se puede soslayar que en muy baja entalpía se consumen energía eléctrica para el funcionamiento de los compresores eléctricos, de las bombas de circulación y de los ventiladores del interior del edificio. Sin embargo su huella en CO₂ y su aporte energético externos son considerablemente inferiores pues las emisiones equivalentes de gases son las asociadas a la energía externa aportada para el funcionamiento de estos dispositivos.

Viabilidad tecnológica y económica

La tecnología es bien conocida por lo que los recursos tecnológicos del mercado bastan para una implantarla con facilidad. Adicionalmente es compatible e integrable con otros sistemas de refrigeración y calefacción como los renovables.

Un sistema correctamente dimensionado es hoy en día el sistema más eficiente desde el punto de vista energético, Con importantes ventajas frente a las tradicionales bombas de calor aire-aire o aire-agua, que utilizan como fuente o sumidero de calor el propio aire ambiente.

Esta superioridad hay que buscarla en que la estabilidad a lo largo del año de la temperatura del terreno proporciona rendimientos de ciclo sustancialmente mayores, tanto en calefacción como en refrigeración hay por tanto un menor uso de energía externa para su funcionamiento.

En entornos como el de Valencia donde las viviendas disponen de sistemas de refrigeración en verano, las bombas de calor geotérmicas mejoran las prestaciones de las bombas tradicionales que utilizan el aire exterior gracias a la estabilidad del foco en el terreno posibilitando ahorros considerables.

Económicamente para residencias individuales supone un coste de inversión elevado, que puede doblar los tradicionales. No obstante, la amortización se consigue porque los gastos corrientes de explotación son muchos menores alcanzando el equilibrio en unos años (de 3 a 5) por el menor coste frente a los suministros de pago. Se consiguen elevadas eficiencias, 300%-600%, en invierno,

Frente a valores de 175%-250% de las equivalentes con foco en el aire exterior.

Adicionalmente aparecen ventajas, como la disminución de ruido, del impacto estético de los elementos aéreos, en fachadas, eliminación de condensado etc.

La durabilidad es también un factor a tener en cuenta por el incremento que supone la menor oscilación térmica de los componentes.

Sin embargo si bien es cierto que el uso del terreno como foco térmico considerablemente más favorable según los principios termodinámicos viene acompañado de una mayor complejidad de su utilización por las características térmicas y también por la mayor envergadura del proceso de instalación.

Perspectivas

A escala mundial se observa el crecimiento de la geotermia, en sus distintos ámbitos, en los procesos de generación de energía. En las últimas décadas, se ha aumentado la capacidad instalada en el mundo más de un 20%, de forma muy dispar. Islandia, en la última década ha aumentado en el entorno de un 50% el uso de esta energía. En la actualidad, el conjunto de Europa se sirve de la energía geotérmica en un porcentaje equiparable, a otras fuentes de energía renovable.

Es evidente que en nuestro país hay un retraso importante en la implantación de estos aprovechamientos de muy baja entalpía. Diversos factores culturales y falta de tradición en la innovación han lastrado su implantación. Sin embargo operan también importantes incentivos para un rápido desarrollo de la mano de la coyuntura energética mundial y los riesgos para la sostenibilidad medioambiental.

Por un lado son crecientes la demanda potencial derivada de las necesidades energéticas domésticas de calefacción y el agua caliente sanitaria. De otro la presión

medioambiental y un mayor apoyo público en su difusión y en la implantación pueden resultar en un incentivo para aproximarnos a países europeos más adelantados en el uso de este recurso energético.

2.2 FUNDAMENTOS TÉRMICOS DEL TERRENO

2.2.1 Propiedades térmicas del terreno, con relevancia en el problema.

El comportamiento del terreno respecto a la capacidad de almacenar calor y transmitirlo es importante para el aprovechamiento energético. En esencia las aplicaciones son dependientes tanto de la temperatura del terreno como de la capacidad del mismo de transmitir o absorber el calor que aparecen en los ciclos de calefacción y refrigeración que vamos a usar.

Son pues variables importantes la conductividad térmica del terreno, la capacidad calorífica de los materiales y la difusividad.

Conductividad térmica del terreno

Esta propiedad es clave en el diseño, se define como la capacidad de conducción de calor. Es característica del material, se mide en $W/m \cdot ^\circ C$, e interviene en la ecuación de conducción:

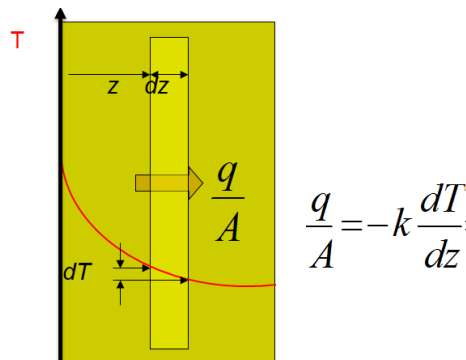


Figura 2.2: Transporte de energía por conducción. Ley de Fourier

En la expresión q es el calor difundido por unidad de tiempo, A el área y dT/dz es el gradiente de temperatura.

La naturaleza del terreno no puede dejar de atender a un factor importante y como que la conductividad térmica aumenta por lo general con el grado de humedad del mismo hasta alcanzar los valores de conductividad correspondientes a un terreno saturado, si bien no es fácil establecer la dependencia entre ambos factores con

carácter general. Por ejemplo, unas gravas no disponen de una alta conductividad térmica por sí solas pero, saturadas de agua por su alta permeabilidad, pueden multiplicar por 4 dicha variable. Sin embargo, unas arcillas en idénticas condiciones de saturación, alcanzan poco más que a duplicar la conductividad, debido a su baja permeabilidad

La conductividad térmica se mide en laboratorio sobre muestras de testigos de sondeos representativas de las formaciones geológicas atravesadas. Estimado a partir de tablas o mediante test de respuesta térmica (TRT). Este último método es necesario en instalaciones medianas o grandes.

El valor de la conductividad térmica nos permite dimensionar los intercambiadores al facilitarnos la posibilidad de estimar la energía térmica que vamos a poder extraer o inyectar mediante el intercambiador de calor enterrado:

En la tabla adjunta se muestran valores de diversos materiales de usuales para la conductividad térmica, y de la capacidad térmica volumétrica. Se observan valores de la conductividad térmica desde de 0,4 a 6 W/mC. Lo valores más elevados son cuarcita y sal, con 6 y 5,4 W/mK respectivamente. Estos valores son excepcionales que los siguientes valores superiores en la tabla están en torno a 3W/mC.

Capacidad térmica específica

Se denomina capacidad térmica o calorífica al cociente entre el calor que se suministra a un sistema y la variación de temperatura provocada.

$$c = dQ / dT$$

Donde C es la capacidad calorífica o térmica y dQ el calor que es necesario suministrar para incrementar la temperatura en dT. Sus unidades son J/m³K.

Esta magnitud es una medida de la capacidad del terreno de almacenar energía y también es indicativa de su inercia térmica, es decir la dificultad de variar la temperatura a mediada que cede o absorbe energía. Cuanto mayor sea la capacidad térmica mayor habrá de ser el calor suministrado para lograr la misma variación de temperatura.

Difusividad

Una magnitud sintética indicativa del comportamiento del terreno es la difusividad térmica definida como el ratio entre la capacidad de conducción del terreno y la capacidad térmica volumétrica del terreno. Se mide en m^2/s . Un valor alto de la difusividad térmica indica que el terreno es mejor conductor que lo que es capaz de almacenar, y un valor bajo significa que el terreno será buen almacenador respecto a cómo conduce el calor.

El rango de valores para la difusividad térmica Labs y Harrington (1982) va desde $0,36 \cdot 10^{-6} m^2/s$ hasta $0,8 m^2/s$, correspondientes a suelos secos, medio y húmedo. (Labs y Harrington 1982) Givoni y Katz seleccionaron como valores límites $\alpha = 0,4 \cdot 10^{-6} m^2/s$ para suelo seco y $\alpha = 1,08 \cdot 10^{-6} m^2/s$ para suelo húmedo. El efecto de la humedad es aumentar la conductividad térmica del suelo.

La complejidad es muy grande hay estudio que estudian la importancia de la forma en que la humedad se encuentra dentro de los suelos (en forma de vapor o en forma de agua líquida). En el caso de encontrarse como vapor, los efectos convectivos del vapor de agua entre los granos del suelo hacen que la transferencia de calor sea más eficiente que si se tratara de agua líquida.

Tipo de roca	Conductividad térmica (W/mK)			Capacidad térmica volumétrica
	Mín.	Valor típico	Máx.	(MJ/m ³ K)
Rocas magmáticas				
Basalto	1,3	1,7	2,3	2,3-2,6
Diorita	2	2,6	2,9	2,9
Grabo	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		aprox. 5,8		2,1
Micasquistos	1,5	2	3,1	2,2
Esquistos arcillosos	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
Limolitas y argilitas	1,1	2,2	3,5	2,1-2,4
Rocas no consolidadas				
Grava, seca	0,4	0,4	0,5	1,4-1,6
Grava, saturada de agua		aprox. 1,8		aprox. 2,4
Arena, seca	0,3	0,4	0,8	1,3-1,6
Arena, saturada de agua	1,7	2,4	5	2,2-2,9
Arcilla/limo, seco	0,4	0,5	1	1,5-1,6
Arcilla/limo, saturado de agua	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	aprox. 3,9
Hormigón	0,9	1,6	2	aprox. 1,8
Hielo (-10°C)		2,32		1,87
Plástico (PE)		0,39		
Aire (0 - 20 °C, seco)		0,02		0,0012
Acero		60		3,12
Agua (+ 10 °C)		0,58		4,19

Tabla 2.1: Tabla Valores de conductividad y capacidad térmica para distintos tipos de materiales Fuente: Paud, D Getothermal energy and heat storage. 2002.

2.2.2 Gradiente térmico del terreno

Se da una interacción energética entre la atmósfera y el suelo balanceando radiaciones y flujos de calor. Se dan ciclos diarios de transferencia desde la superficie hacia la capa superficial por radiación solar y conducción de la energía, así como aportes energéticos de precipitaciones y desde la superficie hacia la atmósfera por radiación y convección principalmente. Se alcanza pues una situación de equilibrio térmico.

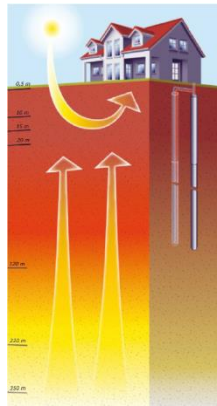


Figura 2.3: Radiación solar, flujo de calor geotérmico e intercambiadores geotérmicos verticales (Fuente: Géothermie. Suisse – énergie).

En consecuencia la temperatura a partir de cierta profundidad, en torno a los 10 m se mantiene constante y se aproxima a la temperatura media anual del aire ambiente en esa determinada zona. Hay factores adicionales que pueden modificar este valor como el clima, la vegetación, la cobertura del suelo, la pendiente, y las propiedades generales del suelo. Este patrón puede distorsionarse por la presencia de corrientes subterráneas que lo alteren

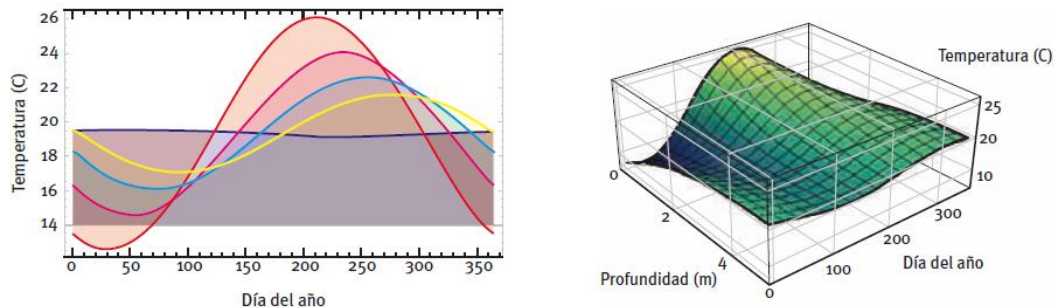


Figura 2.4: Variación de la temperatura de la Tierra en función de la profundidad a lo largo de un año. Fuente: IDAE (Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía) 2010.

La curva de color rojo corresponde a la oscilación natural (inmediatamente bajo la superficie), en magenta, azul claro, amarillo y azul oscuro se representan sucesivamente las evoluciones de temperatura a 1 m, 2 m, 3 m y 10 m respectivamente. Estos valores se corresponden a una ubicación como Valencia.

Como se muestra en la segunda figura las variaciones térmicas son mayores en la capa de 0 a 10 m, destacando las variaciones estacionales de temperatura en estas profundidades inferiores. Las variaciones son mayores a medida que la profundidad es menor interviniendo la composición del terreno y su estado físico que determina los factores de capacidad calorífica, conductividad, y difusividad. La gran inercia térmica de suelos y rocas se manifiesta en los retrasos de los ciclos de temperaturas con respecto al exterior de entorno a cuatro semanas.

A medida que profundizamos la temperatura aumenta, en torno a los 15 m puede considerarse que el terreno está a temperatura constante y con un valor ligeramente superior a la temperatura media anual de la superficie. A mayor profundidad la temperatura es independiente de cualquier variación estacional sino del flujo de calor y por tanto de las condiciones geológicas y geotérmicas. En los primeros 50 m la temperatura es sustancialmente constante. Por debajo se establece un gradiente geotérmico, definido como la relación entre la variación de temperatura y la profundidad claro aunque muy dependiente de factores ligados a la tectónica y circunstancias del suelo. Como valor de referencia se establece como valor estándar una variación media de 3 °C por cada 100 metros de profundidad.

El gradiente es afectado por factores regionales que determinan el contexto geológico y estructural. Aquellos elementos de adelgazamiento de la litosfera, vulcanismo, etc aumentan el gradiente.

El gradiente es afectado también por factores locales: puede darse variaciones verticales y laterales según la conductividad y sobre todo por la las diferencias entre las propiedades térmicas de las rocas. El factor que más condiciona el valor del gradiente geotérmico es la circulación subterránea de agua, pues contribuye a la redistribución de calor. Si hay recarga entra agua fría y es menor si hay ascencias por ser zona de descarga el gradiente es mayor. Las anomalías del terreno pueden ocasionar también variaciones sustanciales a escala local.

Desde el punto de vista del diseño y dimensionado de intercambiadores geotérmicos para aplicaciones de muy baja entalpía, puede concluirse de lo anterior que el gradiente geotérmico es un factor a tener en cuenta únicamente en sistemas verticales cuya profundidad excediese los 100 m. Una dificultad considerable para ello reside en el hecho de que el gradiente geotérmico presenta, según zonas, una considerable heterogeneidad incluso sobre distancias horizontales pequeñas.

Podemos concluir con la siguiente gráfica a modo de resumen:

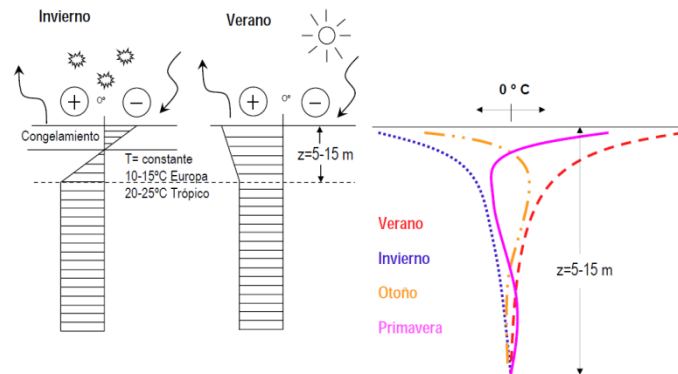


Figura 2.5: Datos referidos al gradiente térmico. Fuente: Ingeosolum. Congreso Geoener 2008

2.2.2 Estimación de temperaturas en el terreno.

La estimación de la distribución vertical de temperatura en función del tiempo puede realizarse bajo ciertos supuestos simplificadores. La expresión propuesta por Kusuda T., Achenbach P.R. en 1965 parte de un suelo homogéneo de propiedades térmicas constantes y bajo el supuesto de temperatura ambiente tipo senoidal, lo que es una limitación importante en climas secos para los que la carencia de agua con su elevado calor específico implica variaciones con segmentos parabólicos y exponenciales. Esta expresión debería en ese caso adaptarse y en la bibliografía se encuentran las diversas variantes.

$$T(z, t) = T_m - A_s e^{-z \sqrt{\frac{\pi}{365\alpha}}} \cos \left[\frac{2\pi}{365} \left(t - t_0 - \frac{z}{2} \sqrt{\frac{365}{\pi\alpha}} \right) \right]$$

Incluye los parámetros: T_m es la temperatura media anual del suelo en °C a una profundidad donde no son perceptibles las variaciones de temperatura, es decir, la temperatura que permanece constante en el terreno durante todo el año, que se considera constante hasta profundidades de 100 metros. As la oscilación anual de la temperatura superficial. Depende de la localización, del tipo de suelo y del contenido en agua; t es el tiempo en días; t_0 es el es el retraso en días de las temperaturas máximas y mínimas del suelo a cierta profundidad comparado con las temperaturas máximas y mínimas en la superficie. α es la difusividad térmica del terreno en $m^2/\text{día}$.

2.3 FUNDAMENTOS FÍSICO-TÉCNICOS DE APROVECHAMIENTO ENERGÉTICO DEL TERRENO

Como se ha indicado el aprovechamiento geotérmico de baja entalpía parte de la aplicación de los fundamentos básicos de las máquinas térmicas empleando el terreno en invierno como como origen del calor y como sumidero del calor en verano. Hay en juego diversos flujos de calor, en modo invierno hay una extracción energética del terreno que se compensa con flujos energéticos ascendentes del interior y desde la superficie. Si se incorpora la refrigeración hay que plantear también el balance energético del suelo, es decir, la diferencia entre aportaciones y extracciones de calor. En ese sentido si el sistema está balanceado el efecto neto es nulo, operando el suelo como un reservorio de calor. Si el sistema no está balanceado habrá que garantizar la presencia de flujos adicionales que permitan el funcionamiento estable a largo plazo. Este estudio global deberá en su momento acompañarse del estudio de demandas térmicas “pico” o a que pueden precisar de refuerzos para atender las demandas.

El estudio de todos estos elementos sitúa elproblema científico-técnico en el dominio de la transmisión de calor y máquinas térmicas con un foco en el terreno, aspectos que se examinan a continuación.

2.3.1. Componentes a considerar en el aprovechamiento geotérmico en baja entalpía.

Podemos establecer en resumen los siguientes elementos como constitutivos del diseño del circuito de intercambio de calor con el terreno: Bomba de calor. Procesos de Intercambio de calor. Fluido caloportante Diseño de circuitos, interconexiones y bombas de circulación. Conexiones hidráulicas a la bomba de calor. Circuito de intercambio térmico con la vivienda. Circuito convencional de climatización

A continuación se pasará revista a los fundamentos teóricos de las bombas de calor y los procesos de intercambio térmico. En una sección posterior se estudiarán desde el punto de vista tecnológico el conjunto de estos elementos.

2.3.2 Bombas de calor.

De acuerdo al principio de Carnot una bomba de calor transfiere el calor desde un foco frío a un foco caliente utilizando una cantidad de trabajo (W).

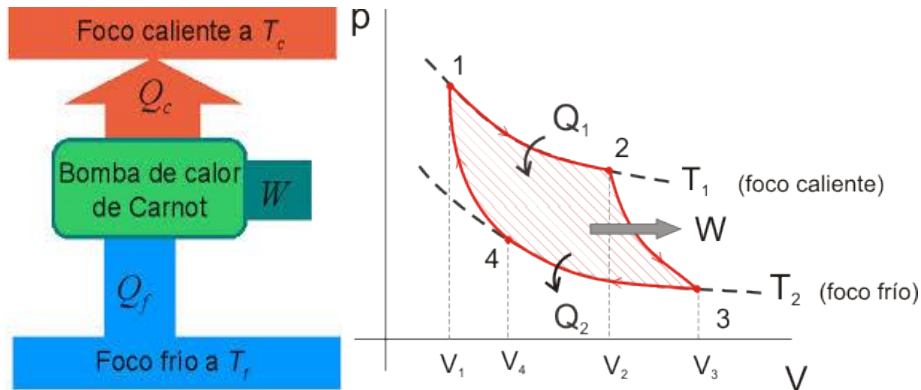


Figura 2.6: funcionamiento bomba de Carnot

Configuraciones básicas de la instalación

Más detalladamente cuando trabajamos en el ciclo de calefacción, según se puede apreciar en la figura 2.7 de la derecha, el líquido refrigerante entra dentro de la válvula de cuatro vías que lo dirige hacia el compresor que comprime aumentando así su presión y aumentando la temperatura del líquido (figura 2.7 de la izquierda) que pasa una vez ya en el foco caliente por un condensador que transmite el calor en este caso a la vivienda. Una vez que el líquido refrigerante pasa por la casa va directo hacia una válvula de expansión que expande el líquido aliviando su presión y disminuyendo así la temperatura de este que termina por otro intercambiador en este caso un evaporador que coge calor del lugar a enfriar. En el caso del ciclo de refrigeración es totalmente a la inversa por lo que la válvula de cuatro vías cambia el sentido del líquido calentando así el refrigerante antes de pasar por el foco externo y calentándolo para finalmente pasar por la válvula de expansión enfriando la vivienda o el foco interno.

