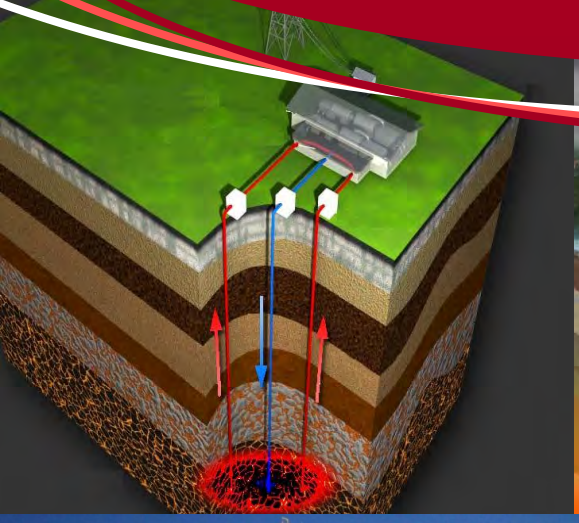
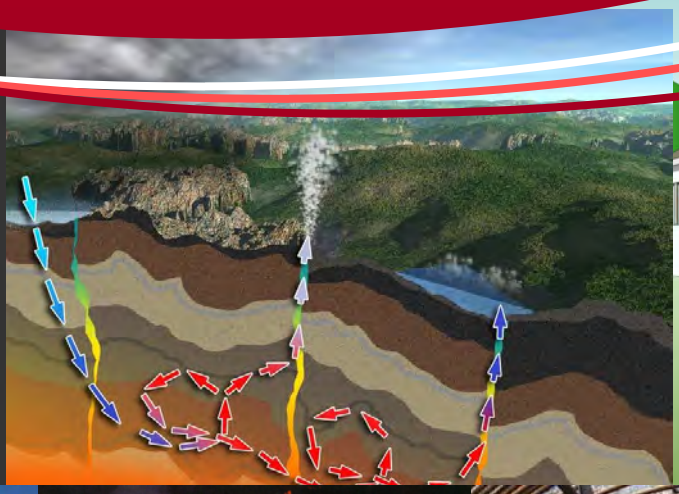
Madrid
Ahorra
con Energía

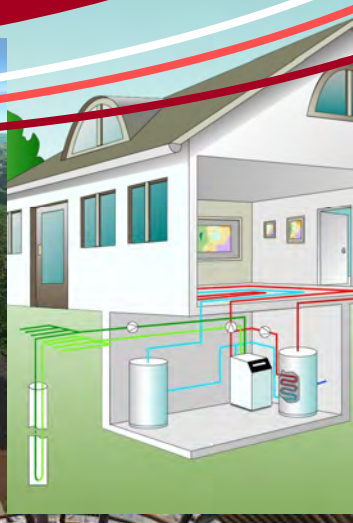
La Suma de Todos

Dirección General de Industria, Energía y Minas
CONSEJERÍA DE ECONOMÍA Y CONSUMO
Comunidad de Madrid

Guía de la Energía Geotérmica







Guía de la Energía Geotérmica

Fundación de la Energía de la Comunidad de Madrid

Energy Management Agency

Intelligent Energy Europe

La Sarna de Todos

Dirección General de Industria, Energía y Minas

CONSEJERÍA DE ECONOMÍA Y CONSUMO

Comunidad de Madrid

Depósito Legal:
Impresión Gráfica:

AUTORES

Guillermo LLOPIS TRILLO
Dr. Ingeniero de Minas

y

Vicente RODRIGO ANGULO
Dr. Ingeniero de Minas

de la U. D. de Proyectos de Ingeniería de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas de la Universidad Politécnica de Madrid.

En la preparación de los originales han colaborado Antonio León Sánchez y Rosa Ortiz, y en la revisión y maquetación del texto el personal de la Fundación de la Energía de la Comunidad de Madrid.

ÍNDICE

PRÓLOGO 11

1. EL CALOR DE LA TIERRA 13
   1.1. INTRODUCCIÓN 13
   1.2. GEOTERMIA 14
      1.2.1. Geotermia somera 16
      1.2.2. El flujo de calor terrestre 18
      1.2.3. La propagación de calor en la Tierra 18
      1.2.4. Manifestaciones geotérmicas 21

2. ENERGÍA GEOTÉRMICA 25
   2.1. DEFINICIÓN 25
   2.2. BREVE HISTORIA DE LA ENERGIA GEOTÉRMICA 26
   2.3. APLICACIONES Y TIPOS DE ENERGÍA GEOTÉRMICA 31
   2.4. ENERGÍA GEOTÉRMICA Y DESARROLLO SOSTENIBLE 33
      2.4.1. Energía renovable 35
      2.4.2. Energía limpia 35
      2.4.3. Energía económica 38
      2.4.4. Energía eficiente 39
      2.4.5. Energía continua 40
      2.4.6. Energía para todo el mundo 40
      2.4.7. Energía local 41

3. RECURSOS GEOTÉRMICOS 43
   3.1. DEFINICIÓN Y TIPOS DE RECURSOS 44
   3.2. YACIMIENTOS GEOTÉRMICOS 46
      3.2.1. Yacimientos de muy baja temperatura 46
      3.2.2. Yacimientos de baja temperatura 48
      3.2.3. Yacimientos de media temperatura 49
      3.2.4. Yacimientos de alta temperatura 51
   3.3. INVESTIGACIÓN DE RECURSOS GEOTÉRMICOS 59
      3.3.1. Investigación de recursos de muy baja temperatura 60

3.3.1.1. Colectores horizontales enterrados 61
3.3.1.2. Sondas geotérmicas 62
3.3.1.3. Sondeos de captación de agua someros 66
3.3.1.4. Cimientos geotérmicos 67
3.3.2. Investigación de recursos de baja temperatura 71
3.3.3. Investigación de recursos de media temperatura 73
3.3.4. Investigación de recursos de alta temperatura 74
3.4. CLASIFICACIÓN DE RECURSOS GEOTÉRMICOS 77

4. APROVECHAMIENTO DE LA ENERGÍA GEOTÉRMICA DE MUY BAJA TEMPERATURA 83
4.1. BOMBAS DE CALOR CONVENCIONALES 85
4.2. BOMBA DE CALOR GEOTÉRMICA 89
4.2.1. Rendimiento de una bomba de calor geotérmica 91
4.3. SISTEMAS DE CAPTACIÓN DE ENERGÍA GEOTÉRMICA DE MUY BAJA TEMPERATURA 94
4.3.1. Captadores horizontales enterrados 97
4.3.2. Sondas geotérmicas 102
4.3.3. Campos de sondas geotérmicas 106
4.3.4. Cimentaciones geotérmicas. Pantallas de sostenimiento 108
4.3.5. Aprovechamiento de aguas en túneles 113
4.3.6. Pozos canadienses o provenzales 115
4.3.7. Sondeos geotérmicos 117
4.3.8. Sistemas de almacenamiento del calor geotérmico 118

5. UTILIZACIÓN DIRECTA DEL CALOR GEOTÉRMICO 121
5.1. CAPTACIÓN DE RECURSOS GEOTÉRMICOS 123
5.2. CESIÓN DEL CALOR GEOTÉRMICO 128
5.3. APLICACIONES 130
5.3.1. Natación, baños y balneología 130
5.3.2. Calefacción de edificios y producción de ACS 132
5.3.3. Calefacción de invernaderos 135
5.3.4. Acuicultura y crianza de animales 139
5.3.5. Secado de alimentos y maderas 141
5.3.6. Otras aplicaciones 142

6. PRODUCCIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA 147
6.1. CIRCUITO ABIERTO 150

6.2. CIRCUITO CERRADO O CENTRALES DE CICLO BINARIO 153
6.3. PEQUEÑAS CENTRALES ELÉCTRICAS GEOTÉRMICAS 155
6.4. SONDEOS DE EXPLOTACIÓN Y DE REINYECCIÓN 157
6.5. VENTAJAS E INCONVENIENTES DE LA ENERGÍA ELÉCTRICA DE ORIGEN GEOTÉRMICO 160
6.6. LA PRODUCCIÓN ELÉCTRICO-GEOTÉRMICA EN EL MUNDO 162

7. LA ENERGÍA GEOTÉRMICA EN ESPAÑA 167
7.1. ENERGÍA GEOTÉRMICA DE MUY BAJA TEMPERATURA 167
7.2. ENERGÍA GEOTÉRMICA DE BAJA, MEDIA Y ALTA TEMPERATURA 171

8. UNA VENTANA AL FUTURO 177
8.1. OPTIMIZACIÓN DE LA UTILIZACIÓN DE LA ENERGÍA GEOTÉRMICA 178
8.2. FUTURO DE LOS RECURSOS DE MUY BAJA TEMPERATURA 181

9. BIBLIOGRAFÍA RECOMENDADA 185

PRÓLOGO

La energía geotérmica, a pesar de venir siendo utilizada con algunos fines térmicos desde hace siglos -termas romanas, baños turcos, curas balnearias, etc.-, es una gran desconocida, pero no por ello está carente de un gran potencial.

A diferencia de la mayoría de las fuentes de energía renovables, la geotérmica no tiene su origen en la radiación del Sol sino en la diferencia de temperaturas que existe entre el interior de la Tierra y su superficie.

El actual escenario de precios de los combustibles fósiles, junto con las implicaciones medioambientales del consumo de éstos, hace que todos los gobiernos dirijan sus esfuerzos al fomento de las energías alternativas o limpias.

En el estado actual de la tecnología, se puede decir que la geotermia tiene dos grandes grupos de aplicaciones o fines: térmicos y eléctricos.

Entre los primeros caben destacar los usos en balnearios y piscinas climatizadas que es la forma más antigua de aprovechamiento; las aplicaciones en producción de agua caliente sanitaria y calefacción mediante las modernas bombas de calor e intercambiadores; y otros muchos usos en agricultura usando las aguas calientes de acuíferos en invernaderos, en acuicultura y en industria, o para evitar la formación de placas de hielo en los pavimentos.

Por otro lado, en la producción de electricidad se viene utilizando desde principios del siglo pasado con las técnicas de vapor seco, de agua a alta temperatura o las centrales de ciclo binario. Más recientemente, se está prestando interés a los yacimientos de rocas secas calientes para su aprovechamiento con el mismo fin.

Las ventajas de la energía geotérmica son tanto ambientales como económicas, por lo que es preciso profundizar en su conocimiento y extender sus aplicaciones -sobre todo en climatización de edificios-, tal como desde hace años se está haciendo en otros países europeos.

Tanto la energía generada como la ahorrada con las diferentes tecnologías de la geotermia darán lugar a un nuevo concepto: el *geowatio*, que competirá con otras energías, convencionales o renovables, tanto en el ámbito económico como medioambiental y al que se le augura un gran futuro.

Esta *Guía de la Energía Geotérmica* se enmarca dentro de una de las líneas estratégicas e innovadoras por la que la Comunidad de Madrid apuesta, de manera firme y decidida, para garantizar un abastecimiento y un consumo sostenible de la energía necesaria para su desarrollo.

Carlos López Jimeno
Director General de Industria, Energía y Minas
Consejería de Economía y Consumo
Comunidad de Madrid

1 EL CALOR DE LA TIERRA

Hace unos 4.500 millones de años, la Tierra era una inmensa bola ardiente constituida esencialmente por gases y polvo. Cuando esa nebulosa se enfrió y se consolidó, hace unos 3.800 millones de años, se formó una corteza dura que atrapó en su interior una ingente cantidad de calor, que todavía perdura hoy en día haciendo del planeta una enorme caldera natural.

1.1. INTRODUCCIÓN

El planeta Tierra no es un cuerpo inerte y frío perdido en el espacio y arrastrado pasivamente por la fuerza gravitacional del Sol. Desde el punto de vista energético constituye un sistema activo que recibe y comunica energía al medio que le rodea, y el calor es una parte de esa energía.

Todos los procesos geodinámicos que suceden en la Tierra, desde los procesos más superficiales, hasta los volcanes, las intrusiones, los terremotos, la formación de cordilleras y el metamorfismo, son controlados por la transferencia y generación de calor en su interior.

El calor es también el motor de la tectónica de placas, que involucra a la litosfera y a la astenosfera, y de otros procesos a mayor profundidad, como los movimientos de convección entre el manto y el núcleo externo.

Foto 1.1. Volcán Kilauea en Hawai. El magma puede ascender a la superficie de la corteza terrestre como lava. Cantidades mayores no llegan y calientan grandes volúmenes de rocas subterráneas.
***©2001 Geothermal Education Office*.**

Hace más de 250 años que se pudo constatar el hecho de que en las minas, la temperatura aumenta con la profundidad a un ritmo de, aproximadamente, 1 ºC cada 30 m, y la existencia, en determinadas regiones del planeta, de volcanes con erupción periódica de

rocas en estado de fusión, de fumarolas con vapores y gases calientes que pueden alcanzar temperaturas superiores a los 1.000 ºC, de fuentes termales y otras manifestaciones térmicas atestiguan la existencia de un calor que proviene del interior de la Tierra.

1.2. GEOTERMIA

Geotermia es una palabra de origen griego, deriva de "*geos*" que quiere decir tierra, y de "*thermos*" que significa calor: **el calor de la Tierra**. Se emplea indistintamente para designar tanto a la ciencia que estudia los fenómenos térmicos internos del planeta como al conjunto de procesos industriales que intentan explotar ese calor para producir energía eléctrica y/o calor útil al ser humano.

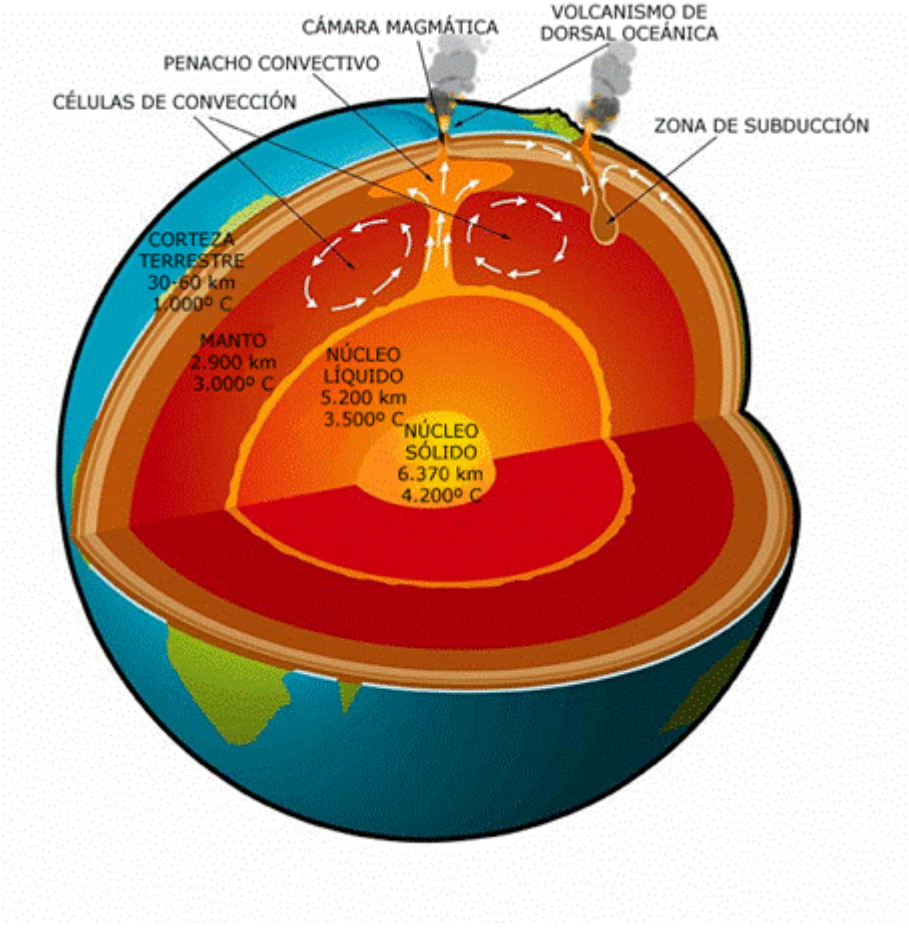


Figura 1.1. Estructura interna de la Tierra.
(Fuente: *Site Geothermie-Perspectives de l'ADEME et du BRGM*).

Desde el centro hasta la superficie, el globo terrestre está constituido por tres capas sucesivas de temperatura decreciente:

- El **núcleo**, sólido en su parte interna y líquido en su parte exterior. Su temperatura puede alcanzar los 4.200 ºC.

- El **manto** que lo envuelve, con temperaturas que van desde los 3.000 ºC a 1.000 ºC. De textura plástica hacia el centro, se vuelve sólido hacia la superficie.

- La **corteza**, que corresponde a la envoltura superficial. Su temperatura varía desde los 1.000 ºC en su contacto con el manto, hasta los 15-20 ºC de la superficie terrestre. Su espesor varía desde 5 a 20 km en las profundidades oceánicas, y desde 30 a 70 km bajo los continentes. Con la parte sólida del manto constituye la **litosfera**, fragmentada en varias **placas litosféricas** que se desplazan lentamente, unas con relación a otras, pudiendo dar lugar a importantes anomalías térmicas en sus bordes.

El resultado de esta estructura interna es que el 99% de la masa de la Tierra está sometida a una temperatura superior a los 1.000 ºC, y únicamente un 0,1% de la misma soporta temperaturas inferiores a los 100 ºC.

Los orígenes del calor interno de la Tierra se encuentran en los siguientes hechos:

- **Desintegración de isótopos radiactivos** presentes en la corteza y en el manto, principalmente, uranio 235, uranio 238, torio 282 y potasio 40.
- **Calor inicial** que se liberó durante la formación del planeta hace 4.500 millones de años, y que todavía está llegando a la superficie.
- **Movimientos diferenciales** entre las diferentes capas que constituyen la Tierra, principalmente entre manto y núcleo.
- **Cristalización del núcleo**. El núcleo externo (líquido) está cristalizando continuamente, y en la zona de transición con el núcleo interno (sólido) se libera calor.

Las grandes diferencias de temperatura entre la superficie de la Tierra y las existentes en su interior originan un flujo continuo de calor hacia la superficie, estimándose que la energía que llega cada segundo a la superficie terrestre, en forma de calor, por conducción, convección y radiación, es de 42×10^{12} J. De ese total, 8×10^{12} J provienen de la corteza, la cual representa sólo el 2% del volumen total del planeta, $32{,}3 \times 10^{12}$ J provienen del manto, el cual representa el 82% del volumen total, y $1{,}7 \times 10^{12}$ J provienen del núcleo, que representa un 16% en volumen y no contiene isótopos radiactivos.

El calor de la Tierra es inmenso, pero sólo una pequeña fracción del mismo puede ser utilizado por la Humanidad, que así lo ha venido haciendo desde las épocas glaciares, en regiones volcánicas, cuando los seres humanos descubrieron la utilidad de los manantiales termales para cocinar alimentos y con fines medicinales, hasta la época actual en la que los medios técnicos disponibles permiten extraerlo de la corteza terrestre y transformarlo en energía eléctrica, o usarlo directamente para calefacción humana o animal, y en procesos industriales y agrícolas.

1.2.1. Geotermia somera

Hasta hace relativamente pocos años, la utilización de la energía térmica de la Tierra ha estado restringida a regiones del planeta donde condiciones geológicas favorables hacen posible la transferencia de calor desde zonas calientes profundas hasta la superficie, o muy cerca de ella, y el posterior aprovechamiento de éste en forma de agua caliente en fase líquida o vapor.

Además del calor interno, la superficie de la Tierra recibe del Sol cada segundo, en forma de calor, 2×10^{17} J, que es cuatro órdenes de magnitud superior al calor geotérmico.

Esa energía penetra a escasa profundidad en el subsuelo, contribuyendo a mantener la superficie del planeta a una temperatura promedio de 15 ºC, y es irradiada de nuevo al espacio, no interviniendo en los procesos energéticos que afectan al interior de la Tierra.

Muchas especies animales se resguardan del frío en invierno y del calor en verano excavando madrigueras en tierra, y los hombres prehistóricos, antes de aprender a utilizar el fuego y a construir cabañas, buscaron protección de las inclemencias meteorológicas en cavernas y cuevas subterráneas, donde la inercia térmica de rocas y suelos contribuye a que los descensos y aumentos de la temperatura ambiente sean menores y más lentos.

Desde hace más de 30 años, como consecuencia de las crisis energéticas del siglo XX, en los países del Norte de Europa y de América, con inviernos muy fríos, se vienen empleando técnicas de intercambio geotérmico que utilizan circuitos cerrados de agua con anticongelante, instalados en sondeos poco profundos o enterrados a muy poca profundidad en el terreno, junto con bombas de calor **“*Geothermal***

***Heat Pumps*" (GHP's)** para satisfacer necesidades de calefacción, refrigeración y producción de agua caliente sanitaria en viviendas unifamiliares y edificios comerciales.

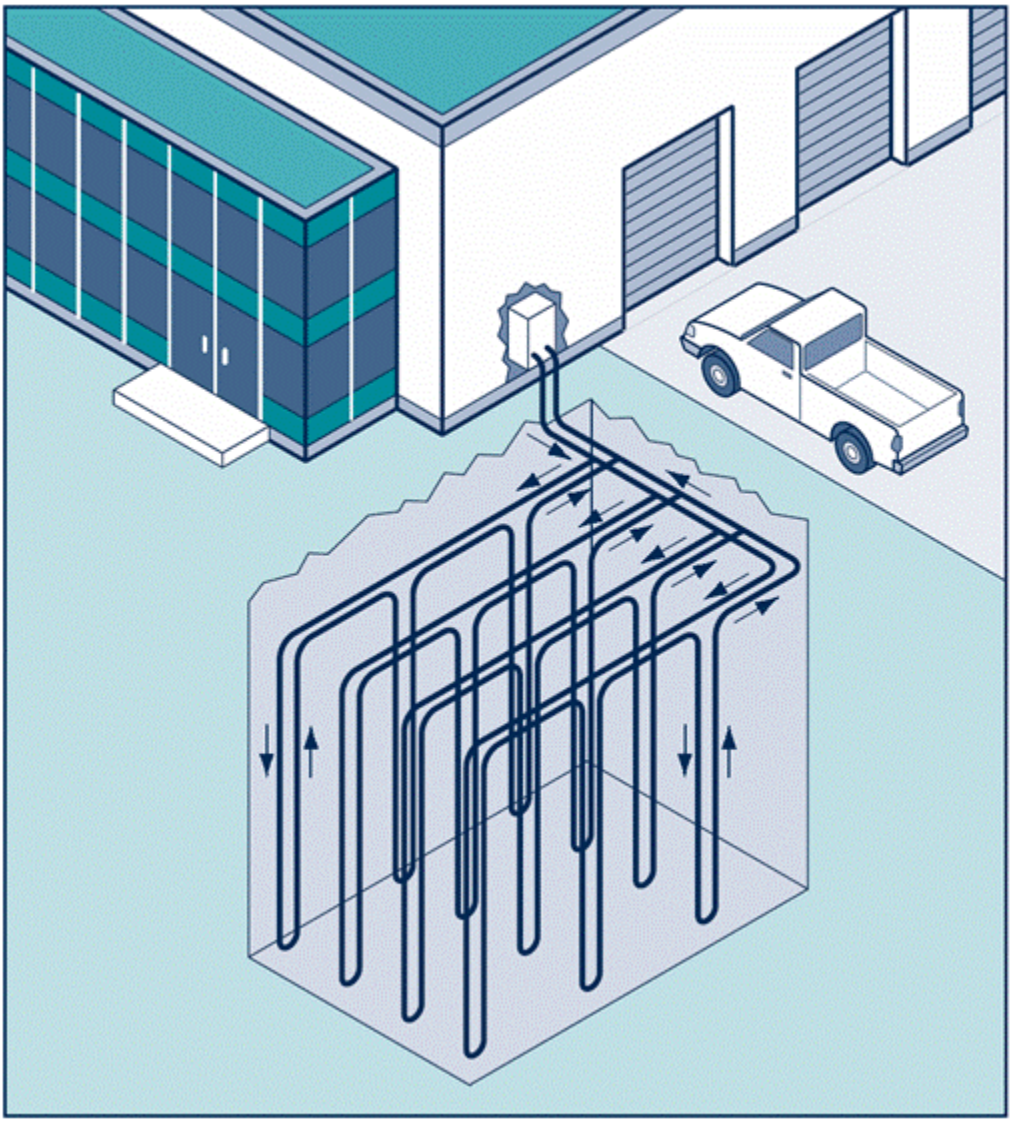


Figura 1.2. Las bombas de calor geotérmicas utilizan la temperatura estable del terreno como fuente de calor para calentar edificios en invierno y como colector para refrigerarlos en verano.

(Fuente: *Office of Geothermal Technologies. U.S. Department of Energy*).

En invierno, el terreno transfiere el calor que almacena al agua con anticongelante, que se utiliza para calefacción, ya que la bomba geotérmica eleva su temperatura. En verano, el agua en circuito cerrado transfiere al terreno el exceso de calor del edificio, de forma que se obtiene refrigeración.

El calor, a baja temperatura, almacenado a poca profundidad en suelos, rocas y aguas subterráneas, recibe en la bibliografía especializada diferentes denominaciones: energía geotérmica somera o a poca profundidad, energía geotérmica de baja intensidad o de baja entalpía, e incluso geotermia solar, geointercambio, bomba de calor conectada al terreno o de fuente subterránea, etc.

1.2.2. El flujo de calor terrestre

La energía térmica que se genera en el interior del planeta remonta lentamente hasta la superficie, pues las rocas de la corteza terrestre son muy malas conductoras del calor.

El flujo de calor se calcula multiplicando el gradiente geotérmico por la conductividad térmica de las rocas.

El **gradiente geotérmico** es la variación de temperatura en función de la profundidad, expresado en ºC/km.

La **conductividad térmica** es una propiedad característica de cada material que indica su capacidad para conducir el calor. Se expresa en W/m· ºC.

El producto de estas dos cantidades proporciona el **flujo de energía**, en forma de calor, por unidad de superficie y por unidad de tiempo. Se expresa en mW/m^2.

El gradiente geotérmico se mide en sondeos mineros o petrolíferos con la ayuda de sondas térmicas. Tiene una valor medio para todo el planeta de 3,3 ºC cada 100 m.

La conductividad térmica se mide en laboratorio sobre muestras de testigos de sondeos representativas de las formaciones geológicas atravesadas.

El flujo de calor terrestre es del orden de 60 mW/m^2. En determinadas regiones con presencia de anomalías geotérmicas, se pueden medir valores de varias centenas de mW/m^2, y en áreas de elevado potencial geotérmico puede alcanzar varios millares.

1.2.3. La propagación de calor en la Tierra

Los mecanismos por los que se propaga el calor en cualquier medio son: conducción, convección y radiación.

Conducción es la transferencia de calor a través de un medio por interacción entre partículas adyacentes. Puede tener lugar en sólidos, líquidos y gases, aunque es característica de los sólidos, puesto que en gases y líquidos siempre se producirá convección simultáneamente.

Si, por ejemplo, se pone una sartén al fuego, las partículas del fondo en contacto con el fuego vibran con mayor energía. La energía se va transmitiendo a las partículas vecinas más lentas y éstas, a su vez, la transmiten a las siguientes más alejadas del extremo caliente. Las partículas de otro medio, un alimento que se va a cocinar en la sartén, vibran empezando por la parte inferior, y la energía térmica se transmite hacia la parte superior del mismo.

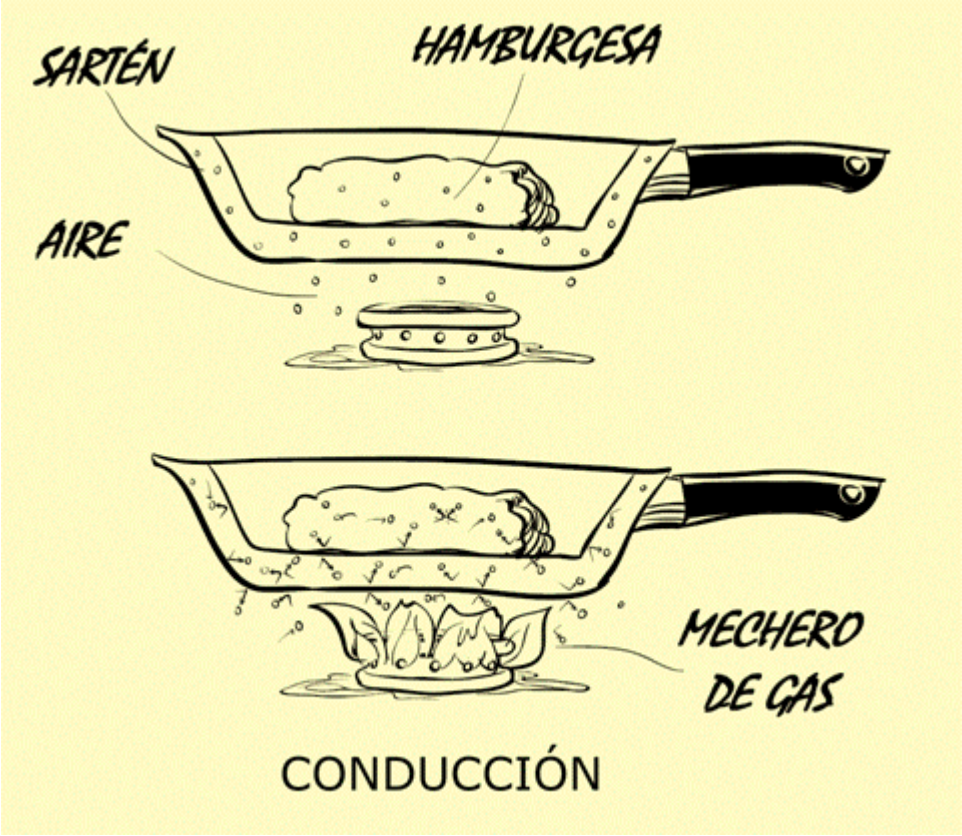


Figura 1.3. Ilustración para escolares del mecanismo de propagación del calor por conducción. (Fuente: *Will Suckow Illustration. ©2001 Geothermal Education Office*).

Convección es el modo en que se transfiere la energía térmica entre una superficie sólida y un fluido adyacente (líquido o gas). Comprende los efectos combinados de la conducción y el movimiento del fluido provocado por las diferencias de densidad del mismo.

Las partículas más calientes del fluido y, por tanto, menos densas, ascienden, desplazando a las más frías, que se hunden por gravedad, dado que son más densas, y éstas, posteriormente, al calentarse, son empujadas otra vez hacia arriba.

Cuanto más rápido es el movimiento del fluido, mayor es la transferencia de calor por convección.

Radiación es la emisión de energía en forma de ondas electromagnéticas, como resultado de cambios en las configuraciones electrónicas de los átomos o moléculas. **Radiación térmica** es la radiación emitida por los cuerpos debido a su temperatura.

Todos los materiales a temperatura superior al 0 absoluto emiten radiación térmica. Los más calientes radian más que los más fríos. Cuando una radiación electromagnética choca con un material, sus moléculas se mueven más deprisa, calentando el material.

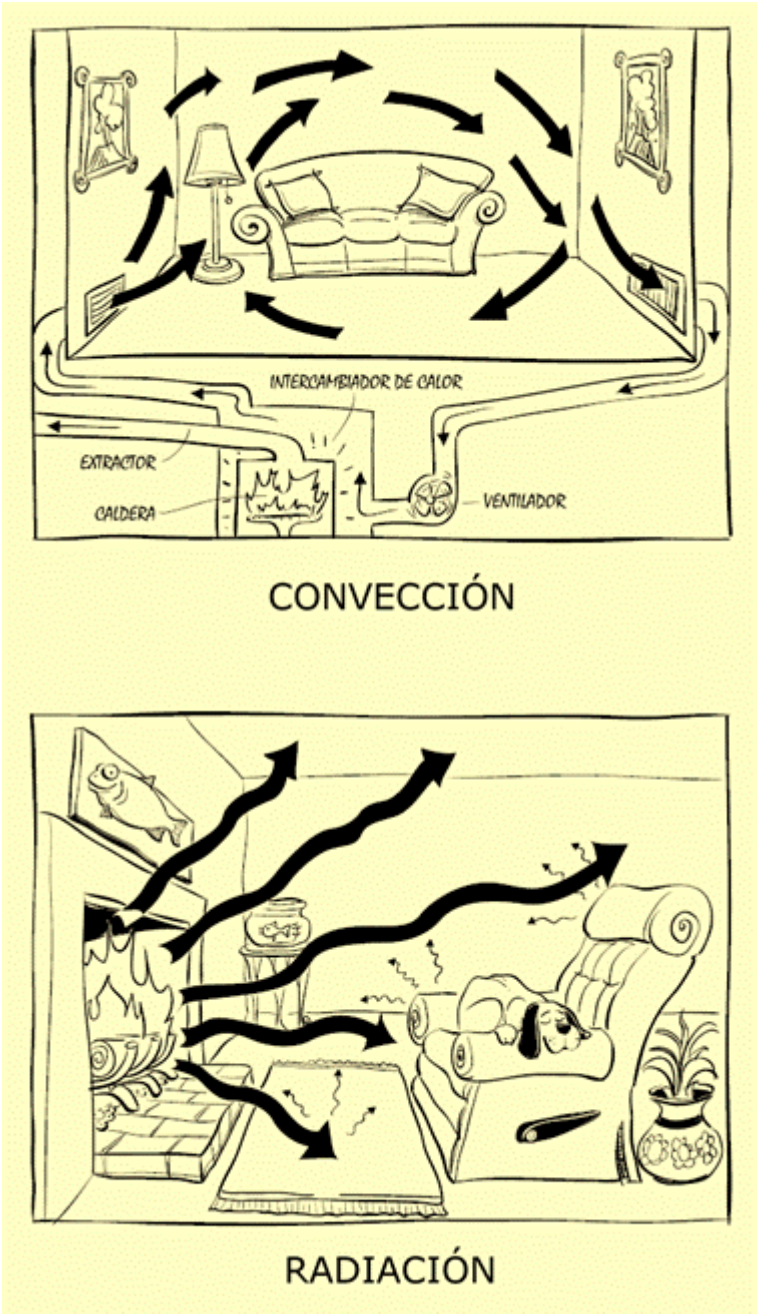


Figura 1.4. Ilustración para escolares de los mecanismos de propagación del calor por convección y radiación. (Fuente: *Will Suckow Illustration. ©2001 Geothermal Education Office*).

La transferencia de calor por radiación es la más rápida, se hace a la velocidad de la luz. No sufre atenuación en el vacío.

Anteriormente, se ha hablado de las tres capas concéntricas que constituyen la estructura interna del planeta: núcleo, manto y corteza.

En este sentido, para el estudio de las deformaciones de los materiales terrestres, la corteza y la parte rígida del manto se agrupan bajo el nombre de **litosfera**, que viene a tener un espesor de 75 – 100 km. La litosfera descansa sobre la **astenosfera**, que es la parte deformable del manto. Es una capa plástica en la que la temperatura y la presión alcanzan valores que permiten que se fundan las rocas en algunos puntos. A continuación se encuentra la **mesosfera**, que equivale al resto del manto y, por debajo, se encuentra la **endosfera**, que comprende el núcleo externo y el núcleo interno.