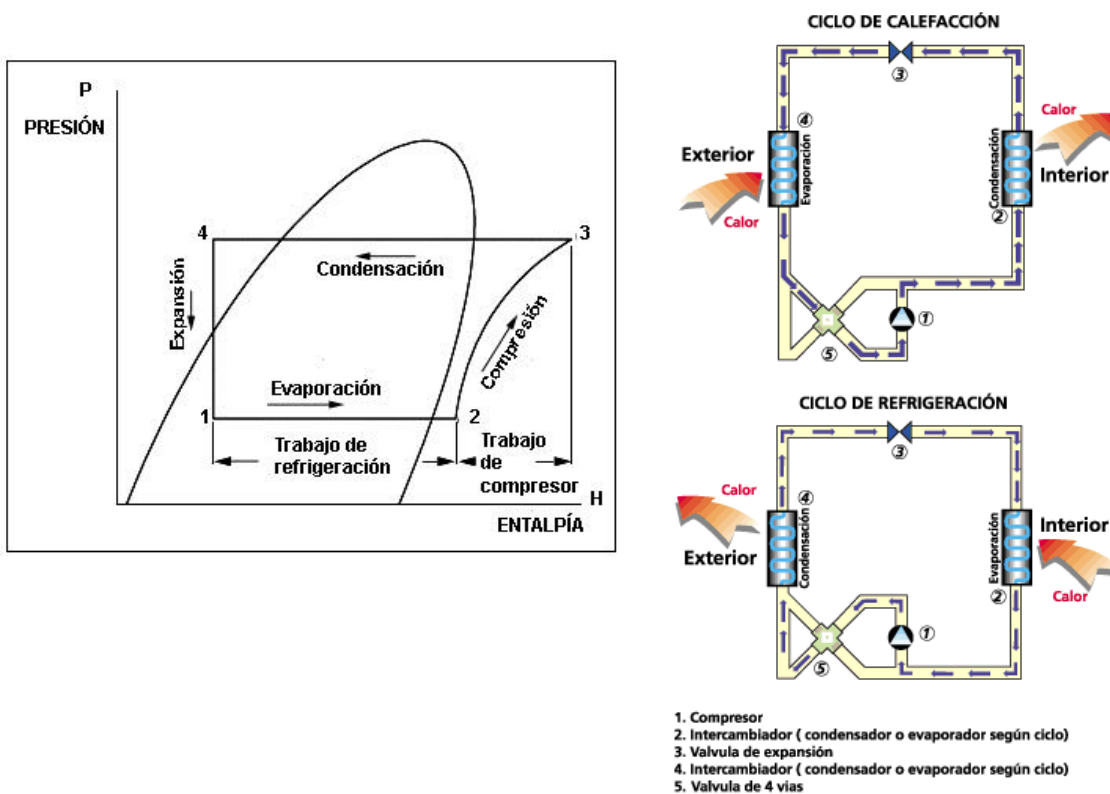


Figura 2.7: ciclos de refrigeración y calefacción

Rendimiento de una bomba de calor

La primera figura muestra el esquema de una máquina de Carnot funcionando como bomba de calor. En cada ciclo, se realiza un trabajo $|W|$ sobre la máquina, ésta extrae $|Q_f|$ del foco frío (foco exterior) y suministra $|Q_c|$ al foco caliente (foco interior). El rendimiento teórico máximo en la calefacción es el COP (Coefficient of Performance) de la bomba de Carnot es el cociente entre el calor suministrado al foco caliente y el trabajo realizado sobre la máquina en cada ciclo.

$$\text{COP} = \frac{|Q_c|}{|W|} = \frac{T_c}{T_c - T_f}$$

En el caso de una refrigeración nos encontramos que el rendimiento teórico máximo se denomina EER (Efficiency Energy Rate).

$$\text{EER} = \frac{|Q_f|}{|W|} = \frac{T_f}{T_c - T_f}$$

Mientras que los rendimientos en funcionamiento en ambos casos son:

$$\text{Refrigeración: EER} = \frac{\text{Potencia } F}{P_{\text{absorbida}}}$$

$$\text{Calefacción: COP} = \frac{\text{Potencia } C}{P_{\text{absorbida}}}$$

(En caso de ser estacionales debe sustituirse potencia por energía)

Las bombas de calor reales no proporcionan el rendimiento de una bomba de Carnot. La eficiencia de la bomba de calor disminuye si por ejemplo la temperatura del foco frío es muy baja. Esto puede verse en la expresión del COP teórico, pues un valor menor de la temperatura en el foco frío, manteniendo constante la temperatura en el foco caliente hace que el denominador sea mayor y el cociente más pequeño. Por eso las bombas de calor son más eficientes en lugares donde el frío en invierno no sea demasiado intenso. Además, una bomba de calor puede invertir su funcionamiento y servir de refrigerador en verano. Esto se consigue con una válvula reversible (cuatro vías).

2.3.3 Fundamentos de transmisión de calor

A modo de recordatorio cabe exponer, de modo simplificado, los tres mecanismos de transmisión de calor a los que nos referiremos con profusión a lo largo de este trabajo.,

Conducción térmica

La transferencia de calor a través del contacto directo de dos cuerpos sin intercambio de materia sino por interacción entre partículas adyacentes. Se puede producir tanto en sólidos como en fluidos estancados, es decir que no haya movimiento del fluido. Como ejemplo si en una barra de hierro se le aplica un calor Q en un extremo poco a poco la barra se va a ir calentando por intercambio de las partículas hasta que la barra tenga en toda su longitud una temperatura igual a Q . Este efecto también puede darse en los fluidos permanentes por ejemplo si a un cubo de agua que no se mantenga perfectamente quieto se le aplica calor este se irá transmitiendo igual que la barra.



Figura 2.8: conducción térmica

Se explica la conducción térmica con la ley de Fourier:

$$q = kA \frac{\Delta T}{\Delta x}$$

Donde q es el calor, k es la constante de conductividad térmica, A es el área de la superficie de contacto, ΔT es la variación de temperaturas y Δx la variación de la distancia entre los dos medios, es decir el espesor del material.

Convección térmica

En el caso de transferencia de calor libre de un fluido al entrar en contacto con una superficie sólida más caliente o más fría, causa que este cambie su temperatura esto provoca un cambio en la densidad del fluido. Esta diferencia de temperaturas y de densidad provoca que haya una circulación. En modo de ejemplo ponemos una olla a hervir donde la olla funciona como superficie caliente y el agua como fluido. Una vez que la olla se calienta, esta transmite el calor al agua que está en contacto con ella. Esa agua se calienta y su densidad disminuye por lo tanto sube y es remplazado por agua más fría y con densidad mayor, formando así una circulación que se aprecia mucho más cuando el agua empieza a hervir.

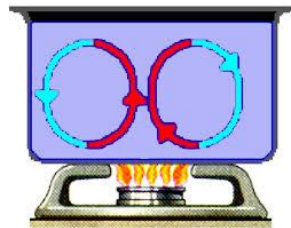


Figura 2.9: convección térmica

La convección se rige por la ley de Newton

$$q = hA(T_{\text{sup}} - T_{\text{fluido}})$$

Donde q es el calor h el coeficiente de película que depende del fluido A el área de contacto entre la superficie y el fluido y finalmente la diferencia de temperaturas.

Radiación térmica

Cualquier tipo de superficie que supere los cero grados centígrados emite una radiación. Esta radiación será recibida por otra superficie la cual absorberá parte de dicha radiación y la otra parte será reflejada. La segunda superficie también emitirá a parte de la refleja de propia radiación. El ejemplo básico es el Sol que emite radiación la cual es recibida y reflejada por la Tierra, la cual también al estar caliente emite radiación.



Figura 2.10: radiación térmica

La radiación sigue los principios de la ley de Stefan-Boltzmann:

$$I = eA\sigma(T^4 - T_0^4)$$

En esta fórmula nos encontramos que I es la energía, e la absorción, A la superficie de contacto σ es la constante de Stefan y por la diferencia de las temperaturas en cuarta potencia de las dos superficies.

2.4 ELEMENTOS DE LA INSTALACIÓN

A continuación se va a pasar revista a los diversos elementos que constituyen la instalación desde un punto de vista técnico, en un capítulo posterior, nos centraremos con especial atención a los diferentes sistemas de intercambiadores por varias cuestiones. En primer lugar porque tanto el sistema de distribución como las bombas de calor son elementos estables y muy fiables que precisan únicamente de un buen dimensionamiento en la implantación del proyecto, así como una buena ejecución y control de calidad de la obra en la fase de ejecución. Por el contrario, la clave del éxito del sistema y que más dificultades presenta es el intercambiador. Su adecuado diseño es esencial y el coste del mismo representa hasta un 40% del sistema geotérmico planteado.

2.4.1 INTERCAMBIADORES EN SISTEMAS GEOTÉRMICOS.

2.4.1.1 Clasificación

Los sistemas geotérmicos utilizados pueden clasificarse en dos categorías: **abiertos** o **cerrados**. Su utilización depende de si el terreno está saturado o no de agua y es factible la utilización del agua subterránea.

Los circuitos abiertos precisan de un suministro adecuado en calidad y cantidad de agua: aguas subterráneas, embalses, río, etc. y tienen la limitación importante de que para implantarlo es necesario que las regulaciones legales lo permitan. Se requiere un caudal comprendido entre 150 y 200 l/h por kW de potencia térmica que se autorice, además de contar con la autorización del Organismo de Medio Ambiente competente, o Aguas correspondiente. Condiciones no siempre factibles. En este tipo de circuito la tubería colectora toma agua y la hace participar en el circuito intercambiador de calor de la bomba, a continuación la devuelve al medio, a cierta distancia, sin alteraciones mayores que cambios de temperatura. Lo que en proyectos de envergadura no es irrelevante medioambientalmente. Para proyectos de media o alta potencia son, lógicamente, más económicos porque su inversión es notablemente inferior respecto a los sistemas cerrados.

No prestaremos más atención a esta configuración por cuanto el diseño que posteriormente se propondrá no lo utilizara.

En nuestro caso utilizaremos un **sistema cerrado**. Estos sistemas serían apropiados si no se dispone de un caudal suficiente de agua subterránea o, como es nuestro caso, la demanda térmica es suficientemente pequeña como para lograr eficazmente los intercambios requeridos.

El lazo cerrado permite la circulación del líquido intercambiador, que puede incluir un anticongelante, son los más utilizados los de base alcohólica como por ejemplo propilenglicol o metanol, mediante una bomba hidráulica. Se excluye cualquier contacto entre el fluido y el entorno.

Para el buen funcionamiento del sistema, el fluido que circula por el lazo cerrado debe tener una protección anti hielo cuando su temperatura baja a menos de 4°C al salir del terreno y entrar en el edificio.

La parte subterránea consta de unas tuberías enterradas en el subsuelo. Se pueden diseñar distintas disposiciones de estas, horizontales, verticales. Y en algunos casos cabe sumergirlas en masas de agua, si se dispone y la legislación lo permite. No en nuestro caso. Estas tuberías precisan de excavación o perforación de pozos para el discurrir de las tuberías, normalmente de polietileno reticulado (PER). La parte subterránea se conecta en superficie a las tuberías de polietileno de alta densidad cerrando el ciclo.

Adicionalmente se precisa de un **circuito de distribución** en la propia construcción que haga el intercambio en la misma. Estamos en el ámbito convencional de radiadores, conductos, suelo radiante etc.

Por lo dicho caben dos configuraciones básicas diferentes que a continuación se examinan.

	CAPTADOR VERTICAL	CAPTADOR HORIZONTAL
Temperatura del suelo	Constante en el año	Varia ligeramente en el año
Requerimiento de terreno	Mínimo	Alto
Uso del terreno	Libre	Limitado
Transmisión de la energía	Muy buena	Buena
Consumo de energía	Muy bajo	Bajo
Relación de cálculo	1/0,75-1 (m ² suelo radiante/m perforado)	1/1,5-2 (m ² suelo radiante/m ² terreno)
Costes de instalación	Mayor	Menor (aprox. 50% captador vertical)

Tabla 2.2: Comparación entre captadores geotérmicos verticales y horizontales (Galarza, 2008)

2.4.1.2 Colectores Horizontales

Constan de tubos enterrados en terrenos, por lo general casi llanos, a baja profundidad de 1 a 3m m de profundidad separados unos 0,4 o 0, 5m m y pueden adoptar diversas disposiciones geométricas. Es muy común adoptar disposiciones en espiral, con lazos solapados situados horizontales o verticalmente (slinky) se logra así disminuir la longitud de excavación. En cada trinchera caben diversas vueltas y su longitud estará determinada por el intercambio requerido. Las prestaciones vienen a variar de 8 a 35 m /Kw, en función tanto del terreno y del número de lazos. Se alcanza del orden de a los 16-24 W/m². Los requerimientos espaciales son elevados hay que ocupar una extensión considerable, en función tanto de la naturaleza del terreno, climatología, etc.

Esta opción no va a ser la elegida posteriormente, hay una limitación de espacio en la vivienda a climatizar.

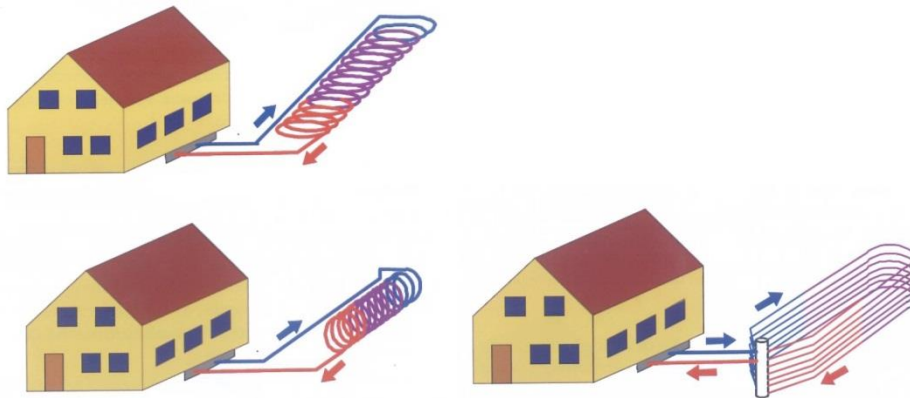


Figura 2.11: En *Guía Técnica de Sondeos Geotérmicos Superficiales. Serie Geoner, 2009*

2.4.1.3 Colectores verticales

Las tuberías se entierran utilizando catas, de profundidad es variable en función de las características del terreno. La planificación de su profundidad, y número se realiza en base a la naturaleza del terreno y el grado de humedad del mismo. Con esta información puede evaluarse el intercambio térmico. También ha de contarse la disponibilidad de terreno para su realización. Se usan profundidades muy variables, pueden darse desde la decena hasta el centenar de metros. Por lo general se trata de perforaciones entre 20 y 200 m de profundidad, formando conjuntos separados de 5 a 6 m como mínimo. El diámetro de la perforación viene a ser de 100-160 mm. Por su centro discurren las tuberías en "U" hasta el fondo y posteriormente se rellena. Pueden usarse distintos tipos pero es muy usada la cementación de abajo arriba con la inyección de una lechada de cemento con bentonita, agua y aditivos.

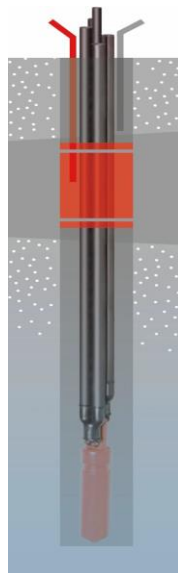


Figura 2.12: Esquema de sonda geotérmica doble con tubo central para cementación y lastre suspendido del pie de sonda (Fuente: HakaGerodur).

En todo caso ha de garantizarse el intercambio térmico total y evaluar adecuadamente la energía por metro de sonda. Precisan mucho menos espacio que los intercambiadores horizontales y pese a su mayor coste se consigue mejor rendimiento térmico por la mayor profundidad $40\text{-}60\text{ W/m}^2$.

Para apreciar los rendimientos indicados baste indicar que con una sonda geotérmica de $150\text{-}200\text{ m}$ de profundidad es posible calentar una vivienda unifamiliar. Si el clima no es extremo no se necesitaría contar con otros sistemas de calefacción de apoyo para los días más fríos. También se cubriría las necesidades de agua caliente sanitaria.

Una variable importante, que posteriormente se examinará es el intervalo térmico del fluido entre la entrada y el retorno de las sondas, conviene que se minimice a entre $2\text{ y }4^\circ\text{C}$. Para ello el caudal del fluido caloportador circulante ha de ser elevado.

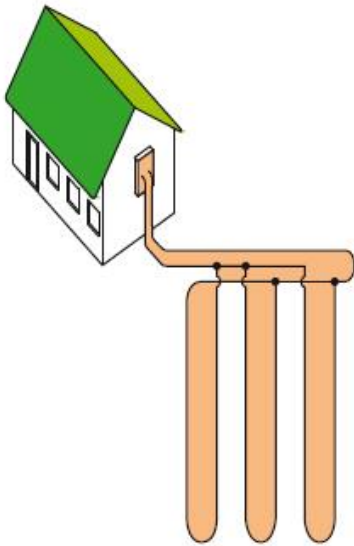


Figura 2.13: Sistema vertical en paralelo en serie

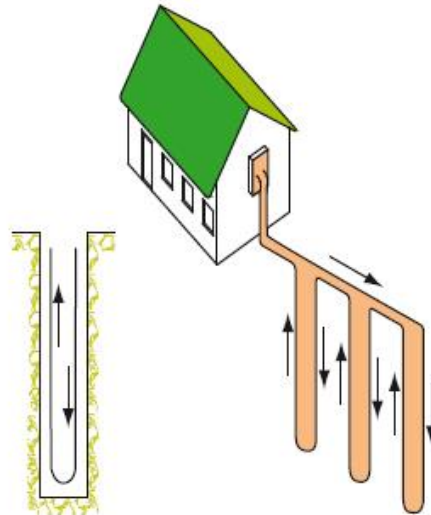


Figura 2.14: Sistema vertical

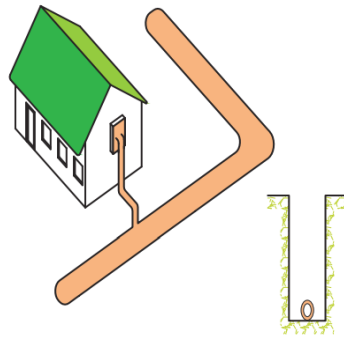


Figura 2.15: Tubería simple horizontal

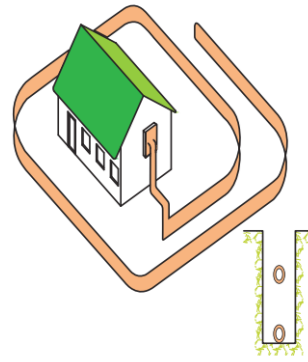


Figura 2.16: Tubería doble horizontal

2.4.1.4 Trayectorias del fluido

Caben diseños en serie o en paralelo, cada uno de estos sistemas presenta ventajas e inconvenientes de ambas opciones.

El sistema en serie permite disponer de una trayectoria de fluido definida, se manejan tubos de mayor diámetro y ello supone un funcionamiento térmico más alto por metro lineal de tubo. Las purgas son más sencillas. Tiene la desventaja del mayor coste asociado a los mayores diámetros y las limitaciones de longitud por pérdida de carga.

Los sistemas en paralelo tienen un menor coste de instalación por trabajar con menores diámetros, el volumen total de fluido es menor también. Sin embargo es difícil conseguir los equilibrios entre las bucles y las operaciones de purga son más complicadas.

2.4.2 BOMBAS GEOTERMICAS

Como se ha señalado es la bomba de calor la responsable de la transferencia del calor. Desde el subsuelo al fluido frigorífico que se vaporiza y es aspirado por un compresor eléctrico, se produce entonces la elevación de su temperatura y la presión al circuito de distribución. La condensación del fluido lo hace volver al estado líquido. Su descompresión da lugar a la vaporización y repita el ciclo. Para refrigerar con una válvula de 4 vías se invierte el sentido de funcionamiento.

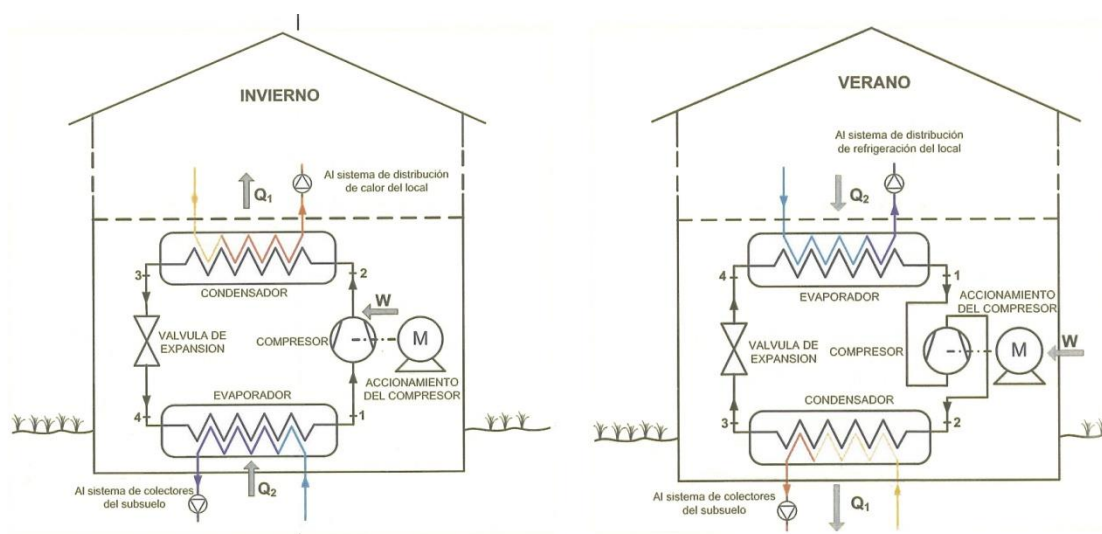


Figura 2.17: Fuente: Guía Técnica de Bombas de Calor Geotérmicas. Serie Geoner, 2009

Sabemos que el rendimiento de la bomba de calor depende del rango de temperaturas entre la fuente de calor y el sumidero al que se evacua. El rendimiento es mayor cuanto menor es el salto térmico y esta es como ya se ha indicado la ventaja de su uso por su constancia frente al aire con valores mucho más cercanos a los de calefacción o refrigeración. Las bombas geotérmicas tienen un rendimiento mucho más elevado que las bombas de calor aire-aire, pues estas extraen calor del aire exterior, frío, en invierno y evacuan calor al aire exterior, caliente, en verano.

Para evaluar el COP (Coefficient of Performance = Coeficiente de Rendimiento), debemos hacer el cociente entre la energía (calorífica o de refrigeración) producida, dividida por la cantidad de energía empleada producirla.

Debemos alimentar eléctricamente la bomba geotérmica y obtendremos valores típicos del orden de 3 a 6. Estos valores indican que para la extracción de 1 kW del terreno, por ejemplo para un COP 4 implicaría un gasto energético eléctrico de 0,25 kW en este caso. Para un COP de 6, elevado, sería 1,7 kW. Por tanto se trata de un aparato de gran eficiencia al multiplicar la energía de uso respecto a la invertida externamente. Además este consumo eléctrico sería la única fuente externa y por tanto la única contribución al CO₂ de la energía. Las bombas de calor suelen tener una potencia desde 2 kW hasta 30 kW. La potencia media típica de una instalación doméstica unifamiliar es de unos 12 kWt.

Podemos clasificar las bombas geotérmicas en razón de los fluidos de entrada y de salida: Bombas de calor agua-agua, que transfieren el calor a radiadores o suelo radiante y bombas de calor agua-aire: que lo transfieren mediante aire a conductos de aire acondicionado del edificio.

El coste inicial es mayor unas 2,5 veces el de otros equipos, debido al coste de los pozos para las tuberías intercambiadoras.



**Foto 2.1: Bomba de calor geotérmica instalada en un edificio para su climatización.
(Fuente: Fundación energía Comunidad de Madrid)**

2.4.3 SISTEMAS DE CALEFACCIÓN/REFRIGERACIÓN EN VIVIENDAS.

La calefacción y/o refrigeración de la propia vivienda, puede realizarse de tres formas:

a) Con radiadores de agua

Este es el sistema que en una vivienda ya construida, como la que va a ser usada en la ejemplificación, permite aprovechar los existentes y disponer del apoyo de la caldera ya existente. También es necesario atender que temperaturas superiores a 50°C no pueden alcanzarse con la bomba de calor y los radiadores usuales trabajan en torno a 65 y 70°C, como mínimo, por tanto la superficie de los mismos ha de incrementarse frente a los radiadores de una instalación con caldera convencional. De esta manera se alcanzaría la misma transmisión de calor al habitáculo.

b) Suelo radiante

Este sistema está formado por una red de tuberías de polipropileno embebidas en el suelo de hormigón. Un sistema de gestión y control garantiza los flujos en las distintas dependencias. Es muy adecuado porque la bomba de calor produce agua para la calefacción a baja temperatura, alrededor de 55°C, temperatura muy adecuada para el suelo radiante.

c) Por conductos de aire.

En el modo calefacción, el refrigerante calienta el aire, que se canaliza a las diferentes habitaciones. En el modo de refrigeración, el refrigerante absorbe calor del aire interior forzando la circulación por los conductos que pasa por el serpentín exterior del evaporador, liberando calor al agua fría que circula al terreno con el intercambiador.

3.- ASPECTOS A CONSIDERAR EN EL DISEÑO DE UNA INSTALACIÓN GEOTÉRMICA DOMÉSTICA

Una vez trazado el marco, general y antes de proceder al estudio de aprovechamiento entálpico de la vivienda concreta, se va a revisar con detalle los distintos aspectos del diseño. Estos aspectos se van a estudiar siguiendo la estructura de las distintas fases a considerar para llevarlo a cabo.

3.1 FASES DEL DISEÑO

Podemos distinguir tres fases, una preliminar, otra de elaboración del proyecto geotérmico y otra de diseño de la ejecución.

3.1.1 Fase previa

En esta fase se debe proceder a un conjunto de estudios previos comenzando con el estudio del edificio recopilando sus características constructivas y de uso. Puesto que estamos ante un problema de flujos de calor los datos climatológicos y en concreto la distribución térmica anual es clave, al igual que el estudio inicial de las características del terreno atendiendo a sus propiedades térmicas y geológicas, en especial la situación hidrogeológica.

Fijados los términos físicos cabe determinar la demanda de refrigeración calefacción y producción de agua caliente sanitaria. El estudio debe establecer valores mensuales, los valores de previstos de carga y eventuales picos. Es necesario contar con los parámetros de horas de funcionamiento estimadas.

En base a estas curvas de demanda y contando con las características constructivas se pueden dimensionar los sistemas para la calefacción, la refrigeración, y todo el sistema de distribución necesario, así se determina la cantidad de energía a transferir para calentar o enfriar según proceda.

Cabe ahora adoptar decisiones acerca de la cobertura de los picos de demanda, si hay que dimensionar como suele ser habitual la instalación a la base de la demanda para una mejor viabilidad económica y dejar, o no, los picos de muy pocas horas anuales a sistemas de refuerzo.

3.1.2 fase de definición de los aspectos geotérmicos

Un punto crucial en la elaboración del proyecto es la determinación de las características del terreno. Este aspecto es importante puesto que una vez realizada la obra no es modificable sino muy dificultosamente. Es el elemento más costoso de la instalación y la tentación del sobredimensionamiento, sino se hace un estudio adecuado supone un sobre coste importante en la fase de construcción y en la de uso, perdiendo el sistema eficiencia y ventaja comparativa con métodos alternativos.

Con esta base se está en condiciones de dimensionar el intercambiador subterráneo, que para nuestros propósitos se corresponde a circuito cerrado y en vertical. La dimensión debe alcanzar a satisfacer equilibradamente los intercambios requeridos tanto en modo operación refrigeración como calefacción. Hay que definir la ubicación, el número, la separación y la profundidad de los sondeos en los que se van a situar los intercambiadores geotérmicos.

Es el momento de que un estudio económico permita evaluar la eficiencia del sistema frente a las alternativas y en especial tomar medidas acerca de la cobertura de la dimensión de los picos y su eventual cobertura por medios de refuerzo.

3.1.3 fase de elaboración del proyecto y diseño de la ejecución.

Corresponde a la definición de todos los aspectos involucrados en el proceso constructivo y puesta en marcha. Selección de equipos, realización técnica de catas, sondeos montajes, puesta en marcha, etc.

3.2 ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES TÉRMICAS DEL TERRENO

El funcionamiento geotérmico ha de dimensionar muy adecuadamente el intercambio con el terreno, puesto que la envergadura de los trabajos para el enterramiento de los tubos, la longitud del tubo enterrado, etc dependen de los parámetros del intercambio. Se necesita conocer in situ tanto las temperaturas del terreno como la conductividad térmica, bien por medición directa, o por estimación a partir de los datos geológicos y la bibliografía.

El coeficiente de conductividad del terreno λ (W/m-K) determina la cantidad de energía que pasa por unidad de tiempo y por una superficie de 1 m^2 a una distancia de un metro para crear un aumento de temperatura de 1° K .

En pequeña instalación bastaría la estimación de un parámetro medio de conductividad térmica tabulado, pero en instalaciones de más envergadura estos datos previos servirían para la realización de un sondeo hasta la profundidad estimada inicialmente.

Una vez realizado el sondeo se pondría en ejecución continuada durante 72 horas con la correspondiente potencia de energía eléctrica necesaria. Obteniendo los registros de campo y posteriormente se procedería al cálculo de los parámetros característicos del terreno: Conductividad térmica, difusividad térmica, distribución de temperaturas, etc.

3.2.1 Estimación de las propiedades térmicas del terreno

En el caso de viviendas unifamiliares, de pequeña potencia térmica y normalmente con hasta cuatro sondas como mucho, el coste no compensa, hoy por hoy, el ahorro que se obtendría de en metros de perforación de instalación de tubos de polietileno. El empleo de datos tabulados como alternativa al ensayo de respuesta térmica también es bastante común, en otros casos, en los que a priori se plantean menos de 10 sondas geotérmicas, en los que el coste del ensayo representa una fracción importante del coste. Hay que a realizar un estudio de aproximación sobre datos y mapas geológicos, hidrogeológicos y de las condiciones climatológicas locales. De fuentes bibliográficas se asignan valores de conductividades térmicas de las rocas que presumiblemente conforman el subsuelo de nuestra vivienda. A partir de estos valores, ya sea usando programas informáticos, o aplicando procedimientos de cálculo simplificados basados en fórmulas empíricas, se estiman los datos.

Como siempre que se recurre a tablas no se tiene en cuenta el estudio fino de variación espacial de las características del terreno ni los efectos del flujo de agua subterránea, estos aspectos no dejan de ser una estimación.

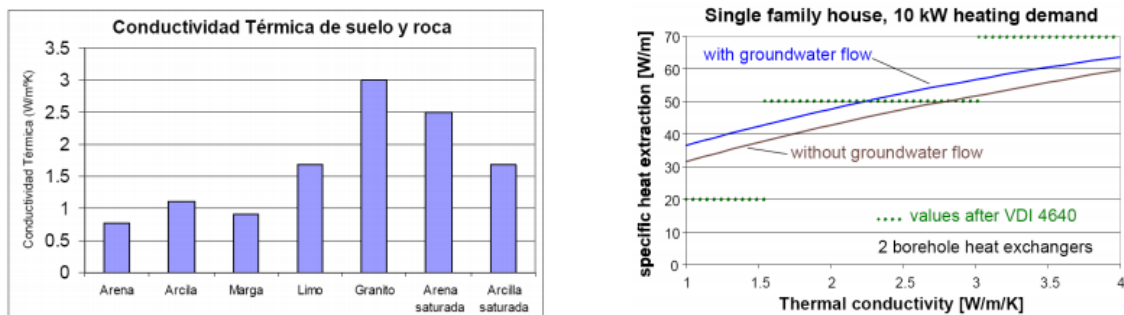


Figura 3.1: Fuente Agasca

3.2.1 Medición de los parámetros térmicos del terreno. TRT.

Los primeros métodos se basaban en el estudio de muestras obtenidas de la perforación y efectuar medidas de su conductividad térmica en laboratorio. Es un método, caro, y que sustrae del estudio la importante influencia del agua subterránea.

El método Test de Respuesta Térmica del Terreno (Thermal Response Test) fue desarrollado a finales del XX en diferentes países como Suecia o EE.UU. El método proporciona el valor real de la conductividad térmica del conjunto de la perforación y su entorno. Este aspecto es importante pues factores como presencia de agua subterránea o la propia conductividad del material de relleno de las perforaciones son

muy relevantes para lograr los valores de intercambio deseados. Observemos que una inadecuada medición podría dar lugar a variaciones permanentes de temperatura en el entorno de la sonda durante su operación y modificando así los valores de diseño y con ello la eficiencia de la instalación.

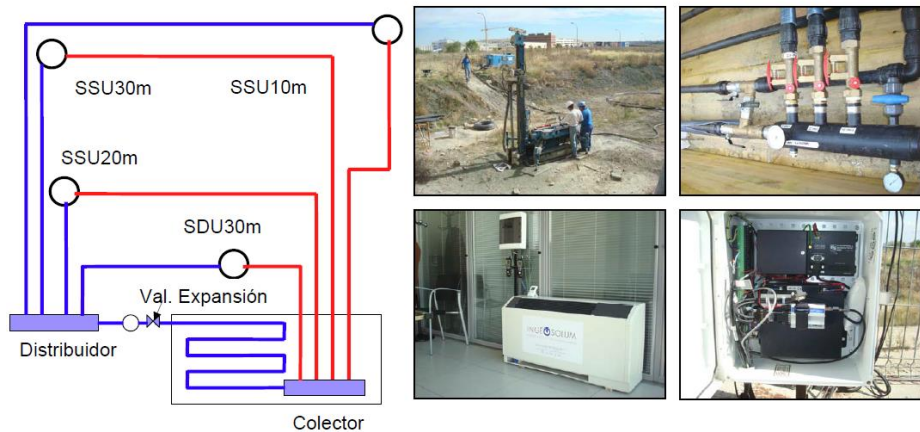


Figura 3.2 : Ensayo de respuesta térmica del terreno. (Fuente geoener)

Para su realización se precisa el la ubicación de la sonda con su relleno correspondiente y la realización de pruebas de estanqueneidad. En el ensayo hace circular el fluido por los tubos del intercambiador, en circuito cerrado, forzado por una bomba de impulsión. El fluido caloportador es calentado en superficie por una resistencia eléctrica. La circulación se mantiene ininterrumpidamente durante un periodo de 50 a 60 horas, para garantizar que se ha alcanzado una situación de estabilidad en la transferencia térmica y se toman datos de caudal, temperaturas de entrada y de salida del fluido del sondeo y del equipo de calefacción, así como se evalúa la energía térmica suministrada.

Se obtiene el parámetro más importante, la conductividad y la resistencia térmica efectivas del terreno, que dependen de los tipos de roca atravesados, los espesores de las diferentes capas, el flujo de agua subterránea, el relleno del sondeo y el material de los tubos. El ensayo se complementa con la simulación por ordenador del comportamiento que tendría el terreno en el transcurso de los años de utilización del campo de sondas geotérmicas.

Los simuladores suelen utilizar como algoritmo las expresiones del modelo matemático de la teoría del foco lineal que se revisara con brevedad posteriormente. Posteriormente del modelo se dedujo la expresión para evaluar la conductividad térmica del terreno.

Con la temperatura del fluido de la sonda (entrada y salida) y el tiempo se realizará una gráfica cuyo eje de abscisas será el tiempo en escala logarítmica, y el eje de ordenadas será la temperatura media del fluido de la sonda,

He aquí una salida gráfica típica:

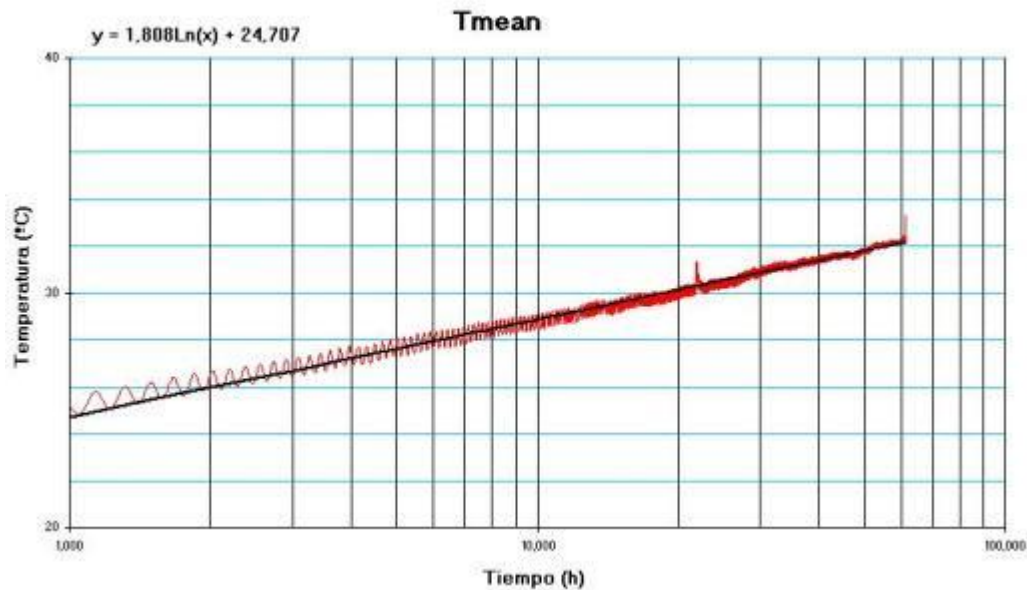


Figura 3.3: Datos del sondeo TRT. Fuente accio.se

La duración del mismo tiene un tiempo mínimo para obtener resultados útiles de

$$t_b \geq \frac{5 \cdot r^2}{\alpha}$$

Con r el radio del sondeo y α la difusividad térmica estimada.

Para un campo de sondas, se parte de que las distancias previstas de separación entre las mismas garantizan, con una simulación informática, el cálculo de número y distancias con un solo ensayo.

3.3 CRITERIOS PARA EL DISEÑO DEL INTERCAMBIADOR

Hay muchos factores a considerar en el diseño de los intercambiadores de calor enterrados y cabrían distintas alternativas de diseño para resolver un mismo sistema. El objetivo es pues conseguir una configuración óptima en base a las características de partida optimizando rendimiento - coste.

Los datos del problema son:

La demanda a la que dar respuesta, con sus peculiaridades, valores base y pico. Elección de las condiciones de operación más desfavorables a las que dimensionar el sistema. Estas cargas se resolverán en un apartado posterior y estarán condicionadas por la climatología y la configuración de la edificación, sus características constructivas y el uso previsto. Una variable a considerar es el factor de utilización pues habitualmente la instalación funcionará intermitentemente, según demanda.

Las características del terreno desde el punto geológico e hidrogeológico, del que estamos especialmente interesados en sus variables térmicas más importantes, que se han estimado, o medido, tal y como se ha señalado en el apartado anterior. La climatología aparece de nuevo como una variable importante por el efecto sobre las temperaturas del terreno.

Las características del circuito, las condiciones de operación y demanda de la bomba de calor y los requerimientos de la bomba impulsora.

Las circunstancias de la parcela a trabajar que, en nuestro caso hacen que nos centremos, por las razones ya examinadas en el intercambiador vertical.

3.3.1 Dimensionamiento del intercambiador de calor enterrado

El primer aspecto a considerar es la determinación de la transferencia de calor entre la tubería y el terreno. Para el cálculo cabe utilizar métodos que incorporen supuestos simplificadores que lo faciliten. La primera simplificación sería reducir el problema a una dimensión adoptando la tubería como una línea infinita a temperatura constante. Esta fuerte simplificación ayuda, no obstante, al cálculo aproximado.

Una segunda simplificación afecta al propio medio conductor, el terreno asumiendo características de isotropía y homogeneidad respecto al valor medio de los valores de toda la longitud de la tubería.