En la litosfera, la transferencia de calor se produce por conducción térmica, el calor se difunde sin que haya transferencia de materia. En la astenosfera el calor se evacua por convección térmica, con movimiento de materia. En la mesosfera el calor se transmite principalmente por convección.

A la escala de 1 segundo, el manto es sólido, pero a la escala de los tiempos geológicos, se comporta como un fluido viscoso, y sus movimientos profundos permiten que el calor interno se evacue a la superficie. En el núcleo externo, el calor se transmite, principalmente, por convección. En el núcleo interno el mecanismo de propagación más importante es la conducción.

Parte de la energía generada en el interior de la Tierra se consume en los procesos que allí suceden. El resto, añadido a la energía procedente de la desintegración de los isótopos radiactivos en el manto y en la corteza, es la que llega a la superficie y, finalmente, es irradiada hacia la atmósfera.

1.2.4. Manifestaciones geotérmicas

Determinadas zonas de la litosfera están sometidas a tensiones que generan gran cantidad de calor y presión, produciéndose fracturas y fallas por las cuales pueden ascender desde el manto, **magmas**, masas de rocas incandescentes, en estado de fusión total o parcial, con pequeñas cantidades de materias volátiles como agua, anhídrido carbónico, ácidos sulfúrico y clorhídrico, etc.

Si las condiciones tectónicas son favorables, los magmas, por su movilidad, pueden ejercer un empuje hacia arriba y romper la costra superficial de la Tierra, formando volcanes por los que se desparraman lavas, cenizas y gases.

Se estima que, para una determinada cantidad de magma arrojado por un volcán, un volumen diez veces mayor permanece debajo de la superficie, formando cámaras magmáticas que calientan las rocas circundantes.

Si esas rocas son permeables o están fracturadas, y existe circulación de agua subterránea, esta última capta el calor de las rocas, pudiendo ascender hasta la superficie a través de grietas o fallas, dando lugar a la formación de aguas termales, géiseres, fumarolas y volcanes de fango.

Foto 1.2. Fumarolas, laguna de aguas termales y volcán de fango. (*©2001 Geothermal Education Office*).

Estos fenómenos tienen características singulares que los diferencian de los afloramientos de aguas comunes. Por estar siempre asociados a las fases póstumas de los procesos magmáticos, además de la alta temperatura que presentan, están acompañados de gases, principalmente carbónicos o sulfurosos, produciendo estos últimos un olor fétido sumamente desagradable.

Juntamente con los volcanes, constituyen las manifestaciones super-

ficiales visibles del calor de la Tierra, y son los que tradicionalmente han atraído la investigación y el estudio de los recursos de energía geotérmica.

- **Volcán**: Abertura en la corteza terrestre por la cual sale lava, vapor y/o cenizas con fuerza, o se derraman continuamente o a intervalos.

- **Aguas termales**: Manantial natural del que brota agua más caliente que la temperatura del cuerpo humano. Puede congregarse en lagunas o fluir por arroyos.

- **Géiser**: Surtidor intermitente de agua líquida mezclada con vapor de agua, a una temperatura entre 70 y 100 ºC, con gran cantidad de sales disueltas y en suspensión.

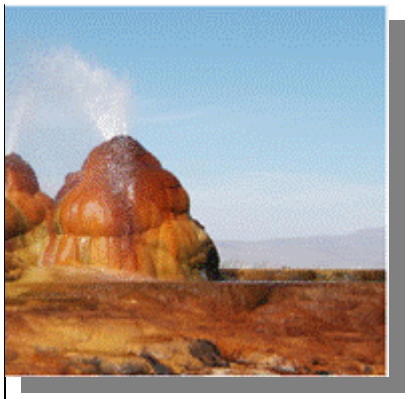
  Los minerales disueltos en el agua quedan depositados alrededor del géiser a modo de escoria o de sílice amorfa (geiserita). Muchos géiseres en el mundo se han extinguido o vuelto inactivos por causas naturales o por la instalación en sus inmediaciones de plantas de energía geotérmicas, como, por ejemplo, en Wairakei (Nueva Zelanda) y en Nevada (EE.UU.). La mayor concentración de géiseres se encuentra en el Parque Nacional de Yellowstone (Wyoming, EE.UU.).

Foto 1.3. Géiser Fly Ranch situado cerca de Gerlach en Nevada (EE.UU.)
(Fuente: *Hill, R. Sandia National Laboratories*).

- **Fumarolas**: Nombre genérico dado a la emisión de gases y vapores de agua a temperaturas muy elevadas, en ocasiones pueden alcanzar 500 ºC. Se las denomina, en función de su composición química, carbónicas, sulfurosas, clorhídricas, etc. Las **solfataras**, además de vapor de agua a 90 – 300 ºC, contienen sulfuro de hidrógeno que, en contacto con el aire, se oxida y deposita azufre alrededor de la abertura. Las **mofetas** son fumarolas más frías, 90 ºC, que desprenden grandes cantidades de anhídrido carbónico.

- **Volcanes de fango (*mud pots*)**: Erupciones de gases y barro que aparecen donde no hay bastante agua para sostener un géiser o una fuente termal. El vapor y los gases burbujean a través del barro formado por la interacción de los gases con rocas sedimentarias. En Italia se llaman **salsas**.

  Son más frecuentes en yacimientos petrolíferos relativamente poco profundos, donde los gases emanados elevan arcillas sumamente hidratadas, llegando a formar charcas o lagunas.



2 ENERGÍA GEOTÉRMICA

Cuando las reservas de los combustibles fósiles en vía de agotamiento acaparan la atención de mucha gente, unos pocos empiezan a interesarse por una forma de energía duradera y exenta de emisiones contaminantes que se encuentra justo debajo de nuestros pies: *el calor de la Tierra*.

La energía geotérmica se muestra como una de las energías más prometedoras y suscita un interés creciente en el conjunto de las estrategias que promueven la explotación de fuentes de energía versátiles y renovables.

2.1. DEFINICIÓN

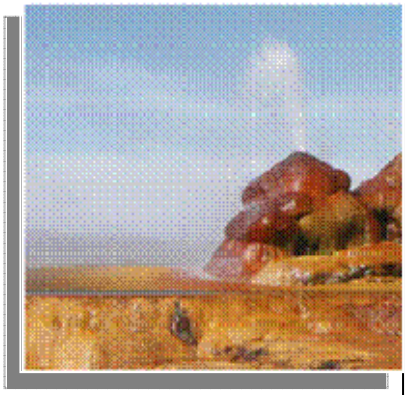
Energía geotérmica es la energía almacenada en forma de calor por debajo de la superficie sólida de la Tierra.

Esta definición es oficial en Alemania (VDI 4640) y ha sido adoptada por el Consejo Europeo de Energía Geotérmica (EGEC). Engloba el calor almacenado en rocas, suelos y aguas subterráneas, cualquiera que sea su temperatura, profundidad y procedencia.

No incluye el calor contenido en masas de agua superficiales, continentales o marinas, cuyo aprovechamiento también es posible mediante intercambiadores y bombas de calor.

Sin embargo, el calor contenido en rocas y suelos es demasiado difuso para ser extraído directamente de forma económica, siendo necesario disponer de un fluido, generalmente agua, para transportar el calor hacia la superficie de forma concentrada, mediante sondeos, sondas geotérmicas, colectores horizontales, o mediante intercambiadores de calor tierra-aire enterrados a poca profundidad en el subsuelo.

Una vez en superficie, el fluido geotermal, en función de su contenido en calor, se destinará a la producción de energía eléctrica, si es



posible, y en caso contrario, se aprovechará su calor directamente recurriendo al empleo de intercambiadores de calor, o de bombas de calor en caso necesario.

2.2. BREVE HISTORIA DE LA ENERGÍA GEOTÉRMICA

Las regiones volcánicas han sido siempre polos de atracción para los seres humanos, por el hecho de la existencia de fumarolas y de fuentes termales que podían utilizar para calentarse, cocer alimentos o simplemente bañarse.

Los restos arqueológicos más antiguos relacionados con la energía geotérmica han sido encontrados en Niisato, en Japón, y son objetos tallados en piedra volcánica que datan de la Tercera Glaciación, hace entre 15.000 y 20.000 años.

Hace más de 10.000 años, los Paleo-Indios de América del Norte, ya usaban las aguas termales para cocinar alimentos y sus minerales con propósitos medicinales. Los manantiales termales eran zonas neutrales donde los miembros de las naciones guerreras debían bañarse juntos en paz.

Las primeras civilizaciones, unos 3.500 años antes de Cristo, apreciaban la práctica de los baños termales y la utilización de barros ter-

Foto 2.1. Acantilado de más de 200 m de altura con manantiales de aguas termales en Pamukkale (Turquía).

mominerales, pero fueron griegos y, posteriormente, romanos los que dejaron numerosos ejemplos de la aplicación de la energía geotérmica en la calefacción urbana y en las tradicionales termas y baños públicos, que se convirtieron en gigantescos centros de ocio, salud y negocio. Las termas de Caracola, en Roma, tenían un aforo para 1.600 personas.

Los romanos difundieron su uso por todo el imperio, extendiéndose con el paso del tiempo a Japón, América y Europa.

La extracción de azufre, travertinos, caolines, limonitas y óxidos de hierro también ha estado ligada tradicionalmente a las fuentes termales.

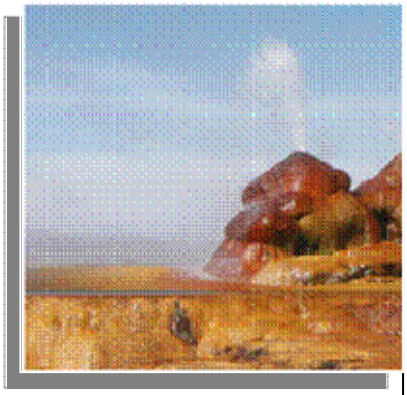
En 1330 ya existía una red de distribución de agua caliente en algunas casas en Chaudes-Aigues, Francia, por cuyo mantenimiento los usuarios tenían que pagar una tasa. Servía, al mismo, tiempo para lavar lana y pieles.

Por la misma época, en Italia, en la región de Volterra, en Toscana, pequeñas lagunas con agua caliente salobre de las que se escapaba vapor a más de 100 ºC, eran explotadas para extraer ácido sulfúrico concentrado y alumbre.

Durante mucho tiempo, el hombre se conformó con utilizar el calor que afloraba de forma natural en la superficie del planeta. A partir del siglo XIX, los avances técnicos y el mejor conocimiento del subsuelo permitieron buscar cada vez a mayor profundidad, y explotar cada vez mejor el calor de la Tierra.

El descubrimiento en 1818 de sales de boro en Larderello, Toscana (Italia), marcó el inicio de la utilización industrial de los recursos geotérmicos. En 1827 el fundador de esta industria, el francés Francois Larderel, desarrolló un sistema para utilizar el calor de los fluidos en el proceso de evaporación, en lugar de quemar madera de los bosques cercanos, que se encontraban en rápida deforestación.

En Francia, en 1833, en el barrio de Grenelle, en París, se inició el primer sondeo profundo, un pozo artesiano de 548 m de profundidad, que tardó ocho años en construirse y captó agua potable a 30 ºC en el acuífero de arenas albienses de la Cuenca de París. En Estados Unidos la primera red local de calefacción urbana entró en funcionamiento en 1892 en Boise, Idaho.



En el siglo XX el empleo de la energía geotérmica se incrementa, arrastrado por las necesidades cada vez más elevadas de energía para abastecer a la civilización moderna.

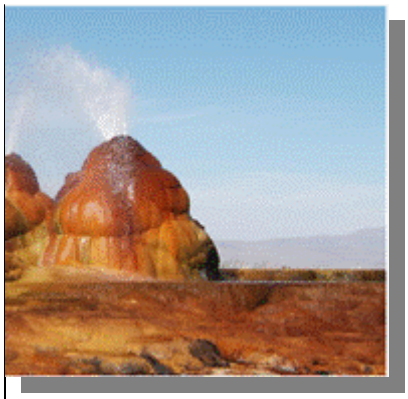
La industria del ácido bórico en Larderello dio paso, en 1904, a la generación de electricidad a partir de vapor geotérmico, entrando en funcionamiento en 1913 una central de 250 kW. Entre 1910 y 1940, el vapor de baja presión fue utilizado para calefacción de invernaderos, y de edificios industriales y residenciales. A finales de la Segunda Guerra Mundial, las tropas alemanas, durante su retirada, destruyeron por completo la central, los pozos y las tuberías.

Foto 2.2. Primera instalación de generación de energía eléctrica de origen geotérmico en Larderello (Italia), en 1904. (© *2000 Geothermal Education Office*).

En 1919 se perforaron los primeros pozos en Beppu, Japón, y en 1924 se instaló una planta experimental de 1 kW para producir energía eléctrica.

En 1921, en Estados Unidos, en la zona de The Geysers, en California, se perforaron dos pozos y se instaló una pequeña máquina de vapor que, conectada a una dinamo, producía electricidad para un pequeño establecimiento termal.

La primera red moderna de calefacción urbana alimentada por energía geotérmica se instaló en Reikjavik, Islandia, en 1930. Desde entonces, redes de calefacción que utilizan la energía geotérmica se encuentran en funcionamiento en Francia, Italia, Hungría, Rumanía, Rusia, Turquía, Georgia, China, Estado Unidos y la propia Islandia, donde,



hoy en día, el 95% de los habitantes de la isla tienen calefacción por medio de una red de 700 km de tuberías aisladas que transportan agua caliente.

Después de la Segunda Guerra Mundial, muchos países fueron atraídos por la energía geotérmica al considerarla competitiva respecto de otras fuentes de energía.

La primera instalación con bomba de calor geotérmica en una vivienda entró en funcionamiento en 1945 en Indianápolis, EE.UU., en la casa de Robert C. Webber, empleado de Indianápolis Power and Light Co. En 1947, Kemler, E.N., en su publicación "*Methods of Earth Heat Recovery for the Heat Pump*" ya mostraba los esquemas de los diferentes métodos de conexión de bombas de calor al terreno que se siguen utilizando actualmente. En 1948 entró en funcionamiento otra instalación en la Universidad del Estado de Ohio, y en 1949 se instaló otra en una casa experimental en la Universidad de Toronto, Canadá.

A partir de la década de los setenta se inicia, en diversas partes del mundo, una intensa actividad de exploración e investigación de recursos geotérmicos al objeto de utilizarlos para producción de energía eléctrica o para calefacción y agua caliente.

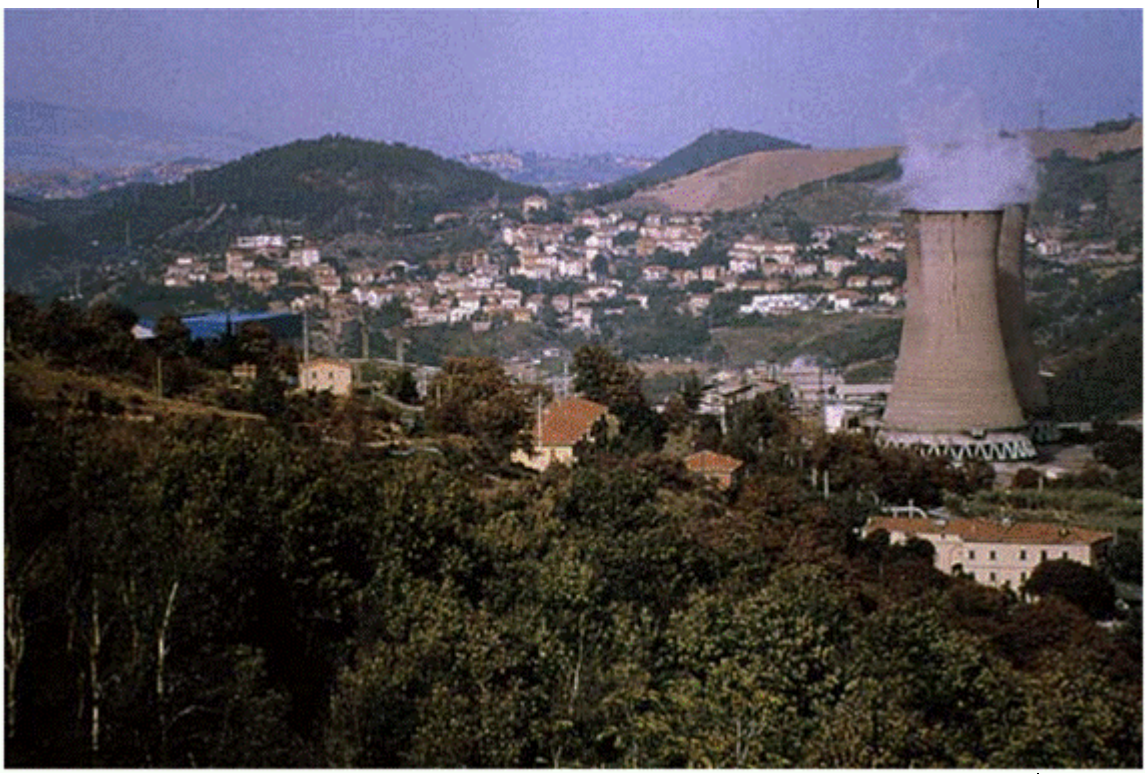
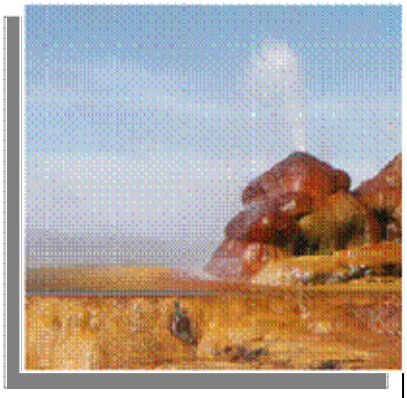


Foto 2.3. Después de 100 años el Campo geotérmico de Larderello continúa productivo. (*©2000 Geothermal Education Office*).



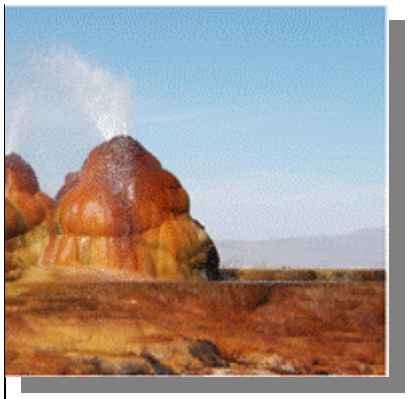
Es también a partir de esa década, como consecuencia de las alzas de los precios del crudo, pero particularmente a partir de la década de los noventa, bajo la presión de las exigencias ambientales y, más particularmente, de la reducción de las emisiones de CO_2 a la atmósfera, cuando el empleo de bombas de calor geotérmicas empieza a conocer un desarrollo prometedor a nivel internacional.

En menos de 15 años se ha llegado a la situación actual, con más de un millón de instalaciones, no sólo en América del Norte, Estados Unidos y Canadá, sino también en algunos países europeos, particularmente en Suecia, Suiza, Alemania y Austria. Sólo en Suecia, existen hoy en día más de 400.000 bombas de calor instaladas.

En el año 2000, la capacidad geotermo-eléctrica instalada a nivel mundial era de 8.000 MW_e, pasando a 9.000 MW_e en el año 2005. Por lo que respecta a los usos no eléctricos de la energía geotérmica, en el año 2000 la capacidad instalada en 59 países era de unos 15.000 MW_t. En 2005, la capacidad instalada en 72 países ascendió a alrededor de 28.000 MW_t, de los cuales unos 15.000 MW_t correspondían a bombas de calor geotérmicas.

En la Fig. 2.1 se puede apreciar la distribución mundial de los principales países productores de energía eléctrica de origen geotérmico en el año 2000, y en la Fig. 2.2 aquellos otros que aprovechan la energía geotérmica para usos directos del calor, en el mismo año.

Figura 2.1. Principales países productores de energía eléctrica geotérmica (potencia instalada en el año 2000). (Fuente: *Site Geothermie-Perspectives de l'ADEME et du BRGM*).



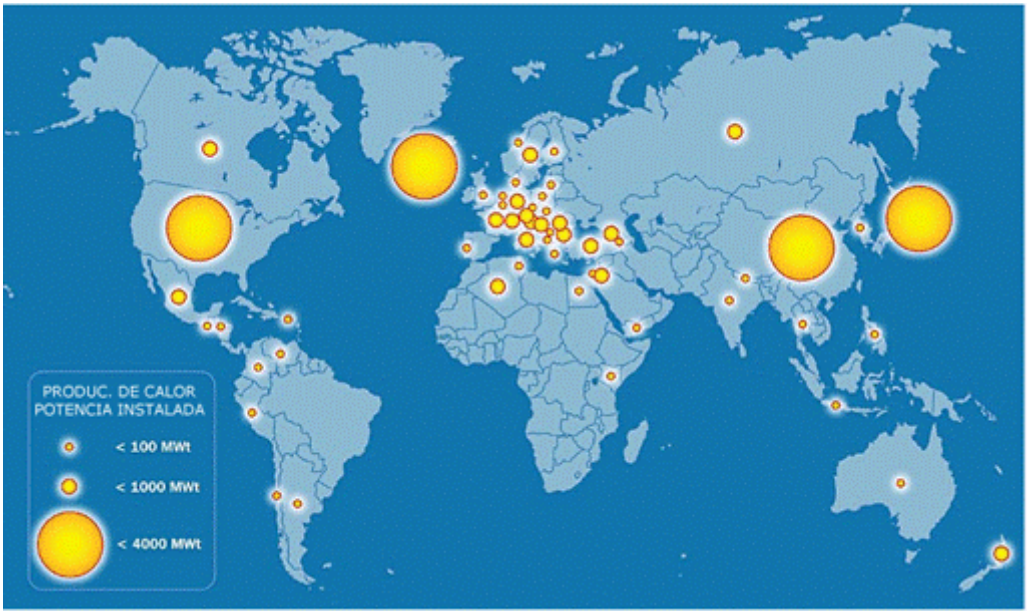


Figura 2.2. Producción de calor por países (potencia instalada en el año 2000). (Fuente: *Site Geothermie-Perspectives de l'ADEME et du BRGM*).

2.3. APLICACIONES Y TIPOS DE ENERGÍA GEOTÉRMICA

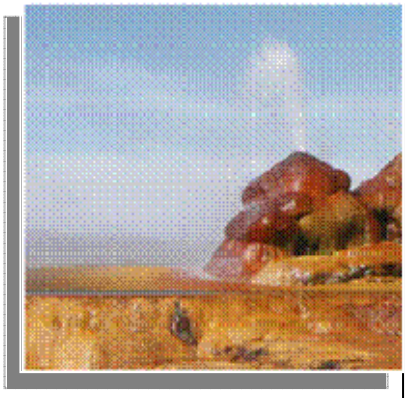
Las aplicaciones que se pueden dar a un fluido geotermal dependen de su contenido en calor, o lo que es lo mismo, de su entalpía.

Entalpía es la cantidad de energía térmica que un fluido, o un objeto, puede intercambiar con su entorno. Se expresa en kJ/kg o en kcal/kg.

Como no existen aparatos que determinen directamente la entalpía de un fluido en el subsuelo, pero sí existen sondas térmicas que miden la temperatura, y como la entalpía y la temperatura pueden considerarse, más o menos, proporcionales, la práctica habitual ha generalizado el empleo de las temperaturas de los fluidos geotermales en lugar de sus contenidos en calor, pues, al fin y al cabo, son las temperaturas las que determinan su futura aplicación industrial.

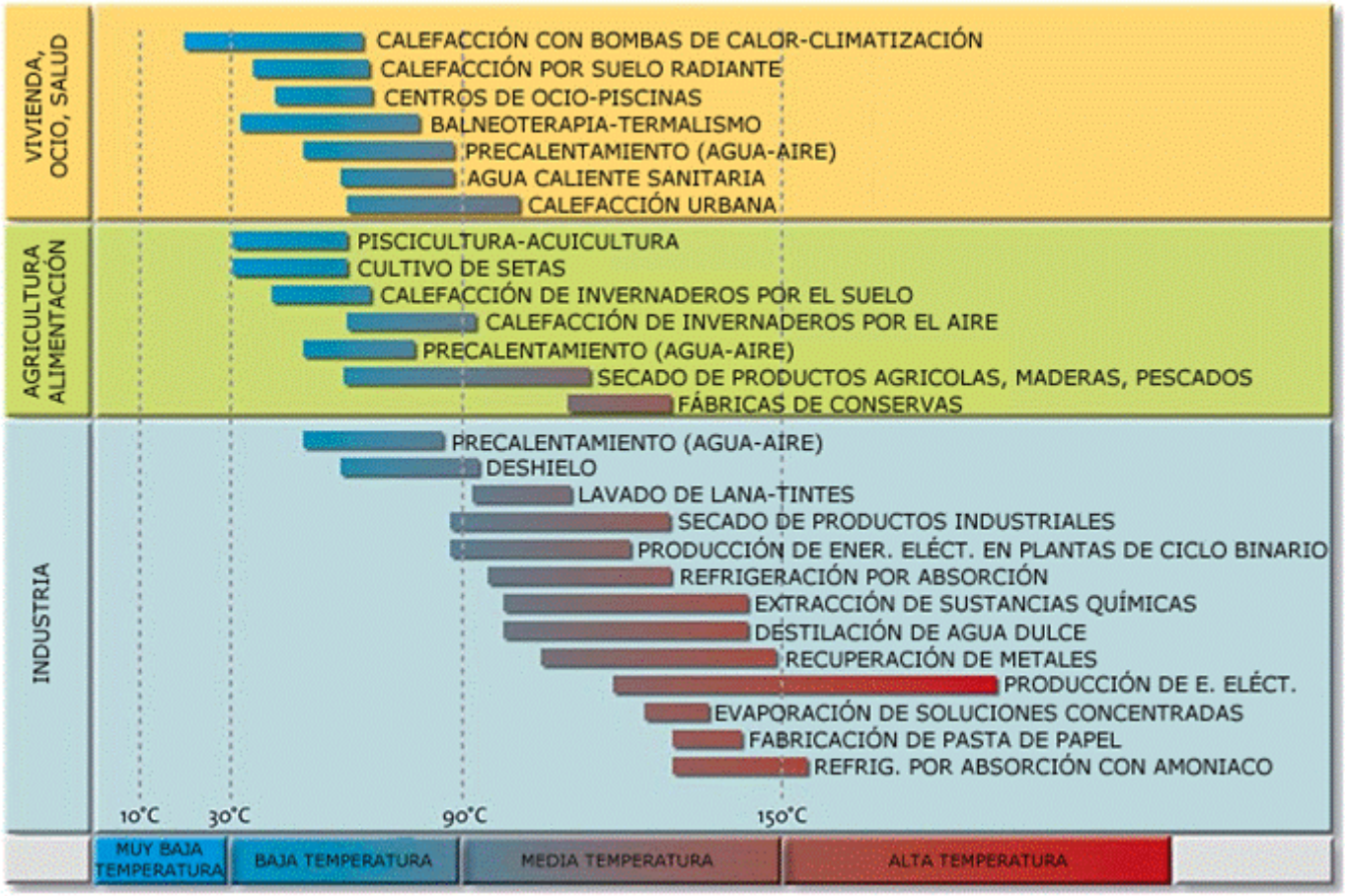
En la Tabla 2.1 se muestran las aplicaciones más importantes de la energía geotérmica con los rangos de temperatura de utilización, y en su parte inferior se establece una agrupación de la energía geotérmica, entre diferentes intervalos de temperatura, en cuatro grandes tipos: muy baja, baja, media y alta temperatura.

Diferentes autores establecen límites de temperatura distintos para



estos intervalos. La división que aparece en la tabla es la que establece el "*Código Minero*" en Francia, y se puede aplicar tanto a la energía geotérmica, como a las explotaciones, los yacimientos y los recursos geotérmicos.

Tabla 2.1. Principales usos de la energía geotérmica en función de la temperatura.



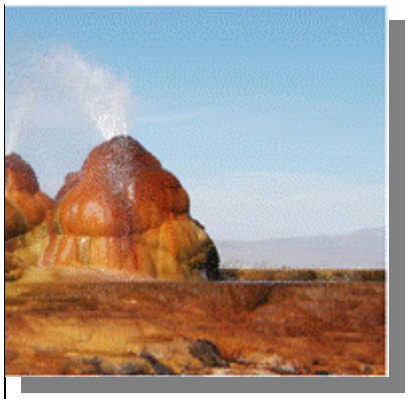
(Fuente: *Site Geothermie-Perspectives de l'ADEME et du BRGM*).

Así pues, se establecen las cuatro categorías siguientes para la energía geotérmica:

- **Alta temperatura: más de 150 ºC**
  Una temperatura superior a 150 ºC permite transformar directamente el vapor de agua en energía eléctrica.

- **Media temperatura: entre 90 y 150 ºC.**
  Permite producir energía eléctrica utilizando un fluido de intercambio, que es el que alimenta a las centrales.

- **Baja temperatura: entre 30 y 90 ºC.**
  Su contenido en calor es insuficiente para producir energía



eléctrica, pero es adecuado para calefacción de edificios y en determinados procesos industriales y agrícolas.

- **Muy baja temperatura: menos de 30 ºC.**
  Puede ser utilizada para calefacción y climatización, necesitando emplear bombas de calor.

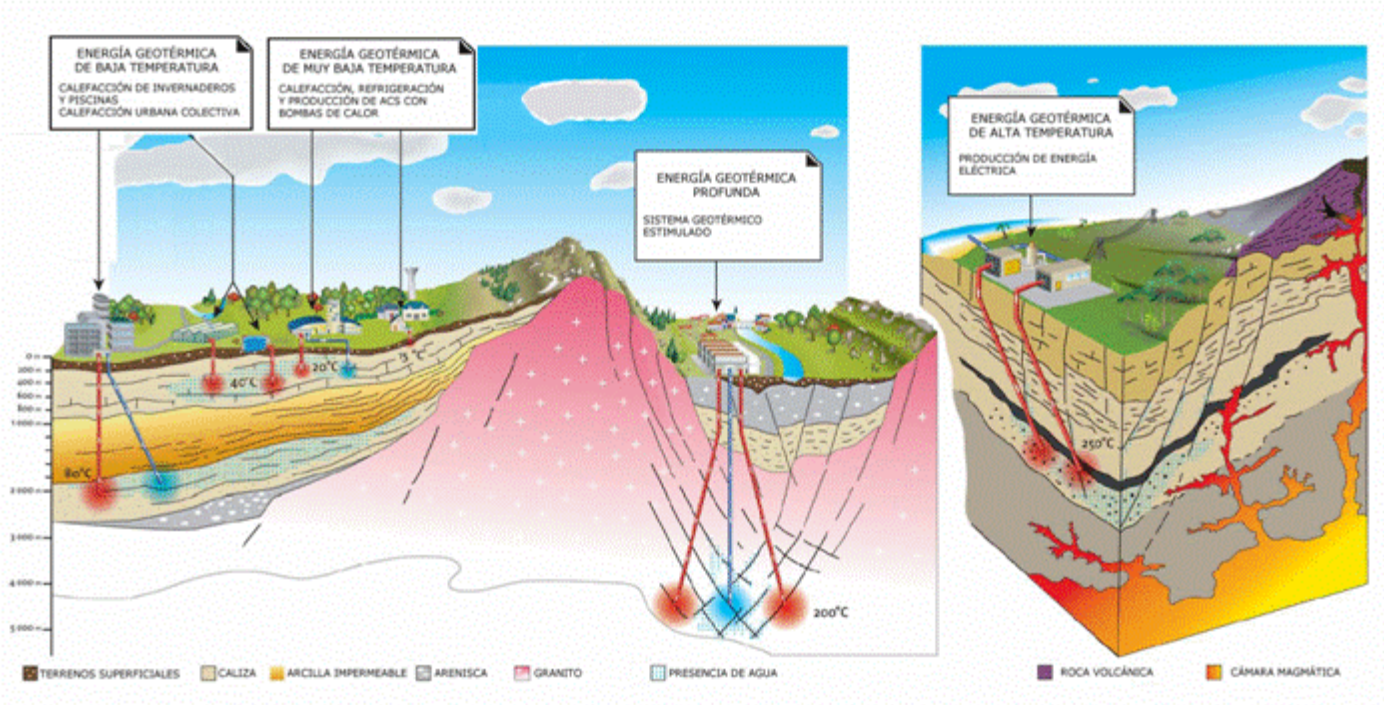


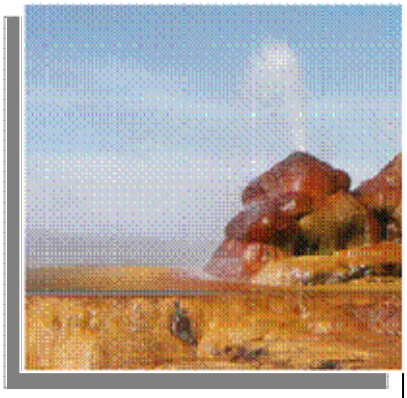
Figura 2.3. Diferentes tipos de energía geotérmica.
(Fuente: *Site Geothermie-Perspectives de l'ADEME et du BRGM*).

La Fig. 2.4 muestra un póster de *Geothermal Education Office* para divulgar las posibilidades de utilización de la energía geotérmica.

2.4. ENERGÍA GEOTÉRMICA Y DESARROLLO SOSTENIBLE

Dentro del grupo de las energías renovables, la energía geotérmica es muchas veces ignorada. Sin embargo, ya existía antes de que la expresión fuese inventada y mucho antes de que se hablara de desarrollo sostenible, de gases de efecto invernadero o de lucha contra el cambio climático. A pesar de su antigüedad, o tal vez a causa de ella, no se beneficia de todo el interés que merece.

El calor terrestre es una fuente de energía duradera para la producción de calor y de electricidad, que no depende de las condiciones



climatológicas, de la estación anual, del momento del día ni del viento. La diversidad de temperaturas de los recursos geotérmicos permite un gran número de posibilidades de utilización.

La energía geotérmica representa una respuesta local, ecológica y eficiente para reducir costes energéticos.