El cálculo queda enormemente facilitado con la ayuda de programas comerciales de diseño de intercambiadores de calor enterrados. Por lo general estos programas se basan en los algoritmos derivados de las metodologías de cálculo contrastadas, en concreto, es un referente la metodología de diseño de la Internacional Ground Source Heat Pump Association (IGSHPA),

El método IGSHPA considera la fuente de calor como de una línea infinita (Teoría de la línea infinita de Kelvin) y fue desarrollado por Ingersoll y Plass. Entonces, el intercambiador de calor con el suelo es una fuente de calor con de pequeño radio y una longitud infinita, la cesión es radial y considerando el medio isótropo, el problema es esencialmente unidimensional.

Para realizar los cálculos hay que diferenciar el caso de intercambiadores verticales u horizontales para simular en uno u otro caso la estructura térmica del mismo. Al igual de si se dispone de un diseño abierto o cerrado. En nuestro caso lo aplicaremos posteriormente a un circuito cerrado con intercambiador vertical.

Las distintas temperaturas entre el suelo y el fluido que circula condicionarán el intercambio de calor, para dimensionar el intercambiador el proceso de cálculo habrá de determinar estas temperaturas: T_{max} y T_{min} del fluido circulante y del terreno, resistencias al flujo de calor, factor de utilización y la variable clave de longitud del intercambiador enterrado.

A continuación se esboza el método de cálculo de la norma alemana VDI 4640 y de IGSHA que implementado en programa de ordenador será el finalmente utilizado en la aplicación a la vivienda.

3.3.1.1 Método de cálculo VDI 4640

La norma alemana VDI 4640 Parte 2, diferencia entre intercambiadores de calor verticales de hasta 30kW para calefacción de potencia calorífica y otros mayores.

Los valores de extracción de calor definidos por la norma solo pueden utilizarse cuando se dan las siguientes circunstancias:

- Sólo se produce extracción de calor.
- La longitud del intercambiador de calor vertical, individual, debe estar comprendida entre 40 y 100 m (profundidad de sondeo).
- La distancia mínima entre dos sondeos debe ser:
 - o Al menos de 5 m para sondeos de 40 a 50 m de longitud.
 - o Al menos de 6 m para sondeos de 50 a 100 m de longitud.
- Tubos en forma de doble U con DN 20, 25 ó 32, o tubos coaxiales con diámetro mínimo de 60 mm.

Suministra tabulados los valores de distintos subsuelos y horas de operación

Horas de funcionamiento Subsuelo	1800 h	2400 h
	Capacidad térmica específica en W/m de sonda	
Valores orientativos generales:		
Subsuelo inapropiado (sedimento seco) ($\lambda < 1,5 \text{ W/mK}$)	25	20
Subsuelo normal de roca consolidada y sedimento saturado con agua ($\lambda < 3,0 \text{ W/mK}$)	60	50
Roca consolidada con elevada conductividad térmica ($\lambda < 3,0 \text{ W/mK}$)	84	70
Rocas aisladas:		
Gravilla, arena, secas	< 25	< 20
Gravilla, arena, con contenido en agua	65 - 80	55 - 85
Corriente freática fuerte a través de gravilla y arena, para instalaciones individuales	80 - 100	80 - 100
Arcilla, limo, húmedos	35 - 50	30 - 40
Piedra caliza (maciza)	55 - 70	45 - 60
Piedra arenisca	65 - 80	55 - 65
Magmatitas ácidas (p.ej. granito)	65 - 85	55 - 70
Magmatitas básicas (p.ej. basalto)	40 - 65	35 - 55
Gneis	70 - 85	60 - 70

Tabla 3.1: Tabla de valores de extracción de calor:

La norma evalúa la potencia térmica del intercambiador como:

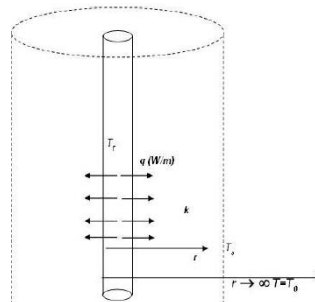
$$\text{Potencia Evaporador} = \frac{\text{Potencia Calefacción} \times (\text{COP} - 1)}{\text{COP}}$$

La longitud de la sonda:

$$\text{Longitud de la sonda} = \frac{\text{Potencia Evaporador}}{\text{Capacidad térmica específica}}$$

3.3.1.2 Método de cálculo IGSHPA

Se aplica el modelo de línea de calor infinita



La ecuación diferencial con las ecuaciones de contorno proporciona las soluciones:

Para la cesión de calor:

$$q = \frac{T_f - T_s}{R_t + R_s}$$

Para las resistencias térmicas de la tubería y el suelo:

$$R_t = \frac{\ln \frac{r_o}{r_i}}{2 \cdot \pi \cdot k_t}$$

$$R_s = R_s(t, r, \alpha_s)$$

Esta resistencia ha sido evaluada por ejemplo por Ingesoll y Plass en 1948

Un aspecto importante que a lo largo de la operación es habitual una variación de esta resistencia. En la práctica basta multiplicar por el factor de utilización

$$\text{Resistencia térmica suelo} : R_s^* = R_s \cdot Fu$$

El funcionamiento de la bomba altera progresivamente la temperatura en el entorno., especialmente si predomina alguna de las cargas y no está balanceado.

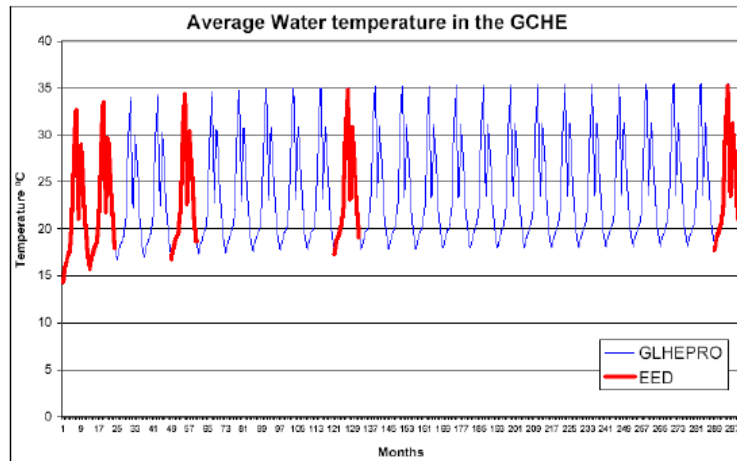
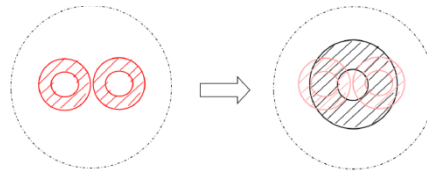


Figura 3.4: Simulación a 25 años, sobre la temperatura media de retorno del agua del intercambiador enterrado. Carga predominante de refrigeración. La figura ilustra cómo, en el caso de Valencia, la preponderancia de la carga de verano, hará que al cabo de 25 años la temperatura media de retorno del agua del intercambiador enterrado aumente en 2,6°C. Fuente: Proyecto GEOCOOL

La geometría real de los sondeos se simplifica adoptando una tubería de diámetro equivalente, se puede acceder a tabulaciones.



En el caso de varias tuberías se aplica la superposición de soluciones.

Como se indicó anteriormente la temperatura del terreno T_s a una profundidad y y a un tiempo, es función de la temperatura exterior en ese instante (Kusada & Achenbach 1965):

$$T_s(y,t) = T_m - A \cdot e^{-y \sqrt{\frac{\pi}{365\alpha}}} \cos\left[\frac{2\pi}{365}(t-t_0 - T_s \frac{y}{2} \sqrt{\frac{365}{\pi \cdot \alpha}})\right]$$

Siendo A la amplitud de oscilación en superficie, T_m la temperatura media, α la difusividad y t_0 el tiempo con la temperatura más baja del año.

Para obtener la longitud de intercambiador necesario para satisfacer la máxima carga de refrigeración se tomará el instante de máxima temperatura anual. Al revés para el caso de calefacción

$$T_{MIN} = T_m - A e^{-y \sqrt{\frac{\pi}{365\alpha}}} \quad , \quad T_{MAX} = T_m + A e^{-y \sqrt{\frac{\pi}{365\alpha}}}$$

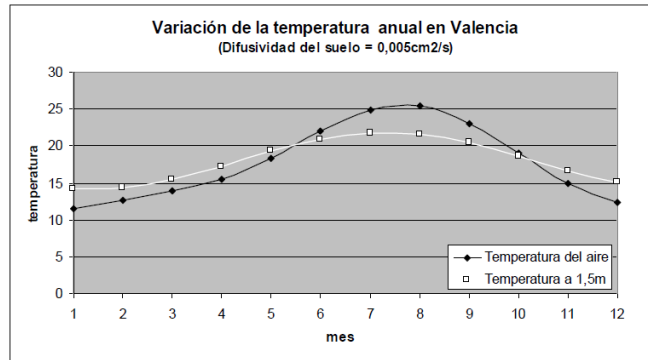


Figura 3.5: Fuente geocol

A efectos de modelado se considera la temperatura a lo largo del sondeo constante y sigue la gráfica de embudo que ya se comentó:

Es necesario elegir también las temperaturas de trabajo (T_{max} , T_{min}) del fluido del intercambiador de calor enterrado. Sabiendo que el intercambiador precisará de menor longitud cuanto más baja sea la temperatura en invierno (más alta en verano), mayor será la diferencia con la temperatura del suelo, y menor tendrá que ser el intercambiador enterrado para el mismo intercambio de calor, por lo que se reducen los costes de inversión. Pero por otra parte esto es inverso para el COP del sistema, por lo que el ahorro energético será mayor.

En el método se obtienen tanto las longitudes de intercambiador para dar satisfacción a la máxima carga fde calefacción a T_{min} del terreno y la de refrigeración a T_{max} del terren. En calefacción la $P_{intercambiada}$ es la calorífica de la bomba de calor y en refrigeración la disipada en el condensador de la máquina

$$\Delta L_c = \frac{P_f}{T_{MIN} - T_{fc}} (R_t + R_s \cdot Fu_c)$$

$$\Delta L_R = \frac{P_c}{T_{fR} - T_{MAX}} (R_t + R_s \cdot Fu_R)$$

Para calcular el intercambiador de calor usaremos en la aplicación el programa Geo-Ciatesa,

3.4 CÁLCULO DE LA CARGA TÉRMICA

Existen diversos procedimientos de cálculo implementados en programas de ordenador para el modelado energético tales como eQuest, Energy10, DOE- 2, EnergyPlus, CE3X del Ministerio de Industria etc. En la fase de aplicación se utilizará uno de estos programas.

A efectos de revisar su funcionamiento y la lógica del cálculo se revisará uno de estos métodos para la calefacción, en que cada estancia de la edificación se analiza y valoran los flujos de calor a partir de sus características constructivas, equipamientos y uso específico. De forma agregada se obtiene la carga y demanda térmica del edificio.

Método de cálculo de las cargas internas

En su publicación HVAC Fundamentals de 2009 ASHRAE expone el Método de la Función de Transferencia (TMF). Este método estima las cargas de calentamiento hora por hora y se aplica para el cálculo de flujo unidimensional de transferencia de calor en paredes y techos. La ASHRAE tabuló las variables de decremento efectivos de calor para muy diversos tipos de paredes y de techo, que son utilizados como coeficientes de la función de transferencia.

Los cálculos de potencia térmica se calculan para la situación más desfavorable (según las tablas UNE 100014-84). Para calefacción se trataría de temperatura mínima, sin radiación solar y sin aportaciones de personas, luces y electrodomésticos. En calefacción las cargas son pérdidas de calor, al exterior, excepto en el caso de las cargas internas. Se puede desglosar de la siguiente manera:

Ganancias térmicas instantáneas:

Cálculo para cada mes y cada hora de la ganancia o pérdida de calor instantánea debida a cada uno de los siguientes elementos:

• Transmisión paredes y techos

Cerramientos opacos al exterior, excepto los que no reciben los rayos solares. La ganancia instantánea para cada hora se calcula usando la siguiente función de transferencia (ASHRAE):

$$Q_{GAN,t} = A \times \left[\sum_{n=0} b_n \times (t_{sa,t-n\Delta}) - \sum_{n=1} d_n \times \frac{(Q_{GAN,t-n\Delta})}{A} - t_{ai} \times \sum_{n=0} c_n \right]$$

$Q_{GAN,t}$ = Ganancia de calor sensible en el ambiente a través de la superficie interior del techo o pared (w)

A = Área de la superficie interior (m²)

$T_{sa,t-n\Delta}$ = Temperatura sol aire en el instante $t-n\Delta$

Δ = Incremento de tiempos igual a 1 hora.

t_{ai} = Temperatura del espacio interior supuesta constante
 b_n, c_n, d_n = Coeficientes de la función de transferencia según el tipo de cerramiento.
 La temperatura sol-aire sirve para corregir el efecto de los rayos solares sobre la superficie exterior del cerramiento.

$$t_{sa} = t_{ec} + \alpha \times \frac{I_t}{h_0} - \varepsilon \times \frac{\Delta R}{h_0} \times \cos(90^\circ - \beta)$$

t_{sa} = Temperatura sol-aire para un mes y una hora dadas ($^\circ\text{C}$)
 t_{ec} = Temperatura seca exterior corregida según mes y hora ($^\circ\text{C}$)
 I_t = Radiación solar incidente en la superficie (w/m^2)
 h_0 = Coeficiente de convección exterior ($\text{w}/\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$)
 α = Coeficiente de absorción a la radiación de la pared exterior (varia con el color)
 β = Ángulo de inclinación del cerramiento respecto de la vertical (horizontales 90°).
 ε = Emitancia hemisférica de la superficie.
 ΔR = Diferencia de radiación superficie/cuerpo negro (w/m^2).

• Transmisión excepto paredes y techos

Cerramientos al interior

Ganancias instantáneas por transmisión en cerramientos opacos interiores y que no están expuestos a los rayos solares.

$$Q_{GAN,t} = K \times A \times (t_l - t_{ai})$$

$Q_{GAN,t}$ = Ganancia de calor sensible en el instante t (W)
 K = Coeficiente de transmisión del cerramiento ($\text{W}/\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$)
 A = Área de la superficie interior (m^2)
 t_l = Temperatura del local contiguo ($^\circ\text{C}$)
 t_{ai} = Temperatura del espacio interior supuesta constante ($^\circ\text{C}$)

Acrisolamientos al exterior

Ganancias instantáneas por transmisión en superficies acristaladas al exterior

$$Q_{GAN,t} = K \times A \times (t_{ec} - t_{ai})$$

$Q_{GAN,t}$ = Ganancia de calor sensible en el instante t (W)
 K = Coeficiente de transmisión del cerramiento ($\text{W}/\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$)
 A = Área de la superficie interior (m^2)
 t_{ec} = Temperatura exterior corregida ($^\circ\text{C}$)
 t_{ai} = Temperatura del espacio interior supuesta constante ($^\circ\text{C}$)

Puertas al exterior

En el caso de puertas al exterior, hay que distinguir según orientación:

$$Q_{GAN,t} = K \times A \times (t_l - t_{ai})$$

$Q_{GAN,t}$ = Ganancia de calor sensible en el instante t (W)
 K = Coeficiente de transmisión del cerramiento ($\text{W}/\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$)

A = Área de la superficie interior (m^2)

t_{ai} = Temperatura del espacio interior supuesta constante ($^{\circ}C$)

t_l = Para orientación Norte: Temperatura exterior corregida ($^{\circ}C$)

Excepto orientación Norte: Temperatura sol-aire para el instante t ($^{\circ}C$)

• Calor interno

Ocupación (personas)

Calor generado por las personas que se encuentran dentro de cada local. Este calor es función principalmente del número de personas y del tipo de actividad que están desarrollando. Los ocupantes aportan carga sensible y carga latente.

$$Q_{GANs,t} = Q_s \times n \times 0'01 \times Fd_t$$

$Q_{GANs,t}$ = Ganancia de calor sensible en el instante t (w)

Q_s = Ganancia sensible por persona (w). Depende del tipo de actividad

n = Número de ocupantes

Fd_t = Porcentaje de ocupación para el instante t (%). Su valor ronda el 75%.

Se considera que 67% del calor sensible se disipa por radiación y el resto por convección.

$$Q_{GANl,t} = Q_l \times n \times 0'01 \times Fd_t$$

$Q_{GANl,t}$ = Ganancia de calor latente en el instante t (w)

Q_l = Ganancia latente por persona (w). Depende del tipo de actividad

n = Número de ocupantes

Fd_t = Porcentaje de ocupación para el instante t (%). Su valor ronda el 75%.

Los valores de la ganancia sensible y latente por persona, dependen del tipo de actividad que esté realizando, valor que está íntimamente relacionado con el tipo de utilización de la zona.

Alumbrado

Calor generado por los aparatos de alumbrado que se encuentran dentro de cada local. Este calor es función principalmente del número y tipo de aparatos.

$$Q_{GAN,t} = Q_s \times n \times 0'01 \times Fd_t$$

$Q_{GAN,t}$ = Ganancia de calor sensible en el instante t (W)

Q_s = Potencia por luminaria (W). Para fluorescente se multiplica por 1'25.

n = Número de luminarias.

Fd_t = Porcentaje de funcionamiento para el instante t (%).

Para nuestro caso de estudio se ha considerado una potencia de iluminación, igual para toda la vivienda y de valor 15 W/m². El porcentaje de funcionamiento tomado es de un 10%.

Aparatos eléctricos

Calor generado por los aparatos exclusivamente eléctricos que se encuentran dentro de cada local. Este calor es función principalmente del número y tipo de aparatos del que se disponga en cada habitación.

$$Q_{GAN,t} = Q_s \times n \times 0'01 \times Fd_t$$

$Q_{GAN,t}$ = Ganancia de calor sensible en el instante t (w)

Q_s = Ganancia sensible por aparato (w). Depende del tipo.

n = Número de aparatos.

Fd_t = Porcentaje de funcionamiento para el instante t (%). El porcentaje de funcionamiento tomado es de un 10%.

Se considera que el 60% del calor sensible se disipa por radiación y el resto por convección.

Aparatos térmicos

Calor generado por los aparatos térmicos que se encuentran dentro de cada local. Este calor es función principalmente del número y tipo de aparatos.

$$Q_{GANS,t} = Q_s \times n \times 0'01 \times Fd_t$$

$Q_{GANS,t}$ = Ganancia de calor sensible en el instante t (w)

Q_s = Ganancia sensible por aparato (w). Depende del tipo.

n = Número de aparatos.

Fd_t = Porcentaje de funcionamiento para el instante t (%). El porcentaje de funcionamiento tomado es de un 10%.

Se considera que el 60% del calor sensible se disipa por radiación y el resto por convección.

$$Q_{GANI,t} = Q_l \times n \times 0'01 \times Fd_t$$

$Q_{GANI,t}$ = Ganancia de calor sensible en el instante t (w)

Q_l = Ganancia sensible por aparato (w). Depende del tipo.

n = Número de aparatos

Fd_t = Porcentaje de funcionamiento para el instante t (%).

Aire exterior

Ganancias instantáneas de calor debido al aire exterior de ventilación.

$$Q_{GAN,t} = 0'34 \times f_a \times V_{aes} \times 0'01 \times Fd_t \times (t_{ec} - t_{ai})$$

$Q_{GAN,t}$ = Ganancia de calor sensible en el instante t (w)

f_a = Coeficiente corrector por altitud geográfica.

V_{aes} = Caudal de aire exterior (m³/h).

t_{ec} = Temperatura seca exterior corregida (°C).

t_{ai} = Temperatura del espacio interior supuesta constante (°C)

Fd_t = Porcentaje de funcionamiento para el instante t (%)

Se considera que el 100% del calor sensible aparece por convección

$$Q_{GANI,t} = 0'83 \times f_a \times V_{aes} \times 0'01 \times Fd_t \times (X_{ec} - X_{ai})$$

$Q_{GANI,t}$ = Ganancia de calor sensible en el instante t (w)

f_a = Coeficiente corrector por altitud geográfica.

V_{aes} = Caudal de aire exterior (m^3/h).

X_{ec} = Humedad específica exterior corregida (gr agua/kg aire).

X_{ai} = Humedad específica del espacio interior (gr agua/kg aire).

Fd_t = Porcentaje de funcionamiento para el instante t (%).

El caudal de aire de ventilación se obtiene en función del uso del local, de su superficie y del número de ocupantes, aplicando la siguiente tabla del Documento Básico HS3 del Código Técnico de la Edificación.

		Caudal de ventilación mínimo exigido q_v en l/s		
		Por ocupante	Por m^2 útil	En función de otros parámetros
Lo- ca- les	Dormitorios	5		
	Salas de estar y comedores	3		
	Aseos y cuartos de baño			15 por local
	Cocinas		2	50 por local ⁽¹⁾
	Trasteros y sus zonas comunes		0,7	
	Aparcamientos y garajes			120 por plaza
	Almacenes de residuos		10	

(1) Este es el caudal correspondiente a la ventilación adicional específica de la cocina (véase el párrafo 3 del apartado 3.1.1).

Tabla 3.2: Ventilación mínima exigida

Infiltraciones

El caudal de aire de infiltración es variable según la estanqueidad de las puertas y ventanas, la porosidad de las paredes del edificio, su altura, escaleras, dirección y velocidad del viento, y caudales relativos de aire de ventilación y extracción. Muchos de estos factores no pueden ser calculados con exactitud y deben ser objeto de una estimación más o menos empírica.

Los valores de los suplementos por orientación: Norte +15%, Sur 0%, Este +10%, Oeste +5%.

La pérdida total será la suma de las pérdidas debidas a los cerramientos verticales y horizontales y a las pérdidas de renovación e infiltración más la carga latente de los caudales de infiltración y renovación. En cuanto a las ganancias se considerará un pequeño porcentaje del calor aportado por la iluminación y por aparatos eléctricos.

3.5 ELECCIÓN DE ELEMENTOS DEL SISTEMA.

3.5.1 Elección de la bomba de calor

El reglamento sobre instalaciones térmicas fija la elección en función de la capacidad térmica y el trabajo eléctrico invertido.

$$\text{COP}_{\text{calefacción}} = \frac{Q_{\text{calefacción}}}{W_{\text{calefacción}}}$$

$$Q_{\text{absorbido}} = Q_{\text{calefacción}} - W_{\text{calefacción}}$$

$$\text{COP}_{\text{refrigeración}} = \frac{Q_{\text{refrigeración}}}{W_{\text{refrigeración}}}$$

$$Q_{\text{inyectado}} = Q_{\text{refrigeración}} + W_{\text{refrigeración}}$$

Con esta elección podemos leer en las tablas de características el caudal intercambiado y las temperaturas de operación.

3.5.2 Elección del fluido circulante

Ya se ha comentado anteriormente que el fluido circulante por el intercambiador de calor enterrado es agua o agua con anticongelante. Esto es así por el riesgo de congelación que se produce en el evaporador si hay un elevado funcionamiento en calefacción, y también por temperaturas frías de terreno. Por tanto la elección del fluido dependerá de factores como: punto de congelación, la conductividad térmica y viscosidad que influyen en la transferencia de calor así como el intento de minimizar las caídas de presión por rozamientos, coste, etc. Hay que atender igualmente a la protección contra la corrosión de los materiales que constituyen el circuito cerrado por el que circula el fluido. Por último es necesario que sea biodegradable para no contaminar las aguas subterráneas en caso de fuga.

Los anticongelantes más utilizados son los que se incluyen en la siguiente Tabla.

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

Tabla 3.3. Medios de transferencia térmica

3.5.3 Elección de los tubos

Mecánicamente se precisa flexibilidad, durabilidad, resistencia, la posibilidad de uniones fuertes en empalmes, etc. Todas estas prestaciones se encuentran tanto en el polietileno (PE) como en el polibutileno (PB) que son efectivamente los más comúnmente empleados.

Térmicamente, respecto a los rangos de temperaturas a soportar, en modo calefacción se alcanzan hasta 45-55 °C en el condensador y de 5-15 °C, en el evaporador circulando por la sonda para su calentamiento. En refrigeración de 7-12 °C en el evaporador, y en intercambiador enterrado el fluido circula entre 25-35 °C.

Estas temperaturas no suponen ningún compromiso a la estabilidad y durabilidad de los materiales.

Para la elección del tubo se necesita definir variables adicionales. La primera de ellas a considerar es el grosor de pared que está tabulada en función de las presiones a soportar (SCH o SDR). En segundo lugar el diámetro a elegir ha de contar con dos factores: el flujo de del fluido y el movimiento del mismo que garantice la mayor eficacia en la transferencia energética. Dos factores contrapuestos exigen llegar a un punto de equilibrio: por una parte ha de ser un régimen turbulento en el interior del tubo para facilitar el intercambio térmico a través de las paredes, por otra parte esta mezcla fluida turbulenta supone una pérdida de carga mayor en el tubo lo que implica mayor potencia de la bomba de recirculación.

La turbulencia es imprescindible. Si atendemos al condición física para ello el número de Reynolds ha de cumplir

$$Re = \frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot \nu \cdot D} > 2.300$$

Para un determinado caudal, Q el caudal (m³/s), D diámetro del tubo (m) y ν la viscosidad cinemática (m²/s).

3.5 4 Selección de la bomba de circulación

Esta bomba de circulación, impulsora, debe satisfacer los caudales y velocidades de circulación del fluido por el intercambiador de calor enterrado. Debe cuidarse la garantía de satisfacer los requerimientos de las caídas de presión. A este respecto son importantes las trayectorias seguidas por el fluido según los diversos diseños y cuidar el ramal del intercambiador más desfavorable.

Muchos modelos de bombas de calor para estas aplicaciones llevan ya incorporada una bomba de circulación para el bucle enterrado.

3.6. EJECUCIÓN DEL INTERCAMBIADOR DE CALOR VERTICAL

3.6.1 Perforaciones

Disposicion:

Situación respecto al edificio, distancia entre sondeos, profundidad, diámetro de perforación.

De la fase de dimensionamiento surgen los datos referidos a las longitudes del intercambiador y su número, si es necesario hacer más de uno.

Las profundidades requeridas ha de estar en consonancia con las capacidades de los equipos de perforación que se utilicen y por las disposiciones normativas de legislación minera y de protección de aguas subterráneas. En España, suelen estar comprendidas entre 100 y 200 m; en otros países, como Francia y Alemania, los sondeos de más de 100 m de profundidad están sometidos al Código Minero y a la Ley de Minas, respectivamente, y precisan de una concesión administrativa.



Figura 3.6: Captación vertical Fuente (Argadi Ingenieros)

Maquinaria y elementos para la perforación:

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

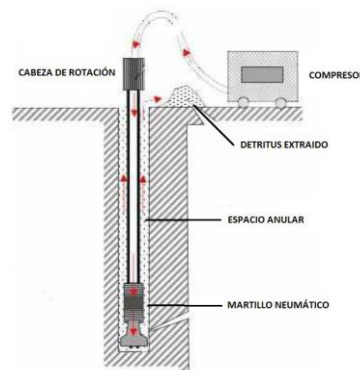
Los equipos de perforación deben adaptarse a las circunstancias del entorno de perforación, en ocasiones viviendas ya construidas con accesos limitados. Por ello se suelen utilizar de pequeñas dimensiones, montados sobre orugas con zapatas de goma, y con un ancho no mayor de 2m. Estos tamaños facilitan su uso en excavaciones de edificios, descendiendo si es preciso mediante grúas.

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

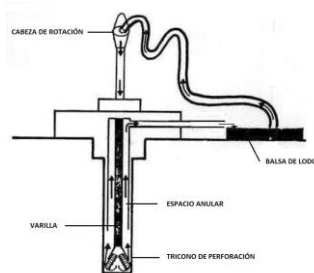
Se pueden utilizar diferentes sistemas de perforación en función de las características del terreno.

Técnicas de perforación:

Rotopercusión con martillo en cabeza o con martillo en fondo, con circulación directa de aire, agua y espumante; se usan en terrenos duros, competentes y estables, como pizarras, granitos, calizas, etc.,...



Rotación con tricono o con corona de diamante y circulación directa de lodos.



Son más usados en arenas y gravas, terrenos más inestables, en los que cabe la posibilidad de derrumbamiento en las paredes del sondeo. En sistema, el circuito de fluido de perforación es idéntico al sistema de perforación a rotopercusión pero el fluido empleado es lodo. De la balsa se inyectan los lodos con una bomba a través del varillaje. El lodo refrigera la herramienta de corte y hace ascender el detritus cortado. Una función muy importante que realizada el lodo en este tipo de sistema de perforación, es la de crear una película en la pared del sondeo que ayuda a mantenerla estable, evitando posibles derrumbes.

Debido a la recirculación del lodo, se va contaminando y perdiendo, sus propiedades. Es necesario que para desarrollar su controlar durante toda la perforación, su densidad, viscosidad y PH. Cabe utilizar aditivos para mantener sus propiedades más tiempo.

Entubación auxiliar

En los primeros metros de la perforación es importante introducir una tubería metálica para estabilizar la primera capa del subsuelo y facilitar la perforación. Es

conveniente que la tubería metálica sea de la menor longitud posible con tal de facilitar su posterior extracción.

En terrenos duros que se usa rotopercusión, los mismos equipos facilitan el revestir con una tubería recuperable los primeros 15 ó 20 m de terreno alterado, si fuese necesario.

Una vez realizada la perforación a la profundidad deseada, el entubamiento empleado puede ser extraído.



Figura 3.7: Perforadora con doble unidad de rotación y manguera para descarga de detritos en un contenedor. (Fuente: Comacchio).

3.6.2 Colocación de las sondas

Maquinaria y técnica de colocación, composición, diámetro, presión, comprobaciones, pruebas

El material más usado para los tubos de las sondas geotérmicas es el polietileno extruido, sin costuras, de alta densidad por las características ya enunciadas anteriormente.

Se suministran en rollos, con las piezas en U que constituyen los pies de sonda soldados por electrofusión, los diámetros exteriores están normalizados a 16, 25, 32 y 40 mm, y con espesores de pared adaptados a la presión de trabajo. Las longitudes son estándar y, como es lógico, permiten alcanzar la longitud total de un sondeo desde el fondo hasta la boca.

Antes de su instalación es necesario revisar, el marcado, la documentación técnica, el estado físico tras el transporte, etc. también es imprescindible una prueba

de estanqueidad, con aire o con agua, y una prueba de caudal para comprobar que no hay resistencias anómalas en su interior. La perfecta elección y estado de los tubos ha de garantizarse por la difícil modificación tras la instalación.

Los extremos de la tubería deben ser protegidos por tapones que vienen de fábrica para evitar contaminación del líquido circulante y poder realizar las pruebas de presión. Las sondas poseen de un dispositivo soldado térmicamente en su extremo que realiza la función de retorno del fluido refrigerante (cambio de dirección). y protección durante el descenso de la sonda.



Figura 3.8: Pies de sondas geotérmicas y espaciadores. (Fuente: BRGM).

Antes de su introducción en el sondeo se deben rellenar con agua, o con agua y anticongelante, para evitar aplastamientos en los tubos por diferencias de presión entre el interior y exterior de los tubos si existiesen lodos o agua en el sondeo, o en la cementación final.



Figura 3.9: Mecanismos para realizar la bajada de sonda al interior del pozo de forma manual.

El descenso al fondo del sondeo requiere de un lastre colgado en el pie de sonda que quedará perdido en el fondo.

La cementación, que debe hacerse de abajo arriba, requiere de un tubo de introducción. Viene a utilizarse tubo de polietileno de 25 mm de diámetro y que debe bajarse cuidado. El descenso requiere de pequeñas piezas que se van colocando regularmente: espaciadores, centradores y abrazaderas de plástico, para que los tubos queden lo más verticalmente posible y separados unos de otros.

Al llegar al fondo se corta el sobrante dejando un metro por encima de la superficie del suelo debidamente protegido con un tapón.

Una vez introducida la sonda se realiza una prueba de presión. Esta prueba consiste en mantener durante mínimo una hora la sonda a una presión 1.5 veces la presión de trabajo con un mínimo de 6 bar.



Figura 3.10: Introducción de una sonda geotérmica doble con un slangman.

(Fuente: EDASU).

3.6.3. Relleno de las sondas

Cementación: Maquinaria, técnica de inyección, composición de la lechada.

La cementación ha de lograr el equilibrio mecánico del conjunto, la estabilización del terreno y el adecuado contacto térmico entre los tubos de la sonda y el terreno. El cierre del sondeo desde la superficie tiene que evitar la entrada de contaminantes exteriores, y sellar los acuíferos que hayan podido ser atravesados durante la perforación. La preservación de la calidad de las aguas subterráneas implica no alterar el flujo de las aguas subterráneas y evitar que si se han cortado varios acuíferos se produzca una intrusión de unos en otros.

Hay que rellenar el espacio anular que queda entre las tuberías del intercambiador y las paredes del hueco del sondeo. Este relleno ha de hacerse bien rellena con arena sílicea calibrada o se cementa con una suspensión de cemento, bentonita y arena sílicea al objeto de lograr el buen contacto térmico. La cementación es la más utilizada pues asegura uniones estables, impermeables y duraderas de la sonda geotérmica al terreno.

La cementación se realiza desde la parte más baja del sondeo, inyectando el mortero a presión, para que se rellene el espacio anular en sentido ascendente, evitando así la existencia de aire que disminuiría la transmisión de calor.

Una vez cementado el sondeo, es necesario la realización ensayo de presión definitivo para comprobar que no existen fugas, y poder garantizar que su durabilidad, y que en condiciones normales de trabajo, la sonda tenga una vida útil de 50 años.

Cabe tener en cuenta el nivel del relleno, y aplicar de nuevo si este baja hasta quedar en el nivel deseado (1 metro por debajo del suelo).

3.7 REVISIÓN DE LA NORMATIVA DE APLICACIÓN A LOS PROYECTOS DE INSTALACIONES TÉRMICAS

Las instalaciones térmicas en edificios están reguladas por disposiciones de diverso rango normativo, que deben tenerse en cuenta a efectos de la corrección técnica del proyecto que se acometa. Estas disposiciones reglamentarias procuran la eficiencia del diseño, la seguridad del mismo, el cumplimiento de las normativas de sostenibilidad ambiental, etc.

3.7.1 Normativa básica

Real Decreto 413/2014, de 6 de junio, por el que se regula la actividad de producción de energía eléctrica a partir de fuentes de energía renovables, cogeneración y residuos.

Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios (R.I.T.E.) y sus correspondientes I.T.E. (RD 1027/2007 de 20 de julio, BOE del 29 de agosto de 2007. Versión consolidada del Real Decreto 1027/2007, de 20 de julio, (BOE 9-09-2013)

Real Decreto 314/2006, de 17 de marzo de 2006, por el que se aprueba el Código Técnico de la Edificación. Texto refundido con modificaciones conforme a la Ley 8/2013, de 26 de junio, de rehabilitación, regeneración y renovación urbanas).

Reglamento Electrotécnico de Baja Tensión. (Decreto 842/2002 de 2 de agosto de 2002).

Real Decreto 2060/2008, Reglamento de equipos a presión publicado el 5 de febrero de 2009

Ley de Protección del Ambiente Atmosférico (LPAA).

RD 865/2003, de 4 de Julio, por el que se establecen los criterios higiénico-sanitarios para la prevención y control de la legionelosis.

RD 863/1995 Reglamento General de Normas Básicas de Seguridad Minera y sus ITC correspondientes.

Normas UNE de aplicación específica.

Ordenanzas Municipales del Ayuntamiento.

Y demás legislación vigente concordante o complementaria con la misma.

A esta legislación básica hay que sumar la específica según el caso:

Los sistemas abiertos no poseen un marco regulador propio pero están sometidos a la ley de aguas:

Real Decreto Legislativo 1/2001, de 20 de julio, por el que se aprueba el texto refundido de la Ley de Aguas.

Requiere concesión administrativa del aprovechamiento por la extracción del agua. “Otros usos industriales”. Climatización. Refrigeración. Así como autorización administrativa de vertido (renovable cada 5 años) para la inyección del agua en el acuífero.

Los **sistemas cerrados** no poseen tampoco un marco regulador propio.

Si se considera dentro de la Ley de Minas, al tratarse de “escasa” importancia solo estaría sometido a la autorización del proyecto de perforación por parte de la autoridad minera en aplicación de las normas de seguridad minera.

3.7.2 Exigencia de eficiencia energética

La Directiva Europea de Eficiencia Energética en Edificación, 2002/91/CE y su traslado a la legislación española ha hecho aparecer nuevos requerimientos en el sector de la edificación en lo relativos al consumo de energía, iluminación, aislamiento, calefacción, climatización, agua caliente sanitaria, certificación energética de edificios o utilización de la energía solar.

Actualmente existen varios los documentos legales puestos en marcha por la Administración para dar respuesta a estos nuevos requerimientos:

Aprobación Código Técnico de Edificación

Modificación Reglamento de Instalaciones Térmicas en Edificios (RITE)

Actualización Normativa de Aislamiento Térmico NBE-CT-79

Certificación Energética de edificios

Plan de Acción de Ahorro y Eficiencia Energética en España

Plan de Fomento de las Energías Renovables

La Ley de ordenación de la edificación (LOE), ley 38/1999 de 5 de noviembre, Establece por medio del marco normativo de Código Técnico de la edificación (CTE) tres bloques de exigencias básicas referidas a la funcionalidad, la seguridad y la habitabilidad de las edificaciones.

Dentro del apartado de habitabilidad el Código Técnico de la Edificación incluye el documento básico, el DB HE Energía, donde se establecen las exigencias en eficiencia energética y energías renovables que deberán cumplir los nuevos edificios y los que sufran rehabilitación.

Dichas exigencias básicas son:

- Limitación de la demanda energética
- Rendimiento de las instalaciones térmicas
- Eficiencia Energética de las instalaciones de iluminación
- Contribución solar mínima de agua caliente sanitaria
- Contribución fotovoltaica mínima de energía eléctrica

Estas dos últimas contribuciones quedan sustituidas por la aplicación de energía geotérmica

Para la correcta aplicación de esta exigencia de diseño y dimensionamiento de la instalación térmica, marcada por la IT 1.2 del R.I.T.E. (RD 1027/2007), se puede optar por el procedimiento simplificado de verificación, que consiste en la siguiente secuencia de verificaciones: Cumplimiento de la exigencia de eficiencia energética en la generación de calor y frío de la IT 1.2.4.1. Cumplimiento de la exigencia de eficiencia energética en las redes de tuberías y conductos de calor y frío de la IT 1.2.4.2. Cumplimiento de la exigencia de eficiencia energética de control de instalaciones térmicas de la IT 1.2.4.3. Cumplimiento de la exigencia de contabilización de consumos de la IT 1.2.4.4. Cumplimiento de la exigencia de recuperación de energía de la IT 1.2.4.5. Cumplimiento de la exigencia de aprovechamiento de energías renovables IT 1.2.4.6. Cumplimiento de la exigencia de limitación de utilización de energía convencional de la IT 1.2.4.7.

En la fase de aplicación al describir la misma y los aparatos a instalar se satisfarán las mismas, para dar cumplimiento a las prescripciones contempladas en el Reglamento de Instalaciones Térmicas en Edificios, R.I.T.E., que hace un especial hincapié en la reducción del consumo energético haciendo uso racional de las fuentes energéticas consideradas.

3.7.3 Aprovechamiento de energías renovables.

Según IT 1.2.4.6 sobre Contribución solar para la producción de agua caliente sanitaria, en los edificios nuevos con previsión de demanda de agua caliente sanitaria una parte de las necesidades energéticas térmicas derivadas de esa demanda se cubrirá, mediante la incorporación en los mismos de sistemas de captación, almacenamiento y utilización de energía solar, adecuada a la radiación global de su emplazamiento y a la demanda total de agua caliente del edificio.

Según apartado 1.1 Ámbito de aplicación, del DB del CTE sobre Contribución solar mínima de agua caliente sanitaria, este es aplicable a los edificios de nueva construcción en los que exista una demanda de agua caliente sanitaria, sin embargo, esta contribución solar mínima determinada podrá disminuirse justificadamente cuando se cubra ese aporte energético de agua caliente sanitaria mediante el aprovechamiento de energías renovables, por tanto, al proyectarse una instalación de geotermia, no es necesaria la realización de un sistema de captación de energía solar para la producción de ACS

3.7.4 Limitaciones en sondeos para circuitos cerrados

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

De cimentaciones, pozos, fosas sépticas y saneamientos: 2 ó 3 m, según países.

De conducciones enterradas no hidráulicas: 0,7 ó 1,5 m, según países.

De árboles y límites de parcela: 5 m.

Entre sondeos geotérmicos: como referencia, 6 m en Alemania ó 10 m en Francia, para sondeos de hasta 100 m de profundidad.

4.- LA INSTALACIÓN DOMÉSTICA EN LA VIVIENDA RESIDENCIAL OBJETO DEL TRABAJO

4.1.- Descripción de la vivienda objeto de estudio.