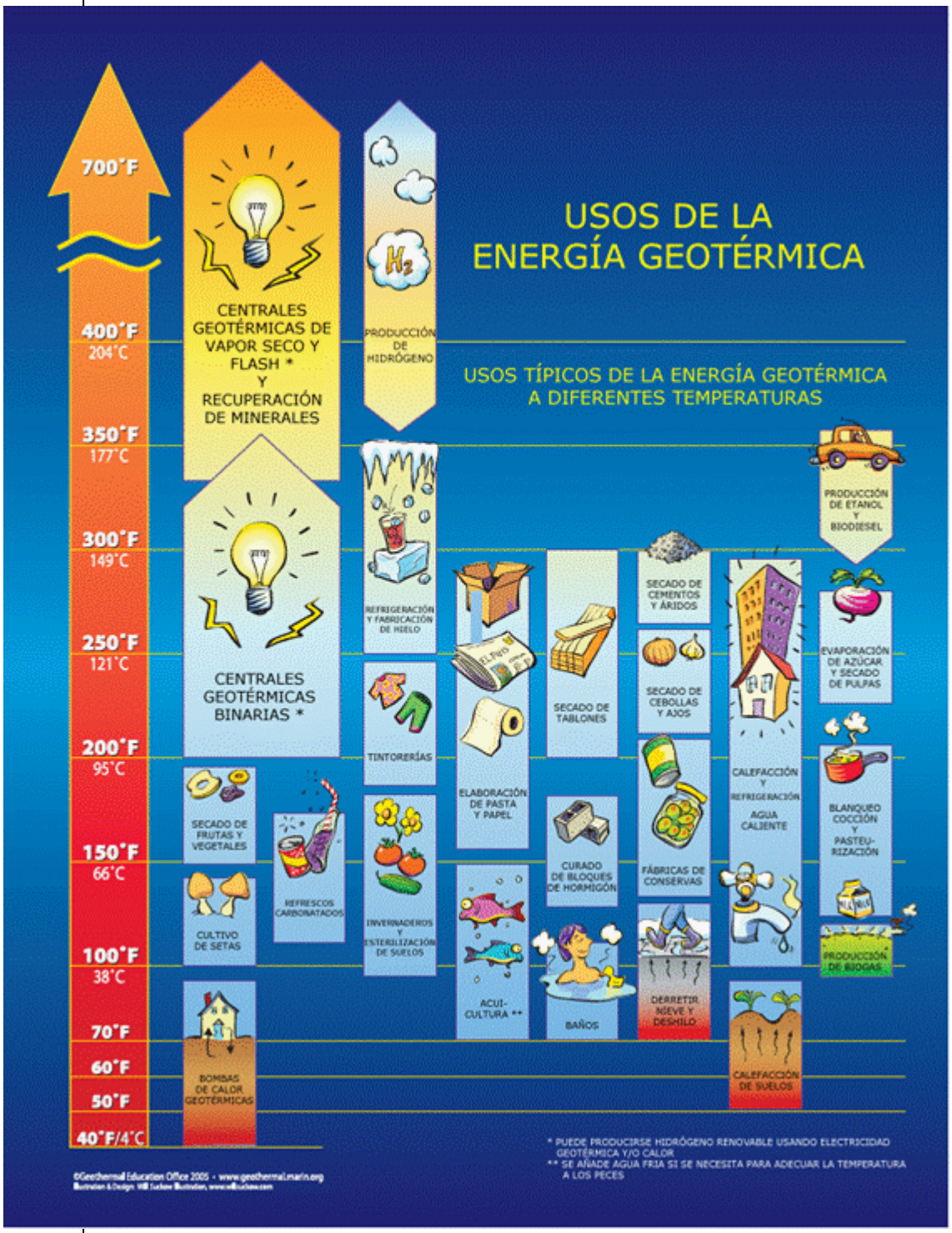
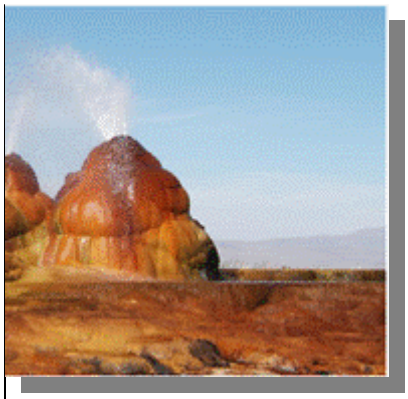


Figura 2.4. Usos de la energía geotérmica.
(Fuente: *Will Suckow Illustration. ©Geothermal Education Office 2005*).



2.4.1. Energía renovable

A la escala del planeta, la energía geotérmica es el recurso energético más grande que existe. Aunque la Tierra se enfría, pues evacua más calor que el que produce, el ritmo de ese enfriamiento es de unos 130 ºC cada mil millones de años. A causa de la lentitud del mecanismo de difusión térmica, la Tierra está perdiendo hoy en superficie el calor que ella misma produjo en el pasado.

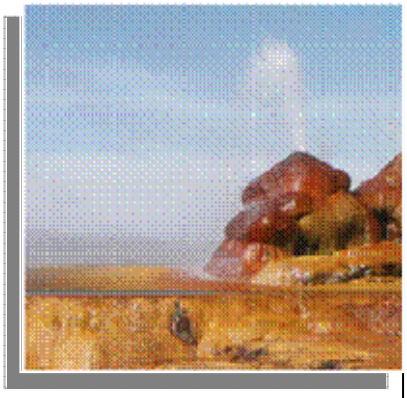
El calor de la Tierra es ilimitado a la escala humana y estará disponible muchos años en sus yacimientos para las generaciones futuras, siempre que la explotación de los recursos geotérmicos se haga de forma racional. Todo lo contrario que las energías fósiles que se agotan a medida que se extraen.

Por lo que respecta a la vida de las explotaciones, entre 20 y 40 años, hay que tener en cuenta que el calor está siempre contenido en la roca o en el terreno. Si el medio de extracción es agua subterránea, ésta se renueva de forma natural por recarga con aguas superficiales o por inyección artificial en el subsuelo. Si se emplean sondas geotérmicas con circulación de un fluido en circuito cerrado, el subsuelo se enfría algunos grados respecto a la temperatura inicial. Si la sonda geotérmica está correctamente dimensionada, el flujo de calor compensa parcialmente esa disminución de temperatura durante el periodo de reposo estival, o al invertir el sentido de funcionamiento y transportar calor desde la vivienda unifamiliar o edificio que se quiere refrigerar, hasta el subsuelo.

2.4.2. Energía limpia

Ninguna instalación que emplee energía geotérmica precisa quemar combustibles, por consiguiente, no contribuye a la emisión de gases de efecto invernadero.

Las instalaciones que emplean bombas de calor geotérmicas para calefacción, refrigeración y producción de agua caliente sanitaria sólo consumen energía eléctrica para el funcionamiento de los compresores eléctricos, de las bombas de circulación y de los ventiladores del interior del edificio. Las emisiones equivalentes de gases son únicamente las correspondientes a la producción en origen de esa energía, muy inferiores a las de los sistemas tradicionales, pues el consumo de electricidad se reduce notablemente. En la Fig. 2.5 se pueden apre-



ciar las emisiones de CO_2 que produce la calefacción de una vivienda–tipo de 150 m^2 con diferentes tipos de energía.

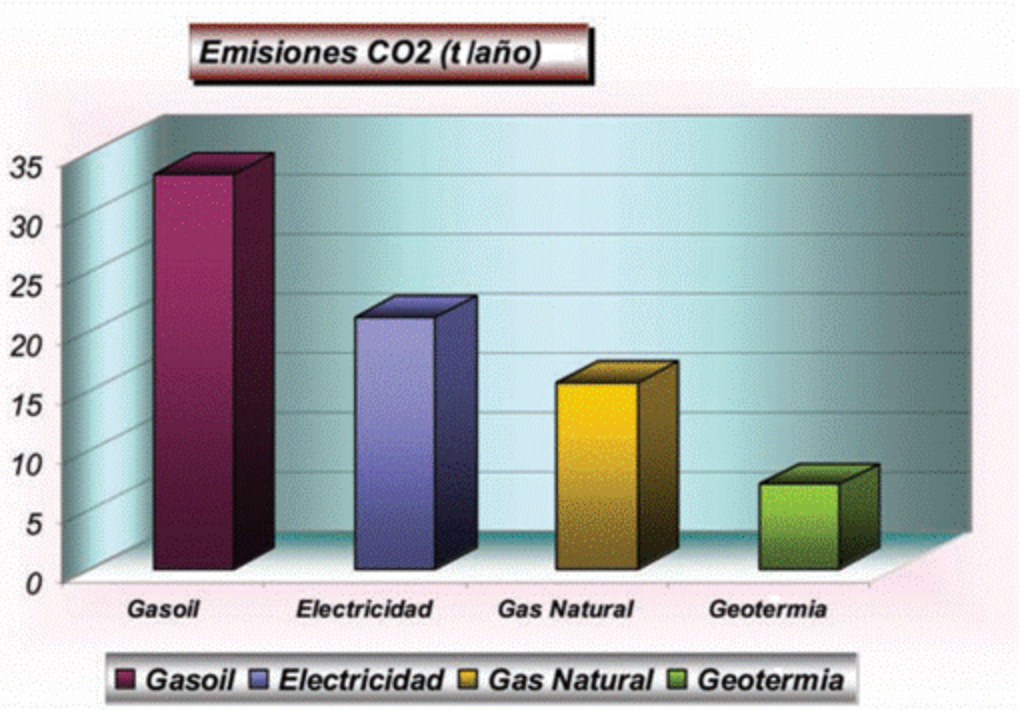


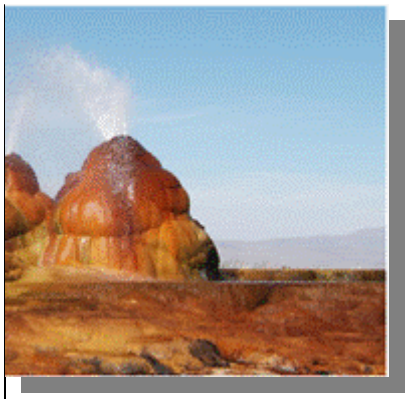
Figura 2.5. Emisiones de CO_2 con diferentes fuentes de energía en una vivienda-tipo de 150 m^2.
(Fuente: *Calor Natural. Ruiz J. 2007*).

Las bombas de calor geotérmicas utilizan sistemas de refrigeración sellados en fábrica, con menos cantidad de refrigerante que los sistemas de aire acondicionados, que rara vez o nunca son recargados, por lo que no contribuyen a la destrucción de la capa de ozono.

En el resto de aplicaciones directas del calor y en la producción de energía eléctrica, las emisiones pueden llegar a ser casi nulas, reinyectando las aguas geotermales a sus acuíferos.

Los fluidos geotermales que se emplean en las plantas de producción de energía eléctrica pueden contener gases disueltos, sales, en ocasiones en concentraciones elevadas, arenas y otros sólidos en suspensión.

De forma general, se puede decir que las centrales emiten a la atmósfera pequeñas cantidades de CO_2, muy pequeñas cantidades de SO_2, y no emiten óxidos de nitrógeno.



Las plantas que trabajan con vapor seco y con vapor "*flash*" emiten a la atmósfera vapor de agua y gases. Las plantas de ciclo binario prácticamente no emiten gases, ya que funcionan utilizando un fluido secundario de bajo punto de ebullición, que es evaporado en un intercambiador de calor antes de hacer girar la turbina.

Foto 2.4. Emisiones de vapor en una central de vapor seco en The Geysers, California (EE. UU.) (Fuente: *Pacific Gas and Electric*).

La cantidad media de CO_2 emitida por las centrales geotermoeléctricas en el mundo es de 55 g/kWh, mientras que una central de gas natural emite 10 veces más.

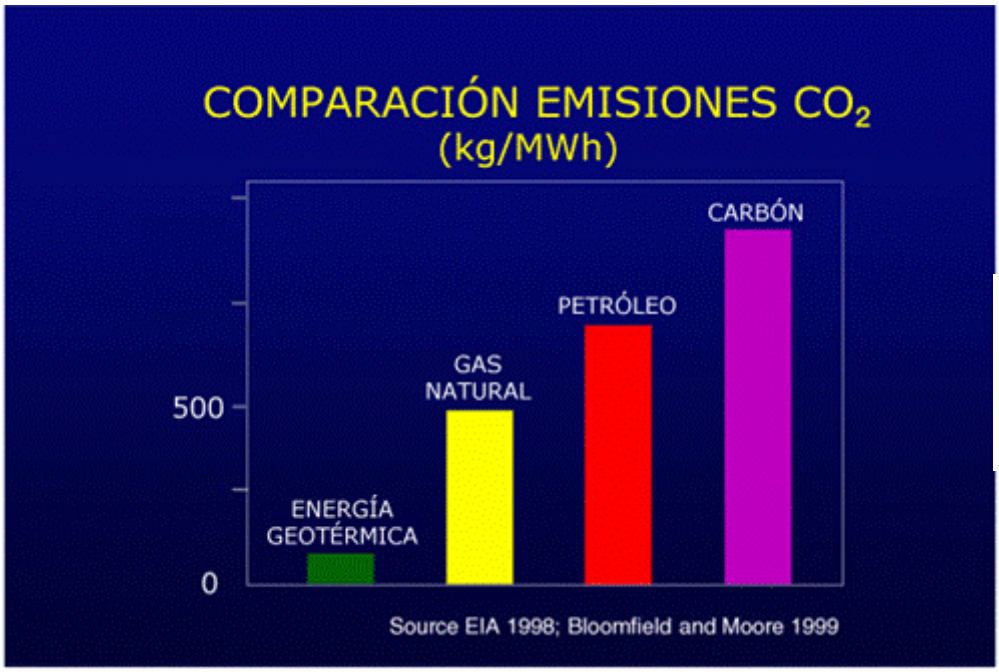
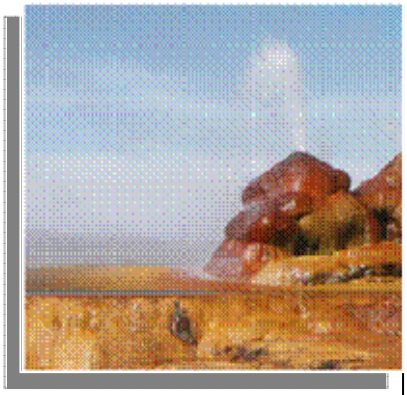


Figura 2.6. Comparación de emisiones de CO_2 en centrales eléctricas. (*©2000 Geothermal Education Office*).



Las sales y los minerales disueltos son reinyectados, con el agua sobrante del proceso, en sus acuíferos. Las arenas y sólidos en suspensión son filtrados, secados y depositados como lodos en lugares apropiados. Algunos de esos sólidos, como por ejemplo cinc, sílice y azufre, pueden recuperarse como subproductos y comercializarse.

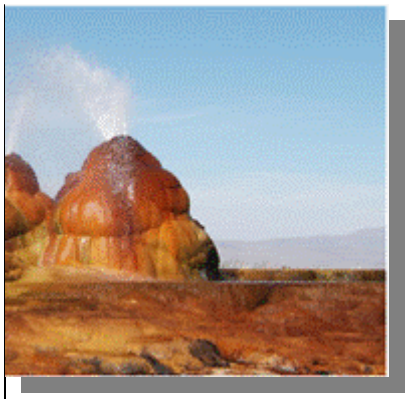
Las instalaciones para redes de calefacción local y las que trabajan con bombas de calor no producen impacto visual, son invisibles. Sólo una tapadera metálica o una pequeña estructura superficial señala la ubicación de los sondeos en el subsuelo. Las instalaciones para calefacción se encuentran en los sótanos de los edificios a los que abastecen.

Las centrales geotérmicas eléctricas modernas son muy compactas, ocupan entre 0,5 y 3,5 ha/MW frente a 2,2–4,5 ha/MW de una central nuclear, y alrededor de 8,5 ha/MW de una central de carbón. Al no necesitar transportar, almacenar ni quemar combustibles, pueden ser integradas fácilmente en el paisaje.

Foto 2.5. Central de ciclo binario Mammoth Pacific en la parte oriental de la cadena de montañas Sierra Nevada, California (EE.UU.) (Fuente: *Geothermal Resources Council*).

2.4.3. Energía económica

Un sistema con bomba de calor geotérmica para una casa individual supone un coste de inversión elevado, por regla general del doble de una instalación clásica de calefacción y refrigeración. Sin embargo, los costes de explotación son mucho más bajos que los



de estos otros equipos, pues los costes de mantenimiento son generalmente muy reducidos y, fundamentalmente, porque su rendimiento energético elevado reduce el consumo de la energía de pago.

Si la calefacción es la necesidad principal de la vivienda, la opción geotérmica se ve favorecida por el menor consumo de electricidad, y por no consumir gas natural o fuel-oil, más caros. Si las necesidades que prevalecen son las de refrigeración, el consumo de energía eléctrica es muy inferior al de los climatizadores clásicos, que son menos eficaces. Si se necesita calefacción y refrigeración, la opción geotérmica tendrá un menor coste de energía eléctrica, pues al ser los equipos de menor potencia, el consumo en las horas pico de demanda, cuando las tarifas son más elevadas, es menor. Además, el periodo de retorno de la inversión se acorta al estar funcionando más horas al año.

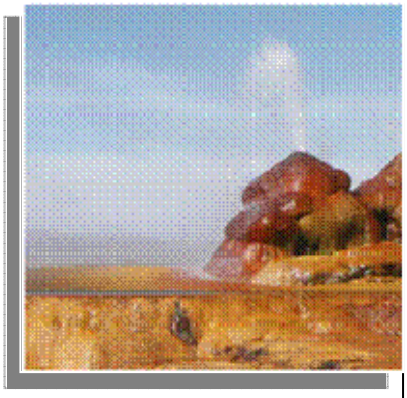
El acceso a un recurso geotérmico de baja, media o alta temperatura necesita de una inversión inicial elevada. Particularmente caras resultan las fases de exploración en terrenos desconocidos, y la realización de uno o varios sondeos de investigación. La inversión disminuye a medida que se reduce el área a investigar y se lleva a cabo el desarrollo del yacimiento. Nada que sea ajeno a los sectores minero y petrolero, que no por ello dejan de investigar yacimientos minerales y de hidrocarburos en cualquier parte del mundo con posibilidades de explotación de recursos.

Siendo la inversión inicial elevada, el coste de explotación es bajo y cada vez será más competitivo con la explotación de las energía fósiles, donde los precios irán creciendo con el agotamiento de los recursos y las restricciones ambientales.

2.4.4. Energía eficiente

Las instalaciones para calefacción y climatización de edificios se diseñan, generalmente, para condiciones extremas. Gracias a la energía geotérmica, por la mayor estabilidad de las temperaturas del subsuelo, se podrán instalar bombas de calor de menor capacidad que si tuviesen que utilizar la temperatura ambiente exterior.

En climas con variaciones de temperatura importantes, las bombas de calor geotérmicas tienen mejores prestaciones que las bombas de calor que utilizan aire exterior, cuyo rendimiento baja considerablemente con las temperaturas extremas.



Un sistema geotérmico utiliza la electricidad para activar el compresor de la bomba de calor, los ventiladores del interior del edificio, las bombas de circulación de los circuitos de intercambio con el subsuelo y en el edificio, y los sistemas de control. En general, se produce entre 2 y 4 veces más energía térmica o frigorífica que la energía eléctrica que se consume. Eso significa que estos sistemas tienen rendimientos de 200 a 400%, muy superiores a las resistencias eléctricas, donde el rendimiento máximo es del 100%.

También son superiores a los sistemas clásicos de climatización. Una instalación que utilice energía geotérmica, comparada con instalaciones clásicas de bombas de calor o de climatización, permite ahorros de energía de 30 a 70% en calefacción y de 20 a 50% en climatización. Un sistema geotérmico también compite ventajosamente con otros sistemas de calefacción, incluso con los sistemas con mejores prestaciones de gas natural.

La tecnología que emplean las bombas de calor geotérmicas ha sido calificada por la Agencia de Protección del Medio Ambiente de Estados Unidos como la más eficiente para calefacción y refrigeración existente hoy en día.

El Departamento de Energía de EE.UU. considera que la bomba de calor geotérmica es ideal para aplicaciones en edificios residenciales, comerciales y gubernamentales.

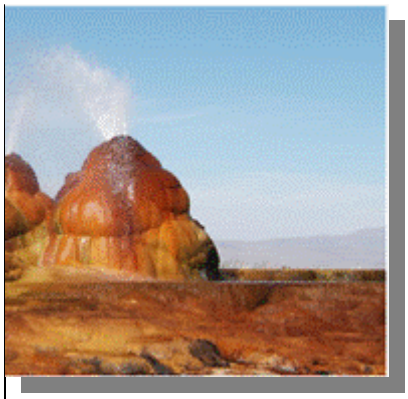
2.4.5. Energía continua

Contrariamente a la energía solar o a la eólica, la energía geotérmica no depende del clima, de la radiación solar ni del viento. Está disponible 24 horas al día, 365 días al año.

La energía geotérmica depende de las características intrínsecas del subsuelo (gradiente geotérmico, permeabilidad de las rocas, etc.), constantes para cada caso concreto, lo cual asegura una gran regularidad en su utilización. Los coeficientes de disponibilidad de las centrales geotérmicas eléctricas son del 90% de media, y en redes de calefacción se puede alcanzar el 100%.

2.4.6. Energía para todo el mundo

A diferencia de las energías fósiles, las más utilizadas hoy en día, los



recursos geotérmicos no están localizados en lugares concretos, frecuentemente desérticos o en el fondo de los mares. El calor del subsuelo está presente en todos los continentes a disposición de la Humanidad.

Dependiendo de las formaciones geológicas o de la composición de las rocas, y del gradiente geotérmico, la energía geotérmica será de mayor o menor temperatura, y más o menos fácil de extraer, pero las técnicas existentes hoy en día permiten un desarrollo planetario de la energía geotérmica.

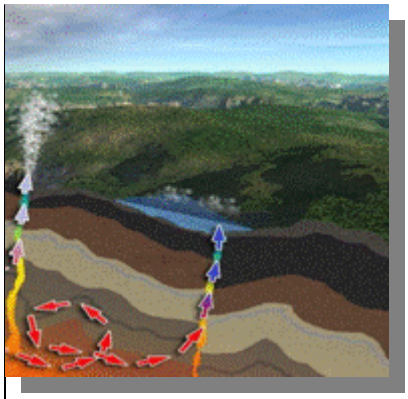
2.4.7. Energía local

Por su propia naturaleza, la energía geotérmica es una energía local, para consumir sobre el propio terreno. Es la respuesta más próxima para satisfacer las necesidades energéticas de calefacción, refrigeración y producción de agua caliente sanitaria.

Reduce la dependencia de importaciones energéticas y asegura la regularidad en el abastecimiento. Disminuye las pérdidas energéticas derivadas del transporte de electricidad y la contaminación que provoca el transporte de combustibles por carretera.

La relación entre el calor del subsuelo y su aprovechamiento en superficie es de doble sentido, de forma que es posible adaptar los recursos geotérmicos a las necesidades y las necesidades a los recursos geotérmicos.

La energía geotérmica ofrece oportunidades económicas para la implantación de nuevas industrias y favorece el desarrollo local.



3 RECURSOS GEOTÉRMICOS

El Departamento de Energía de Estados Unidos, en su publicación de Septiembre de 2003 "La energía geotérmica en la actualidad", afirma textualmente:

> *"Es muy vasto el potencial de energía geotérmica que poseemos en la Tierra, justo debajo de nuestros pies. Este increíble recurso equivale a 50.000 veces la energía que se obtiene de todos los recursos de gas y petróleo del mundo".*

En la Fig. 3.1 se muestra un gráfico con el potencial geotérmico de EE.UU., tal y como se recoge en diferentes publicaciones.

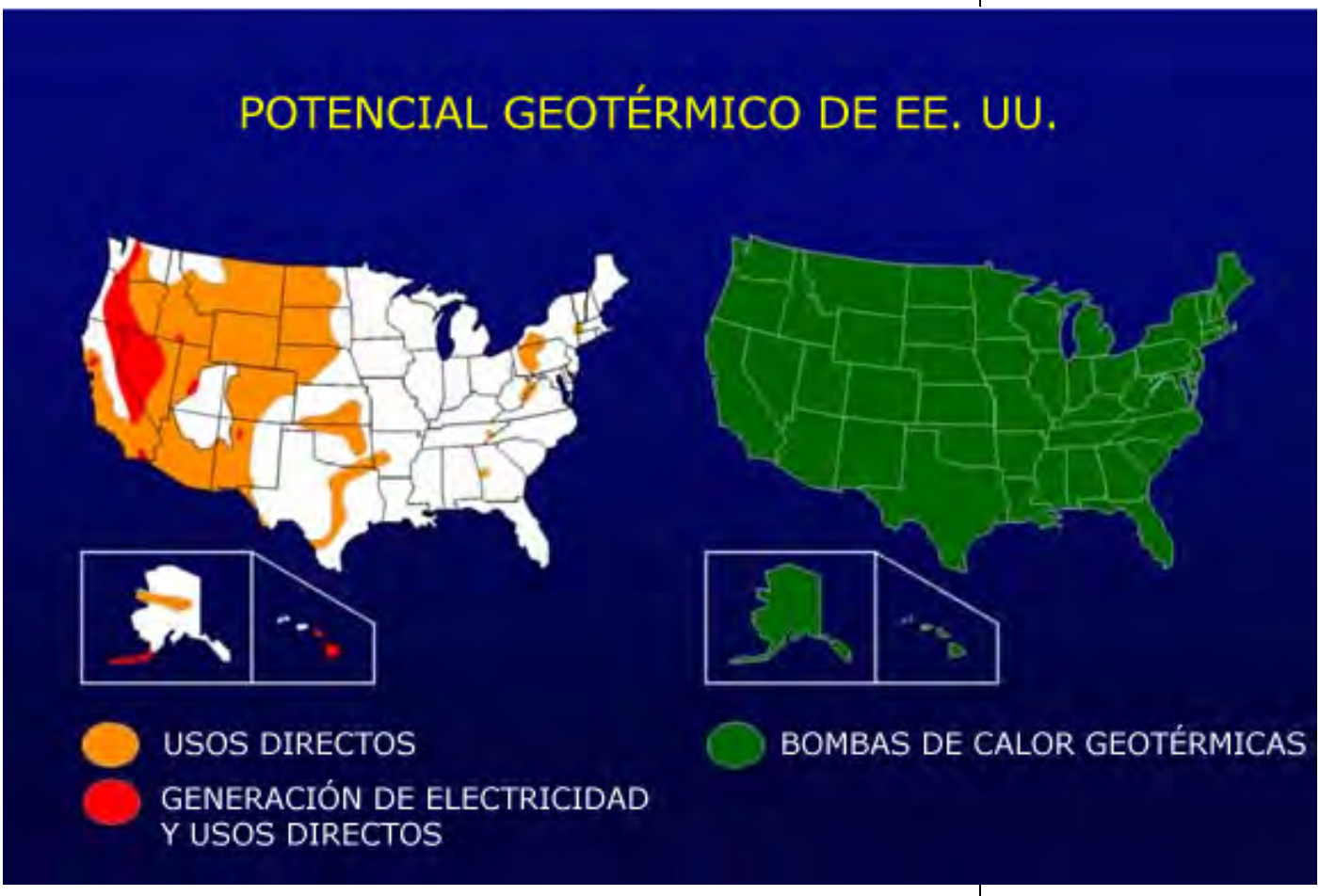
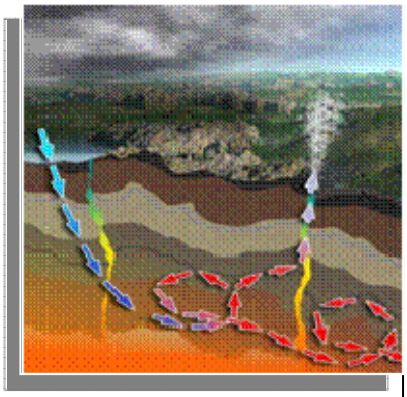


Figura 3.1. Potencial geotérmico de Estados Unidos.
(Fuente: *@2000 Geothermal Education Office*).



Ante tal manifestación cabe preguntarse si es que acaso, gracias a la energía geotérmica, la Humanidad tiene abastecidas sus necesidades energéticas para los próximos siglos, o si tal vez se refiere sólo a los habitantes de ese país.

Probablemente no ocurra ni una cosa ni otra, pues en tan pocas palabras se mezclan conceptos tales como potencial de energía geotérmica, increíble recurso, energía que se obtiene (¿térmica, eléctrica, ...?) y recursos de gas y petróleo, que admiten diferentes acepciones, dependiendo de la óptica con que se contemplen.

El aprovechamiento industrial de la energía geotérmica es un acontecimiento relativamente moderno, que ha experimentado un gran crecimiento en los últimos años. Ese crecimiento no se ha visto acompañado de un desarrollo comparable de la terminología científica, y términos similares son utilizados a menudo con distinto propósito por diferentes autores.

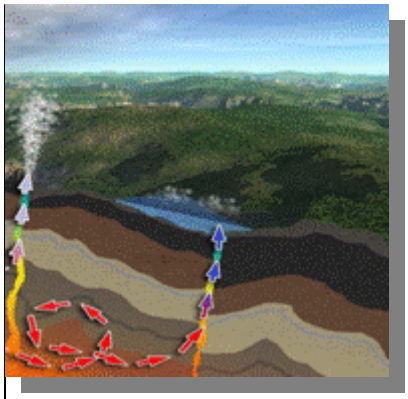
3.1. DEFINICIÓN Y TIPOS DE RECURSOS

Recurso geotérmico es una concentración de calor que existe en la corteza terrestre en forma y cantidad tales que su extracción económica es actual o potencialmente posible.

Esta definición está en consonancia con la que se utiliza en los sectores minero y de hidrocarburos para recurso mineral: "*concentración de materiales sólidos, líquidos o gaseosos que existen en forma natural en la corteza terrestre en forma y cantidad tales que su extracción económica es actual o potencialmente posible*".

Sólo difieren en la expresión "*en forma natural*" toda vez que hay, o puede haber en el futuro, explotaciones que aprovechan calor del subsuelo que no es de origen natural, sino provocado por la acción humana.

Entre estos últimos se encuentran el calor que se evacua al terreno en verano por los sistemas de intercambio de calor que utilizan bombas de calor geotérmicas, y el calor que se puede recuperar en túneles, ferroviarios o de carreteras, y en galerías y túneles de minas subterrá-



neas que explotan sulfuros metálicos expuestos a procesos exotérmicos de oxidación.

No sería el calor de las aguas que se infiltran por sus paredes, que al fin y al cabo son de origen natural, sino el de las instalaciones de ventilación forzada con aire, necesarias para la explotación comercial de los primeros y para la explotación de minerales en los segundos. En ambos casos el calor es un subproducto que es necesario evacuar.

Con respecto a la definición de energía geotérmica, añade la condición de que el calor en el subsuelo pueda ser extraído económicamente en la actualidad o en el futuro. No cifra la cuantía de ese futuro, y no presupone que los medios para su explotación estén disponibles.

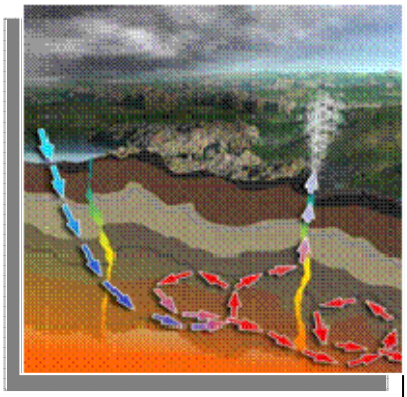
El concepto de recurso geotérmico es tan amplio que engloba desde el calor que se puede encontrar en los horizontes más superficiales del suelo, para los que el calor que proviene del interior de la Tierra tiene una importancia insignificante, pues es el propio suelo el que actúa como una masa térmica que absorbe energía solar, hasta el calor almacenado en rocas situadas a las profundidades que se podrían alcanzar con técnicas de perforación de pozos petrolíferos, que actualmente son de unos 10 km. El sondeo más profundo, más de 12 km, ha sido perforado en la Península de Kola, en Rusia.

Con la tecnología disponible hoy en día para la explotación de la energía geotérmica, se pueden alcanzar y, posteriormente, captar recursos geotérmicos hasta 5.000 m de profundidad y que no superen los 400 ºC de temperatura.

Por lo que respecta a los tipos de recursos geotérmicos, se adopta la clasificación basada en el nivel de temperatura, con los mismos intervalos que se han utilizado anteriormente para la energía geotérmica:

- Recursos de muy baja temperatura: menos de 30 ºC.
- Recursos de baja temperatura: entre 30 y 90 ºC.
- Recursos de media temperatura: entre 90 y 150 ºC.
- Recursos de alta temperatura: más de 150 ºC.

La Fig. 3.2 muestra las zonas del mundo con mayores posibilidades de encontrar recursos geotérmicos de alta, baja y muy baja temperatu-



ra. Todas las tierras emergidas del planeta cuentan, al menos, con posibilidades de albergar recursos geotérmicos de muy baja temperatura.

Figura 3.2. Los recursos mundiales.
(Fuente: *Site Geothermie-Perspectives de l'ADEME et du BRGM*).

3.2. YACIMIENTOS GEOTÉRMICOS

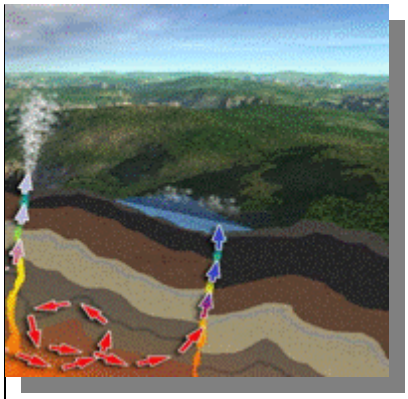
Cuando en un área geográfica concreta se dan determinadas condiciones geológicas y geotérmicas favorables para que se puedan explotar de forma económica los recursos geotérmicos del subsuelo, se dice que allí existe un yacimiento geotérmico. Las condiciones no son las mismas para cada uno de los cuatro tipos de recursos geotérmicos que se han mencionado en el apartado anterior.

Los yacimientos geotérmicos pueden ser clasificados conforme a diferentes criterios: el contexto geológico, el nivel de temperatura, el modo de explotación y el tipo de utilización.

La clasificación más común es la del nivel de temperatura, y es la que se ha tenido en cuenta, con los mismos intervalos de temperatura anteriores, para describir en los apartados siguientes algunos aspectos importantes de cada tipo de yacimiento.

3.2.1. Yacimientos de muy baja temperatura

Prácticamente la totalidad de la corteza terrestre del planeta constituye un extenso yacimiento de recursos geotérmicos de muy baja



temperatura, menos de 30 ºC, que se ve interrumpido por la presencia de masas de agua continentales o marinas.

En cualquier punto de la superficie del planeta se puede captar y aprovechar el calor almacenado en las capas superficiales del subsuelo, a pocos metros de profundidad, o en acuíferos poco profundos, para climatización de casas individuales y edificios por intermedio de bombas de calor geotérmicas.

La superficie del suelo intercambia calor con la atmósfera y sufre las variaciones diarias de temperatura hasta una profundidad de 0,5 m. A pocos metros de profundidad, la temperatura permanece relativamente estable, entre 7 y 13 ºC, si se la compara con la temperatura ambiente en superficie. Ello es debido al calor recibido del Sol, que calienta la corteza terrestre especialmente en verano, y a la gran inercia térmica de suelos y rocas.

Las variaciones estacionales de temperatura son perceptibles en el terreno hasta una profundidad de alrededor de 10 m. A partir de 10 m de profundidad y con poca circulación de agua subterránea, el subsuelo es capaz de almacenar el calor que recibe y mantenerlo incluso estacionalmente, de forma que el terreno permanece a una temperatura prácticamente constante durante todo el año.