La vivienda de estudio se encuentra en el término municipal de Paterna (Valencia). Se trata de una residencia unifamiliar emplazada en la urbanización “Gran Campolivar” que consta de 67 casas similares. El año de construcción fue el año 2003. La urbanización se sitúa en el distrito y barrio residencial de Campolivar.



Figura 4.1: Vista área de la urbanización “Gran Campolivar” la flecha señala la casa de estudio.

En lo referido a la tipología del terreno se pueden apreciar grandes desniveles por todo el distrito. Incluso la calle esta inclinada por lo que las diferentes parcelas se encuentran a diferente cota.



Figura 4.2: Situación de la zona de estudio en un mapa. (Fuente: Google maps).

La casa se compone de 3 pisos totalmente habitables y su distribución es la que sigue:

Piso 0: se sitúa a la altura de la calle y está formada por un salón, una cocina, un aseo y un dormitorio. En la parte no cubierta de la casa diferenciamos varias zonas un jardín delantero con un garaje al lado y un jardín trasero.



Figura 4.3 piso "0"

Piso 1: Al subir las escaleras nos encontramos con 3 dormitorios uno de ellos más grande y dos baños. También posee partes externas como el piso anterior, en este caso dos terrazas, una en un dormitorio pequeño y otra en el dormitorio más grande.

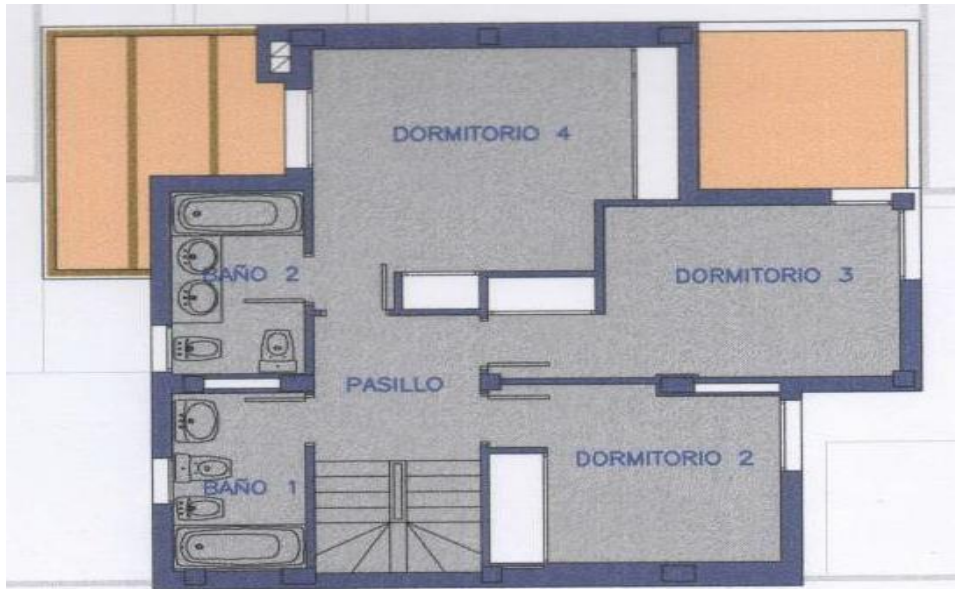


Figura 4.4: piso "1"

Piso 2: En este piso nos encontramos con una buhardilla, es una sola habitación más baja que el resto, en la cual los techos están inclinados debido a la forma de la cubierta. Finalmente, como se puede observar en la imagen, posee una última terraza.



Figura 4.5: piso "2"

A continuación se tabula la distribución de la vivienda dividida por pisos y también por diferentes habitaciones, con su respectiva superficie despreciando las zonas que no vayan a entrar en el estudio. Es decir las zonas al aire libre como son los jardines el garaje y las tres terrazas.

Pisos	Zonas	Superficie (m ²)
Piso 0:	Cocina	14
	Salón	29,75
	Baño	4,5
	Dormitorio	9
	Hueco escalera	4
	Total:	61
Piso 1:	Dormitorio 1	10,5
	Dormitorio 2	11,125
	Dormitorio 3	13,5
	Baño 1	5,25
	Baño 2	5,25
	Hueco escalera	4
	Total	49,625
Piso 2	Buhardilla	41
	Hueco escalera	4
	Total	45
Superficie total de estudio		159,625

Tabla 4.1: de las distintas habitaciones con sus superficies

4.2 Calculo de las cargas térmicas.

Para el estudio de la calificación energética de la vivienda se debe realizar con un programa informático, el cual haya superado los test de validación y sea reconocido por el Ministerio de Industria, Energía y Turismo y también por el Ministerio de Fomento para la realización de certificados energéticos para edificios ya existentes. En nuestro caso usaremos el programa Ce3x descargado de la página web del Ministerio de Industria.

Para el cálculo hemos utilizado los planos y la distribución por superficie de la vivienda vistos en el apartado anterior. Así pues nos encontramos con tres plantas con una superficie total de 159,625 m² cuyo informe de eficiencia energética se explica en el anexo 1. Los resultados finales son los siguientes:

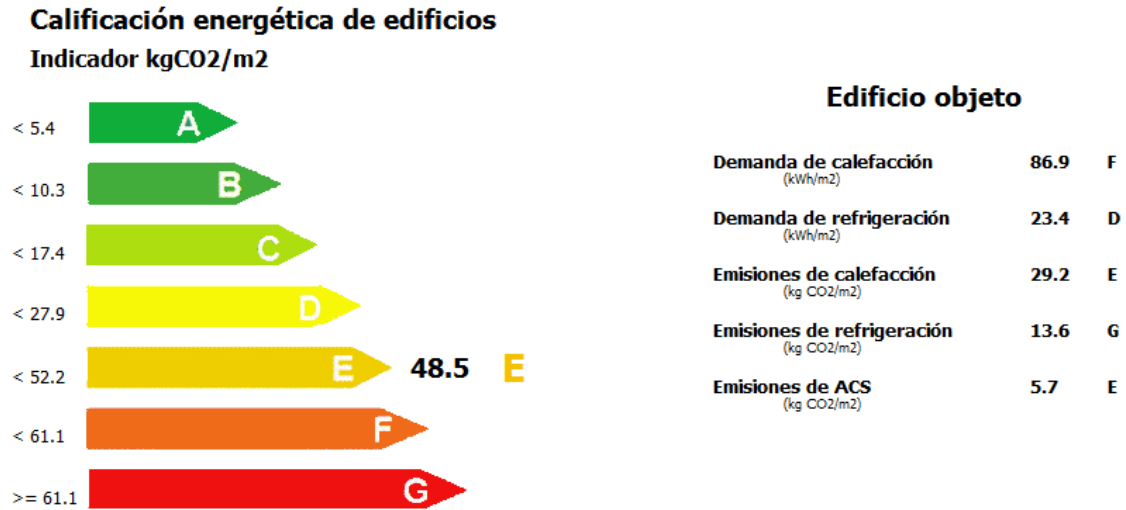


Figura 4.6: Resultados del programa Ce3x para la vivienda unifamiliar escogida

Como se puede observar, nos encontramos con una calificación energética de E y una demanda de calefacción de 86,9 Kw/ m² (calificación energética F) y una demanda de refrigeración de 23,4 Kw/ m² (calificación D). Si esta demanda la multiplicamos por la superficie de toda la vivienda (160 m²), tenemos para estas condiciones la siguiente tabla:

Demanda	Kwh/ m ² año	Superficie (m ²)	Kwh/año
calefacción	86,9	160	13.904
refrigeración	23,4	160	3.744

Tabla 4.2: de necesidades energéticas

Para obtener la potencia final de demanda anual y así poder dimensionar la bomba calorífica tenemos que concretar cuantas horas al año se necesitara de esta. Para ello hacemos una estimación y obtenemos una utilización de la calefacción en 4 meses al año (Noviembre, Diciembre, Enero y Febrero) durante unos 25 días por mes y un total de 6 horas al día lo que hace un total de 600 horas al año. Lo calculamos para la calefacción al ser la más desfavorable.

Potencia	Kw h/año	horas	Potencia final (Kw)
calefacción	13.904	600	23,2

Tabla 4.3: de potencia necesaria para la vivienda

4.3 Elección del fluido refrigerador y de tuberías.

Para la elección del fluido nos basaremos en lo recogido en la guía técnica de diseño de sistemas de bombas de calor geotérmicas.

Como se sabe el fluido circulante por el intercambiador de calor enterrado es agua o agua con anticongelante (si se prevé que el intercambiador geotérmico puede tener riesgo de congelación).

La elección de uno u otro fluido dependerá de distintos factores como pueden ser:

- Características de transferencia de calor (conductividad térmica y viscosidad)
- Punto de congelación
- Requerimientos de presión y caídas de presión por rozamiento
- Corrosividad, toxicidad e inflamabilidad
- coste

	Agua	Etilenglicol	Propilenglicol	Metanol
Densidad a 20 °C (g/cm ³)	1	0,9259	0,8630	0,6585
Punto congelación °C (30% volumen)	0	-13	-12	-26
Punto ebullición °C	100	197	187	64
Calor Específico a 15 °C (kJ/ Kg.K)	4,187	2,185	2,50371	2,47021
Viscosidad a 0 °C (Pa.s) ·10 ⁻³	1,79	57,4	243	0,87
Viscosidad a 20 °C (Pa.s) ·10 ⁻³	1,01	20,9	60,5	0,60
Viscosidad a 40 °C (Pa.s) ·10 ⁻³	0,655	9,5	18,0	0,45
Conductividad térmica a 20 °C (kW/m.K) ·10 ⁻³	0,60	0,26	0,20	0,21

Tabla 4.4: características de los distintos fluidos.

Para nuestro caso elegimos etilenglicol con una viscosidad a 40°C de 9,5 Pa.sx10⁻³ y punto de congelación de -13°C.

La configuración emplear es la de intercambiador en vertical en secciones colocadas en paralelo debido a la reducción de coste de la instalación debido a que los diámetros son más pequeños que en serie por lo que también hay una menor cantidad de fluido a emplear.

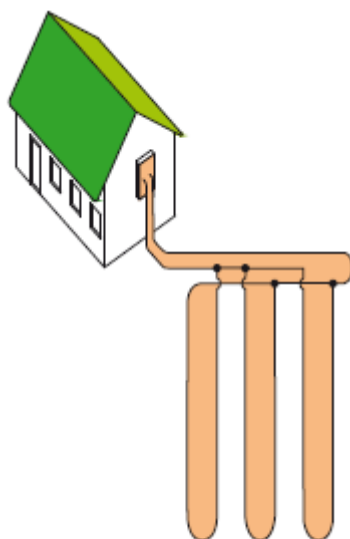


Figura 4.7: Dibujo de una configuración en paralelo vertical

Para implementar esta configuración tenemos que elegir el material apropiado. Los dos materiales más comunes son: el polietileno y el polibutileno. Ambos tubos son resistentes y flexibles y tienen la propiedad que al empalmarlos mediante fusión por calor se forman empalmes más fuertes que propio tubo.

Otro requisito es el diámetro del tubo para ello se debe llegar a un equilibrio entre el funcionamiento térmico y la caída de presión, ya que el diámetro debe ser grande para que no se produzcan pérdidas de carga muy elevadas y al mismo tiempo pequeño para no necesitar una gran potencia de bombeo y también para asegurar la turbulencia del fluido. Como se sabe el intercambio térmico eficaz requiere de régimen turbulento en el fluido caloportador.

En el estudio térmico los dos materiales trabajan perfectamente a las temperaturas del intercambiador de calor.

Finalmente decidimos elegir polietileno como nuestro material a usar y más específicamente el PE32 con las siguientes características:

presión	4 bar
Diámetro interior	28 mm
Diámetro exterior	32 mm
Kp	0,40678 w/mk

Tabla 4.5: de características del material elegido.

Ahora que conocemos las propiedades del tubo somos capaces de calcular como debe ser el caudal para asegurar la turbulencia del fluido y para ello usaremos la fórmula de Reynolds.

$$Re = \frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot \nu \cdot D} > 2.300$$

Donde Re es el número de Reynolds que dependiendo de si es menos de 2.300 es laminar o si es superior turbulento, D corresponde al diámetro interior del tubo, ν la viscosidad cinemática (m²/s) y Q el caudal (m³/s).

En la fórmula de arriba despejamos Q:

$$Q = \frac{2300 \cdot \pi \cdot \nu \cdot D}{4} = \frac{2300 \cdot \pi \cdot 0,032 \cdot 9,5 \cdot 10^{-6}}{4} = 0,55 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s} = 1,98 \text{ m}^3/\text{h}$$

Necesitamos que la bomba posea un caudal nominal superior a 1,98 m³/h.

4.4 Dimensionamiento de la bomba de calor geotérmica.

Para dimensionar un intercambiador se utilizan numerosos métodos, como pueden ser:

- Método no unificado por la “asociación internacional de Bombas de calor con Fuente-Tierra”
- Método no unificado, utilizado por la “sociedad americana de ingenieros de calefacción, Refrigeración y Aire-Acondicionado”.
- Método con normas alemanas: “La utilización termal del subsuelo” o “Las instalaciones de bombas de calor conectas en la Tierra”.

En nuestro caso utilizaremos el último caso, el método alemán dado que nos permitirá de obtener un valor bastante aproximado, de manera sencilla, de la longitud equivalente de un intercambiador vertical.

Para poder dimensionar la bomba vamos al catálogo “CIAT” en el apartado de bombas de calor geotérmicas y buscamos una bomba con potencia mayor a 23,2 Kw. Encontramos que la bomba “AGEO+” son las correspondientes y dentro de este apartado escogemos la “AGEO+ 80HT” que posee las características siguientes:

BOMBA DE CALOR R-410A			
Modelo	Potencia frigorífica (kW)	Potencia calorífica (kW)	Precio (€)
Ageo+ 20H	5,9	7,4	6.006
Ageo+ 30H	7,6	9,4	6.735
Ageo+ 40H	9,2	11,5	6.959
Ageo+ 50H	12,2	15,3	7.802
Ageo+ 40HT	9,1	11,3	7.037
Ageo+ 50HT	12,8	16,1	7.324
Ageo+ 65HT	15,9	19,8	7.502
Ageo+ 80HT	19,7	24,5	8.152
Ageo+ 100HT	24,9	30,9	9.644
Ageo+ 120HT	29,1	36,3	10.791

Tabla 4.6: de potencias de las bombas AGEO+

Al mismo tiempo que tiene que cumplir la demanda de calefacción y refrigeración también tiene que corresponder al caudal proveniente de la sonda que es de 1,98 m³/h y nos interesa saber para los cálculos siguientes el COP. Todos estos valores los obtenemos en la tabla siguiente:

Modelo	Nº circuitos / compresores / etapas	Circuito interior		Circuito exterior		Potencia absorbida		Intensidad máxima absorbida	
		Caudal nominal (m ³ /h)	Conexiones hidráulicas E/S	Caudal nominal (m ³ /h) (1)	Conexiones hidráulicas E/S	Frío (kW)	Calor (kW)	230 V / I ph (A)	400 V / III ph (A)
Ageo+ 20H	1 / 1 / 1	1,3	G1"	1,2	G1"	1,4	1,5	12,7	-
Ageo+ 30H	1 / 1 / 1	1,6	G1"	1,6	G1"	1,9	1,9	14,6	-
Ageo+ 40H	1 / 1 / 1	1,9	G1"	2,0	G1"	2,3	2,3	18,4	-
Ageo+ 50H	1 / 1 / 1	2,7	G1 1/4"	2,6	G1 1/4"	3,0	3,0	26,0	-
Ageo+ 40HT	1 / 1 / 1	1,9	G1 1/4"	2,0	G1 1/4"	2,2	2,2	-	7,9
Ageo+ 50HT	1 / 1 / 1	2,7	G1 1/4"	2,6	G1 1/4"	3,3	3,2	-	11,3
Ageo+ 65HT	1 / 1 / 1	3,3	G1 1/4"	3,3	G1 1/4"	3,9	3,9	-	13,4
Ageo+ 80HT	1 / 1 / 1	4,0	G1 1/4"	4,0	G1 1/4"	4,7	4,7	-	16,3
Ageo+ 100HT	1 / 1 / 1	5,1	G1 1/2"	5,1	G1 1/2"	5,7	5,7	-	20,5
Ageo+ 120HT	1 / 1 / 1	6,0	G1 1/2"	6,0	G1 1/2"	7,1	7,1	-	23,1

Tabla 4.7: de características de las bombas AGEO+

El caudal es de 4 m³/h por lo tanto también cumple los requerimientos para conseguir el régimen de flujo. Precisamos calcular el COP como potencia calorífica dividido por potencia absorbida. Una vez efectuado resulta valer 5,2.

$$\text{Potencia} = \frac{\text{potencia calorífica} \cdot (\text{COP} - 1)}{\text{COP}} = \frac{24,5 \cdot (5,2 - 1)}{5,2} = 19,79 \text{ Kw.}$$

4.5 Dimensionamiento del intercambiador.

Para hallar la longitud equivalente primero hay que hacer un estudio de nuestro suelo. Lo mejor para obtener las propiedades térmicas del subsuelo sería llevar a cabo un Ensayo de Respuesta térmica del Terreno, ERT. Como se expuso anteriormente este ensayo precisa la perforación del terreno y en pequeñas instalaciones e no se suele hacer debido a su duración y alto coste, por lo que no se suele hacer en pequeñas instalaciones cabe efectuar estimaciones. Pero para nuestro trabajo será suficiente con el mapa geológico y los datos hidrogeológicos publicados.

Comencemos por mostrar la composición geológica del terreno donde se sitúa la instalación.

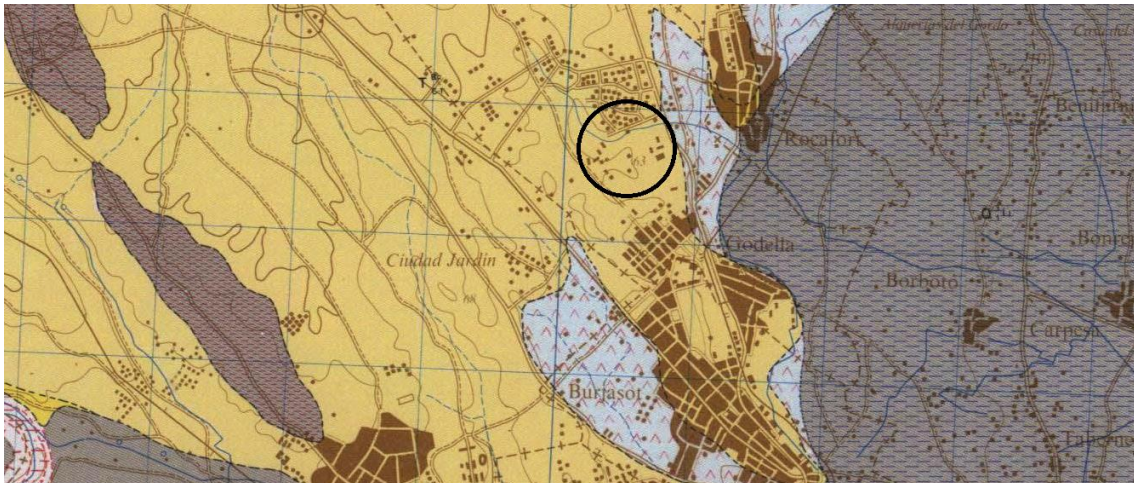


Figura 4.8: Mapa geológico (E: 1:50.000)

Donde la leyenda es:

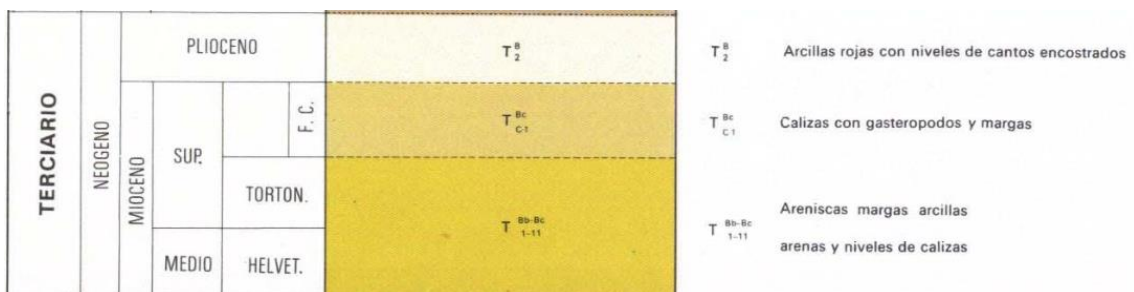


Figura 4.9: Leyenda de los materiales de la época del terciario

Las dos imágenes nos muestran que el suelo donde está situada la construcción es de origen terciario, constituido por calizas y margas en su mayoría.. Sin embargo para especificar más podemos observar los datos del sondeo más cercano recopilado por el Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio ambiente.