A una profundidad de 15 m se considera que el terreno está a temperatura constante todo el año, con un valor ligeramente superior a la temperatura media anual de la superficie. Dicho valor depende del clima, de la vegetación, de la cobertura del suelo, de su pendiente, de la cantidad de nieve y de las propiedades generales del suelo.

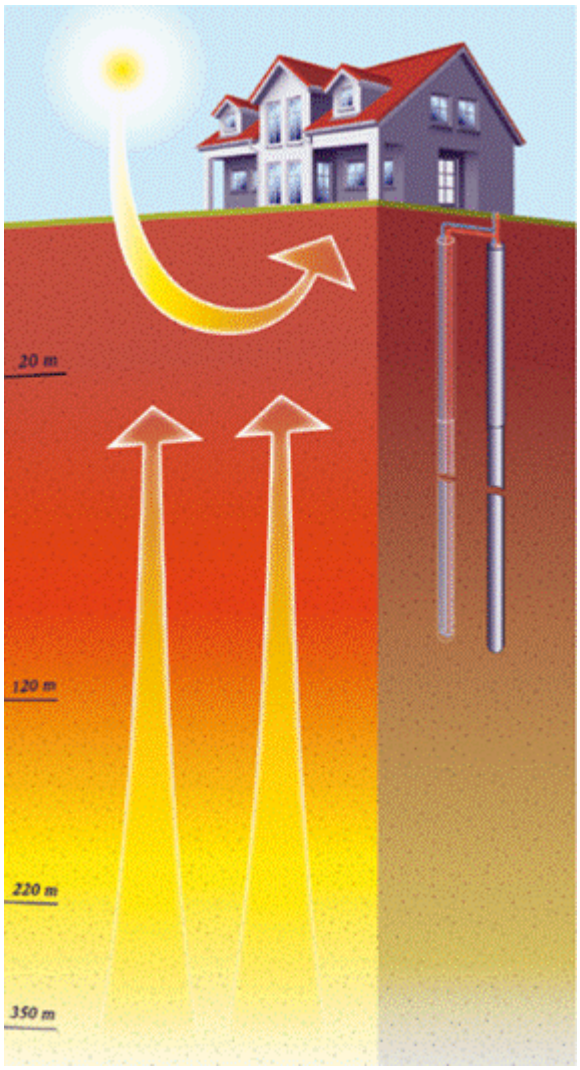
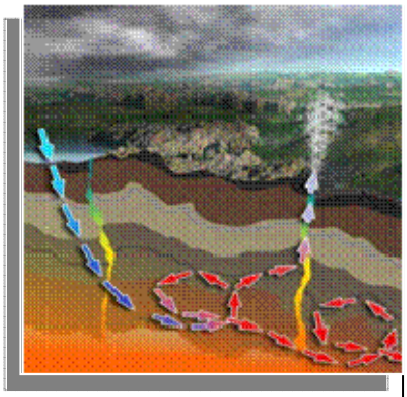


Figura 3.3. La radiación solar y las condiciones climáticas influyen sobre la temperatura del subsuelo sólo hasta una cierta profundidad. (Fuente: *Géothermie. L'utilisation de la chaleur terrestre. Suisse énergie*).



A partir de 15 m de profundidad, la temperatura de las rocas, que reciben el calor terrestre que remonta de las profundidades, no depende de las variaciones estacionales de temperatura, ni del clima, sólo de las condiciones geológicas y geotérmicas.

Por debajo de 20 m de profundidad, la temperatura aumenta a razón de unos 3 ºC cada 100 m como consecuencia del gradiente geotérmico. En la mayor parte de las regiones del planeta, las rocas se encuentran a una temperatura de 25 – 30 ºC a 500 m de profundidad.

3.2.2. Yacimientos de baja temperatura

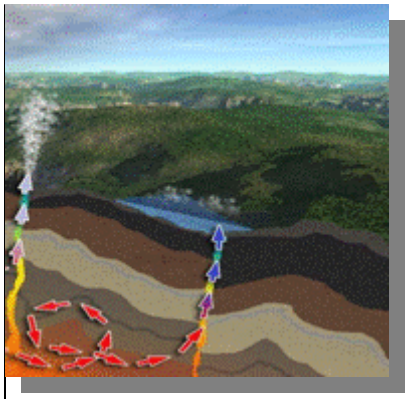
Yacimientos geotérmicos de baja temperatura, entre 30 y 90 ºC, pueden encontrarse en cuencas sedimentarias en las que el gradiente geotérmico sea el normal o ligeramente superior. La única condición geológica requerida es la existencia a profundidad adecuada, entre 1.500 y 2.500 m, de formaciones geológicas permeables, capaces de contener y dejar circular fluidos que extraigan el calor de las rocas. Con un gradiente geológico normal, de alrededor de 3 ºC cada 100 m, a una profundidad de 2.000 m, la temperatura puede alcanzar 70 ºC o más.

Anteriormente se comentó que una de las mayores fuentes de calor terrestre era la desintegración de isótopos radiactivos presentes en las rocas. Ese calor varía con la composición química y con la edad de las rocas, razón por la cual, los gradientes geotérmicos son más elevados en cuencas sedimentarias jóvenes que en zócalos antiguos.

Existen yacimientos geotérmicos de baja temperatura en numerosas regiones del planeta: Cuenca del Amazonas y del Río de la Plata en América del Sur, Región de Boise (Idaho) y Cuenca del Mississipi – Missouri en América del Norte, Cuenca Artesiana de Australia, la Región de Pekín y de Asia Central, las cuencas de París y Aquitania en Francia, la Cuenca Panónica en Hungría, etc.

La Cuenca Panónica está rellena de materiales procedentes de la erosión de las montañas circundantes de edad Alpina. El gradiente geotérmico es de 5 – 6 ºC cada 100 m.

La Cuenca de París está formada por un apilamiento de capas sedimentarias depositadas en el transcurso de las tres últimas eras geológicas, sobre un zócalo cristalino o granítico más antiguo. Se explotan



cinco acuíferos geotérmicos en diferentes capas de sedimentos. El más explotado es el de calizas del Dogger en la región de Ile de France, que se extiende sobre una superficie de 15.000 km^2 y proporciona agua a temperaturas que varían entre 56 y 85 ºC desde profundidades de 1.800 a 2.000 m.

Otro ejemplo de este tipo de yacimientos es el de Boise (Idaho, EE. UU.), cuya primera red de calefacción a distancia entró en funcionamiento en 1892. Actualmente, los edificios del Capitolio, Juzgados y 40 edificios comerciales más, tienen calefacción con agua geotermal a una temperatura de unos 80 ºC, que se extrae por varios pozos desde 268 – 580 m de profundidad, y se inyecta por otro pozo situado a 1,6 km al suroeste del campo de pozos de producción, Fig. 3.4.

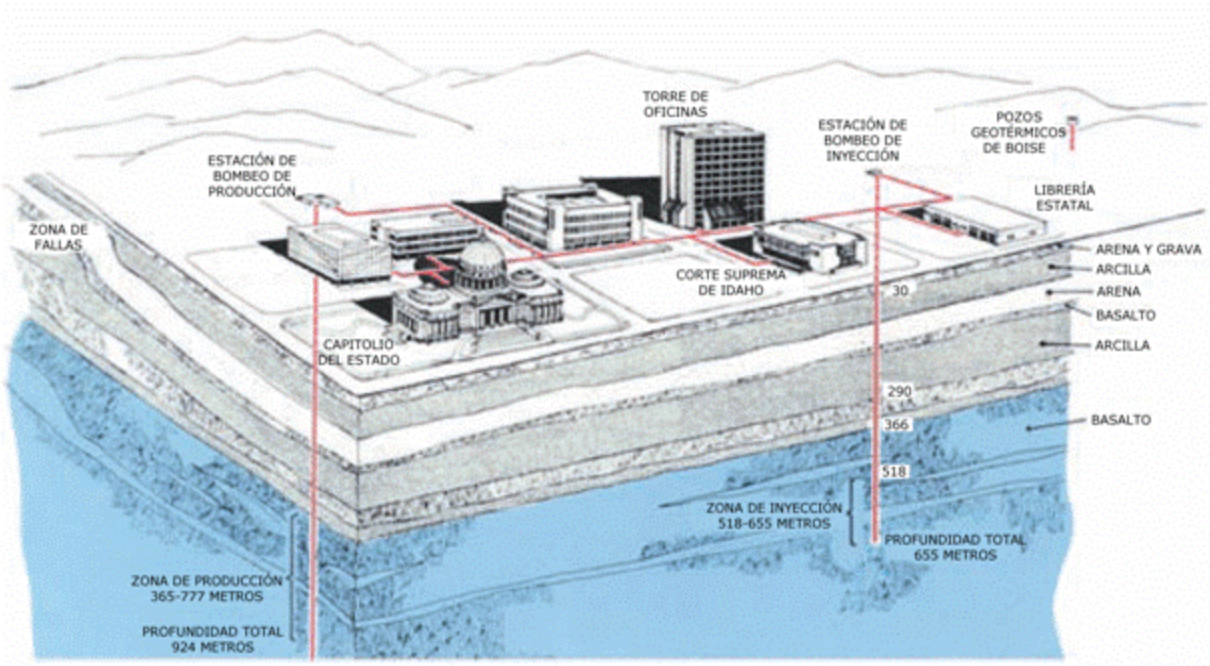
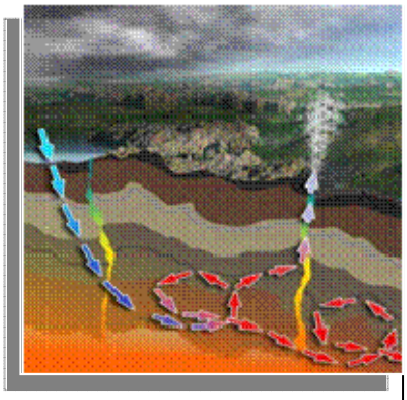


Figura 3.4. Sistema de calefacción urbana de Boise, Idaho, EE.UU. (Fuente: *Geothermal Technologies Program. Direct Use. U.S. Department of Energy. 2004*).

3.2.3. Yacimientos de media temperatura

Yacimientos con recursos geotérmicos a temperaturas comprendidas entre 90 y 150 ºC se encuentran en numerosos lugares del planeta: en cuencas sedimentarias, como los de baja temperatura, pero a profundidades comprendidas entre 2.000 y 4.000 m; en zonas de adelgazamiento litosférico; en zonas con elevada concentración de isótopos radiactivos; o en los mismos ámbitos geológicos que los yacimientos de alta temperatura, pero a menos profundidad, menos de 1.000 m.



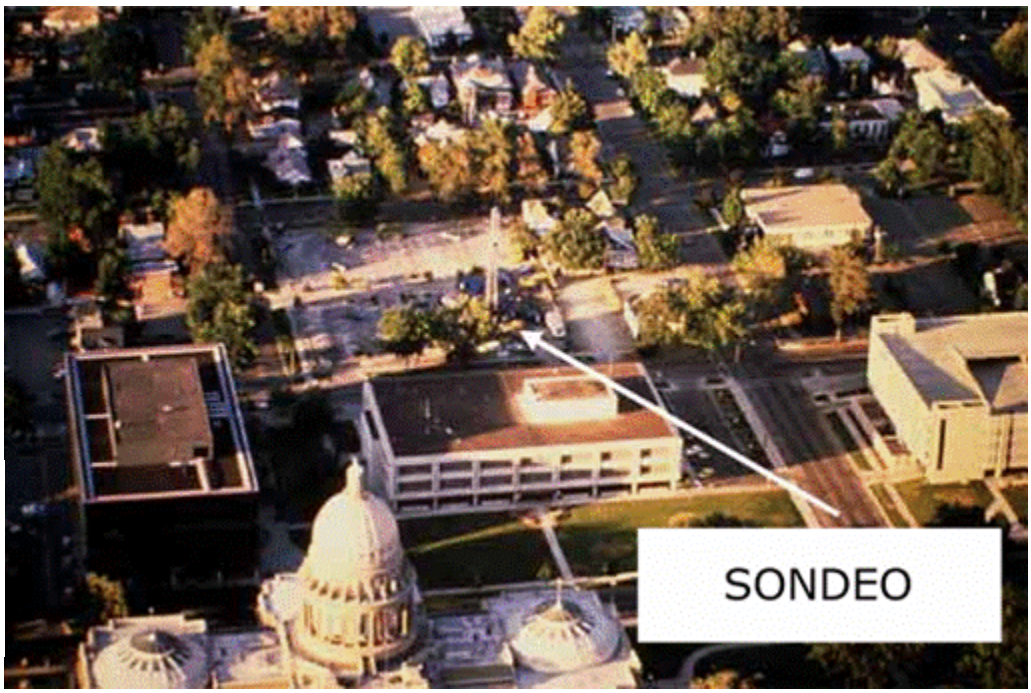


Foto 3.1. Perforación geotérmica ante el edificio del Capitolio de Boise, Idaho, EE.UU. (Fuente: *@2000 Geothermal Education Office*).

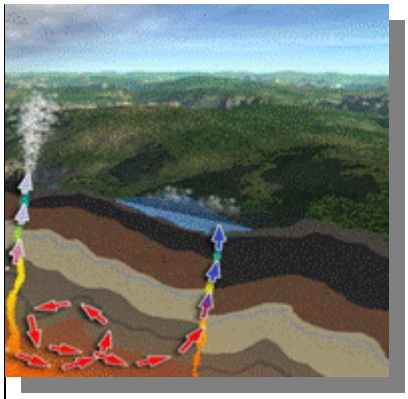
Yacimientos de este tipo se encuentran en un gran número de zonas muy localizadas donde, debido a discontinuidades y fallas, el agua puede remontar fácilmente hasta la superficie, señalando su presencia mediante aguas termales.

Al igual que los yacimientos de alta temperatura, precisan de una intrusión magmática como fuente de calor, y de un acuífero con buena recarga. Se diferencian de ellos en que no existe capa impermeable sobre el acuífero que mantenga el calor y la presión en el yacimiento.

Ejemplos cercanos en cuencas sedimentarias se encuentran en Alemania y en Austria.

En Alemania, en Neustad-Glewe, región de Pomerania, una pequeña planta para producción de energía eléctrica y calefacción explota agua caliente a 97 ºC desde una profundidad de 2.250 m. En Unterhachim, en Baviera, al sureste de Munich, está en construcción una planta para producción de energía eléctrica y calefacción que explotará un pequeño yacimiento con agua caliente a 122 ºC desde 3.450 m de profundidad.

En Austria, en Altheim, en la Cuenca molásica de Haute-Autriche se extrae agua caliente a 106 ºC desde 2.300 m de profundidad para una red local de calefacción a distancia y para producción de electricidad en una pequeña planta de 1 MW. Dependiendo de la esta-



ción anual y de la demanda de calefacción, las dos plantas se reparten el recurso geotérmico.

3.2.4. Yacimientos de alta temperatura

Los yacimientos con fluidos geotermales, o con rocas calientes, a más de 150 ºC de temperatura, se encuentran en zonas geográficas con gradiente geotérmico extraordinariamente elevado, hasta 30 ºC cada 100 m.

Esas zonas suelen coincidir con la existencia de fenómenos geológicos notables, como actividad sísmica elevada, formación de cordilleras en épocas geológicas recientes, actividad volcánica muy reciente y, principalmente, regiones volcánicas situadas en los bordes de las **placas litosféricas**. Se suelen explotar a profundidades comprendidas entre 1.500 y 3.000 m.

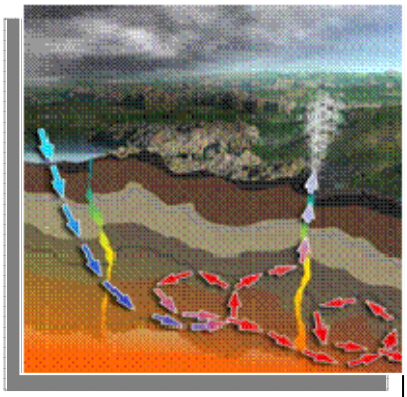
Esos fenómenos no son otra cosa que distintas formas de liberación de la energía interna de la Tierra y se producen como consecuencia de los movimientos de convección de masas de rocas fundidas, **magmas**, procedentes del manto, y por los desplazamientos relativos de las distintas placas litosféricas que constituyen la litosfera terrestre.

La litosfera, formada por la corteza terrestre y parte del manto superior, con un espesor variable entre 70 y 150 km, es frágil y quebradiza. Lejos de ser una capa homogénea, está constituida por 12 placas principales y varias más pequeñas que flotan sobre la astenosfera, formada por material plástico y dotada de movimientos de convección lentos y regulares, Fig. 3.5.

Las placas litosféricas se desplazan a velocidad muy lenta, entre 1 y 20 cm al año, y su tamaño y forma cambian a lo largo de millones de años.

Es esencialmente en los bordes o límites de esas placas, y más generalmente en las zonas frágiles de la corteza, por donde el magma puede escaparse y ascender, dando nacimiento a las intrusiones plutónicas y a los volcanes. En estos casos el calor se disipa principalmente por convección, y la transferencia de calor es mucho más eficaz.

Como zonas propicias para que el magma ascienda a la corteza terrestre, pudiendo llegar o no a la superficie, se pueden citar:



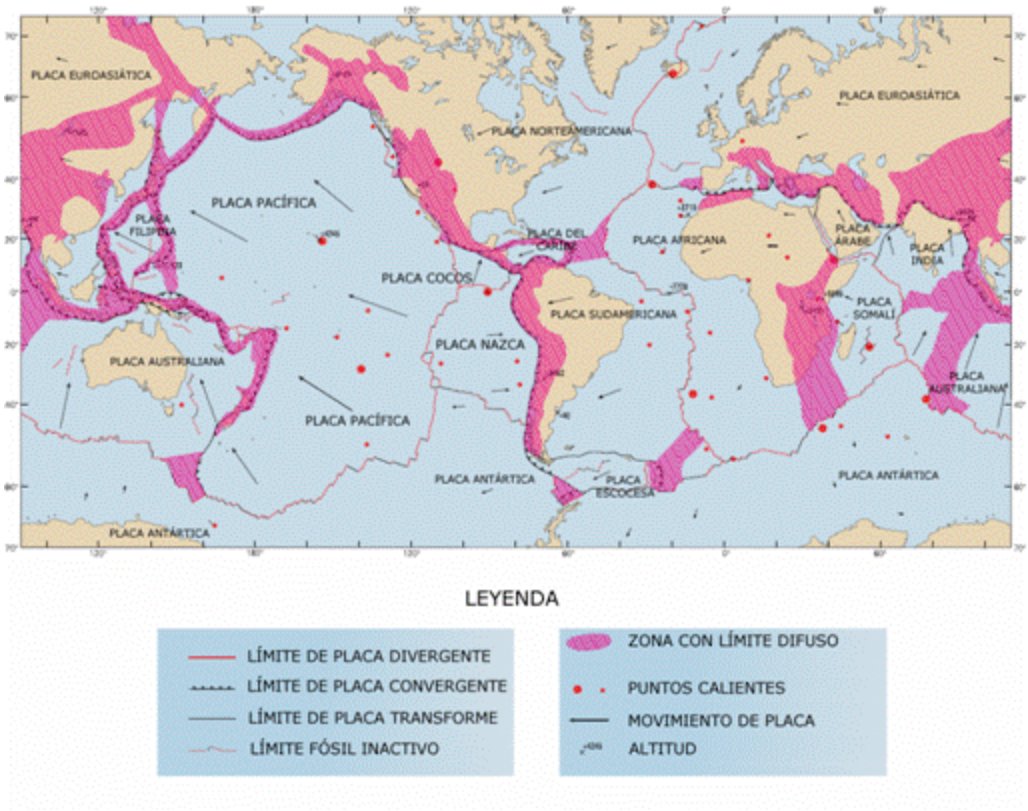


Figura 3.5. Placas litosféricas. (Fuente: *U.S. Geological Survey. Smithsonian Institution y U.S. Naval Research Laboratory*).

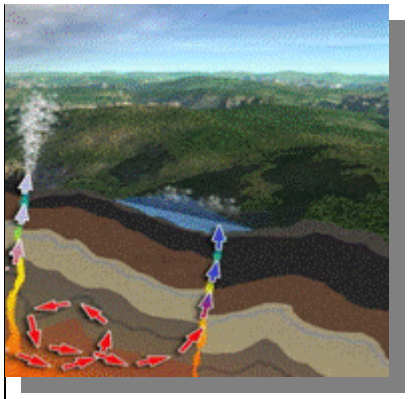
- **Dorsales centro-oceánicos**: áreas de separación de placas en donde existe una generación continua de corteza a partir de magmas ascendentes. Es el caso, por ejemplo, de Islandia, Islas Azores y el mar Rojo.

- **Áreas de choque de placas**: se produce la subducción de una placa bajo la otra con la consiguiente fusión de corteza y generación de magmas. Es el caso del margen occidental del Océano Pacífico y de la costa occidental de América del Sur.

- **Áreas de actividad distensiva**: dentro de una placa, en zonas de adelgazamiento de la corteza, se pueden originar ascensos de magmas procedentes del manto. Son los casos del gran Rift de África Occidental, el Rift de Río Grande en América del Norte, el Graben del Rin en Europa y el Rift Baikal en Asia.

- **Puntos calientes (*Hot spots*)**: son también áreas de actividad geotérmica situadas en el interior de placas litosféricas. Focos de calor concentrado situados en el manto, cercanos a la base de la litosfera, que son capaces de calentar la corteza terrestre y producir actividad volcánica.

  Los puntos calientes permanecen fijos en el manto mientras las



placas litosféricas se mueven sobre ellos. A medida que se mueve la placa, los volcanes se van enfriando y extinguiendo al quedar cada vez más alejados del foco de calor, que permanece fijo.

Son los casos, entre otros, de las Islas Hawai y del Parque Nacional de Yellowstone en Estados Unidos.

En la Fig. 3.6 se adjunta una sección transversal esquemática del interior de la Tierra, donde están representadas la mayoría de las situaciones anteriormente comentadas.

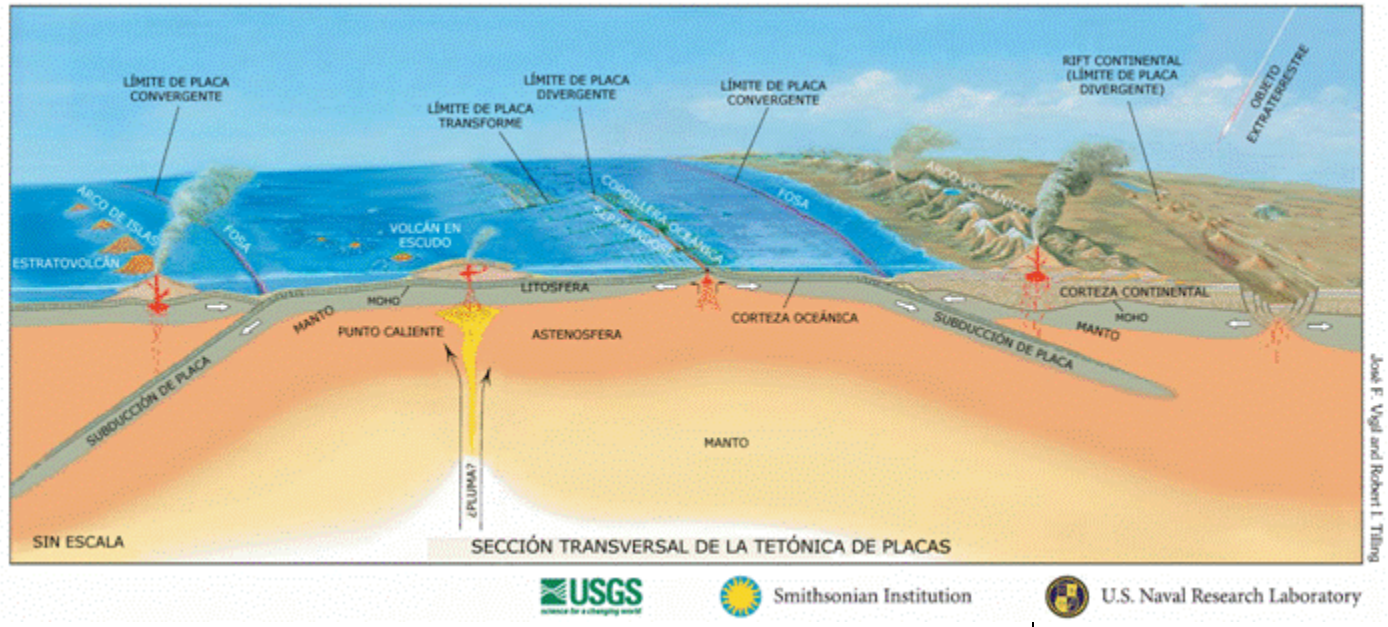
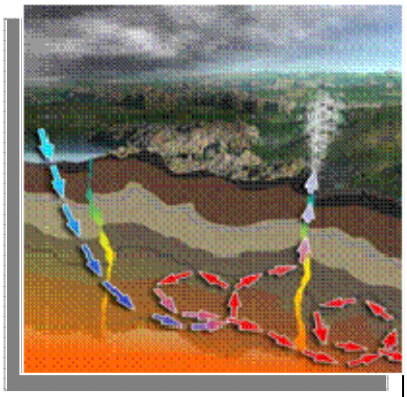


Figura 3.6. Sección transversal mostrando los procesos de la tectónica de placas. (Fuente: *Vigil, J.E. y Tilling, R.I. U.S. Geological Survey. Smithsonian Institution y U.S. Naval Research Laboratory*).

Un modelo, o prototipo, Fig. 3.7, de yacimiento geotérmico de alta temperatura, debe reunir tres condiciones geológicas básicas:

- **Fuente de calor**: un magma, que puede estar a 700 – 1.000 ºC, situado a 5-10 km de la superficie. En determinadas zonas con fuerte actividad tectónica como los graben (bloques hundidos y limitados por fallas normales), el magma se encuentra más cerca de la superficie y además puede ascender por fallas.

- **Acuífero**: una capa de rocas calientes permeables de las que el agua en circulación pueda extraer calor que esté conectada a un área de recarga superficial, a través de la cual el agua me-



teórica pueda reemplazar a la que se escapa por las fuentes termales, o a la que es extraída mediante los pozos de explotación. El agua, dependiendo de su temperatura y presión, estará en fase líquida o en fase vapor, y podrá contener sales disueltas y gases como CO_2, SH_2, etc.

- **Capa impermeable**: situada sobre el acuífero para que mantenga el agua atrapada y la presión del mismo.

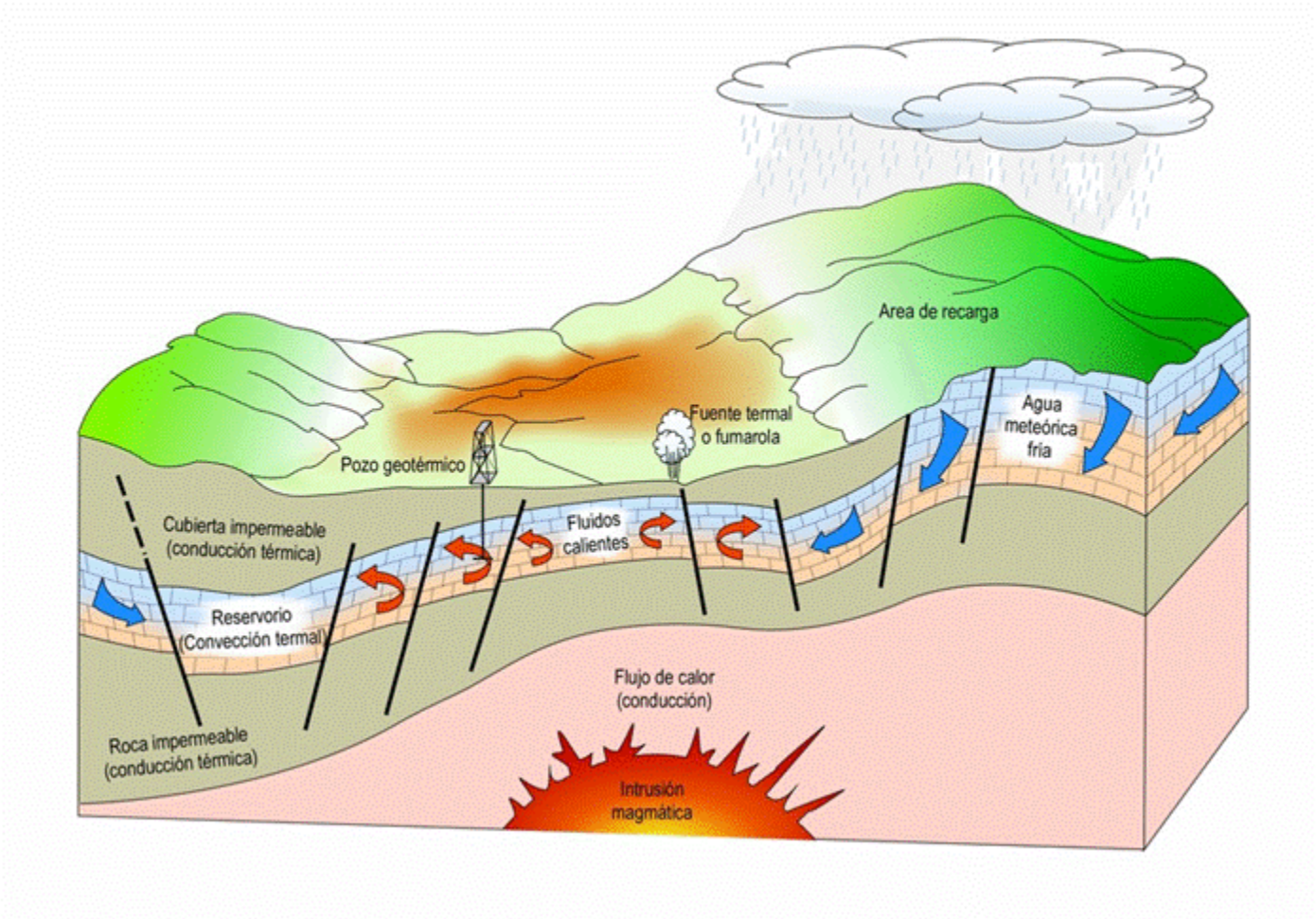
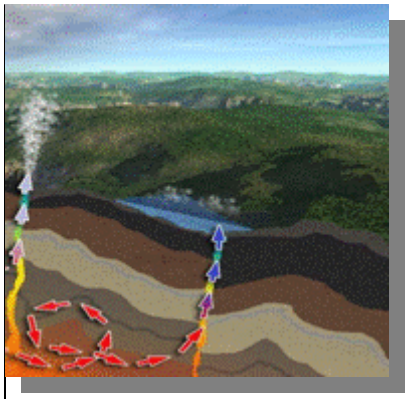


Figura 3.7. Representación esquemática del modelo de un yacimiento geotérmico de alta temperatura.
(Fuente: *Dickson, M.H. y Fanelli, M. Gethermal Energy*).

Muchos yacimientos de este tipo que se explotan actualmente contienen agua a presión y temperatura elevada, ocasionalmente 300 ºC. Generalmente llevan asociadas manifestaciones en superficie como géiseres, fuentes termales, fumarolas, etc.

Cuando el agua asciende por el pozo de extracción a la superficie, la



presión disminuye bruscamente y se genera una gran cantidad de vapor. Una vez separado el vapor con un separador de fases, se pasa a una turbina para que genere energía eléctrica.

A estos yacimientos se les denomina **de vapor húmedo** por la presencia de agua en fase líquida en el cabezal del pozo. Es el caso, por ejemplo, de Cerro Prieto en México, Reykjanes en Islandia, Otake en Japón y Wairakei en Nueva Zelanda.

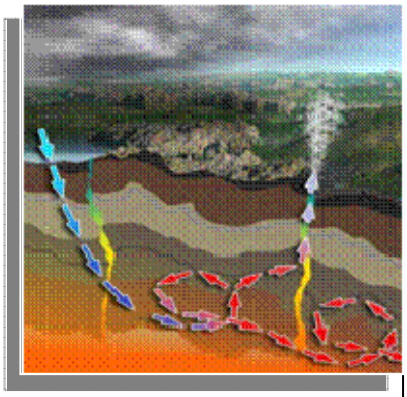
Si para la presión del yacimiento, la temperatura es superior a la de saturación correspondiente, habrá un sobrecalentamiento sin contenido de agua líquida. En este caso, los yacimientos se llaman de **vapor seco** y permiten obtener mejores rendimientos en las turbinas generadoras de electricidad. Ejemplos de los mismos se encuentran en Larderello (Toscana, Italia) y en The Geysers (California, EE.UU.).

Por lo que a las capas de rocas permeables que constituyen el acuífero se refiere, existe una gran variedad. En Cerro Prieto son arenas deltaicas; en Wairakei, brechas pumíticas; en Larderello, calizas y dolomías fracturadas; en The Geysers, grauvacas fracturadas.

Larderello, en funcionamiento desde 1913, Wairakei, desde 1958, y The Geysers, desde 1960, han sufrido pérdidas de presión en los acuíferos con los consiguientes descensos de producción de energía eléctrica a lo largo de sus dilatados periodos de explotación. Actualmente siguen en producción reinyectando agua a los acuíferos para mantener la presión.

En The Geysers, uno de los campos geotérmicos más grande del mundo, con 21 plantas de generación de energía eléctrica y 900 MW de capacidad conjunta, la producción empezó a declinar dramáticamente a finales de los años 80 por falta de fluidos. En 1997 se empezó a hacer una recarga artificial con agua depurada, lo cual permitió reactivar las plantas que habían cesado su actividad. Actualmente se está reinyectando, a través de pozos perforados al efecto, agua reciclada procedente de depuradoras situadas en la ciudad de Santa Rosa, que llega hasta el campo por una tubería de 66 km de longitud.

Dos excepciones al modelo de yacimiento de alta temperatura descrito anteriormente lo constituyen los llamados **yacimientos de roca seca caliente** (HDR por sus siglas en inglés), también llamados **sistemas geotérmicos estimulados** (EGS en inglés), y los llamados **yacimientos geopresurizados**.



Yacimientos de roca seca caliente

De lo visto hasta ahora se infiere que un recurso geotérmico es explotable actualmente para producción de energía eléctrica si reúne cuatro condiciones: que no esté a demasiada profundidad, y que en el yacimiento en que se encuentra haya calor, rocas permeables y agua suficiente.

De esas condiciones, si se exceptúa el calor, que es el que el flujo de calor terrestre proporciona, y la profundidad, que tiene que ser accesible con los equipos de perforación disponibles, las otros dos, permeabilidad en las rocas y agua en circulación, pueden ser mejoradas por el hombre, de ahí el nombre de **Sistemas Geotérmicos Estimulados**.

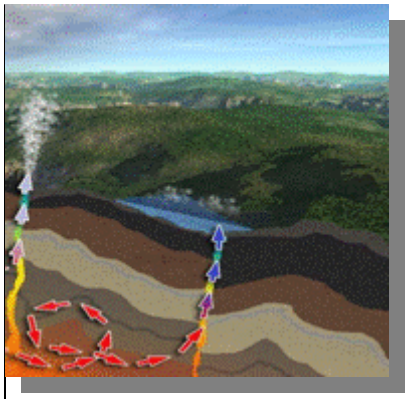
La permeabilidad en las rocas puede crearse artificialmente inyectando grandes volúmenes de agua a elevada presión por un pozo para producir su fracturación. El proceso llamado **hidrofracturación**, o fracturación hidráulica, es usado frecuentemente en la producción de petróleo y gas.

La distribución en profundidad del sistema de fracturas que se crea puede modelizarse utilizando métodos sísmicos de prospección geofísica, al objeto de determinar la ubicación de un segundo pozo de extracción de agua caliente, que será enviada a una central de ciclo binario para generación de energía eléctrica, y posteriormente reinyectada de nuevo al yacimiento, Fig. 3.8.

Esta tecnología se probó por primera vez en el año 1977 en Los Álamos (Nuevo México, EE. UU.), y está siendo ensayada actualmente en Japón, Alemania, Francia, Inglaterra y Estados Unidos.

El proyecto más avanzado comenzó en 1987 en Francia, en Soultz-sous-Forêts, a unos 50 km de Estrasburgo, en el flanco occidental del Graben del Rin, cerca de un campo petrolífero antiguo bien conocido.

La roca caliente es un plutón granítico fracturado situado a 1.400 m por debajo de un conjunto de sedimentos terciarios y mesozoicos. El proyecto contempla inyectar agua fría hasta 5.000 m de profundidad por un pozo central, que el agua circule por las fracturas en contacto con el granito caliente (200 ºC), y extraerla del subsuelo mediante dos pozos de producción, distantes 450 m, para alimentar una central de



ciclo binario de 6 MW de capacidad, que se piensa incrementar a 25 MW en etapas posteriores.

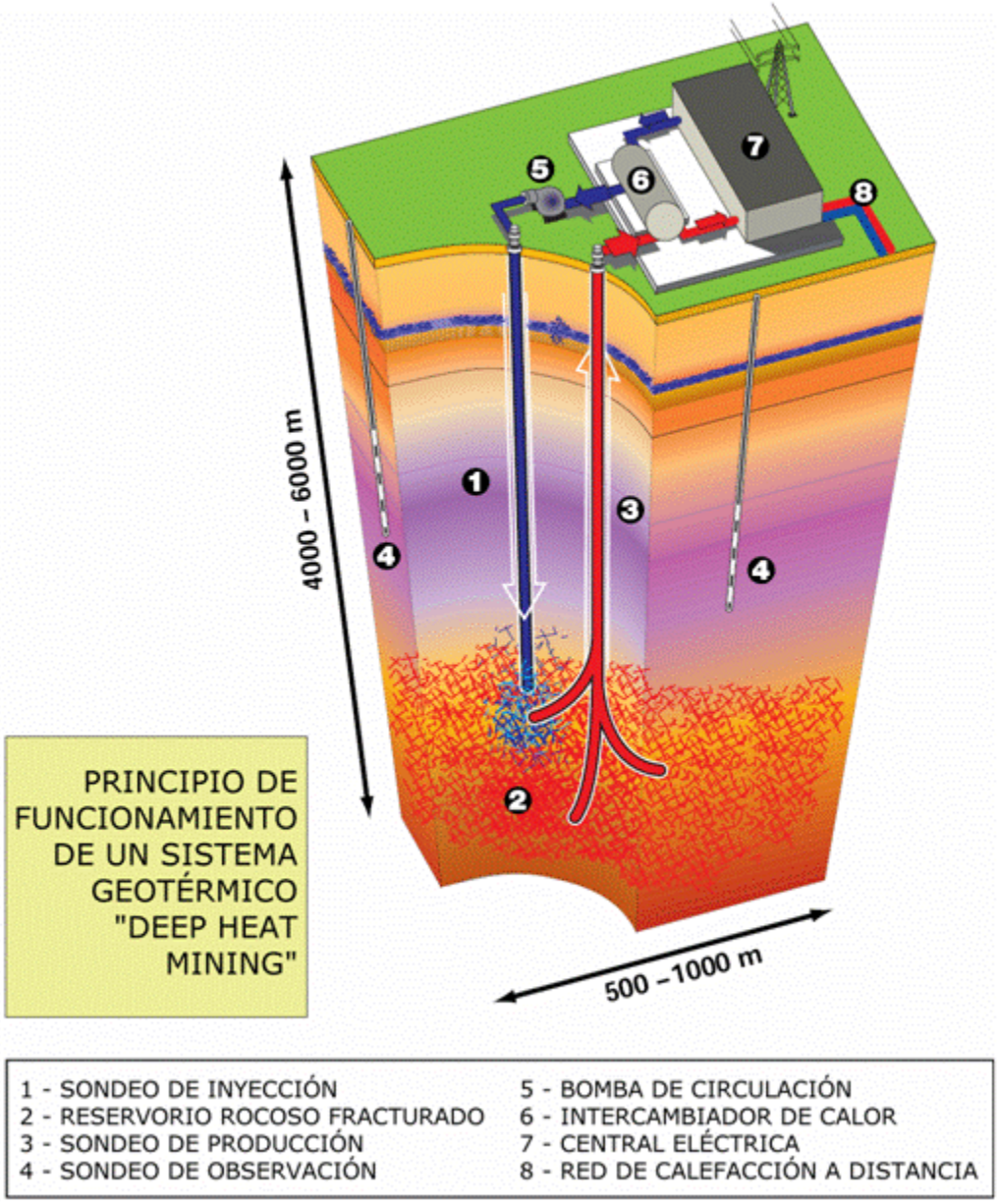
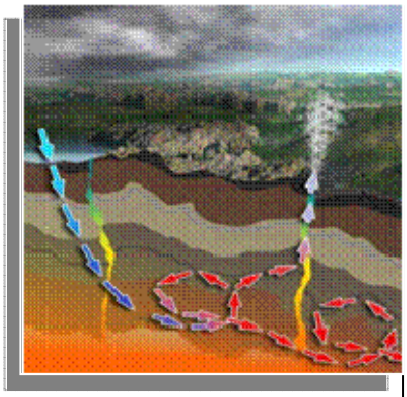


Figura 3.8. Representación esquemática de un Sistema Geotérmico Estimulado. (Fuente: *Infos-Géothermie nº 2. Suisse énergie. 2002*).

La tecnología EGS (*Enhanced Geothermal Sistems*), además de poder utilizarse para crear yacimientos de alta temperatura nuevos, puede aplicarse para ampliar la extensión de yacimientos que están actualmente en producción, con el consiguiente incremento de las reservas geotérmicas y de la productividad.

El campo geotérmico de Coso, situado a unos 160 km al norte de Los

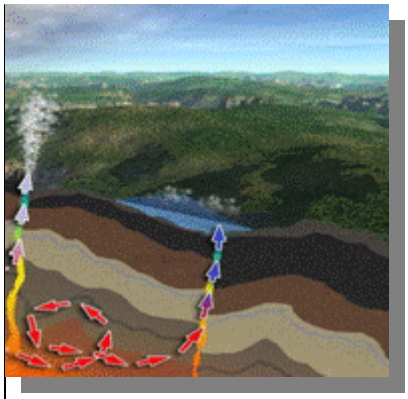


Ángeles (California, EE.UU.), tiene una capacidad de producción de 260 MW, estando previsto aumentarla en 20 MW interconectando y aumentando artificialmente el tamaño de las fracturas naturales de las rocas que han sido selladas por procesos de mineralización secundaria.

Foto 3.2. Pozo de perforación en Soultz-sous-Forêts. Francia.
Fuente: (*Site Geothermie-Perspectives de l'ADEME et du BRGM*).

Yacimientos geopresurizados

Son otro caso particular de yacimientos de alta temperatura. El agua contenida en el acuífero está sometida a grandes presiones, entre un 40 y un 90% superiores a la presión hidrostática que correspondería a la profundidad a la que se encuentra.



Han sido descubiertos como consecuencia de exploraciones petrolíferas en cuencas sedimentarias con gradiente geotérmico normal, pero en las que el agua se encuentra a una profundidad de 6.000 m o mayor, y por lo tanto a temperaturas superiores a 150 ºC. Ninguno se encuentra en explotación.

3.3. INVESTIGACIÓN DE RECURSOS GEOTÉRMICOS

Para que un recurso geotérmico pueda ser explotado económicamente se necesita verificar su existencia y localización en suelos, rocas o acuíferos, y posteriormente determinar sus características al objeto de estimar su potencial energético. La amplitud y complejidad de los estudios previos que hay que llevar a cabo serán de mayor o de menor envergadura dependiendo del tipo de recurso que se tenga intención de explotar.

En la Fig. 3.9 se representan, a la izquierda, cuatro posibilidades de aprovechamiento de recursos de muy baja temperatura, y a la derecha, los de un recurso de baja y de alta temperatura (un sistema geotérmico estimulado).

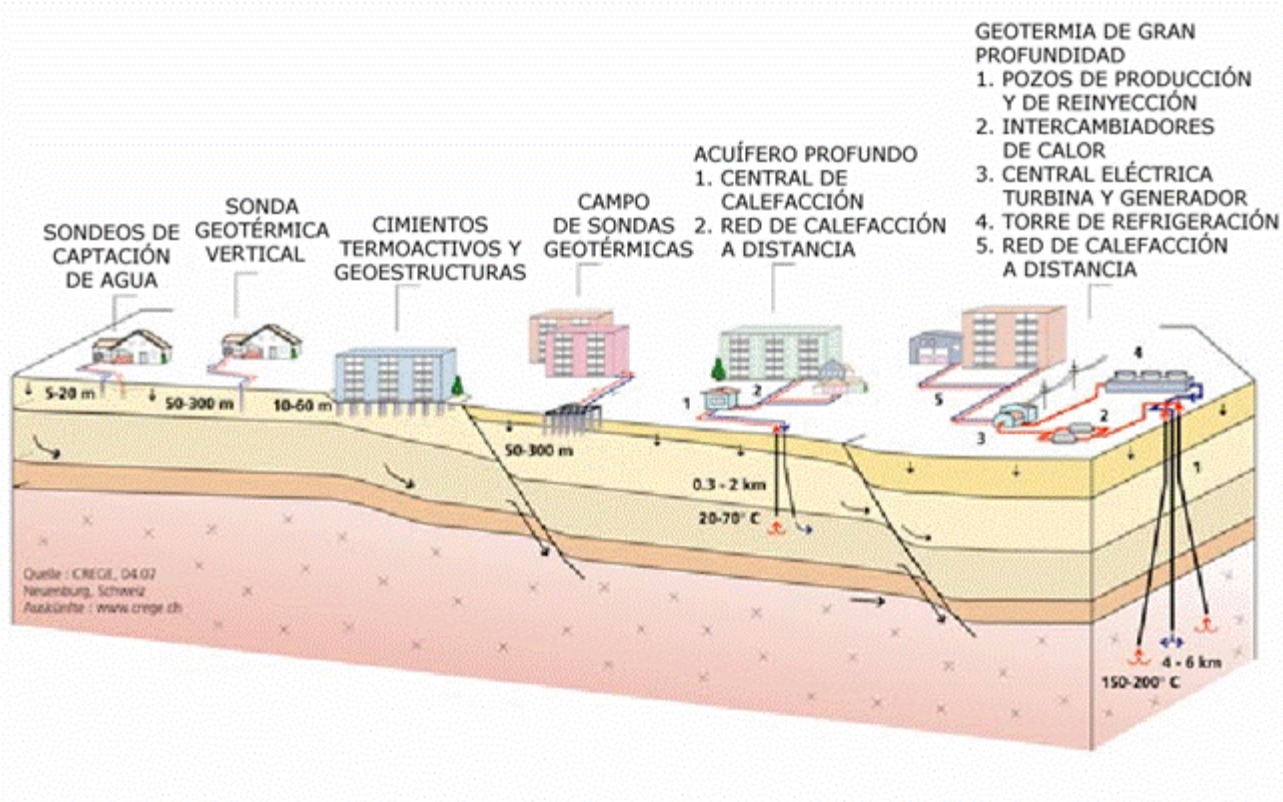
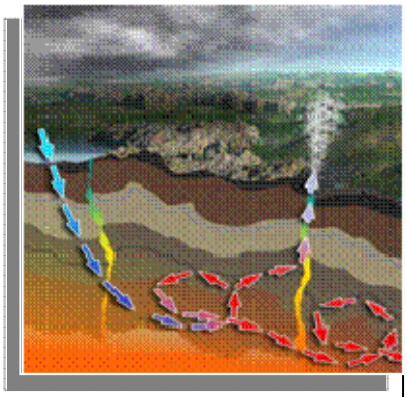


Figura 3.9. Varios aprovechamientos del calor de la Tierra.
(Fuente: *Cattin, S. Crege. Géothermie. CH*).



En los apartados siguientes se hace una breve descripción de las modalidades de investigación que se pueden emplear, mantenimiento los mismos intervalos de temperatura que se han venido considerando para la energía geotérmica y para los yacimientos.

3.3.1. Investigación de recursos de muy baja temperatura

Los recursos de muy baja temperatura reúnen dos características que los diferencian del resto, y que hacen que su investigación se aparte de los cánones clásicos de investigación geológico-minera de recursos minerales.

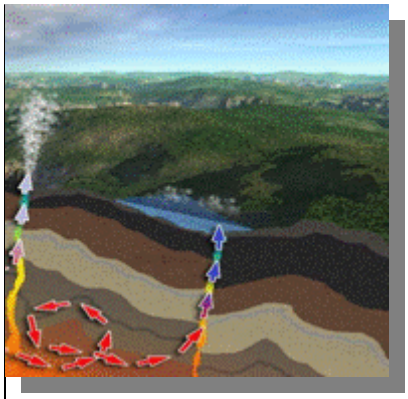
La primera es que se trata de un recurso energético que está debajo de cualquier terreno de cualquier lugar habitado del planeta, próximo a la superficie. La segunda, que su posibilidad de aprovechamiento está supeditada al uso forzoso de bombas de calor geotérmicas.

Gracias a esas dos circunstancias, son los recursos que mejor se adaptan a las necesidades de climatización de viviendas unifamiliares y de edificios de pequeñas o grandes dimensiones.

Más que investigar la forma de localizar el recurso que, al fin y al cabo, ya se sabe que está bajo el terreno, a poca profundidad, y en espera de ser extraído, lo que se investiga es cual es la mejor forma de explotarlo para que, sin llegar a agotarlo, pueda satisfacer la demanda energética que se necesita para mantener el confort térmico en el interior de los edificios a los que va a dar servicio.

La expresión "**a poca profundidad**" es un término ambiguo, particularmente para personas ajenas al aprovechamiento de este tipo de recursos, pero la diferenciación entre **energía geotérmica somera** y **energía geotérmica profunda** se suele establecer, arbitrariamente, en una profundidad de 400 m por debajo de la superficie. Los recursos geotérmicos de muy baja temperatura se enmarcan en el primero de los dos dominios.

Los estudios previos necesarios para poder aprovechar el recurso podrán ser muy simples o muy complejos, dependiendo de la potencia que se tenga que suministrar, del tipo de instalación que tenga que extraerlo, de las horas de funcionamiento anual y de la modalidad de la demanda (calefacción y/o refrigeración, y producción de agua caliente sanitaria).



Estas instalaciones cabe agruparlas en:

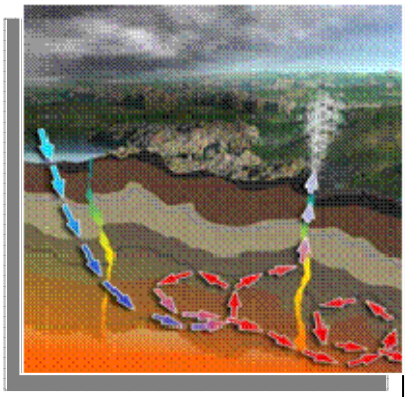
- Colectores horizontales enterrados.
- Sondas geotérmicas.
- Sondeos de captación de agua someros.
- Cimientos geotérmicos.

3.3.1.1. Colectores horizontales enterrados

Con tan sólo una capa superficial de suelo de 0,8 m de espesor es posible enterrar unos colectores horizontales, tubos de polietileno de 25 a 40 mm de diámetro, por los que circula agua con un anticongelante que, conectados a una bomba de calor geotérmica, pueden satisfacer las necesidades de calefacción de una vivienda familiar de tipo medio, alrededor de 150 m^2.

Sólo se necesita que la parcela de terreno disponga de un espacio despejado que sea 1,5 veces la superficie habitable a calentar, en el caso de vivienda nueva, y hasta 3 veces para casas antiguas con malos aislamientos térmicos, Foto 3.3.

Foto 3.3. Red de captadores horizontales de polietileno antes de ser enterrada. (Fuente: *Site Geothermie-Perspectives de l'ADEME et du BRGM*).



Debido a la escasa profundidad a la que están enterrados los tubos, el clima tiene una influencia extraordinaria en esta modalidad de explotación. El terreno sirve, por así decirlo, de acumulador de energía solar. La energía geotérmica propiamente dicha no reviste más que un papel secundario.

Dependiendo de la altitud topográfica del terreno, las capas de tubos que forman los serpentines o bucles geotérmicos permiten obtener de 20 a 30 W de energía térmica por m^2 ocupado por el bucle.

En estos casos, unos breves reconocimientos geológicos y geotécnicos del terreno, y seguir las recomendaciones del fabricante de la bomba de calor suele ser suficiente.

3.3.1.2. Sondas geotérmicas

Si la capa de suelo no tiene espesor suficiente, si la superficie disponible para enterrar los colectores horizontales es insuficiente, si existen canalizaciones en el subsuelo, o si la demanda energética es mayor que la que pueden proporcionar los colectores horizontales, siempre se podrán utilizar colectores de calor, en posición vertical, en el interior de uno o varios sondeos, con profundidades que pueden ir desde cerca de 20 m hasta más de 100 m, y diámetros de perforación de tan sólo 10 a 15 cm. Estos dispositivos reciben el nombre de **sondas geotérmicas**, Fig. 3.10.

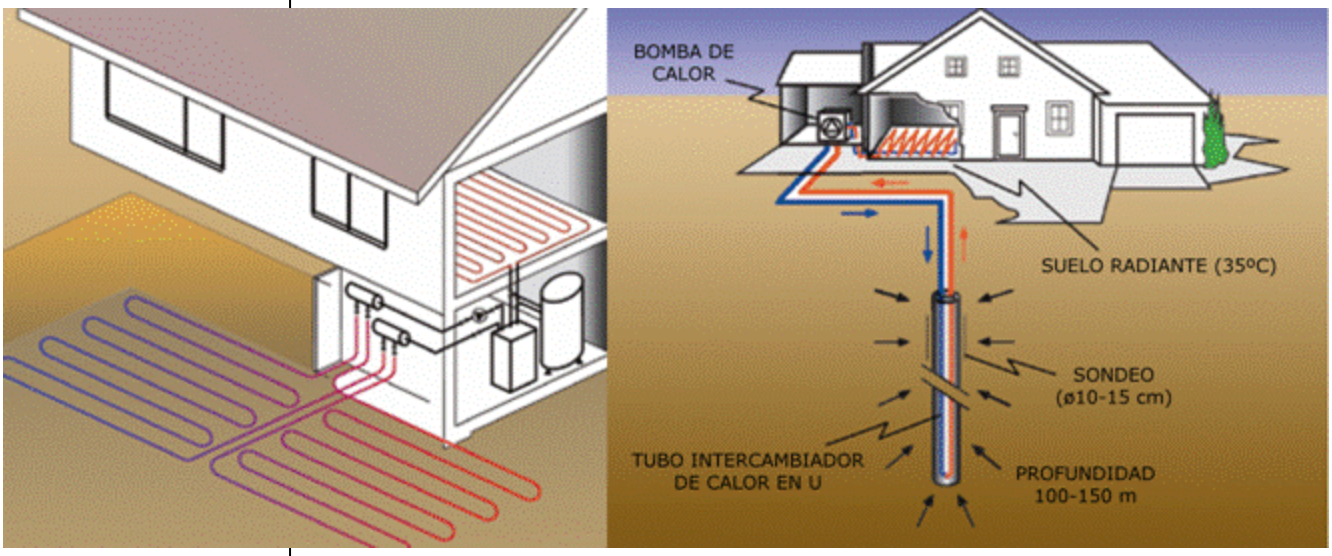
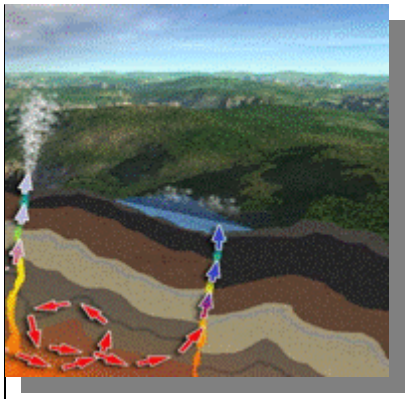


Figura 3.10. Colectores horizontales enterrados y sonda geotérmica vertical. Dos tipos de captadores para alimentación de una bomba de calor en una casa individual. (Fuente: *Haka Gerodur /CHYN. Géothermie. L'Utilisation de la chaleur terrestre. Suisse énergie*).



Un caso ilustrativo de este tipo de técnica es el de Suiza, donde se estima que, en el año 2000, había más de 20.000 sondas geotérmicas instaladas, que alcanzaban una longitud total de 4.000 km, lo que representa una longitud media por instalación de 200 m (Paud, D.. 2002).

Un parámetro clave para el dimensionamiento de una sonda geotérmica es la potencia de extracción de calor por metro lineal de sonda, y varía, generalmente, entre 20 y 70 W/m.

En el caso de requerir mayores potencias, por tratarse de grupos de viviendas o de edificios de grandes dimensiones, puede recurrirse al empleo de **campos de sondas geotérmicas**, en número de 4 a 50, dispuestas lo más cerca posible de las edificaciones o incluso debajo de ellas, con profundidades de 50 a 300 m, que dependerán de la potencia requerida y de las condiciones geológicas locales.

En el caso de instalaciones para potencias inferiores a 30 kW no se requieren estudios previos extensos, ya que suelen dimensionarse para terrenos estándar, a partir de valores tabulados proporcionados por los fabricantes de equipos, o a partir de guías técnicas y normas publicadas por asociaciones de ingenieros y arquitectos en países donde estos sistemas geotérmicos están muy implantados, como pueden ser Alemania, Austria, Francia, Suecia y Suiza.

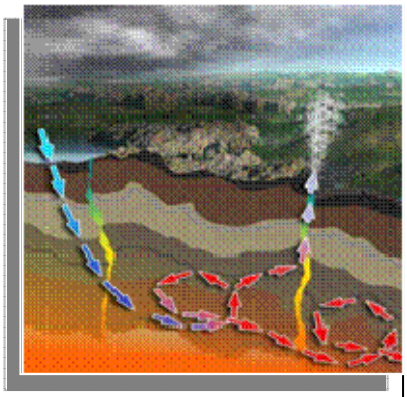
Para poder dimensionar una sonda geotérmica es necesario conocer previamente:

- Conductividad térmica del terreno. La potencia de extracción es proporcional a la conductividad térmica.

- Humedad natural del suelo. Mejora la conductividad térmica y garantiza un buen contacto entre sonda y suelo.

- Presencia o ausencia de aguas subterráneas. Cuando una sonda geotérmica penetra en una **capa freática** (primera capa con agua subterránea que se encuentra en el subsuelo), o en un acuífero somero, en los que el agua presente una velocidad de flujo superior a varios centímetros por día, la cantidad de calor útil aumenta sensiblemente.

- Tipo de prestaciones de la instalación. Puede determinarse a partir de las temperaturas del exterior y del interior del edificio, horas de funcionamiento, modalidad (calefacción-refrigeración-ACS), meses de funcionamiento, etc.



Cuando en el capítulo 1 se comentaron el flujo de calor terrestre y los mecanismos de propagación de calor, se habló de gradiente geotérmico, conductividad térmica y de propagación del calor por conducción, convección y radiación.

En suelos y rocas secos, y en los materiales de revestimiento del sondeo que aloja el material de relleno y los tubos de la sonda geotérmica, la propagación del calor se realiza por conducción.

En el seno del líquido que circula por el interior de la sonda, el calor se propaga por convección natural y por convección forzada. Si la sonda atraviesa un medio poroso saturado de agua, existirá también propagación de calor por convección natural y forzada.

Para la transferencia de calor por conducción, las propiedades físicas más importantes de suelos, rocas y materiales de la sonda son la conductividad térmica y la capacidad térmica volumétrica. Para la transferencia de calor por convección, la permeabilidad del terreno también es un parámetro importante.

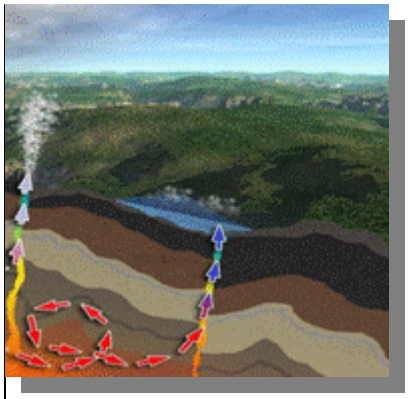
- **Conductividad térmica** es el flujo de calor transmitido por conducción a través de un cuerpo sometido a un gradiente de temperatura de 1 K/m (1 grado Kelvin por metro). Se expresa en W/m· K, o en W/m· ºC.

- **Capacidad térmica volumétrica** es la cantidad de calor necesaria para elevar la temperatura de 1 m^3 de terreno en 1 K. Se expresa en J/m^3· K.

- **Permeabilidad** es la capacidad de un suelo o roca para ser atravesado por el agua. Se expresa en m/s. Permite determinar la velocidad de flujo del agua subterránea.

En la Tabla 3.1 se reflejan los valores de conductividad térmica y capacidad térmica volumétrica de las rocas más comunes y de algunos materiales de uso frecuente.

Las instalaciones de tamaño medio a grande, como son los campos de sondas geotérmicas, no se pueden diseñar simplemente con ayuda de un conjunto de reglas generales y recomendaciones. Hay que hacer una revisión exhaustiva de la geología e hidrogeología del emplazamiento, recopilar información sobre infraestructuras, servicios y captaciones enterrados en el subsuelo, sobre posibles instalaciones

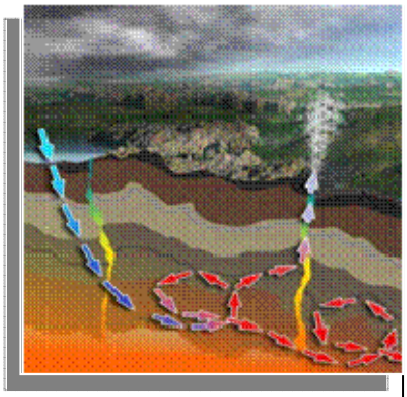


similares cercanas a las que se puede interferir o ser interferido por ellas, y determinar en laboratorio las propiedades geotérmicas de los materiales con muestras tomadas en los sondeos.

Tabla 3.1. Conductividad térmica y capacidad térmica volumétrica de diferentes tipos de rocas y materiales.

TIPO DE ROCA	Conductividad térmica (W/mK)			Capacidad térmica volumétrica
	min.	valor típico	max.	(MJ/m³K)
Rocas magmáticas				
Basalto	1,3	1,7	2,3	2,3 - 2,6
Diorita	2,0	2,6	2,9	2,9
Gabro	1,7	1,9	2,5	2,6
Granito	2,1	3,4	4,1	2,1 - 3,0
Peridotita	3,8	4,0	5,3	2,7
Riolita	3,1	3,3	3,4	2,1
Rocas metamórficas				
Gneis	1,9	2,9	4,0	1,8 - 2,4
Mármol	1,3	2,1	3,1	2,0
Metacuarcita		aprox. 5,8		2,1
Micasquistos	1,5	2,0	3,1	2,2
Esquistos arcillosos	1,5	2,1	2,1	2,2 - 2,5
Rocas sedimentarias				
Caliza	2,5	2,8	4,0	2,1 - 2,4
Marga	1,5	2,1	3,5	2,2 - 2,3
Cuarcita	3,6	6,0	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
Rocas arcillosas, limosas	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
Morrena	1,0	2,0	2,5	1,5 - 2,5
Arena, seca	0,3	0,4	0,8	1,3 - 1,6
Arena, saturada de agua	1,7	2,4	5,0	2,2 - 2,9
Arcilla / limo, seco	0,4	0,5	1,0	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	2,0	aprox. 1,8
Hielo (-10 ºC)		2,32		1,87
Plástico (PE)		0,39		-
Aire (0 - 20 ºC, seco)		0,02		0,0012
Acero		60,0		3,12
Agua (+10 ºC)		0,58		4,19

(Fuente: *Paud, D. Geothermal energy and heat storage. 2002*).



La capacidad de las sondas geotérmicas verticales se puede determinar experimentalmente realizando Tests de Respuesta Térmica en uno o varios sondeos piloto. Gracias a las medidas de temperatura realizadas en el interior del tubo de una sonda geotérmica, se puede tener una imagen exacta de las temperaturas encontradas a lo largo del mismo.

Se utilizan programas informáticos para el diseño de la matriz de sondeos y para simulación numérica dinámica, que permiten tener en cuenta las posibles interferencias entre ellos, y la existencia de flujos regionales o locales de agua subterránea que facilitarían el transporte de calor dentro de la red de sondeos.

Cuando un sistema completo está ya instalado y funcionando, un programa informático que mide las prestaciones del campo de sondas durante dos años, permite evaluar si los objetivos fijados por el proyecto energético han sido alcanzados, optimizar los reglajes, y ajustar el modo de funcionamiento.

3.3.1.3. Sondeos de captación de agua someros

Si la permeabilidad del terreno es suficientemente elevada puede recurrirse a explotar la capa freática mediante dos sondeos, uno de producción, con una bomba sumergida que conduce el agua a la bomba de calor para, una vez extraída su energía y enfriada, ser devuelta a la capa freática por un pozo de reinyección, o ser vertida a un cauce fluvial, Fig. 3.11.

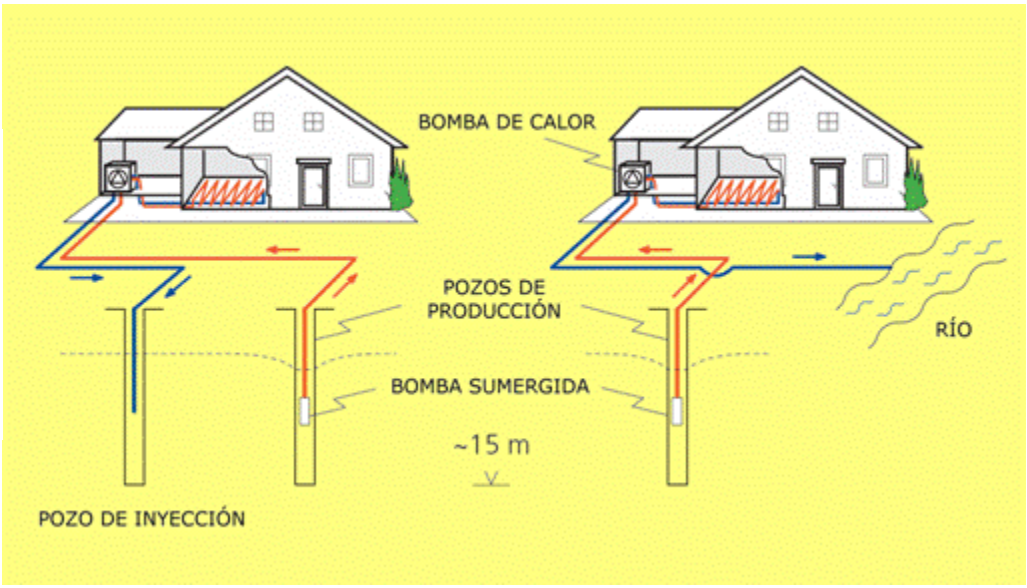
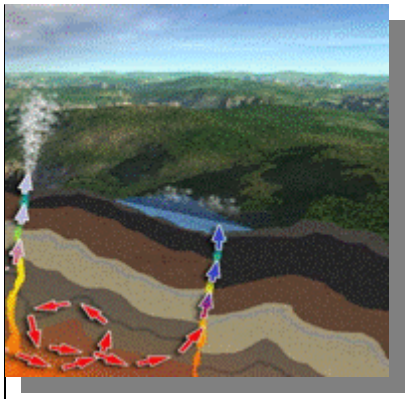


Figura 3.11. Esquema para calefacción de una casa familiar utilizando sondeos de captación de agua en la capa freática. (Fuente: *Cattin, S. Infos-Géothermie nº 4. Suisse énergie. 2002*).



Para evitar el enfriamiento continuo del agua subterránea, los sondeos de toma y restitución de agua deben situarse respectivamente aguas arriba y aguas abajo del flujo subterráneo.

Para una instalación con una potencia calorífica de 20 kW puede ser necesario un caudal de agua de alrededor de 6 m^3/h. Para demandas energéticas grandes, de más de 75 kW, los sistemas abiertos que explotan acuíferos poco profundos, por debajo de la capa freática, mediante pozos de captación y de reinyección, ofrecen, cuando pueden utilizarse, ventajas económicas con respecto a los campos de sondas geotérmicas, derivadas del ahorro que supone tener que perforar menos metros de sondeos.

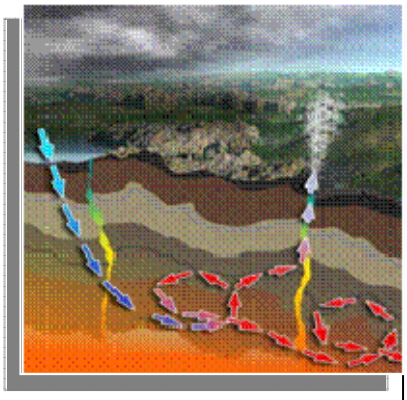
En sistemas abiertos que explotan acuíferos poco profundos, se requiere un estudio hidrogeológico local y la perforación de, al menos, dos pozos, de extracción y de reinyección, en los que se realicen ensayos hidráulicos para comprobar que no se vean interferidos entre ellos hidráulica y térmicamente, reduciendo la eficiencia del sistema, y ensayos de calidad del agua, vigilando que tenga bajos contenidos en hierro y bajo potencial redox, al objeto de evitar problemas de corrosión, sarro y colmatación de tuberías y conducciones, que puedan afectar al funcionamiento de la instalación a largo plazo.

Los estudios deben ir acompañados de modelización numérica como apoyo en el diseño del sistema, y para la evaluación del impacto térmico asociado a su funcionamiento.

Otro aspecto, no menos importante, a tener en cuenta en la fase de estudios previos, es el de las autorizaciones para captación de agua, por la cantidad de disposiciones a nivel local, autonómico y nacional, sobre protección de las aguas subterráneas que, como es lógico, anteponen el abastecimiento de agua potable a las poblaciones para consumo humano a la captación con fines de climatización de edificios.

3.3.1.4. Cimientos geotérmicos

Cuando en una excavación, porque es necesario para asegurar la estabilidad de los terrenos circundantes, o porque un suelo no tiene suficiente resistencia para soportar las cargas de una estructura mediante cimentaciones superficiales, se emplean pilotes, pantallas subterráneas, muros de contención o losas, fabricados con hormigón ar-



mado, que se hincan en el terreno, generalmente a nivel de la capa freática, a profundidades comprendidas entre 10 y 40 m, Fig. 3.12.