Litología			
De (m)	Hasta (m)	Edad	Material
0,00	12,40	CUAT. INDIFERENCIADO	GRAVAS Y ARENAS
12,40	12,80	MOCENO	ARENISCAS
12,80	13,30	MOCENO	ARENAS
13,30	18,50	MOCENO	ARENISCAS
18,50	19,30	MOCENO	ARENAS Y ARCILLAS
19,30	19,80	MOCENO	CALIZAS
19,80	21,90	MOCENO	ARENISCAS
21,90	22,90	MOCENO	CALIZAS
22,90	24,10	MOCENO	ARENAS Y ARCILLAS
24,10	25	MOCENO	ARENISCAS
25	26,30	MOCENO	ARENAS
26,30	27	MOCENO	CALIZAS
27	28	MOCENO	ARENAS
28	30,50	MOCENO	CALIZAS
30,50	34	MOCENO	LIMOS Y ARENISCAS
34	35,50	MOCENO	ARENAS
35,50	46	MOCENO	LIMOS

Figura 4.10: Sondeo numero 4581 situado al lado del río Turia.

subsuelo	Extracción de calor específica (w/m)	
	Para 1800h	Para 2400h
Terreno malo (sedimento seco)	25	20
Terreno duro normal y sedimentos saturados de agua	60	50
Roca consolidada con conductividad térmica elevada	84	70

Tabla 4.8: de valores de extracción de calor específico para intercambiadores verticales. (Procedente de la tabla 3.1)

A pesar de la cercanía al situarse menos de (8km) hemos de tener en cuenta la diferencia sustancial en los niveles freáticos, al estar ubicado en una zona por la que discurre el río Turia y el nivel freático es apenas de 0,20 metros. Nos sirve pues para confirmar los datos geológicos. Sin embargo podemos constatar que el material predominante es la caliza y ajustar el nivel freático, que tendrá tanta importancia en la capacidad de extracción calorífica por otros medios.

Por todo ello, para calcular la longitud equivalente necesitamos estimar la extracción de calor calorífico del suelo que resolveremos con la tabla anterior y la fijación por estimación del nivel freático en nuestra perforación.

Comenzaremos revisando los acuíferos que nos rodean, para localizar el nivel freático en nuestro subsuelo:

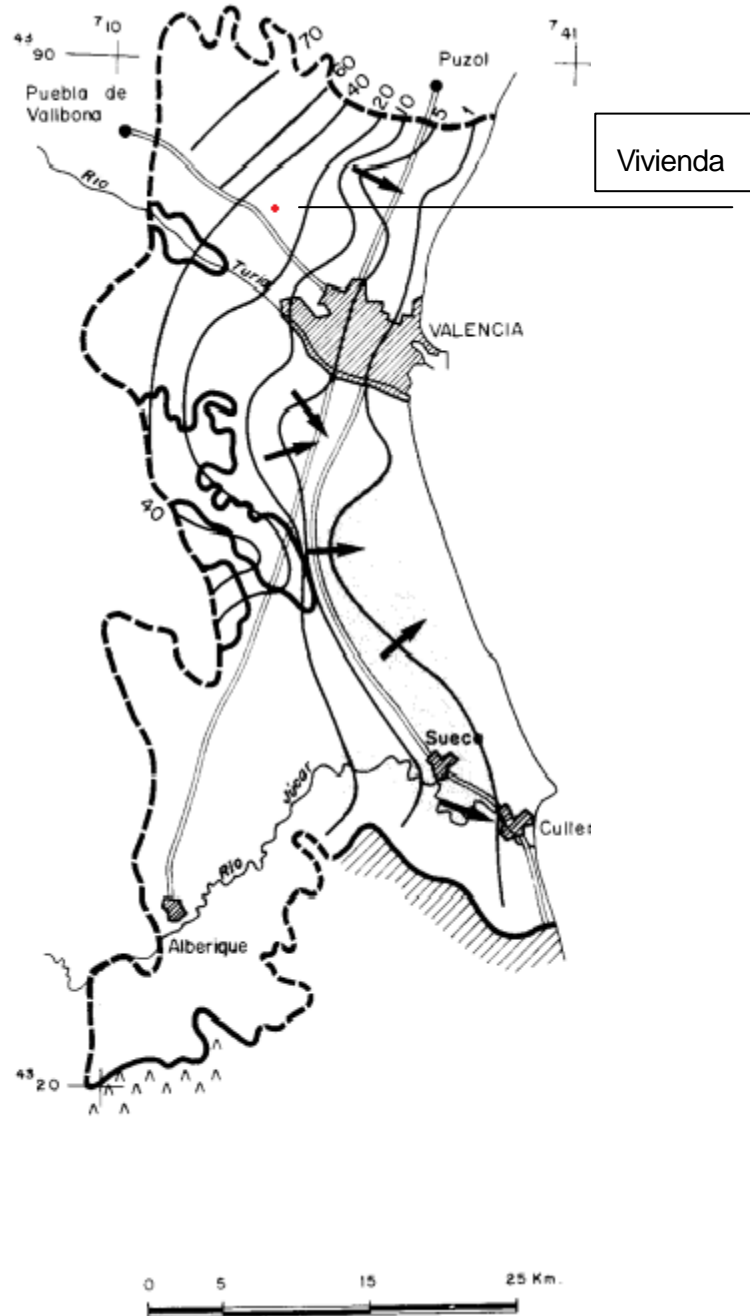


Figura 4.11: plano de acuíferos en Valencia

Según podemos ver en el plano, la vivienda de estudio se encuentra en el punto señalado. Si hacemos una interpolación de las cotas del nivel de los acuíferos resulta que los acuíferos que corresponde a nuestro subsuelo se localizan a unos 35 metros de profundidad. Para estar más seguros ponemos un intervalo de unos 15 metros de espesor. Por lo que nos encontramos con un espesor seco de 20 metros que posee una extracción de calor específica de 20 (w/m) mientras que unos 30 metros saturados con sus respectivos 60 (w/m) haciendo una proporción el terreno en 50 metros de profundidad tiene una extracción de calor específica en 1800 horas de 46 (w/m) por lo tanto:

$$\text{Longitud de sondeo} = \frac{\text{Potencia (w)}}{\text{extracción de calor específica} \left(\frac{\text{w}}{\text{m}}\right)} = \frac{19.790}{46} = 430 \text{ m}$$

La longitud de sondeo total será de 430m. Ahora bien se ha establecido por el mejor rendimiento de la perforación en relación a los diferentes niveles del acuífero. Al existir un nivel saturado (a partir de los 20 metros), el proceso de intercambio de calor será más efectivo con profundidades de 50 metros que hacer un solo sondeo, y en base a ello se ha realizado el cálculo de la capacidad térmica, el número de sondas a realizar resulta de 430/50 igual 9 sondeos.

Respecto a la separación entre pozos, hay que tener en cuenta que dependiendo de cuanto estén separados y como sea la configuración puede afectar tanto al COP como al EER (cuanto más separado más aumentan).

A efectos de ilustración podemos recurrir al estudio realizado por Miguel Zamora respecto a la ubicación de una configuración de 12 pozos.



Figura 4.12: Configuración de pozos en una simulación (fuente: Proyecto Miguel Zamora)

Según la simulación se confirma que la mejor configuración es la lineal, por lo que podemos afirmar que cuanto menos compacta sea la colocación de los pozos menos interfiere un pozo con los más próximos y por lo tanto el COP y EER son mejores. Para afianzar esta simulación observamos las siguientes distribuciones de temperaturas:

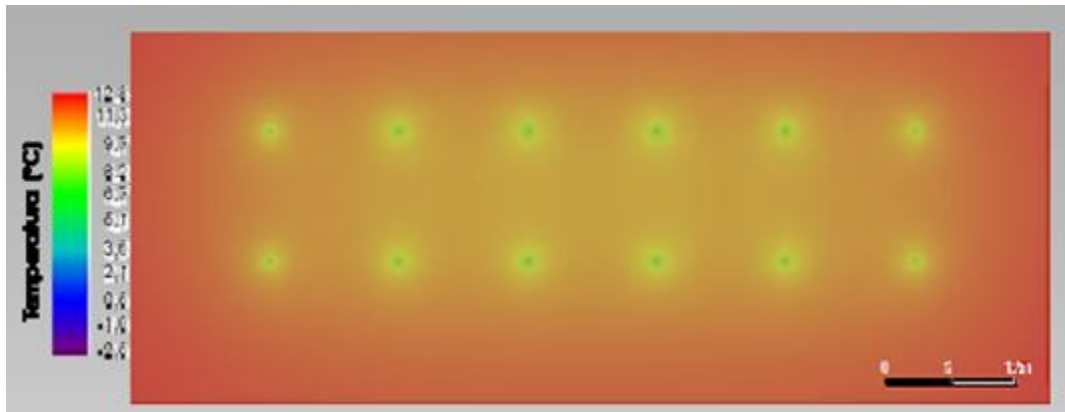


Figura 4.13: Distribución de las temperaturas pasados 5 años (distancia entre las sondas 12m).

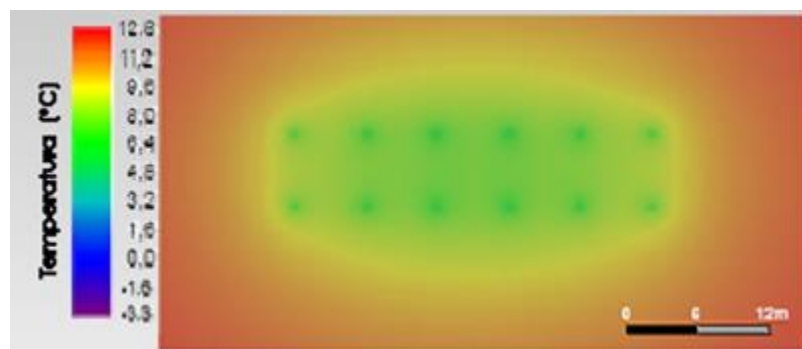


Figura 4.14: Distribución de las temperaturas pasados 5 años (distancia entre las sondas 6m).

Estas dos imágenes refuerzan lo expuesto anteriormente. Si miramos la primera imagen vemos como cada sonda tiene su cambio de temperatura independiente de la otra. Mientras que cuando la separación es menor nos encontramos con que la distribución de temperatura se presenta como si fuese un conjunto de sondas unidas. Y se producen cambios significativos en los parámetros de diseño a lo largo de los años.

En nuestro estudio si tenemos que efectuar la separación de 9 sondeos los colocaríamos 3x3 con una distancia de unos 12 metros lo que terminaría ocupando un área de 24 m x 24m.

5.- CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS

5.1.- Algunos apuntes sobre el balance económico y energético.

5.1.1 Balance económico.

El aprovechamiento geotérmico de baja entalpía requiere una inversión inicial importante y con cierta incertidumbre en cuanto a los parámetros térmicos si no se realiza sondeo previo, aunque las estimaciones suelen ser bastante fiables. Las perforaciones son las que más gastos generan. Una instalación geotérmica consta de pozos geotermales, tuberías que transportan los fluidos de un sitio a otro y un sistema de pozos de reinyección. Estos aspectos al ser los que más cargos afectan al proyecto son los que más estudios requieren, es un proyecto de baja entalpía los gastos de perforación ascienden hasta casi el 60% de la inversión total.

Los diferentes factores que afectan a un sistema geotécnico son los siguientes:

- 1 Lo primero de todo es conocer las características que definen el tipo de proyecto es decir lo que nos va influir directamente en la primera inversión como en los costes de uso y mantenimiento:
 - La profundidad a la que se encuentra el recurso
 - El caudal y la temperatura necesaria nos indica que potencia vamos a utilizar.
 - El tipo y las propiedades del fluido.
- 2 La distancia entre el recurso y el lugar de uso. Las tuberías por las que circula el fluido son termalmente estables pero las válvulas bombas son mucho más costosas y afectan tanto al coste inicial como al de mantenimiento y uso. Hay que tener en cuenta que si la distancia es muy grande el costo energético también dado que las pérdidas de calor y presión son directamente proporcionales a la longitud del tubo. Por lo que interesa que estén lo más cerca posible.
- 3 Las características de los consumidores. Ellos son los que nos definirán que tipo de instalación que hay que construir, ya que está, se efectuará teniendo en cuenta la demanda necesaria (nivel térmico, potencia total, tipo de distribución, etc.).
- 4 Otro gran factor es el clima, pues según el clima que haga, el consumidor tendrá mayor o menor demanda. La potencia o el tiempo de funcionamiento son los parámetros que habría que definir.

5 Es muy importante antes de empezar una construcción, estudiar la rentabilidad de la instalación, por lo que lo primero sería, es hacer una comparativa con otro tipo de energías ya sean renovables o no.

6 Por último, en el caso de las energías renovables existen subvenciones o financiaciones que mejorarían la rentabilidad del proyecto lo que significaría ser más competitivos ante otras energías.

5.1.2 Balance energético.

Hoy en día los procesos energéticos son los que forman unos de los mayores impactos ambientales. Y están asociados con las emisiones que están perjudicando la atmosfera que provocan el calentamiento global, la generación de residuos y la contaminación tanto en el medio terrestre como en el medio acuático.

La energía de estudio, la energía geotérmica, no solo el impacto es significativamente más bajo que en los producidos por los combustibles fósiles o similares, sino que también es menor a los ocasionados por otras energías renovables.

5.1.3 Presupuesto y comparativas sistema actual contra el geotérmico.**5.1.3.1 Presupuesto.**

Presupuesto/descripción	unidades	Precio/unidad	Subtotal (€)
<p>Lote Intercambiador geotérmico</p> <p>Excavación de 9 pozos de 50m de profundidad situados a 12 metros cada uno (12 euros/metro)</p> <p>Excavación del canal para el colector</p> <p>Se incluye el relleno posterior con el conglomerado extraído.</p>	1	11.500	11.500
<p>Materiales Intercambiador Geotérmico</p> <p>Compuesto por 800 metros de tubería polietileno PE32 con un diámetro nominal 1 1/4" a 1,47 euros /metro, 9 T's, 9 válvulas, 40 codos.</p>	1	2.750	2.750
<p>Instalación Intercambiador Geotérmico</p> <p>Colocación de las tuberías que componen tanto el colector como el intercambiador vertical, así como las uniones entre estos y la unión de la bomba.</p> <p>Rozas en el muro para el paso del colector con albañilería y pintura posterior.</p>	1	3.250	3.250
<p>Lote Generador Geotérmico</p> <p>Bomba Ageo+ 80HT de CIAT</p> <p>Equipos bomba de calor agua-agua con grupo hidráulico tanto en circuito de captación como en el interior.</p>	1	8.152	8.152
<p>Opciones Generador Geotérmico</p> <ul style="list-style-type: none"> - Aislamiento acústico del compresor - Kit de arranque para temperaturas bajas del circuito interior - Puesta en marcha 	1	900	900

Bomba de Circulación Intercambiador Geotérmico Bomba gemela, marca Sedical, modelo SA(D)P 40/8T, en circuito hidráulico del intercambiador geotérmico, incluyendo bridas, contrabridas, juntas, cableado, conexión eléctrica, completa, instalada y probada.	1	1.400	1.400
Bomba de Circulación Calefacción Bomba gemela, marca Sedical, modelo SA(D)P 40/8T, en circuito hidráulico del intercambiador geotérmico, incluyendo bridas, contrabridas, juntas, cableado, conexión eléctrica, completa, instalada y probada.	1	1.400	1.400
Deposito de Expansión Intercambiador Geotérmico Vaso de expansión de la marca IBAIONDO, el con una capacidad de 80 litros y una presión máxima de trabajo de 10 bares. Totalmente instalado y en funcionamiento.	1	81	81
Deposito de Expansión Calefacción Vaso de expansión de membrana fija de la empresa IBAIONDO, con una capacidad máxima de 18 litros.	1	81	81
Deposito de Inercia Deposito de inercia marca IBAIONDO, tipo 200AR-A, fabricado en acero al carbono. Aislado térmicamente con espuma rígida de poliuretano inyectado en molde, libre de CFC y acabado exterior con forro acolchado desmontable.	1	310	310
Instalación Circuito Interior Adecuación del circuito de climatización existente al sistema geotérmico, cierre de cinco zonas del circuito y conexión del mismo a la bomba de calor, instalación de elementos como las válvulas, deposito de expansión, bombas de circulación, etc.	1	2000	2000
Fancoil Major line Reciclaje de la instalación actual =0€	3	249	747
TOTAL			32.571
TOTAL CON I.V.A			39.410

Tabla 5.1: presupuesto estimado

(Anexo 4 para ver los utensilios).

En este tipo de instalaciones, en las geotérmicas, pueden recibir subvenciones por parte de las instituciones públicas, en este caso la Agencia Valenciana de la Energía (AVEN) más el Instituto para la diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE). Estas impulsan proyectos dirigidos a la explotación de energías renovables. Luego se considera oficial la información publicada en la **ORDEN9/2011, de 16 de mayo, de la consellería de Infraestructuras y Transporte, sobre concesión de ayudas de la Agencia Valenciana de la Energía, en materia de energías renovables y biocarburantes. [2011/6042]** que dictamina la subvención a fondo perdido de hasta el 45% del coste del proyecto.

Por lo tanto nos encontramos que nuestro presupuesto se verá reducido en: $39.410 \times (1-0,45) = 21.675,5\text{€}$.

5.1.3.2 Comparativa sistema actual contra el geotérmico.

Estudio de coste medio de la energía suministrada a la casa:

GASTOS ANUALES DE GAS NATURAL					
KW/h	€/KWh	Termino fijo	Alquiler contador	IVA	TOTAL(€)
13904	0,05374623	52,32	14.4	21	984,94

Tabla 5.2: gastos anuales de gas natural

Obtención del coste medio de KWh obtenido con gas natural:

Precio medio del KWh= $882,98 / 12320 = 0,072 \text{ €/KWh}$

El gasto medio del gas se ha calculado en base a lo reflejado en las facturas emitidas por la compañía suministradora en el año 2014.

Precio medio de la electricidad:

concepto	Potencia KW	Factor	euros
Potencia contratada	5,5	42,04	231,22
Consumo	5200	0,124107	635,36
SUBTOTAL 876,58			
Impuestos (4,864% subtotalx 1,05113)			44,82
Otros servicios			7,08
TOtal			928,48
Total con iva (21%)			1123,46

Tabla 5.3: precio medio de la electricidad

Obtención del coste medio de KWh de electricidad:

$$\text{Coste medio del KWh } 1123,46/5200 = 0,216 \text{ €/KWh}$$

Estudio del coste del sistema actual frente al geotérmico:

Total demanda energética 17648 KWh obtenida programa Ce3x

Eficiencia energética del sistema geotérmico (COP) 5,2

Los KWh que obtenemos con la nueva bomba de calor:

Consumo del sistema geotérmico $17648/5,2 = 3393,84$ KWh

Suponemos un incremento del 10% de consumo debido a elementos auxiliares (ventiladores, fancoil...)

Consumo actual ajustado según la estimación de 3733,23 KWh

Coste de la climatización geotérmica $3733,23 \times 0,216 = 806,38\text{€}$

Calculo del coste del sistem actual para el servicio deseado (programa Ce3x):

Consumo atribuido a calefacción (consumo de gas) =984,94€

Consumo atribuido a refrigeración:

Demanda eléctrica de 3744 para refrigeración (COP del sistema actual 1,7)

Consumo para refrigeración $3744/1,7 = 2202,35$ KWh

Coste actual de refrigeración $2202,35 \times 0,216 = 475,71\text{€}$

Coste actual total $984,94 + 475,71 = 1460,65\text{€}$

Balance económico:

Ahorro correspondiente $1460,65(\text{consumo sistema actual}) - 806,38(\text{geotérmico}) = 654,27\text{€}$

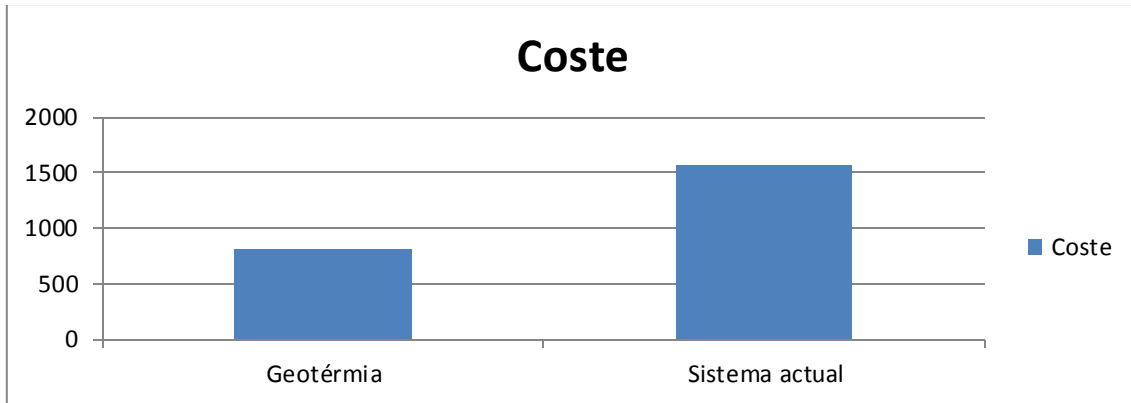


Figura 5.1: grafica del balance económico anual

Ahora observaremos una grafica para conocer cuál sería el periodo de retorno de la inversión y conocer en qué tiempo se amortiza.