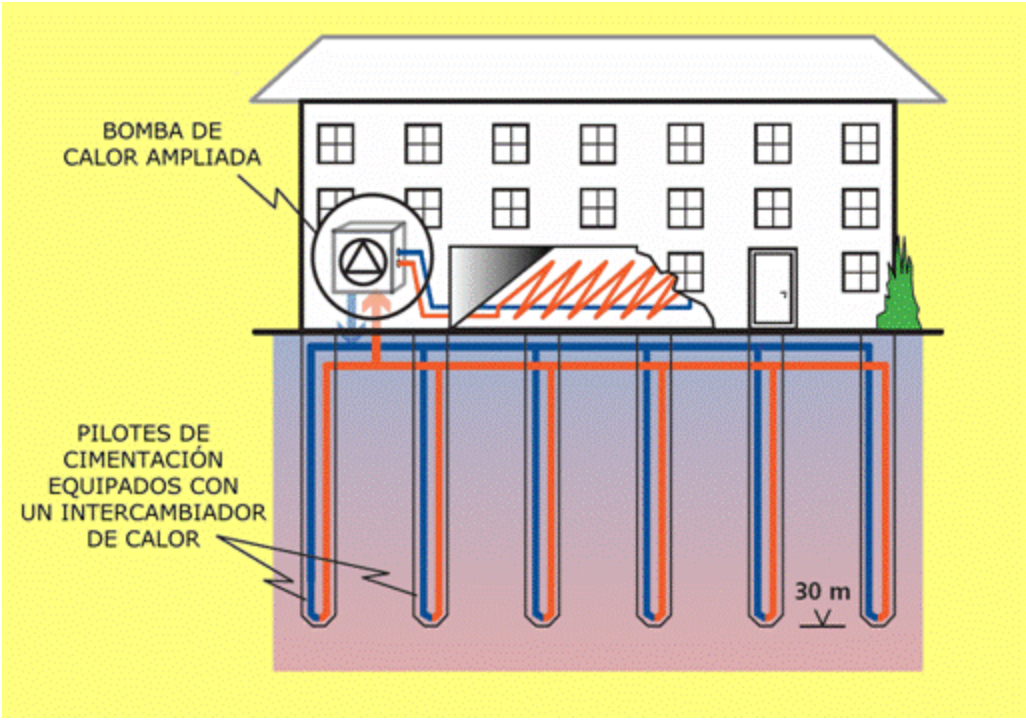


Figura 3.12. Sistema de pilotes energéticos para calefacción y climatización. (Fuente: *Infos-Géothermie nº 1. Suisse énergie. 2001*).

De forma indirecta, se están creando unas condiciones propicias para el intercambio de energía geotérmica de muy baja temperatura con el terreno, dado el gran volumen que se ve afectado. Basta con insertar en el interior de parte, o de la totalidad, de esas piezas de hormigón, una red de tubos de polietileno por los que circule agua con un anticongelante, y conectarlos en circuito cerrado con una bomba de calor o con una máquina de refrigeración, Fig. 3.13.

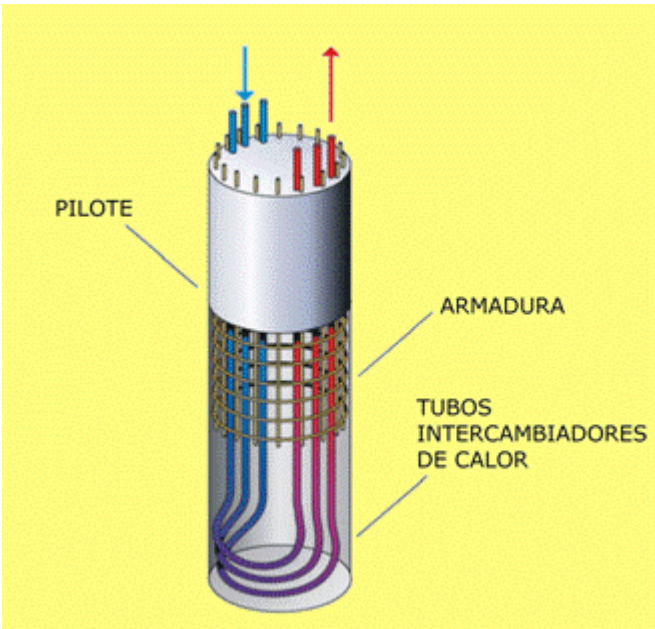
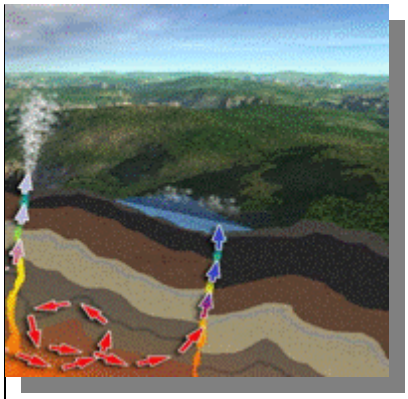


Figura 3.13. Tubos intercambiadores de calor integrados en un pilote para cimentaciones. (Fuente: *Geothermal Energy. Clauser, C. 2006*).



En sus inicios, entre finales de los años setenta y principios de los ochenta, esta tecnología se empleaba en casas individuales y plurifamiliares, pero actualmente es una de las más utilizadas para calentar edificios de grandes dimensiones en invierno y para enfriarlos en verano, por mediación del almacenamiento subterráneo estacional de calor y de frío, recibiendo diferentes denominaciones: **cimientos geotérmicos, energéticos o termoactivos, geoestructuras, pilotes intercambiadores de calor**, etc., Foto 3.4.

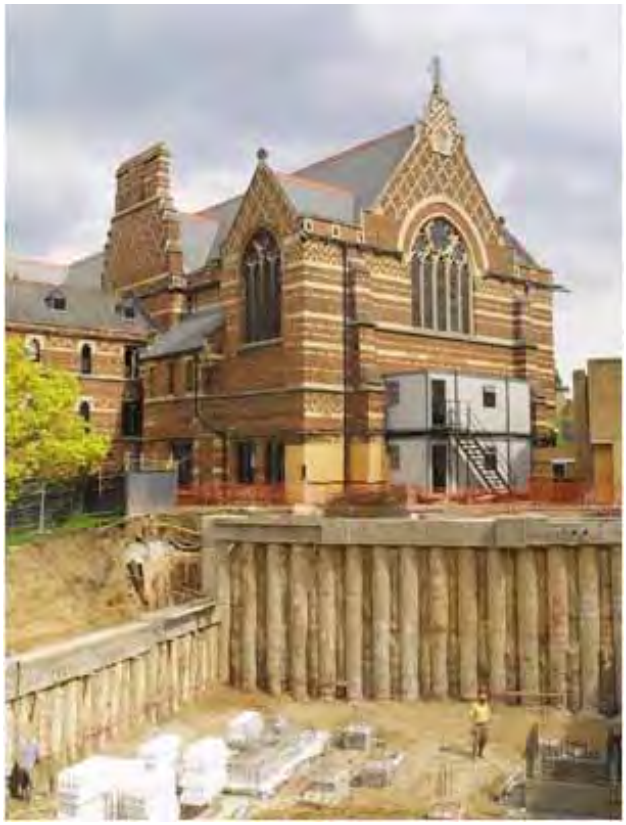


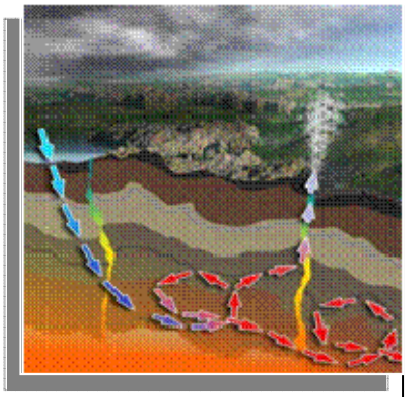
Foto 3.4. Muros de contención con 90 pilotes geotérmicos en Keble College, Oxford (R.U.). Potencia de calefacción 45 kW. Terminado en 2001. (Fuente: w*ww.enercret.com*).

Por lo que respecta a los estudios previos necesarios para poder implantar una instalación geotérmica de este tipo, es válido mucho de lo indicado para los campos de sondas geotérmicas.

Es importante conocer de antemano:

- Características geotécnicas de los estratos del subsuelo en que han de hincarse las cimentaciones activas.

- Nivel de la capa freática, oscilaciones anuales, dirección y velocidad de flujo.



- Características del terreno necesarias para definir el potencial geotérmico: capacidad térmica volumétrica, conductividad térmica y permeabilidad.

- Existencia o ausencia de manantiales cercanos o construcciones subterráneas que desvíen o calienten las aguas freáticas.

- Temperatura máxima, mínima y media anual del subsuelo.

- Distribución mensual y semanal del consumo de energía en calefacción y refrigeración, así como sus rendimientos de punta.

En la Tabla 3.2 se muestran los campos de variación de las tres características de los terrenos mencionadas anteriormente, en formaciones geológicas blandas que se pueden encontrar en la construcción de pilotes.

Tabla 3.2. Campos de variación de las principales características de los terrenos más comunes.

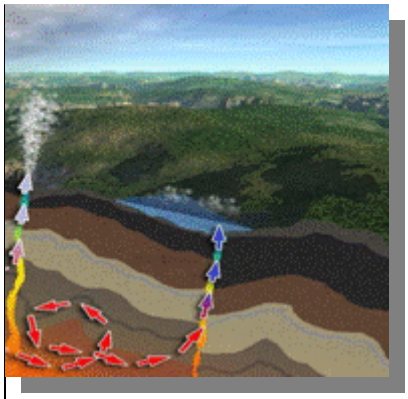
Tipo de suelo	Permeabilidad	Conductividad térmica (W/mK)		Capacidad térmica volumétrica (MJ/m³K)	
	(m/s)	seco	saturado	seco	saturado
Arcilla	10^{-8} - 10^{-10}	0,2 - 0,3	1,1 - 1,6	0,3 - 0,6	2,1 – 3,2
Limo	10^{-5} - 10^{-8}	0,2 - 0,3	1,2 - 2,5	0,6 – 1,0	2,1 – 2,4
Arena	10^{-3} - 10^{-4}	0,3 - 0,4	1,7 – 3,2	1,0 – 1,3	2,2 – 2,4
Grava	10^{-1} - 10^{-3}	0,3 - 0,4	1,8 - 3,3	1,2 – 1,6	2,2 – 2,4

(Fuente: *Paud, D. Geothermal energy and heat storage. 2002*).

En la tabla se aprecia que los valores de la conductividad térmica y de la capacidad térmica volumétrica son mucho más elevados en presencia de agua subterránea.

La capacidad de un conjunto de pilotes intercambiadores para almacenar energía térmica estacionalmente, depende directamente de la velocidad de flujo de la capa freática. Basta una velocidad de 0,5 a 1 metro por día para que se disipe la energía transferida por los pilotes y se impida su almacenamiento.

El diseño de una instalación de calefacción y de climatización utilizando cimientos geotérmicos debe ser concebido lo más pronto posible en un proyecto, pues los pilotes serán colocados en obra antes de



que las instalaciones de calefacción y refrigeración hayan sido dimensionadas.

Es muy importante que, desde el principio de la planificación del proyecto constructivo, colaboren arquitectos, geólogos, ingenieros, especialistas en cimentaciones, expertos en proyectos de climatización de edificios, la dirección de obra y otros profesionales implicados en el proyecto, para que la empresa especializada encargada de la cimentación proceda al cálculo y simulación, en tres dimensiones, de los diferentes parámetros que influyen recíprocamente, y que determinan, en última instancia, los límites del rendimiento de las instalaciones.

3.3.2. Investigación de recursos de baja temperatura

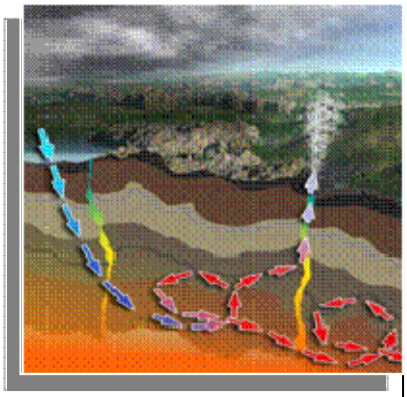
En los recursos geotérmicos de baja temperatura, entre 30 y 90 ºC, concurren dos circunstancias que limitan su explotación comercial y, consecuentemente, su investigación geológico-minera.

La primera de ellas es que no contienen vapor de agua, sólo proporcionan calor, que ha de dirigirse a usuarios muy localizados, que no disten más de unos pocos kilómetros del brocal del pozo por el que se extrae el agua caliente.

La segunda es que los acuíferos profundos en los que se ubican suelen estar cargados de sales, por lo que para preservar el medio ambiente es necesario reinyectar el agua usada otra vez al acuífero una vez extraído el calor.

Estos dos condicionantes hacen que, aunque sus posibilidades de utilización sean amplias, como se vio en la Tabla 2.1, su mayor consumo se circunscriba a calefacción urbana en ciudades con el recurso en el propio subsuelo, y a establecimientos de baños termales, algunos instalados desde tiempos ancestrales, donde el agua caliente remontaba a la superficie a través de fallas y fracturas.

Muchos balnearios, para asegurarse un abastecimiento regular de agua caliente, han procedido a perforar sondeos profundos. Los aumentos de caudal obtenidos se destinan a mejorar la gestión energética de su recurso geotérmico, utilizando el agua termal de forma integral para el llenado de las piscinas, mantenimiento de la temperatura de los recintos y para calefacción de habitaciones, reinyectándolo posteriormente al acuífero.



La ausencia de vapor que podría utilizarse para producción de energía eléctrica, y la necesidad de consumo cercano a la fuente, limitan el valor económico de cualquier yacimiento nuevo que se pueda descubrir, y ello hace que no esté justificada la aplicación de medios técnicos sofisticados y caros para la investigación de este tipo de recursos.

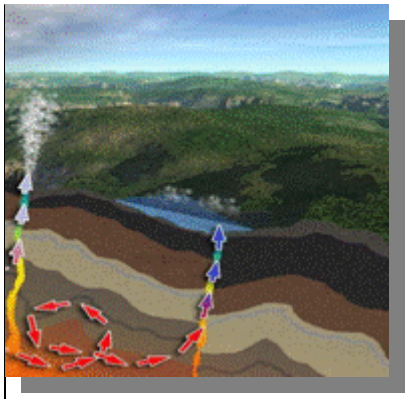
La investigación de recursos de baja temperatura se basa en un proceso de recopilación, tratamiento e interpretación de datos ya disponibles, especialmente de otros trabajos, y de sondeos exploratorios ya realizados en el ámbito de investigaciones de hidrocarburos o hidrogeológicas.

De forma esquemática, una investigación de recursos geotérmicos de baja temperatura llevaría aparejada las fases, etapas y objetivos que se reflejan en la Tabla 3.3.

Tabla 3.3. Investigación de recursos de baja temperatura.

FASE	FINALIDAD	ETAPAS	OBJETIVOS	TÉCNICAS EMPLEADAS
Documentación. Estudios geológicos e hidrogeológicos	Selección y Evaluación de objetivos de explotación	Documentación	Antecedentes	Geología, geofísica, hidrogeología
			Planificación etapas posteriores	
		Evaluación de información y selección de áreas	Definir los almacenes explotables	Geología, hidrodinámica, hidroquímica, evaluación de almacenes
			Seleccionar puntos favorables	
			Definir el modelo geotérmico	
Estudio de almacenes	Confirmar las hipótesis geológicas y definir condiciones de extracción del recurso	Perforación de sondeos profundos	Confirmar el modelo previsto	Sondeos profundos, diagrafías, pruebas de producción, ensayos sobre testigo
			Seleccionar almacenes	
		Evaluación del yacimiento	Establecer las características hidráulicas del almacén	Bombeos de larga duración, diagrafías, evaluación de almacenes, hidroquímica
			Estimar el potencial térmico explotable	
Viabilidad Técnico-Económica	Definir las condiciones de utilización y estudiar la viabilidad económica de la explotación	Estudio térmico	Elegir los usuarios	Estudios de mercado, análisis energético de sistema de utilización
			Definir el aporte geotérmico y seleccionar el sistema	
		Balance energético, económico y financiero	Definir los parámetros económicos del sistema	Análisis energético, cálculo de inversiones y costes, estudios de financiación
		Montaje jurídico y administrativo	Definir el modelo de empresa explotadora y modo de operación	Estudios jurídicos. Estudios de mercado

(Fuente: *Sánchez Guzmán, J. Energía Geotérmica. IGME. 1984)*.



Si existe información relativa a sondeos para agua o para petróleo, se cuenta con una información muy útil sobre permeabilidad y porosidad de acuíferos, temperatura y salinidad de aguas.

Las posibles campañas sísmicas y gravimétricas llevadas a cabo en una zona facilitan información sobre anomalías en el subsuelo, estructuras, fallas, etc.

Los estudios geológicos permiten conocer el contexto, la litología, la sucesión y edad de las capas, los cambios de facies y las estructuras tectónicas.

Los estudios hidrogeológicos permiten estudiar los flujos de agua en el seno del acuífero y evaluar el recurso desde el punto de vista cuantitativo y cualitativo.

Los análisis químicos determinarán la composición del agua, y los análisis de elementos disueltos indicarán el recorrido del fluido, su edad, su origen y las condiciones de alimentación y realimentación del acuífero.

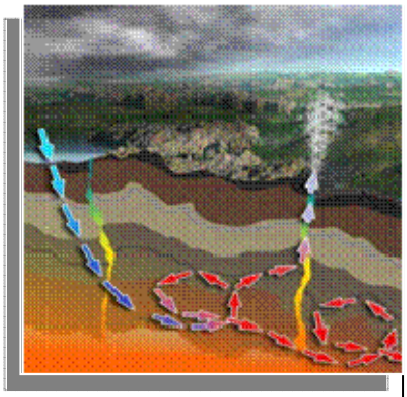
Un sondeo de exploración facilitará información más precisa, pero su coste es el obstáculo principal. Puede realizarse en pequeño diámetro, pero generalmente se concibe para poder ser utilizado si se confirman las perspectivas de explotación prometidas.

Estudios de diagrafías, detritos, y eventualmente testigos de sondeo, completarán los datos sobre las formaciones atravesadas. Medidas de temperatura, caudal y presión harán posible definir las características esenciales del yacimiento.

En el estudio de viabilidad habrá que abordar la parte más compleja del proyecto: usuarios potenciales, demanda energética, modulación horaria, diaria y mensual de la demanda, gestión técnica y financiera, estudio de costes de inversión, explotación y mantenimiento de las instalaciones, contratos de suministro, gestión de ventas del fluido geotermal, etc.

3.3.3. Investigación de recursos de media temperatura

Al hablar de yacimientos de recursos geotérmicos con temperaturas comprendidas entre 90 y 150 ºC, se dijo que podrían encontrarse en



las mismas áreas que los yacimientos de alta temperatura, pero a menor profundidad, o en cuencas sedimentarias, como los de baja temperatura, pero a mayor profundidad.

Parece lógico pensar que si se plantea cualquier investigación de recursos geotérmicos en regiones de volcanismo o actividad sísmica actual o reciente, irá siempre encaminada al descubrimiento de yacimientos con el máximo valor económico posible, que son los yacimientos de alta temperatura, y cuentan con su metodología de investigación propia, como se comentará en el apartado siguiente.

Por este motivo, habrá que admitir que la investigación geológico-minera de este tipo de recursos en cuencas sedimentarias, se realizará siguiendo las mismas pautas de fases y etapas, y con las mismas técnicas que se han expuesto en la Tabla 3.3 para los yacimientos de baja temperatura.

A ellas habrá que añadir otra fase, la de construcción de una planta de ciclo binario para producción de energía eléctrica, pues este es el mayor aliciente de este tipo de recursos, en la que se aprovechará el agua caliente extraída del pozo antes de destinarla a usos domésticos, industriales o agrícolas relacionados con el calor.

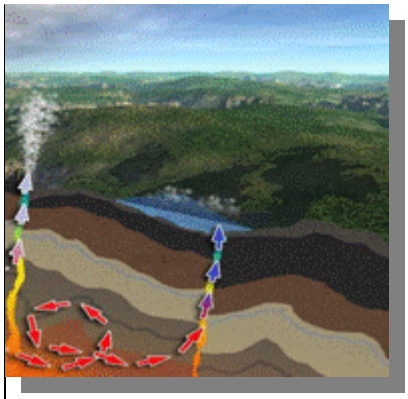
Como se verá en un capítulo posterior, las plantas de ciclo binario tienen rendimientos muy bajos, y la generación de electricidad, para que la operación resulte rentable, debe complementarse con otros aprovechamientos antes de que el agua sea devuelta al acuífero.

Aunque son plantas de pequeña capacidad, cuentan a su favor con que son de pequeñas dimensiones y de fácil implantación, y que si las características del yacimiento lo permiten, pueden ser ampliadas de forma modular.

3.3.4. Investigación de recursos de alta temperatura

A diferencia del oro negro, el oro blanco que puede salir por el brocal de un pozo geotérmico, en forma de vapor, no soporta desplazamientos y debe ser consumido localmente. Esta restricción se resuelve fácilmente transformando la energía térmica en energía eléctrica que puede ser distribuida por un territorio más amplio.

La circunstancia anterior, unida al mayor valor económico de estos



recursos y a las condiciones particulares de temperatura, quimismo, presión, etc., que caracterizan a los yacimientos que los contienen, hacen posible el uso de técnicas de prospección no válidas para los recursos de menor temperatura.

La investigación geológico-minera de recursos de alta temperatura ha estado tradicionalmente encaminada a descubrir nuevos yacimientos en áreas de actividad volcánica, en las cuales la existencia de un foco de calor activo que proporcione un flujo de calor anómalo, está prácticamente asegurada, Foto 3.5.

Foto 3.5. Volcán Michoacán, Guanajuato (México). Foco de calor activo que evidencia un flujo de calor anómalo.
(Fuente: *The Dynamic Earth. Smithsonian Museum of Natural History*).

Un proyecto de exploración de recursos se inicia sobre la totalidad de una zona cuya extensión, casi siempre, sobrepasa los 10.000 km^2 y se desarrolla en una serie de etapas que se resumen en la Tabla 3.4.

La primera etapa, de reconocimiento, consiste en la realización de una serie de estudios con métodos superficiales que pretenden detectar las áreas con mayores posibilidades para continuar la exploración.

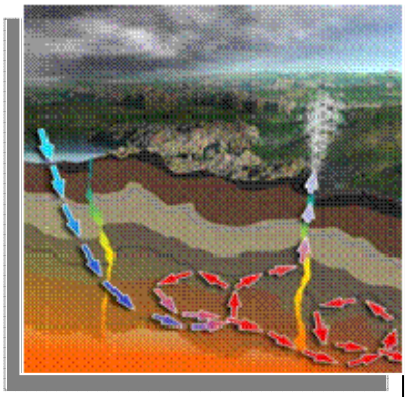


Tabla 3.4. Investigación de recursos de alta temperatura.

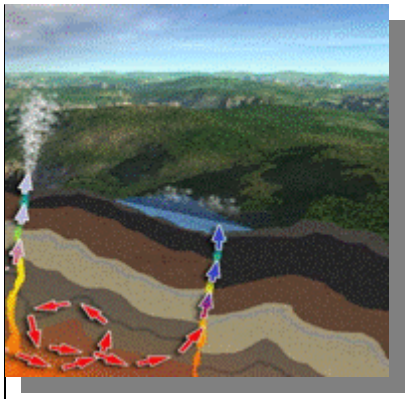
ETAPA	SUPERFICIE A INVESTIGAR	ESTUDIOS O TAREAS	OBJETIVOS
RECONOCIMIENTO	Más de 10.000 km²	Modelos conceptuales	Localizar las áreas con mejores posibilidades de albergar un almacén
		Geología	
		Geoquímica	
		Hidrogeología	
PREVIABILIDAD	500 a 2.000 km²	Geología	Determinar el modelo geotérmico preliminar y seleccionar la ubicación de los pozos de investigación
		Geoquímica	
		Geofísica	
		Hidrogeología	
		Sondeos someros	
VIABILIDAD	10 a 15 km²	Sondeos exploratorios	Verificar las características del yacimiento
		Estudio del reservorio geotermal	Determinar la conveniencia técnica y económica de su explotación
DESARROLLO		Pozos de explotación	Crear las condiciones para una correcta explotación del yacimiento
		Sistema de conducción	
		Diseño de la planta	
EXPLOTACIÓN		Funcionamiento de la planta	Optimizar el rendimiento de la planta
		Control del campo geotermal	

(Fuente: *Energía Geotérmica. Secretaría de Energía. República Argentina. 2004; Investigación de Recursos Geotérmicos. Petratherm España, S.L. 2007*).

En la segunda etapa, de previabilidad, se investigan en detalle las áreas anteriormente seleccionadas con el fin de identificar su potencial geotérmico. Termina con la proposición de un modelo de campo geotérmico y con la delimitación de los lugares más favorables para realizar las primeras perforaciones profundas. Tanto en esta fase como en la anterior, se utilizan técnicas geológicas, geoquímicas y geofísicas.

La geología permite determinar la presencia de una fuente de calor magmática a poca profundidad a partir del estudio de los materiales volcánicos emitidos a la superficie, en función de su edad y composición, delimitar el yacimiento y determinar las formaciones permeables que pueden contener fluidos y las impermeables que pueden mantener el fluido atrapado.

La hidrogeología y la geoquímica de aguas hacen posible delimitar



los circuitos de alimentación y salida de agua, calcular la temperatura del acuífero y la composición de los fluidos profundos.

La aplicación de diversos métodos geofísicos (gravimétricos, eléctricos, magnetotelúricos, sísmica de refracción, ruido sísmico, termometrías, etc.), permiten identificar anomalías geotérmicas, así como accidentes y fallas, y confirmar y delimitar la existencia de estructuras geológicas propicias para la existencia de un yacimiento.

En la etapa de viabilidad se evalúa la posibilidad técnica y económica de aprovechamiento del yacimiento, y se definen los posibles sistemas de explotación.

En la etapa de desarrollo se perforan los pozos de explotación y se procede al diseño de la planta. En la última etapa se construye y pone en funcionamiento la planta, se profundiza en el conocimiento que se tiene del almacén y del fluido geotermal, y se estudia cómo varían sus características con la extracción de energía, al objeto de optimizar el rendimiento de la planta y de prolongar los años de actividad del campo geotérmico.

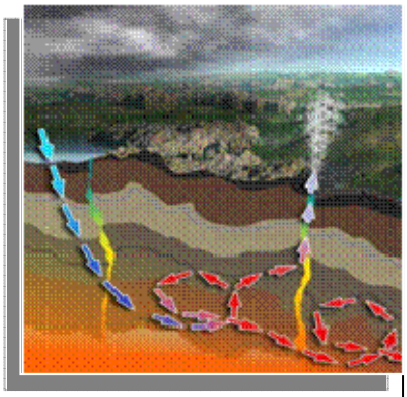
A medida que se avanza en el proceso de investigación, el grado de incertidumbre sobre la explotabilidad del yacimiento disminuye, pero el nivel de inversiones aumenta significativamente, por lo que es imprescindible evaluar detenidamente la conveniencia de finalizar una etapa y pasar a la siguiente, o abandonar el proyecto.

3.4. CLASIFICACIÓN DE RECURSOS GEOTÉRMICOS

Se acostumbra a clasificar a los recursos energéticos (en general), apoyándose en un esquema similar al propuesto por McKelvey en 1972 para los recursos minerales, publicado posteriormente en 1976 por el U.S. Geological Survey y el U.S. Bureau of Mines como "***Principles of a Resource / Reserve Clasification for Minerals***".

Dicho esquema fue adaptado por Mufler y Cataldi en 1978 para recursos geotérmicos, y contempla el mayor o menor grado de conocimiento geológico de los recursos y la viabilidad económica de su exploración. Se resume en la Fig. 3.14.

Se considera **Base de recursos accesible** a toda la energía térmica almacenada entre la corteza terrestre y los primeros 5.000 m de pro-



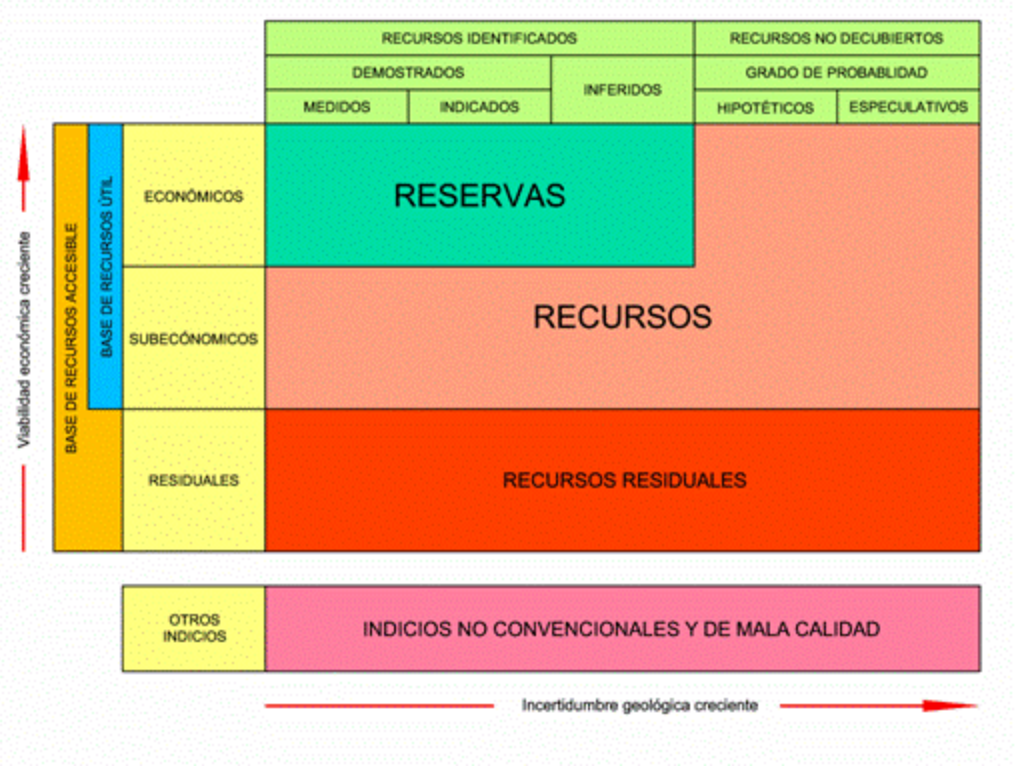


Figura 3.14. Esquema de clasificación de recursos geotérmicos.

fundidad, estimada para una determinada área del planeta, y calculada a partir de la temperatura media anual regional. Teóricamente podría ser extraída con la tecnología actual.

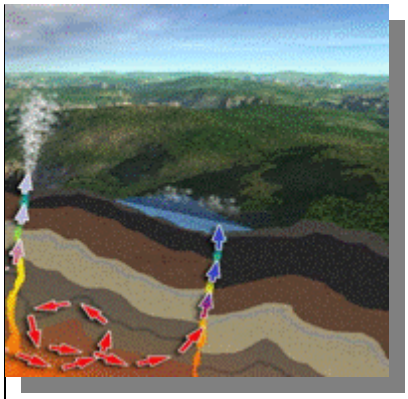
Base de recursos útil es la fracción de la anterior que está almacenada en los primeros 3.000 m bajo la superficie terrestre.

Recursos geotérmicos son la fracción de la anterior que podría ser explotada en los próximos 40-50 años.

Incluye cantidades de recursos que, en el momento de la estimación, son considerados subeconómicos. Algunos autores prolongan el futuro inmediato hasta “menos de 100 años”.

Reservas geotérmicas son la fracción de los recursos geotérmicos que pueden ser explotados económicamente en los próximos 10-20 años.

Dentro de la categoría de recursos geotérmicos cabría hacer una distinción entre **recursos no descubiertos** y **recursos identificados**, en función de que su existencia sólo esté postulada; y dentro de la categoría de reservas, o recursos identificados, para los que puede que no existan medios de extracción, o que no estén en actividad, todavía



cabe diferenciar entre **inferidos** y **demostrados**, en función del grado de conocimiento geológico.

Estos últimos, a su vez, se pueden diferenciar en **indicados** y **medidos** dependiendo de la precisión con la que se hayan determinado, dimensiones, forma y profundidad del yacimiento, contenido energético, etc.

Entre las estimaciones de recursos menos optimistas que se han podido encontrar figuran las que se adjuntan en la Tabla 3.5 para el año 2000.

Tabla 3.5. Potencial geotérmico mundial en el año 2000.

CATEGORÍA DE RECURSO	ENERGÍA (EJ)
Base de recursos accesible	140.000.000
Base de recursos útil	600.000
Recursos geotérmicos	5.000
Reservas geotérmicas	500

Nota: 1 EJ = 10^{18} J
(Fuente: *Geothermal Energy. Clauser, C. 2006*).

Según esas cifras, poco más de un 0,4% de la inmensa base de recursos accesible se considera como útil, y de ésta, no llega a un 1% lo que se considera recurso geotérmico. Todavía sólo un 10% de los recursos, la parte más accesible, son considerados reservas geotérmicas.

Diminuta como puede parecer la cantidad de reservas, ésta es superior al consumo de energía primaria mundial en el año 2001, que fue de 420 EJ. Una tercera parte de esa cantidad puede considerarse de alta temperatura, apropiada para producir energía eléctrica, y las otras dos terceras partes, de temperatura inferior a 150 ºC. La distribución por regiones del planeta para el mismo año es la que se recoge en la Tabla 3.6.

Merece la pena señalar el hecho de que la inclusión de un recurso en una u otra categoría es dinámica, cambia con el transcurso del tiempo. Por un lado, el incremento de los precios de la energía, los avan-

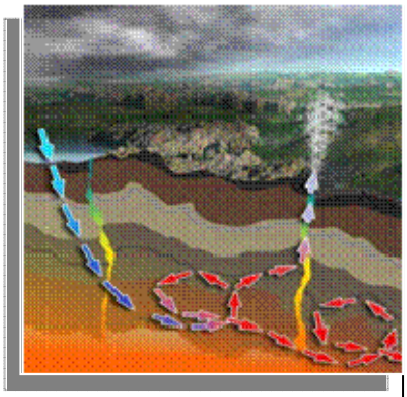


Tabla 3.6. Base de recursos geotérmicos accesible por regiones en el año 2000.

REGIÓN	ENERGÍA (EJ)	TOTAL (%)
América del Norte	26.000.000	18,60
Latinoamérica y Caribe	26.000.000	18,60
Europa Occidental	7.000.000	5,00
Europa Oriental y antigua URSS	23.000.000	16,40
Oriente Medio y África del Norte	6.000.000	4,20
África Subsahariana	17.000.000	12,10
Pacífico Asiático (excepto China)	11.000.000	7,90
China	11.000.000	7,90
Asia Central y Meridional	13.000.000	9,30
TOTAL	140.000.000	100,00

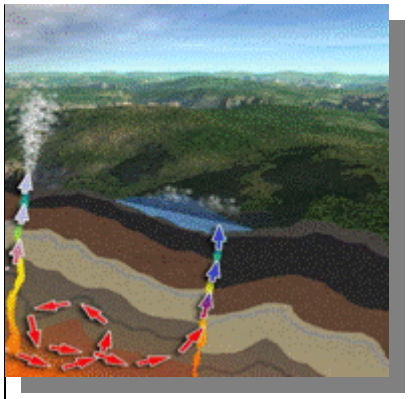
Nota: 1 EJ = 10^{18} J

(Fuente: *Geothermal Energy. Clauser, C. 2006*).

ces tecnológicos y una mayor exploración de recursos geotérmicos, harán que aumenten las reservas de energía geotérmica en determinadas regiones. Por otro lado, la inflación, el aumento de impuestos, reglamentaciones excesivas y leyes ambientales restrictivas, harán que disminuyan en otras.

Por paradójico que resulte, cuanto mayor sea el número de explotaciones, y cuanto más aumente la producción de energía geotérmica, mayores serán sus reservas. El grado de conocimiento de los recursos mejorará y más cantidades de éstos adquirirán la condición de reservas.

Por todo lo anterior, es de prever que en los próximos años, a medida que las reservas de los combustibles fósiles se vayan agotando, las de energía geotérmica vayan aumentando; y es de desear que el número de expertos que cuestionan el carácter renovable de este recurso energético, vaya disminuyendo.



Si la energía geotérmica dejara de explotarse algún año de estos (a la escala humana), no sería por agotamiento del recurso, sino por obsolescencia de las instalaciones que se encargan de extraerlo del subsuelo, por cese de actividad industrial, agrícola, comercial o pública de las empresas u organismos que aprovechan su calor, o porque los usuarios domésticos a los que les hace la vida más confortable en sus hogares han alcanzado la edad de jubilación y/o se han ido a morar a otra parte, Fig. 3.15.

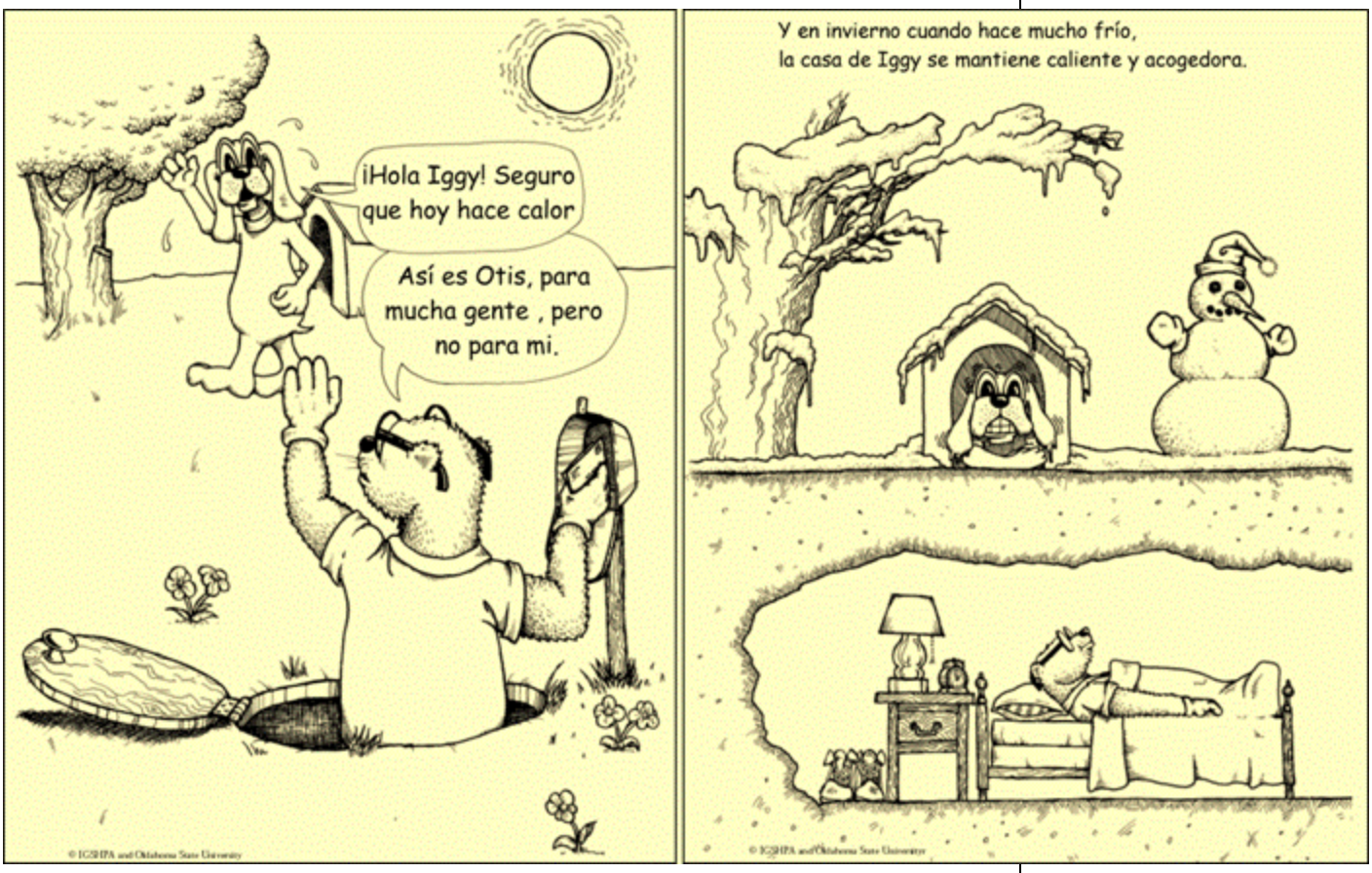
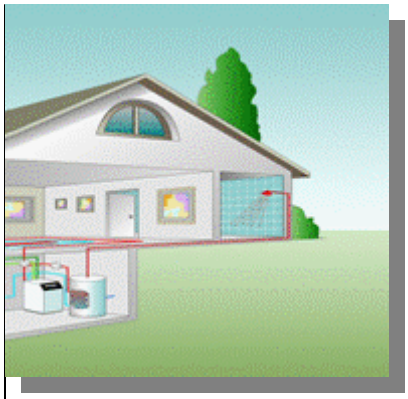


Figura 3.15. Hojas de un comic de IGSHPA para difundir el uso de la energía geotérmica. (Fuente: *@IGSHPA and Oklahoma State University*).



4 APROVECHAMIENTO DE LA ENERGÍA GEOTÉRMICA DE MUY BAJA TEMPERATURA

La energía geotérmica de muy baja temperatura basa sus aplicaciones en la capacidad que el subsuelo posee de acumular calor, y de mantener una temperatura sensiblemente constante a determinada profundidad, a lo largo de todo el año.

Por otra parte, como puede apreciarse en la Fig. 4.1, las necesidades energéticas más comunes de los seres humanos, en los hogares, se centran en la calefacción y el agua caliente sanitaria, con lo que podría plantearse una primera idea de aprovechamiento de este recurso energético: utilizar la temperatura del subsuelo para climatizar las viviendas y el agua de uso doméstico diario.

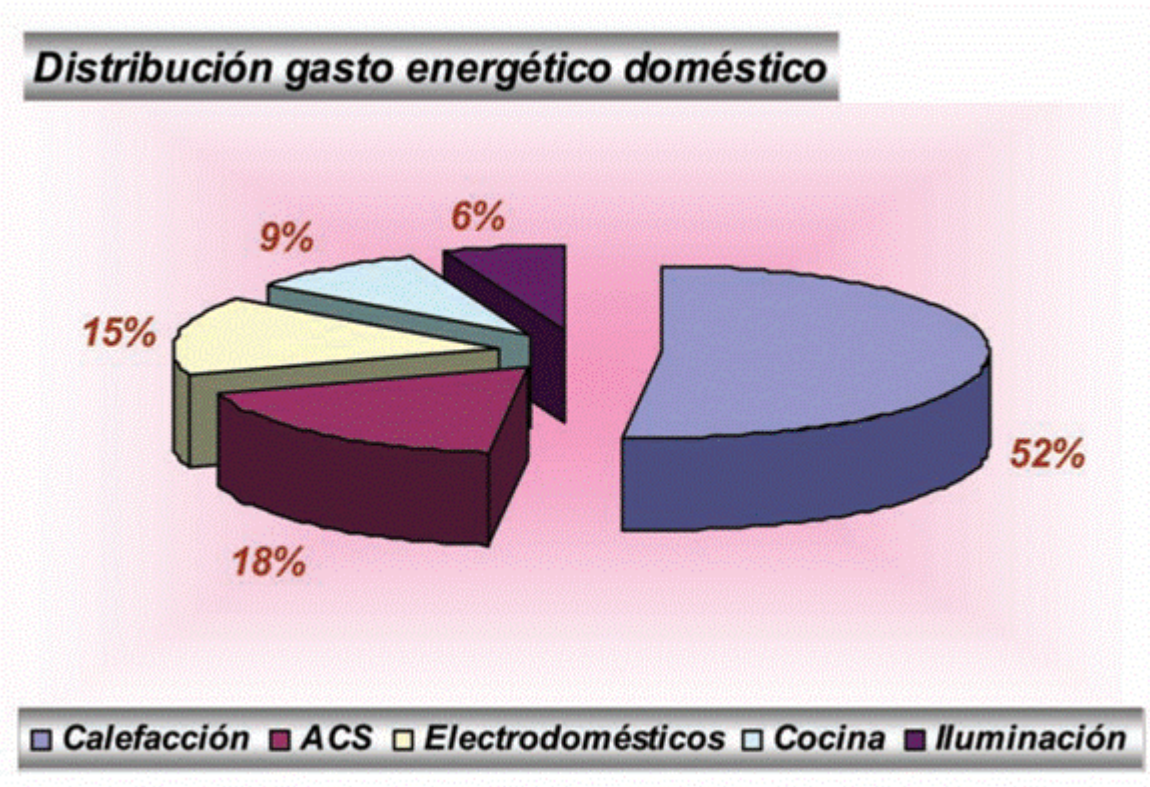
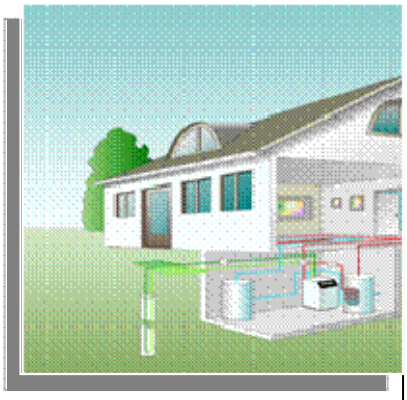


Figura 4.1. Distribución del gasto energético doméstico. Vivienda-tipo medio. (Fuente: *Calor Natural. Ruiz, J. 2007*).

Sin embargo, pese a la globalidad que se ha enunciado para la disponibilidad de esta energía, su rendimiento puede ser muy diverso, según la temperatura de la que se disponga. Así, si se considera la temperatura del subsuelo según una función F, tal que:



$$T_{sp} = F\ (T_{ss}, x, k, C_e, t)$$

donde

T_{sp} = Temperatura del suelo a una determinada profundidad.
T_{ss} = Temperatura del suelo en superficie.
x = Profundidad bajo la superficie.
k = Conductividad térmica del terreno.
C_e = Calor específico del terreno.
t = Tiempo de intercambio de calor.

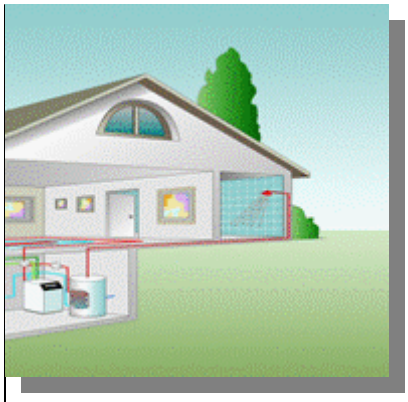
Es evidente que el comportamiento de los terrenos en cuanto a la transmisión del calor a través de ellos y a su capacidad de almacenarlo, condicionarán en gran medida el rendimiento de los aprovechamientos de este tipo de energía

Para las transferencias de calor por convección, la permeabilidad del terreno se convierte también en un factor importante, cuando no decisivo. 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.

Las aplicaciones van a depender, fundamentalmente, de la temperatura del terreno y de la capacidad del mismo de transmitir o absorber el calor que absorberá o cederá el espacio a climatizar. Este calor será conducido, desde o hasta el terreno, por un agente intercambiador de calor que, en la inmensa mayoría de los casos es un fluido con unas características especiales, como su bajo punto de congelación y su capacidad de mantener el calor, es decir, una baja inercia térmica; en realidad, suele ser agua con un aditivo, como algún glicol (alcohol especial de bajo punto de congelación).

Para esta modalidad de aprovechamiento, las temperaturas del subsuelo no excederán de los 30 ºC, siendo las más comunes a utilizar las que oscilen en el rango de los 10-18 ºC, y es evidente que este margen de temperaturas no es aprovechable directamente para la calefacción de las habitaciones que utiliza el ser humano, que demanda del orden de 40-50 ºC, según las necesidades.

Se deduce inmediatamente que la forma de aumentar la temperatura del fluido de intercambio de calor deberá proceder de una fuente



de energía ajena a la que se puede extraer del subsuelo; para ello, se utiliza un ingenio que el hombre se ha procurado desde hace más de 50 años, con un funcionamiento muy sencillo y con unos rendimientos muy notables, denominado **Bomba de calor**.

4.1. BOMBAS DE CALOR CONVENCIONALES

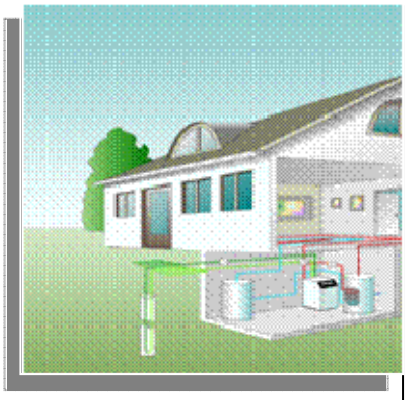
Las leyes que sobre la forma de comportarse los gases enunciaron Boyle, Mariotte, Charles y Gay-Lussac, no son más que el reflejo de un principio ya conocido desde muy antiguo por los físicos y que puede enunciarse así: "*Un gas se calienta cuando se comprime y se enfría cuando se expande*". Este sencillo enunciado, casi evidente, es el origen de una de las máquinas con más difusión en la sociedad no sólo industrial, sino entre la mayor parte de la población.

En efecto, los clásicos frigoríficos, tanto domésticos como industriales, utilizan este principio. Los denominados comúnmente "refrigerador" o "nevera" son armarios o cajones aislados térmicamente para que el calor no penetre dentro de dicho armario. Cuando en él se introduce algún alimento, éste lleva consigo unas calorías desde el exterior.

Dentro del refrigerador se dispone de un panel de captación, que contiene en su interior un circuito hidráulico, por el que circula un líquido refrigerante o un gas licuado; este líquido tiende a evaporarse captando o "robando" rápidamente el calor introducido junto con el alimento. Una vez captado el calor en el líquido o gas, éste pasa a un compresor que lo comprime, consiguiendo así que aumente de temperatura. Aumentada su temperatura en la compresión, se traspasa por circulación al panel o circuito exterior (parte trasera de los refrigeradores). El calor que transporta el líquido invadirá la ausencia de éste en el ambiente exterior, disipándolo fuera del refrigerador.

Este mecanismo es lo que se denomina una bomba de calor, y con ella se ha conseguido extraer el calor del interior del frigorífico y se ha disipado en el exterior. Del mismo modo, un acondicionador de aire extrae el calor desde el interior de un habitáculo, disipándolo en el exterior. Esa ausencia de calor es el concepto de refrigeración.

Si se consigue aprovechar el frío en el evaporador (válvula de expansión) para refrigerar un ambiente en verano, y el calor en el condensador (compresor) para calentar el mismo ambiente en invierno, se habrá conseguido alcanzar el concepto de climatización. La pregun-



ta inmediata sería si para conseguir el doble efecto mencionado, se requerirían dos máquinas de funcionamiento inverso, lo cual presentaría inconvenientes de inversión monetaria, de mantenimiento y de espacio físico, un problema fundamental en la capacidad de las viviendas actuales. Esto respondería a los esquemas que pueden verse en la Fig. 4.2.

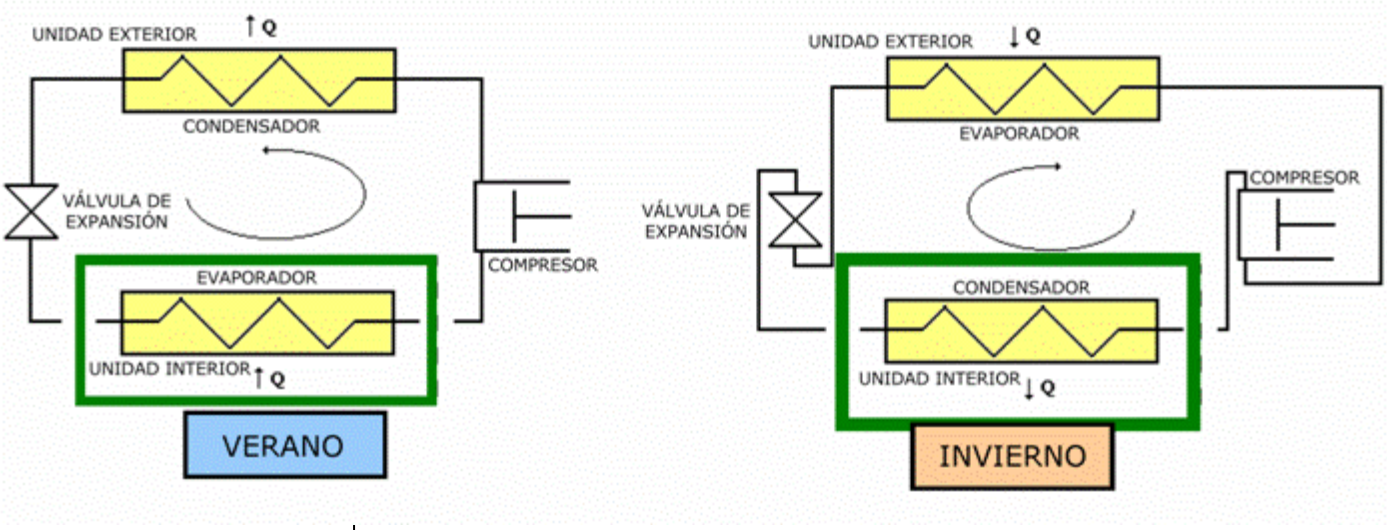


Figura 4.2. Esquema doble de funcionamiento del grupo evaporador-condensador. Ciclos verano e invierno. (Fuente: *Bomba de calor. IEE. Universidad de Cantabria*).

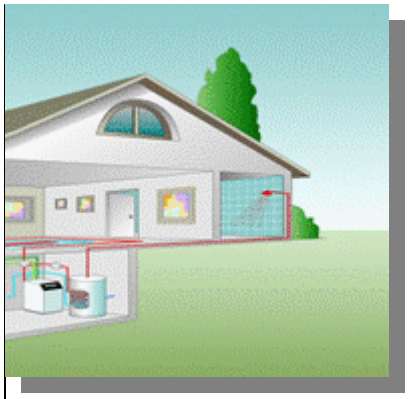
En dicha figura se han representado los dos ciclos precisos en la máquina descrita para conseguir los resultados de climatización previstos y que responderían al cuadro de funcionamiento siguiente:

	VERANO	INVIERNO
UNIDAD INTERIOR	EVAPORADOR	CONDENSADOR
UNIDAD EXTERIOR	CONDENSADOR	EVAPORADOR

Este tipo de funcionamiento, además de los inconvenientes descritos, presenta unas desventajas importantes:

- Bajo rendimiento, cuando las temperaturas exteriores son bajas.
- Formación de escarcha en el evaporador, que requeriría una inversión del proceso para el "desescarchado".
- Golpe de líquido en el compresor.

Existe una posibilidad de evitar acudir a una dualidad de máquinas, aunando el proceso en una sola, según los esquemas de funcionamiento que pueden observarse en la Fig. 4.3.



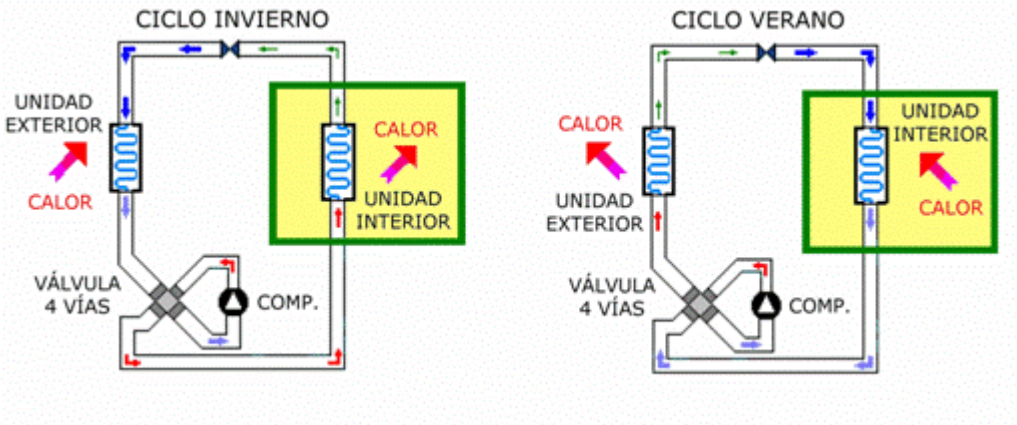


Figura 4.3. Funcionamiento de la bomba de calor reversible. Ciclos verano e invierno. (Fuente: *Bomba de calor. IEE. Universidad de Cantabria*).

Como puede apreciarse en dicha figura, para suplir la necesidad de dos máquinas independientes, se precisa simplemente una válvula de expansión de doble sentido y una válvula de cuatro vías a la salida del compresor, que aunaría las dos funciones en un ciclo único. Esta válvula será la que se encargue de invertir el flujo del refrigerante; se accionaría por la propia presión del líquido refrigerante y estaría pilotada eléctricamente. La tubería superior sería la de descarga, mientras su enfrentada es la de aspiración y las otras dos van a las unidades interior y exterior. La situación de funcionamiento de una válvula de este tipo será la que se muestra en la Fig. 4.4.

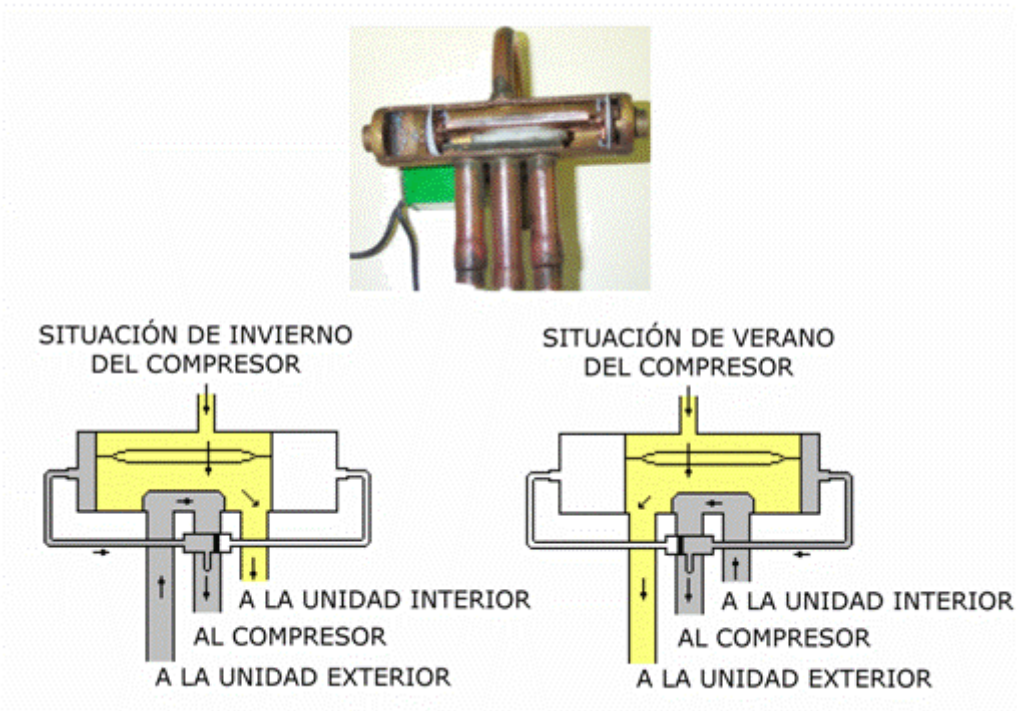
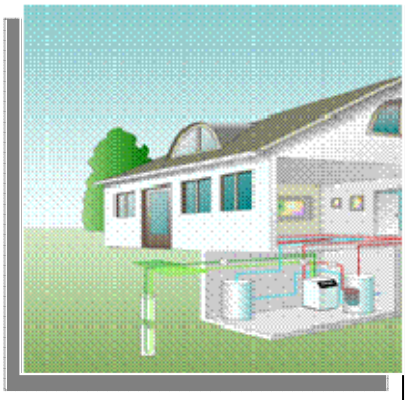


Figura 4.4. Sección de una válvula de cuatro vías y situación de verano e invierno de la misma. (Fuente: *Bomba de calor. IEE. Universidad de Cantabria*).



Con este sencillo sistema se consigue reducir a una sola máquina la dualidad de funciones de la bomba de calor, invirtiendo el sentido de circulación del refrigerante y alternando las funciones del grupo compresor-evaporador, que configuran el mecanismo de una bomba de calor convencional.

La bomba de calor hasta aquí descrita es la convencional, denominada aire-aire, pues en ella, tanto el foco frío (medio exterior de intercambio de calor), como el foco interior de intercambio de calor, (punto de demanda), están constituidos por aire, bien el atmosférico en el primer caso, bien el interior a climatizar en el segundo. Son las bombas de calor más extendidas comercialmente y de las que el mercado dispone en una amplia gama de potencias y prestaciones.

Estas bombas de calor requieren, aparte del consumo eléctrico en bombas de circulación, un aporte exterior de energía calorífica, como se puede apreciar en la Fig. 4.5, en la que el calor aportado al refrigerante del circuito secundario proviene de una fuente eléctrica, aunque puede ser aportada desde la combustión de carburantes convencionales fósiles. Este calentamiento produce, en última instancia, una conducción de calor hacia el punto de demanda, donde una corriente de aire se encarga de disiparlo en el habitáculo a calentar.

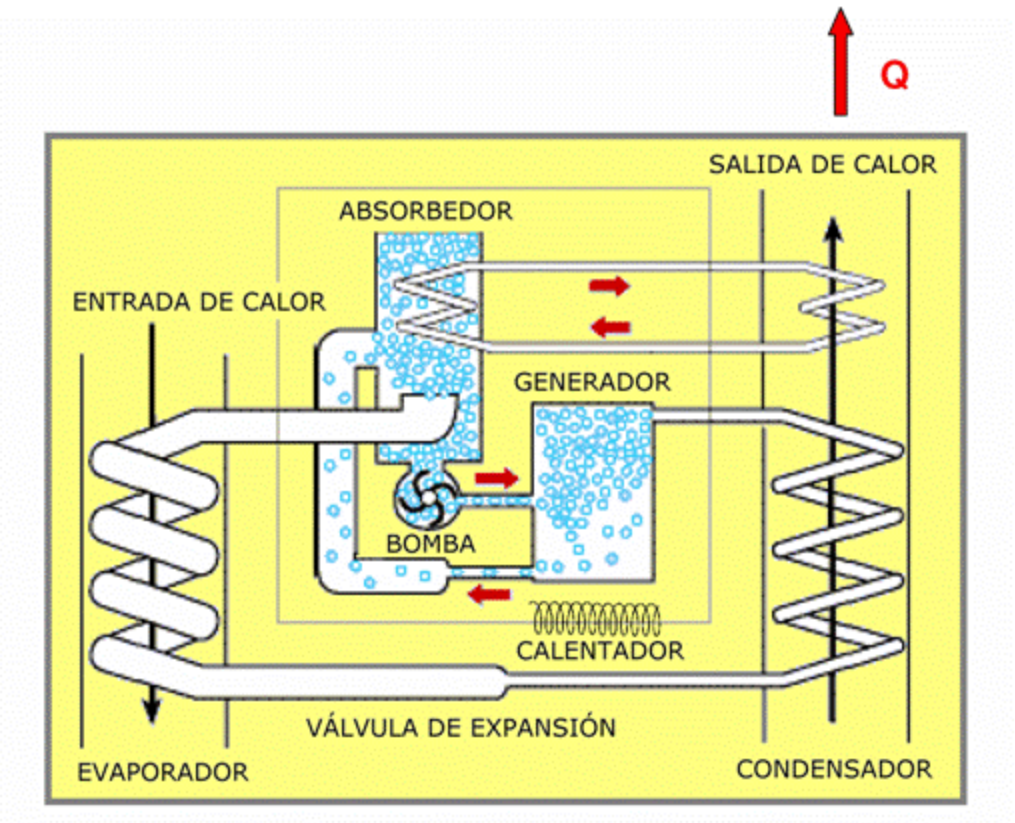
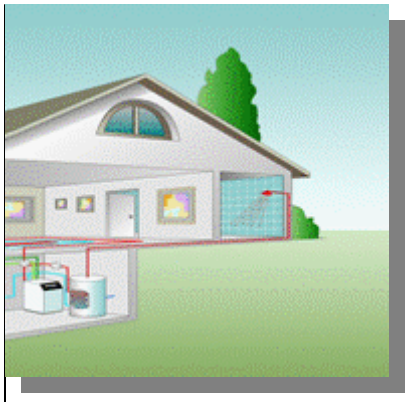


Figura 4.5. Esquema de funcionamiento de una bomba de calor de absorción aire-aire. (Fuente: *Bomba de calor. IEE. Universidad de Cantabria*).



Pero el destino final del calor absorbido por el refrigerante del circuito secundario, puede ser destinado a calentar agua de calefacción para ser disipada por radiación desde los clásicos radiadores de agua o aceite en los puntos de demanda, o por un suelo radiante. De todas formas, el foco frío seguiría siendo el aire atmosférico, con los inconvenientes que se han descrito.

4.2. BOMBA DE CALOR GEOTÉRMICA

En las aplicaciones geotérmicas de muy baja temperatura, se pretende extraer el calor del subsuelo terrestre, para poder calentar un fluido de alta compresibilidad y bajo punto de vaporización (circuito secundario), al objeto de transmitir ese calor a una instalación en invierno, invirtiendo el proceso en verano. Pero sólo es posible extraer calor si la temperatura de entrada geotérmica es superior a la de retorno del circuito secundario, la cual viene determinada por el tipo de instalación de calefacción y por la temperatura exterior.

Así mismo, en las bombas de calor hasta aquí descritas, el ambiente exterior es el existente en la atmósfera. Sin embargo, se abren otras posibilidades, en las que juega un papel importante la aportación de la energía geotérmica, según se puede apreciar en la Fig. 4.6.

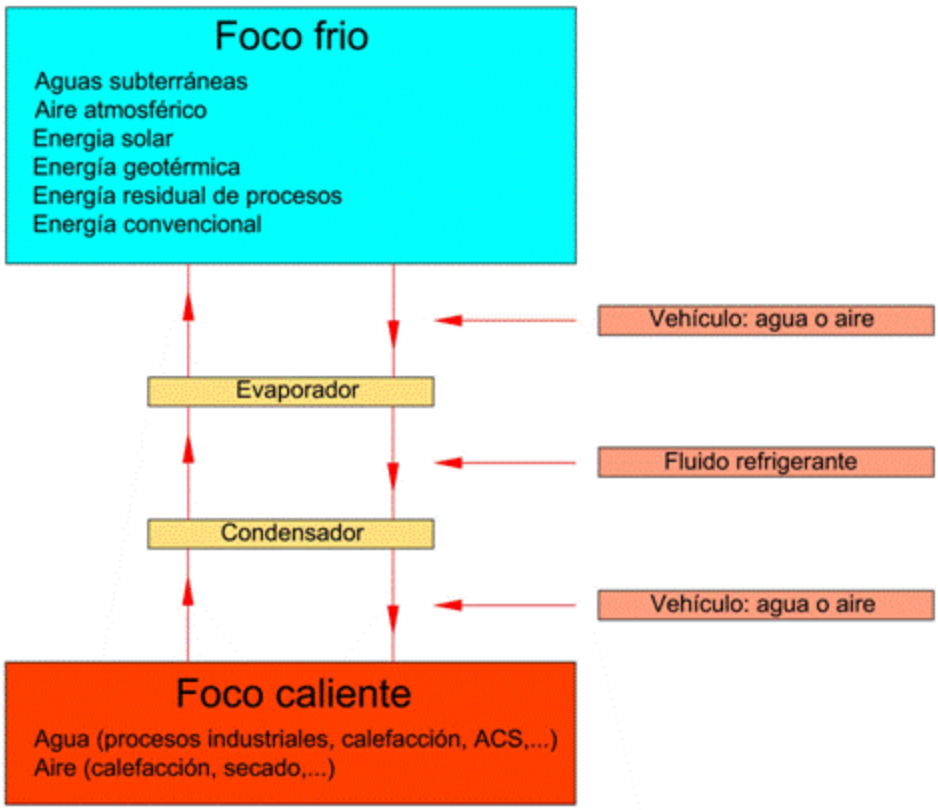
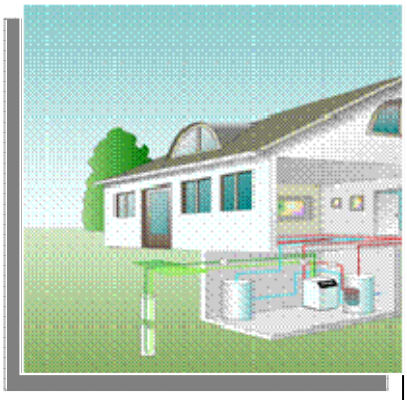


Figura 4.6. Diferentes posibilidades de foco frío para bomba de calor.



En las condiciones habituales, suele aceptarse una diferencia mínima de unos 4-6 ºC entre la temperatura media del fluido caliente y la temperatura media del frío, y un salto térmico máximo de 10 ºC entre la temperatura de entrada y la de salida del agua que aprovecha la energía geotérmica de muy baja temperatura. En la mayoría de las aplicaciones comerciales, los caudales utilizados son los siguientes:

- Caudal del lado del agua geotérmica, entre 0,018 y 0,045 l/s kW_t
- Caudal del lado del agua caliente, entre 0,045 y 0,054 l/s kW_t

lo cual equivale a un salto de temperatura de entre 13,3 y 5,3 ºC para el agua geotérmica y entre 5,3 y 4,4 ºC para el agua caliente.