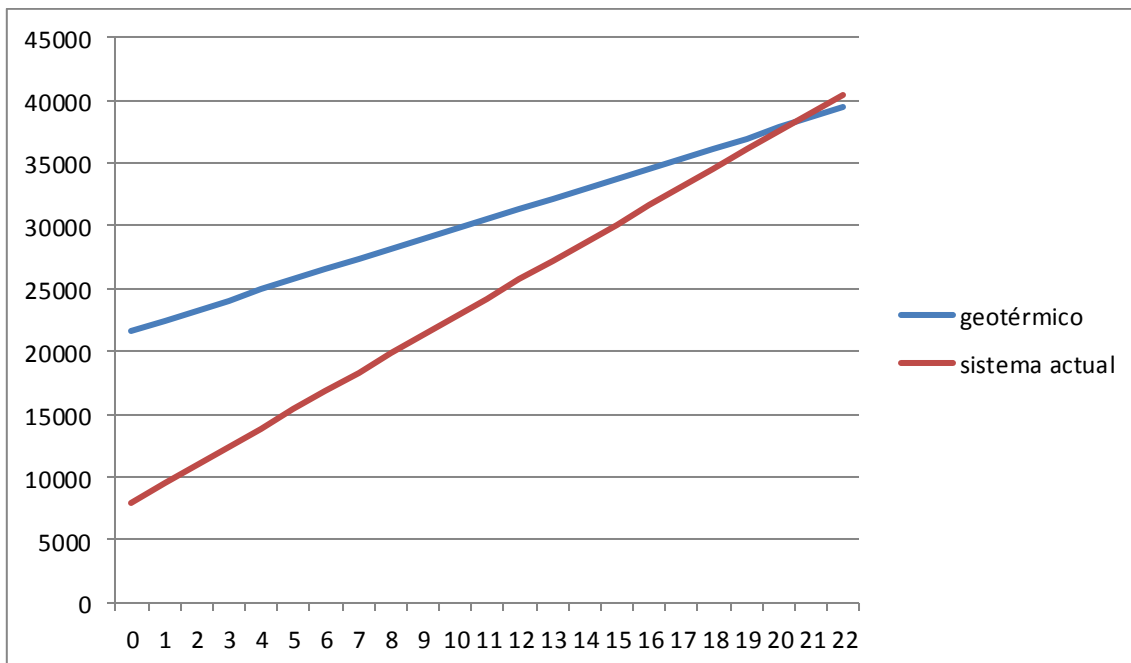


Figura 5.2: grafica de desarrollo de los costes a lo largo de los años

Como podemos observar el periodo de retorno es a partir de los 19-20 años debido a su gran coste inicial. A la hora de calcular esta grafica hemos supuesto un precio inicial de 8000€ para la construcción y colocación de la instalación actual. Posteriormente se ha ido sumando los costes anuales más para la instalación actual un incremento del 1% por mantenimiento y un 2% por incremento de la energía. Finalmente por falta de datos no hemos podido calcular el gasto por emisiones de CO2 que hubiese provocado que el periodo de retorno fuese antes de esos 19 años.

Ahorro de emisiones:

Las bombas geotérmicas reúnen características positivas para el medio ambiente, en términos de reducción CO2 en comparativas con otras posibilidades muestra que los beneficios de esta energía son indudables. Si se le añade una menor cantidad de consumo de energía eléctrica hace que sea una opción seria para los organismos públicos que incentivan la instalación de bombas de calor acopladas al terreno como forma de reducir la dependencia energética de los combustibles fósiles.

La calefacción deja de atenderse con gas. Todo el consumo pasa ser eléctrico con las disminuciones correspondientes a la eficiencia del sistema:

Instalación	Consumo anual	Factor de emisión	Emisiones
gas	-13904	0,563	-7827,95
Electricidad antes (solo refrigeración)	-2202,35		
Electricidad actual (sistema geotérmico)	+3733,23		
Balance eléctrico	+1530,88	0,501	+766,97
Balance de emisiones			-7060,98

Tabla 5.4: balance de emisiones

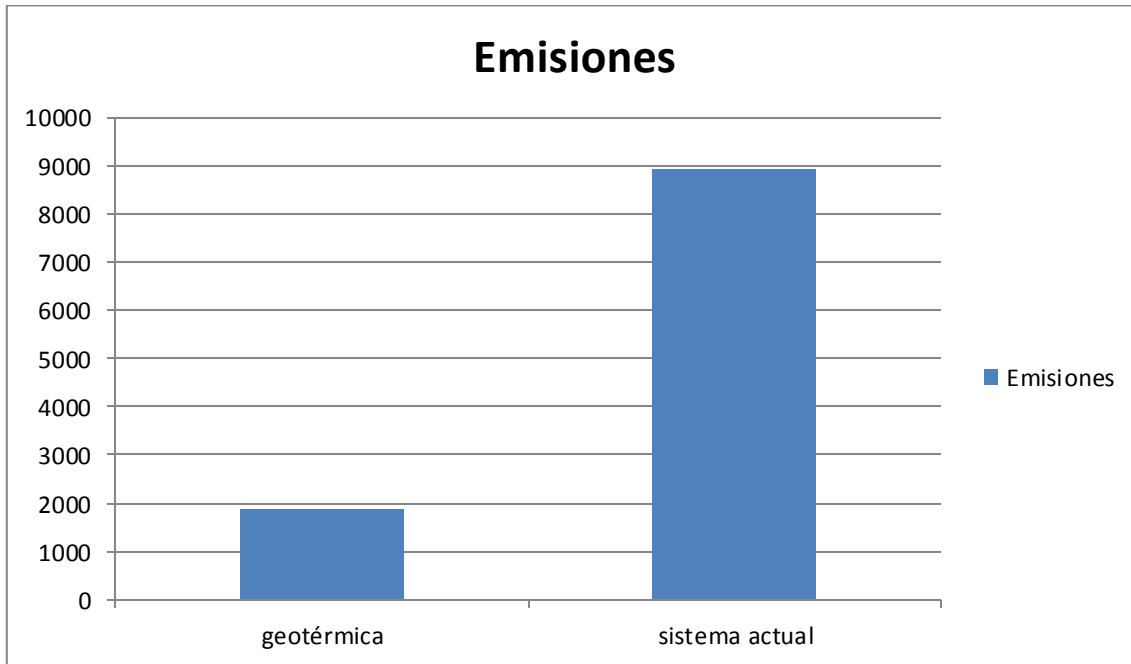


Figura 5.3: balance de emisiones

5.2.- Mejora energética en la vivienda unifamiliar

Después de haber dimensionado nuestra instalación geotérmica es hora de saber si de verdad es tan eficiente como hemos razonado antes. Para ello volvemos al programa del ministerio de Industria el Ce3x y con la misma envolvente en este caso utilizaremos en vez de nuestra caldera convencional de gas natural utilizamos una bomba de calor y calculamos su calificación energética de edificios con un indicador KgCO2/m².

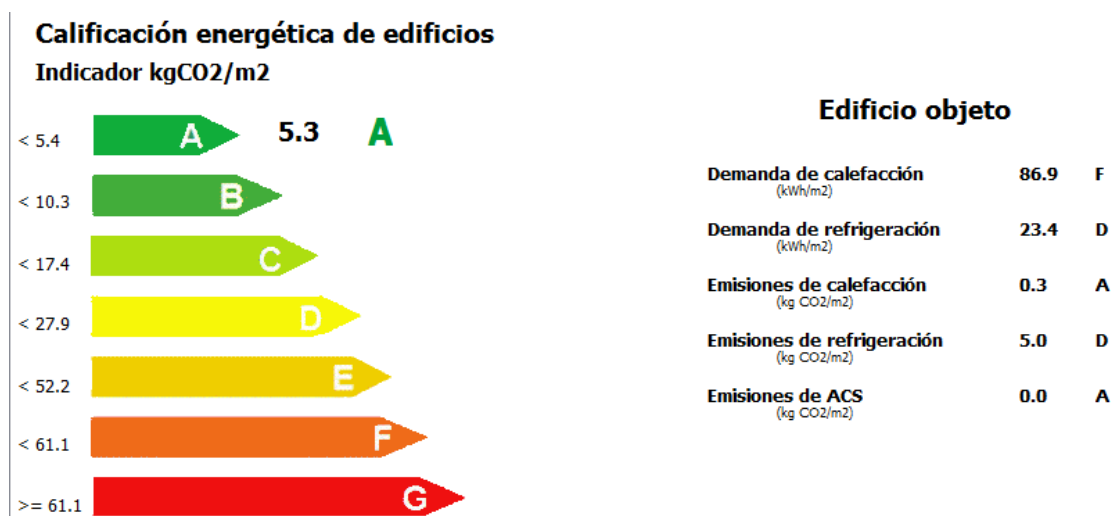


Figura 5.4: Resultados del programa Ce3x para la vivienda unifamiliar escogida con una bomba de calor.

Como podemos observar la vivienda se vuelve mucho más eficaz. Pasa de una eficacia E con 48,5 KgCO₂/m² (figura 5.2) a solo 5,3KgCo₂/m² con una eficiencia A (figura 5.1). Es decir una rebaja del 89% de emisión de CO₂ a la atmosfera en este caso.

Calificación energética de edificios

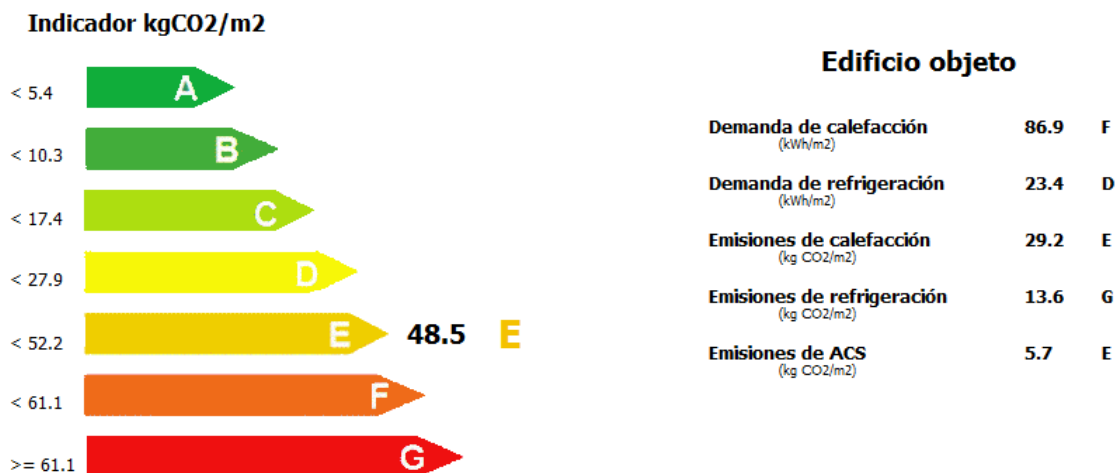


Figura 5.2: resultados del programa Ce3x para la vivienda unifamiliar escogido con una caldera convencional.

5.3.- Elementos medioambientales que fundamentan la elección de esta tecnología. Ventajas e inconvenientes

5.3.1 Ventajas

Son numeras las ventajas de una instalación geotérmica:

- Beneficios medio ambientales:
 - Debido a su carácter autóctono, la energía geotérmica es independiente de sectores exteriores.
 - El impacto ambiental es mucho más pequeño que los generados por los combustibles fósiles y nucleares e incluso menores a las de otras anergias renovables. Esto es debido a que la energía proviene del interior de la tierra lo que provoca que las instalaciones sean mucho más compactas haciendo a su vez que esta sea más reducida, ocupando así menos espacio. Se estima que una planta geotérmica ocupa un tercio que una planta térmica de gas.
 - En comparación con otras fuentes de energía es mucho más limpia como podéis observar en la siguiente tabla:

g/kWh	NO _x	SO ₂	CO ₂
Carbón	2,0	4,7	996
Petróleo	1,8	5,5	760
Gas Natural	1,3	0,1	551
Geotermia (flash)	0	0,1	27
Geotermia (ciclo binario y flash/binario)	0	0	0

Tabla 5.5: Fuente: Geothermal Energy Association. Abril 2007

- Constatamos que a diferencia de las otras fuentes de energía, la geotermia ofrece un flujo constante y uniforme independientemente de variaciones estacionales ya sean lluvias, sol, viento, etc.
- Finalmente no hay impacto visual ni acústico y el nivel de creación de residuos es menor que los de su competencia.

Podemos indicar que se trata de una energía limpia, segura, constante y uniforme, que no ocupa mucho espacio y autóctona. Al poder utilizarse en casi cualquier parte, ayuda a zonas de difícil acceso que sean capaces de generar su propia energía.

Finalmente vemos como la energía geotérmica es capaz de utilizar la temperatura de la tierra ya sea temperaturas muy bajas que no se podrían captar con métodos convencionales. Ya que se utiliza una tecnología que según la Agencia de Protección Medioambiental de Estados Unidos es la más eficiente tanto en calefacción como en enfriamiento.

- Beneficios socioeconómicos:

Según numerosos estudios, como apunta la Geothermal Energy Association (GEA) las instalaciones de energía geotérmica generan no solo más puestos de trabajo que las convencionales sino que estos son más estables, de más larga duración, más diversificados y de alta calidad. Como según se puede observar en la tabla comparativa entre los ratios de estimación de empleo generado en Estados Unidos:

	Fase de construcción e instalación (trabajos/MW)	Fase de operación y mantenimiento (trabajos/MW)
Geotermia	4,0	1,7
Gas natural	1,0	0,1

Tabla 5.6: comparativa: fuente U.S DOE

Como ya hemos dicho anteriormente una de las ventajas es que se puede construir una instalación geotérmica en casi cualquier lugar del mundo incluso en los sitios más remotos. Esto conlleva a que haya más independencia de otras fuentes por

lo que se produciría un desarrollo en lugares más desfavorecidos gracias a la estabilidad, a los ingresos y a la creación de empleo.

Uno de los sectores que se podría beneficiarse más es el sector de la agricultura ya que permitiría disponer de productos en cualquier momento del año gracias a unas condiciones óptimas. Esto aumentaría la producción del país y podría reducir en el precio final del producto.

5.3.2 inconvenientes

Con respecto a las otras fuentes uno de los mayores problemas que hay es el pleno desconocimiento tanto por parte de la sociedad como por los proyectistas e instaladores lo que provoca falta de formación de especialistas y una ausencia de normativa técnica reguladora.

En términos económicos la principal traba es la inversión inicial ya que para hacer estudios previos para conocer el mejor lugar para hacerlo ya hay que hacer costosas operaciones entre ellas perforaciones para conocer las propiedades del terreno. Lo que eleva el coste inicial muy por encima de sus competidores. Debido a inversión inicial, esta, solo es rentable a largo plazo, aunque en su favor hay que añadir que requiere un bajo nivel de mantenimiento.

A lo referido al medio ambiente existe riesgo de emisiones tóxicas aunque estas no sería de normal sino en caso de accidentes, los cuales pueden provocar fugas de los fluidos que pueden contaminar las aguas colindantes. En ocasiones también se pueden producir emisiones de CO₂ pero siendo estas muy inferiores a las del resto y un riesgo de contaminación térmica.

5.4 Reflexiones personales y perspectivas futuras.

En la época donde nos encontramos siempre en la busca del desarrollo y consumo ha provocado la existencia de un importante problema debido a la demanda energética creciente, con externalidades negativas de contaminación, daño al medio ambiente, etc. Por nuestro afán de mejorar y de seguir evolucionando hay que buscar soluciones que consigan producir y al mismo tiempo no dañar nuestro entorno. Es por eso que poco a poco las energías renovables son más y más importantes, no solo en nuestro presente sino como clave de nuestro futuro.

Como hemos querido presentar en este trabajo, la energía geotérmica es una de las mejores opciones pero también de las menos conocidas, o de las menos solicitadas, debido a su alto precio inicial, lo que según mi opinión condiciona a que su desarrollo vaya mucho más lento. Si se confiase más en esta tecnología esta iría mejorando y abaratando su precio debido a la competencia del mercado y economías de escala. Hoy en día su desarrollo en todo el mundo y en concreto en nuestro país es insuficiente a pesar de su gran potencial.

En mi opinión es preciso un impulso decidido de las energías geotérmicas, liderado por las administraciones públicas, que coloquen a nuestro país en el grupo de

países que impulsan estas tecnologías, en el convencimiento del importante retorno en términos económicos y medioambientales de la misma

Por último, desde mi perspectiva personal considero enriquecedor las nuevas perspectivas que me ha abierto este trabajo.

6. BIBLIOGRAFÍA

Referencias técnicas:

Galarza, V. (2008). Sistemas integrales de eficiencia energética para calefacción, climatización y agua caliente sanitaria. Obras Urbanas, 56-64.

IDAE- ATECYR. (2010). Guía técnica de diseño de sistemas de bomba de calor geotérmica. Ahorro y eficiencia energética en climatización, 14. 48 pp.

Llopis, G.; López, C. (2009). Energía geotérmica superficial para la climatización de edificios. Ingeopres: Actualidad técnica de ingeniería civil, minería, geología y medio ambiente, Nº. 180, 44-48 pp.

Mands, E.; Sanner, B. Energía geotérmica a poca profundidad. UBeG GBR. 12 pp.

Pérez, D. (2010). La climatización al estilo nórdico. Análisis de la bomba de calor geotérmica en el panorama energético español. Energética XXI, 88-89.

Ruíz, J. (2010). Utilización de la energía geotérmica en climatización. Energética XXI, 86-87.

Vegas, J.M.; Rodríguez, J.M. (2009). Energía geotérmica, principios básicos. Rehau, S.A. 17 pp.

Proyectos:

Benítez, S. (2011). Estudio de las aplicaciones de la energía geotérmica en España. Caso práctico para la climatización de una vivienda unifamiliar. Universidad Politécnica Carlos III. Madrid.

Espada, V. Estudio de instalaciones de climatización geotérmicas en viviendas. Universitat Politècnica de Catalunya. Barcelona.

Ibáñez, R (2014). Estudio de aptitud geológica para instalaciones geotérmicas de muy baja entalpía para suelos de Castellón de la Plana. Universidad Politécnica de Valencia.

1A Ingenieros (2008). Proyecto de Instalación Térmica para Centro Multiusos de seguridad en Laguna de Duero, Valladolid.

Casajuana, D; Fresno, D; Rodrigues, H; Fernús, X (2009). Diseño de una instalación de climatización utilizando energía geotérmica solar en un edificio de viviendas de Terrassa. Universidad Católica, Universitat Politècnica de Catalunya. Barcelona.

Software utilizado:

Microsoft Office
Ce3x-Programa del ministerio.

Páginas Web consultadas:

<http://www.idae.es/>
<http://www.ashrae.org/>
<http://www.geoplat.org/>
<http://www.ciemat.es/>
<http://info.igme.es/cartografia/>
<http://www.energylab.es/>
<http://argadi.com/>
http://www.igme.es/Geotermia/Ficheros%20PDF/Manual_Geotermia_2,5.pdf
http://www.grupociat.es/infos/catalogues/CATALOGO_CIAAT_2013-14.pdf
http://www.ciat.fr/infos/catalogues/CATALOGO_CIAAT_2013-14.pdf
<https://www.materialescalefaccion.com/vasos-de-expansion/1893-vaso-expansion-80-cmf-80l-6-bar.html>
http://www.generadordeprecios.info/obra_nueva/Instalaciones/IC_Calefaccion_climatizacion_y_A/Geotermia/Sonda_geotermica_vertical.html
http://www.alfa90.com/es/downloads/dl/file/id/43/catalogotarifa_sedical_2013.pdf