La bomba de calor geotérmica permite soslayar las limitaciones expuestas más arriba y explotar recursos geotérmicos de rentabilidad, en principio, dudosa, debido a su baja temperatura, e incluso posibilita explotar recursos a temperatura menor que la de demanda.

Concurren para ello dos factores importantes que favorecen la implantación de este tipo de instalaciones: por un lado, en el mercado ya existe una amplia gama de bombas de calor de distintos tipos y dentro de una amplia serie de potencias, de precio asequible y que no precisan de una complicada instalación ni de un personal excesivamente cualificado para su instalación y mantenimiento; y, por otro, la existencia de amplias zonas potencialmente utilizables, mucho más abundantes y extensas que las de baja y media temperatura.

La bomba de calor geotérmica, **GHP** (***Geothermal Heat Pump***), tiene su aplicación fundamental en instalaciones domésticas y comerciales, para agua caliente sanitaria y calefacción, de pequeña y mediana potencia. Con ella se soslayan los inconvenientes citados al hablar de las bombas de calor con intercambio final con la atmósfera. En las GHP, los inconvenientes de formación de escarcha en el condensador desaparecen y, de forma intuitiva, se aprecia que el rendimiento mejorará al pedir calor de un medio menos frío (el terreno) que en las bombas de calor convencionales (el aire atmosférico) en invierno, y viceversa en verano. En efecto, es más fácil ceder calor al terreno, a una temperatura casi constante con la estación, que al aire caliente de la atmósfera veraniega.

En la Tabla 4.1, pueden observarse unos datos correspondientes al año 2004, que muestran la implantación de este sistema de bombas de calor geotérmicas en diversos países.

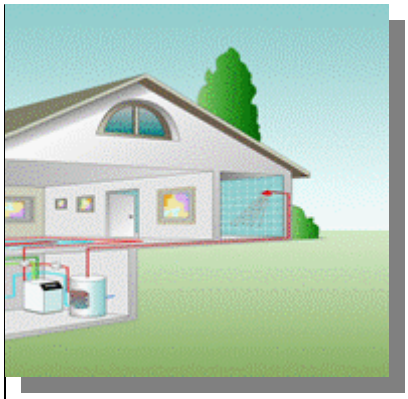


Tabla 4.1. Principales países con bombas de calor geotérmicas.

País	Población x (10^6)	Nº GHP's	Producción anual (TJ)	Potencia instalada (MW_t)	Producción por habitante anual (MJ)	Potencia media unitaria (kW_t)
Suecia	9	200.000	28.800	2.000	3.200	10,00
EE. UU.	294	500.000	13.392	3.720	46	7,44
Alemania	82	51.000	4.212	780	51	15,29
Canadá	32	36.000	1.080	435	34	12,08
Suiza	7	27.000	2.268	420	324	15,56
Austria	8	23.000	1.332	275	167	11,96
TOTAL	**432**	**837.000**	**51.084**	**7.630**	**3.822**	**9,12**

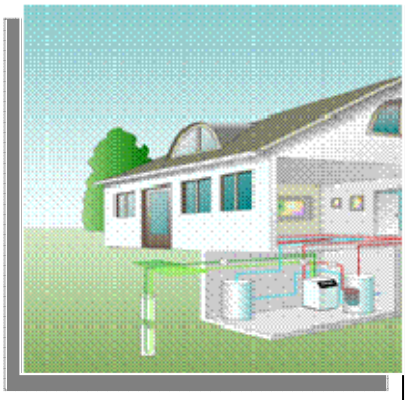
(Fuente: *Geothermal Energy. Clauser, C. 2006*).

Como se puede apreciar en dicha tabla, el número de máquinas instaladas es considerable, más de 800.000 unidades, solamente en los países referenciados como más importantes en el uso de la energía geotérmica de muy baja temperatura. Es interesante hacer notar que, así como la potencia térmica media instalada por bomba es de poco más de 9 kW_t en el conjunto, en Alemania y Suiza se supera la media de potencia por bomba con creces, lo cual indica un alto porcentaje de bombas de calor para instalaciones superiores al ámbito unifamiliar. En cambio, en EE.UU. la media no alcanza en absoluto la del conjunto mundial, lo cual hace pensar en una mayoría de pequeñas bombas de uso en pequeñas viviendas unifamiliares.

Otro dato reseñable a partir de la citada Tabla 4.1 es la producción por habitante del conjunto de energía térmica derivada de las bombas de calor, con un máximo espectacular para Suecia, mientras en EE.UU., con doble número de bombas de calor geotérmicas, se encuentran prácticamente al final de la clasificación en producción por habitante. Esto responde a la realidad de que no se precisa la misma energía térmica doméstica en el clima medio de los EE.UU. que la que precisa una gran mayoría de habitantes en Suecia.

4.2.1. Rendimiento de una bomba de calor geotérmica

Para formular las ecuaciones que reflejen el rendimiento de la máquina, se considerará formada por: un compresor que aspira un gas a baja presión y lo comprime hasta una presión elevada; un condensa-



dor, donde el gas se enfría y sale en forma de líquido saturado o subenfriado; una válvula de expansión, de donde sale en forma de mezcla líquido-vapor; y un evaporador, donde la fase líquida pasa a vapor; el vapor saturado o ligeramente sobrecalentado es absorbido al compresor, completándose el ciclo.

El balance de energía alrededor de la máquina permite formular:

$$P_e + P_E = P_C + P_p \qquad (1)$$

donde

P_e = Potencia eléctrica consumida en la operación.
P_E = Potencia frigorífica (calor extraído del exterior).
P_C = Potencia térmica (calor cedido al exterior).
P_p = Potencia perdida, debida a rozamientos e imperfecciones.

La eficiencia de la máquina se expresa por medio de un coeficiente internacionalmente aceptado, conocido como **COP** (***Coeficient of Performance***), y que se define como el cociente entre la energía útil obtenida de la máquina y la energía de todo tipo que dicha máquina ha consumido en el proceso. Si se considera la máquina como productora de frío, determinaremos su eficiencia frigorífica, mientras que si la consideramos productora de calor, se obtendrá una eficiencia térmica.

COP frigorífico	$COP_f = P_E/P_e$
COP térmico	$COP_t = P_C/P_e$

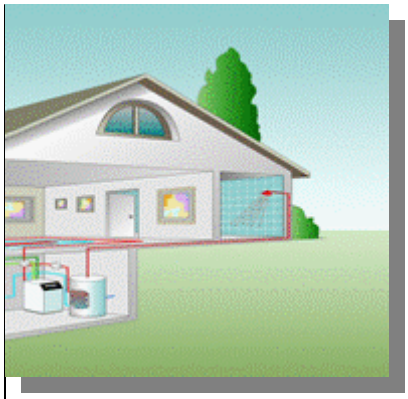
y utilizando la ecuación (1) para relacionar ambos, se obtendrá que:

$$COP_f = COP_t + 1 - P_p/P_e$$

El límite máximo teórico de la eficiencia viene dado por la que tendría una máquina ideal que funcionaría siguiendo un ciclo termodinámico de Carnot, según las siguientes expresiones:

COP frigorífico (máximo)	$COP_{f^*} = (T_C - T_E)/T_E$
COP térmico (máximo)	$COP_{t^*} = (T_C - T_E)/T_C$

y una relación entre ambos de $COP_{t^*} = COP_{f^*} + 1$ (2)



donde

T_C = Temperatura del medio caliente.
T_E = Temperatura del medio frío.

Como se puede apreciar en la relación anterior, el COP_{t*} siempre superará en un punto, en el peor de los casos (máximos) al COP_{f*}, y en los casos habituales, según la ecuación (2), la eficiencia en utilización térmica superará en más de un punto a la eficiencia en utilización de refrigeración. Ambos estarán más próximos cuanto menores sean las pérdidas de energía en el funcionamiento.

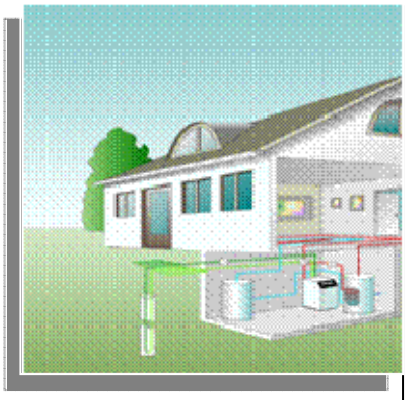
En los catálogos de los fabricantes figura el COP nominal de la máquina funcionando en régimen estacionario y trabajando entre unas temperaturas determinadas del fluido frío y del fluido caliente. Hay que tener en cuenta que, fuera de las condiciones nominales especificadas, la eficiencia podría ser muy distinta y que su valor medio estacional será menor, puesto que, durante muchas horas a lo largo del año, funcionará a carga parcial.

Del rendimiento que se obtiene en las prestaciones más extendidas de las GPH's, se pueden desprender las siguientes consideraciones:

- **Régimen de calefacción**. El COP_t depende, en gran medida, de la temperatura del recurso geotérmico pero, en líneas generales, su valor suele estar comprendido entre 3 y 4, pudiendo llegar a 5. Para la gran mayoría de los equipos, la temperatura máxima de agua caliente es de 50 ºC, con un salto térmico entre ida y retorno de 5 ºC. Si la calefacción es por generación de aire caliente y difusión por convección, la temperatura de suministro suele estar comprendida entre 32 y 40 ºC.

- **Régimen de refrigeración**. El valor del COP_f suele situarse entre 2,5 y 3,5 y, en cuanto a las condiciones de producción de frío, suelen distinguirse dos posibilidades más extendidas: máquina de expansión directa, en la que el aire del recinto a climatizar pasa directamente a través del evaporador; y máquina enfriadora de agua, en la cual el evaporador enfría agua que luego se distribuye a los climatizadores locales.

  En el primer caso, las condiciones nominales del aire interior suelen ser de 25 ºC y alrededor del 50% de humedad relativa. Por el contrario, las condiciones nominales de las enfriadoras de agua



suelen ser del orden de 7 ºC para la temperatura de impulsión y 5 ºC de salto térmico entre impulsión y retorno.

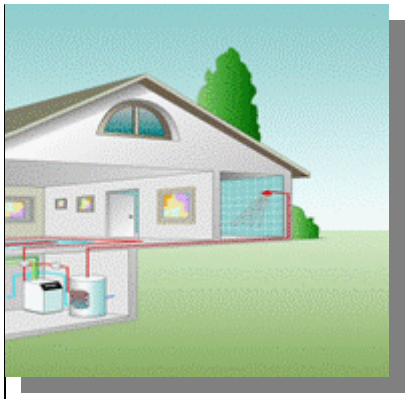
4.3. SISTEMAS DE CAPTACIÓN DE ENERGÍA GEOTÉRMICA DE MUY BAJA TEMPERATURA

En el intercambio general de calor en una GHP, como ya se ha visto anteriormente, y simplificando de nuevo el proceso, un intercambiador de calor está conectado al circuito de climatización o ACS (en el interior) y el otro está conectado al lado geotérmico (en el exterior). La válvula de cuatro vías dirige la circulación del fluido refrigerante en un sentido o en otro, en función del régimen de funcionamiento; en calefacción, el intercambiador interior funciona como condensador y el exterior como evaporador, invirtiéndose los papeles en régimen de refrigeración.

Al final del circuito de distribución se encuentran los puntos de demanda, donde debe ser entregado el calor (o el frío) a los recintos de consumo. La gran variedad de casos posibles de entrega final dependen de cada aplicación particular, siendo los más extendidos los de calefacción/refrigeración de locales, bien privados (viviendas), bien oficinas o dependencias industriales o, incluso, de concentración de viviendas (edificios completos). Estos puntos de demanda serán el punto de partida para el dimensionamiento de un sistema de aprovechamiento de la energía geotérmica de muy baja temperatura.

Siguiendo el esquema que aparece en la Fig. 4.7, el primer paso será determinar el consumo térmico en los puntos de demanda, bien en los distintos puntos de calefacción, en el agua caliente sanitaria o en los de refrigeración. Este consumo dependerá de la climatología del emplazamiento, de la orientación del inmueble y su situación (horas de sol) y de la forma de entrega final del calor o el frío (intercambiadores finales de calor o frío), con sus rendimientos correspondientes.

Este consumo, dividido por el número de horas de funcionamiento, bien en cada caso (refrigeración, calefacción, producción de ACS), o bien mediante tablas de consumo medio por superficie habitable, según las circunstancias climatológicas mencionadas, proporcionará la potencia media o/y en puntas que la instalación de la GHP precisará. Hoy día, con la expansión que estos sistemas están teniendo en todo el mundo, el mercado dispone de tablas y ábacos que determi-



nan la potencia necesaria del equipo en función de las características citadas.

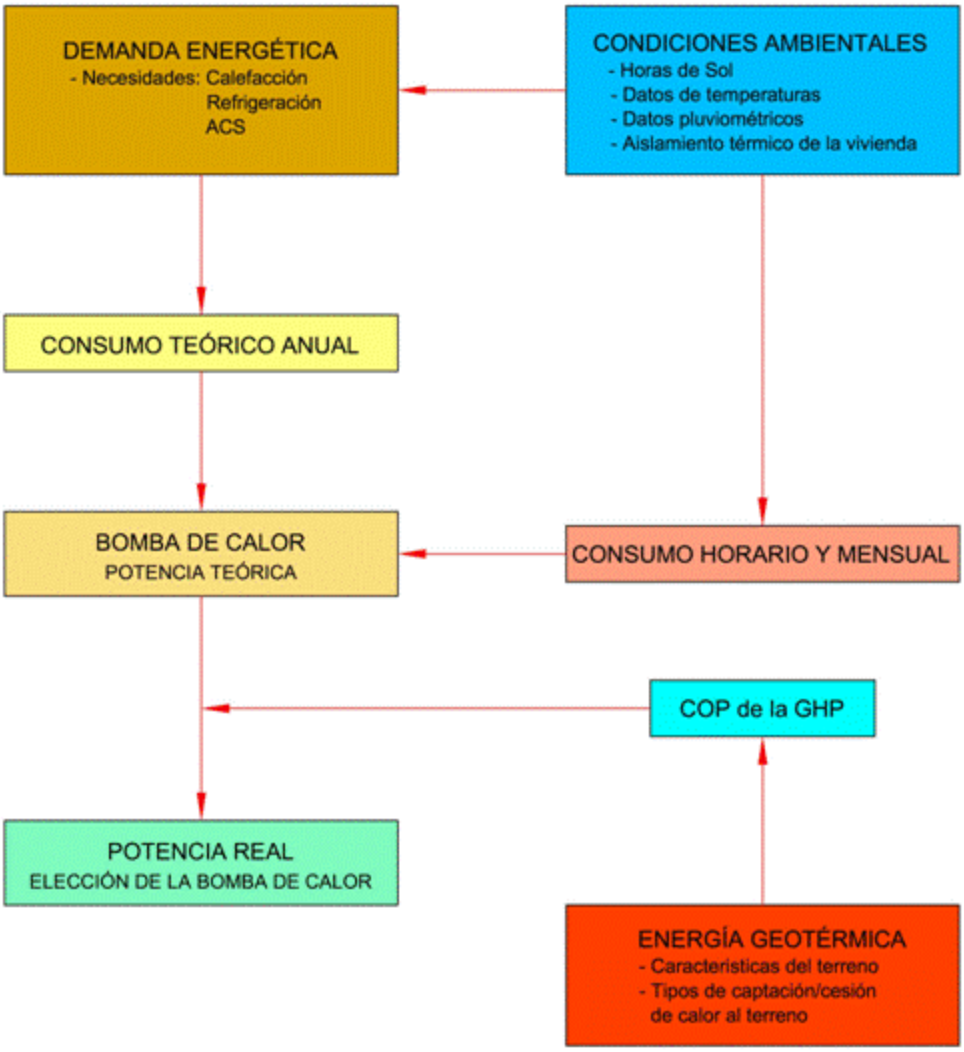
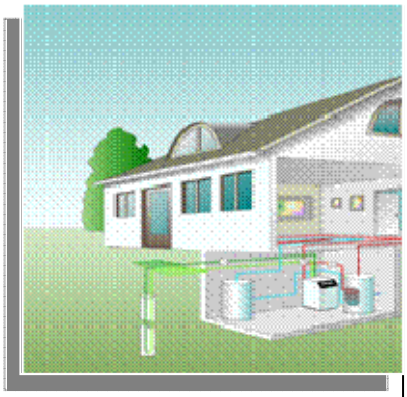


Figura 4.7. Secuencia de etapas para el dimensionamiento de una bomba de calor geotérmica.

La potencia requerida que acaba de ser calculada, en cualquier caso, responde a los parámetros empleados y proporciona unos resultados teóricos. En efecto, una bomba de calor geotérmico, diseñada para una potencia máxima, tendrá unos resultados prácticos que dependerán del rendimiento de dicha bomba, el cual depende a su vez de varias condiciones exteriores, principalmente de la temperatura del foco frío. Y esa temperatura es la que el sistema obtiene de la fuente de energía geotérmica.

Es bastante evidente el papel que los intercambiadores de calor primarios, que más bien se podrían definir como captadores del calor



geotérmico, juegan en el rendimiento del sistema, en cualquiera de sus versiones de funcionamiento, con más trascendencia en el caso de la refrigeración, al ser más reducido su COP, lo que obliga a prestar más atención a dichos intercambiadores exteriores.

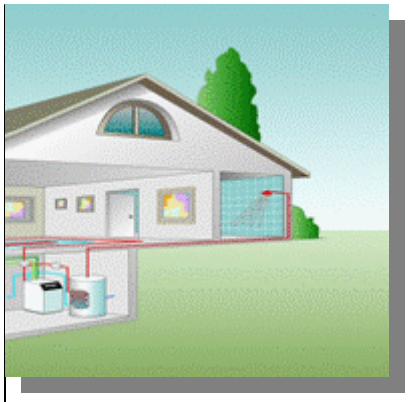
En efecto, la capacidad de intercambiar calor con la fuente de energía geotérmica, dependerá de las características del terreno, como ya se ha visto con anterioridad, pero éstas son las que la naturaleza ha impuesto y deben considerarse inamovibles. Lo que sí puede modificarse es la capacidad del intercambiador para absorber o ceder el calor, y éste dependerá de las necesidades de la bomba de calor geotérmica calculadas y de su rendimiento (COP), según el esquema ya citado de la Fig. 4.7.

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

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

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

Esta longitud será una función del calor capaz de ser absorbido o cedido por el terreno, de las temperaturas del suelo y del fluido intercambiador, de la resistencia térmica del terreno y de las caracterísi-



cas conductivas del material del que está compuesto el tubo captador. Puede formularse una función F, tal que:

$$L_{cap} = F\ (Q, T_s, T_f, Cap, R_s) \qquad (3)$$

donde

L_{cap} = Longitud del captador de calor (superficie/tiempo de contacto).
Q = Calor a disipar o captar por el terreno.
T_s = Temperatura del suelo.
T_f = Temperatura del fluido de intercambio, generalmente agua glicolada.
Cap = Morfología y tipo del material captador.
R_s = Resistencia térmica del terreno (inversa de la conductividad térmica).

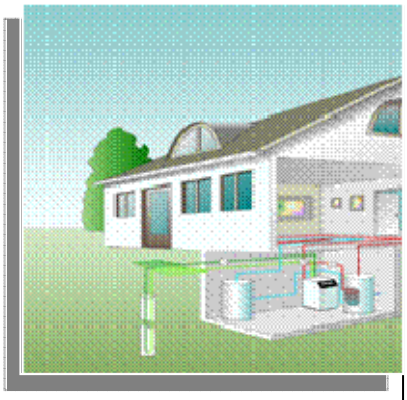
En cada caso, y para cada aplicación, puede ser más conveniente un tipo de tubos captadores que otro, de las muchas variedades que existen en el mercado, dependiendo el diseño final de las variables que se acaban de exponer.

Por último, el precio del sistema elegido de tubos captadores, será el que decida la opción más adecuada. Es interesante hacer constar que, en la mayoría de los casos, no será el precio unitario de los materiales o su cantidad lo que rentabilice un tipo de intercambio u otro. La sencillez de instalación sobre el terreno y la posibilidad de aprovechar otras obras para instalar la red de captadores, pueden ser los factores decisivos para la elección del sistema pues, en suma, estas últimas constituyen la partida más importante del presupuesto de la inversión económica del proyecto.

Vista la importancia que la elección del sistema de tubos captadores tiene para la rentabilidad de cualquier aprovechamiento de energía geotérmica, se expondrá cada caso con más detalle en apartados sucesivos.

4.3.1. Captadores horizontales enterrados

El objetivo fundamental de este tipo de captadores es proporcionar el foco frío para bombas de calor geotérmicas, cuya finalidad se reduzca a climatización de viviendas o locales con afluencia de público.



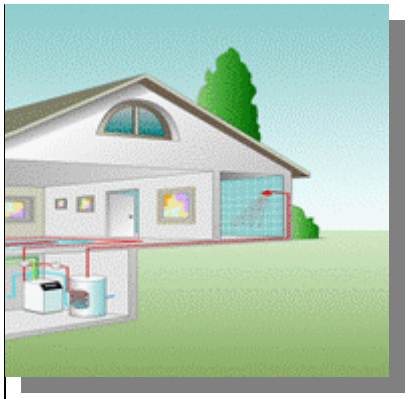
En función de su tamaño, precisarán una o varias bombas de calor geotérmicas, para lo cual se precisará una cantidad de tubos colectores variable, determinada por la Fórmula (3) del epígrafe anterior.

Quizás uno de los ejemplos más característicos y extendidos que aprovechan este tipo de instalaciones, sea el de servir de soporte para la climatización de viviendas unifamiliares. En la Foto 4.1 se puede apreciar el tendido de tubos captadores en un circuito (en algunos casos pueden ser varios) que converge en una toma única para alimentar el foco frío de una bomba de calor, destinada a la climatización de una vivienda unifamiliar.

Foto 4.1. Red de captadores horizontales y unión de tubos. (Fuente: *www.instalacionesalegre.com*).

En la misma foto puede apreciarse la escasa profundidad a la que se coloca la red de tubos captadores y la sencillez del sistema de tendido de la misma. Es evidente la serie de limitaciones que impone la instalación, pues requiere:

- La utilización de una superficie de terreno, como la que se aprecia en la Foto 4.1, con una sobrexcavación añadida.



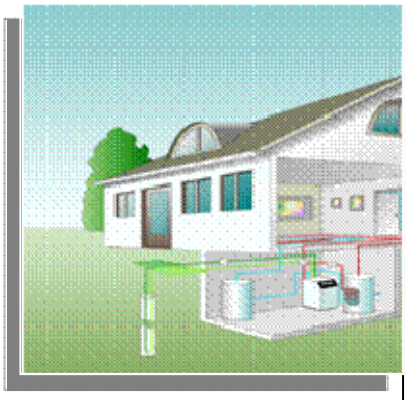
- Una restricción en el empleo de dicha superficie, pues no admitirá, una vez enterrada la red de captadores, ninguna planta de raíces profundas o con ramificaciones en profundidad.
- Supondrá una dificultad para cualquier servicio añadido posterior que deba atravesar el subsuelo (redes telefónicas, TV por cable, desagües, etc.).

Sin embargo, la serie de ventajas que supone son de gran interés para su aceptación como sistema de climatización. En efecto:

- Su coste es más bien bajo, pues el de una excavación como la que se aprecia en la citada Foto 4.1, no supondría ni el 15% de la inversión total, incluida en ella la bomba de calor.
- No precisa instalaciones exteriores al entorno de la finca.
- No requiere permisos ni autorizaciones especiales, aparte del permiso de obra.
- Es limpio y ecológico. En el movimiento de tierras originado, el volumen excavado se repone como relleno del hueco originado.
- El mantenimiento de la red de captadores es, prácticamente, nulo.

El proyecto puede convertirse en algo más ambicioso, pretendiendo alcanzar objetivos mayores. Un ejemplo puede verse en la Foto 4.2.

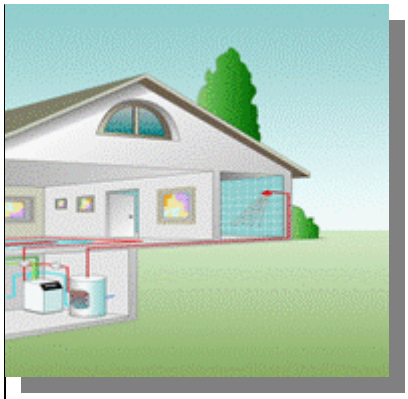
Foto 4.2. Excavación de grandes dimensiones y extendido de tubos captadores. (Fuente: *Aplicacions Geothérmiques. Geótics Innova. Seminario Energía, Edificación y Cambio Climático. Barcelona 2005*).



Para la climatización de una o varias viviendas unifamiliares adosadas, de gran proliferación en los tiempos actuales, se precisarían más bombas de calor o una de mayor potencia. Ello requeriría mayor cantidad de calor a intercambiar con el terreno, lo cual se traduciría en una mayor longitud de tubos captadores. Por otra parte, se habrá reducido la superficie utilizable de intercambio, pues las parcelas individuales se reducen en beneficio de una común de mayores dimensiones. Si en esta parcela común se incrementa la longitud de los tubos captadores, bien por la mayor superficie disponible, bien por un recorrido espiral de dichos captadores, o por el efecto combinado de ambos, se dispondrá de suficiente cantidad del binomio tiempo/superficie de intercambio para atender las necesidades de calor.

En la Foto 4.3 se aprecia una aplicación más compacta y de gran capacidad. Una vez determinadas las necesidades finales de suministro de frío/calor, y calculadas las bombas de calor geotérmicas, habrá que proceder a la instalación de la red de captadores necesarias para el intercambio de calor.

Foto 4.3. Tendido en espirales de tubos captadores horizontales. (Fuente: *Geothermal Heat Pump Consortium*).



Es evidente que se requerirá una mayor longitud de tubos captadores para suministrar el calor necesario. En la citada Foto 4.3 se muestra cómo una ramificación de zanjas albergará una red de tubos captadores que, con el recorrido necesario, cubrirán las necesidades del proyecto.

Una ventaja importante de acometer estas labores en la ejecución de un proyecto nuevo es que las excavaciones necesarias para el tendido de los tubos captadores se integran en el proyecto general de excavación de la obra (cimientos, desagües, acometidas de servicios, etc.), con un sobrecoste, prácticamente, nulo.

En el esquema de la Fig. 4.8 se observa la climatización de una piscina con una bomba de calor geotérmica, en la cual el foco frío lo constituyen una red de captadores horizontales. La realización de la obra, si se efectúa en conjunto, aprovechando para ejecutar la excavación del vaso de la piscina al tiempo que la del hueco para el tendido de los captadores, abaratará sensiblemente los costes. Lo que se ha considerado un lujo hasta el momento, empieza a entreabrir las puertas a una prestación social, como lo fue en su día la incorporación del refrigerador a la vida moderna.

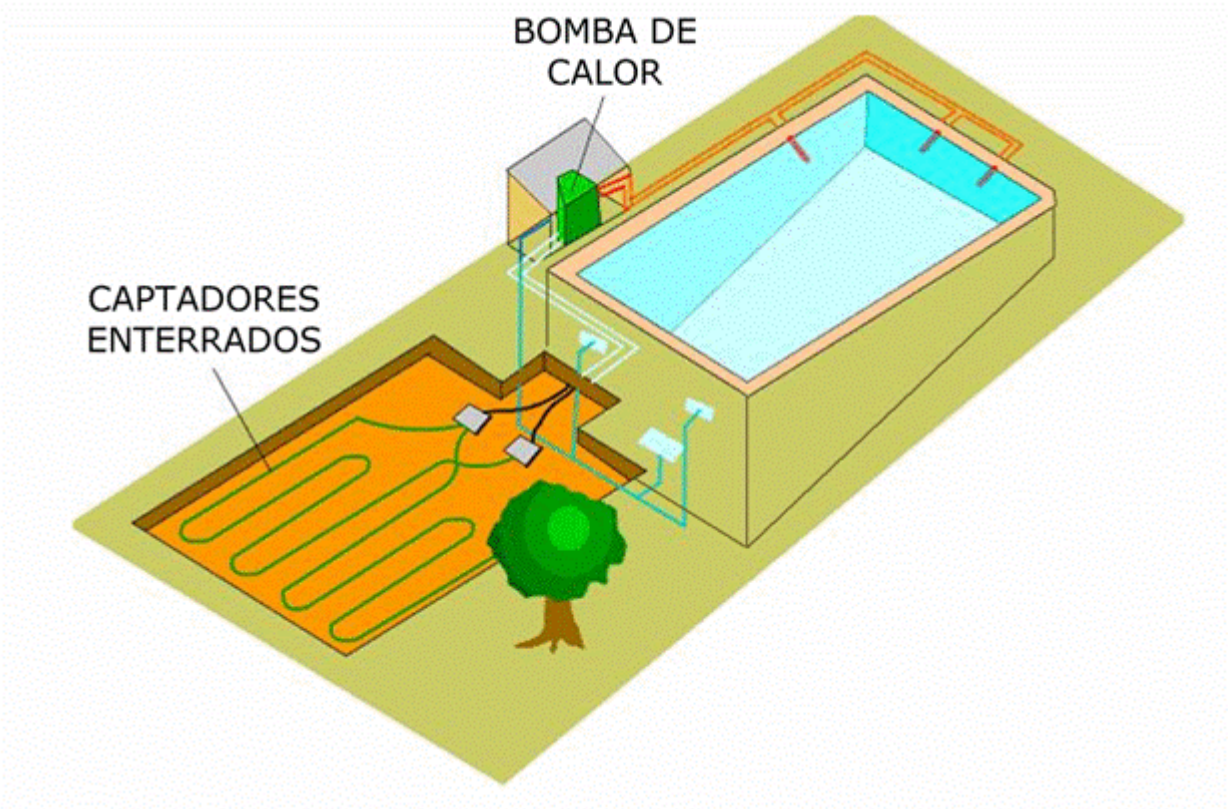
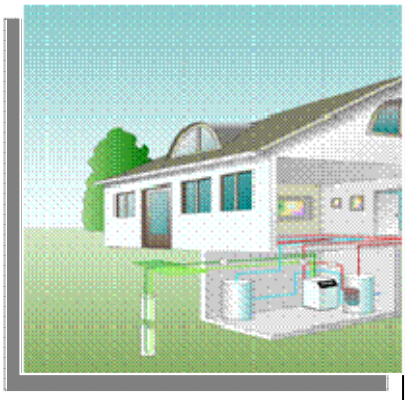


Figura 4.8. Esquema de climatización de una piscina con apoyo geotérmico. (Fuente: *www.ingelco.es*).



El tendido de los tubos captadores flexibles es sencillo y de coste reducido. Estos tubos de propileno, PVC o de polietileno de alta densidad están preparados para resistir las agresiones de los contaminantes (abonos, fugas, etc.) que la actividad humana genera y que, disueltos en las aguas someras de lluvia o riego, llegan a la red de captadores, debido a su exigua profundidad.

En cuanto al agua que circula por el interior de los tubos captadores, se trata de agua con anticongelantes o substancias que mejoren su conductividad, pero con la suficiente garantía de limpieza para evitar deposiciones o incrustaciones de materiales disueltos o en suspensión. Ello alarga la vida útil de los tubos y reduce el mantenimiento a cotas simbólicas.

4.3.2. Sondas geotérmicas

Pueden existir varias razones que desaconsejen la instalación de captadores horizontales como fuente de alimentación geotérmica de muy baja temperatura para una bomba de calor. Desde una imposibilidad de disponer de suficiente terreno para extender los captadores horizontales, pasando por la posible inexistencia de un suelo sobre el macizo rocoso, hasta la presencia de mejores condiciones de captación del terreno. En estos casos se opta por una instalación vertical.

Aprovechando la escasa o nula superficie que ocupa un sondeo, los tubos captadores pueden ser introducidos en uno de ellos, convirtiéndose en sistemas de captación vertical o, más comúnmente denominados, sondas geotérmicas. Como puede verse en la Foto 4.4, una máquina convencional de sondear puede realizar un sondeo en un reducido espacio, incluso a mínima distancia de una vivienda, creando un pozo en cuyo interior serán alojados los captadores verticales.

El entubado de los sondeos será necesario en los primeros metros de los mismos para garantizar su estabilidad, ya que se trata de la zona más alterada e inestable. Si se perfora en terrenos rocosos, bastará con entubar un par de metros a lo sumo.

Por el contrario, si se perfora en terrenos sueltos de poca consistencia, a la hora de realizar la perforación habrá que asegurar la estabilidad del sondeo para lo cual se trabajará con lodos de perforación que lo mantengan estable. Una vez finalizada ésta, se introducirán los tubos captadores dentro del sondeo. Es fundamental utilizar tubos diseña-

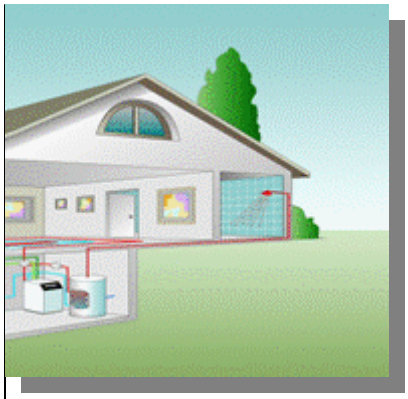
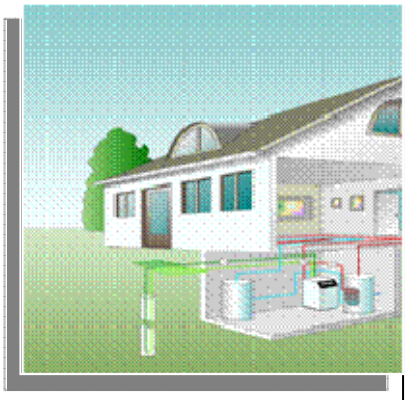


Foto 4.4. Perforación para sonda geotérmica al lado de una edificación. (Fuente: *Girod Geotermia*).

dos y homologados destinados específicamente a la geotermia ya que, de esta manera, se garantizan unas características físicas y mecánicas que confirman un perfecto y seguro funcionamiento del sistema y un elevado grado de intercambio térmico, incluso ante la eventualidad de que el sondeo se derrumbe.

En cualquier caso, el sondeo ha de ser rellenado con algún material que permita una fluida transmisión de calor a los tubos captadores que están en su interior y una circulación del agua que hubiera en el terreno, bien por la existencia de algún nivel freático a poca profundidad, bien por la presencia de aguas someras procedentes de filtraciones pluviométricas, como se indica en el esquema de la Fig. 4.9. Es conveniente que los tubos sean introducidos ya rellenos del agua glicolada con una presión tal que contrarreste la presión existente en el fondo del sondeo.

Como se vio en las Tablas 3.2 y 3.3, la presencia de agua embebiendo a la mayor parte de los materiales aumenta notablemente la capacidad de transmitir calor geotérmico, incrementando el rendimien-



to de la bomba de calor. Por ello, en el caso de que no haya presencia de agua en el sondeo, un relleno de gravas o arenas permeables es lo más aconsejable para incrementar la conductividad térmica. Un relleno de hormigón con bentonita (arcilla blanca de gran conductividad térmica) o algún material de similares características también puede ser empleado.

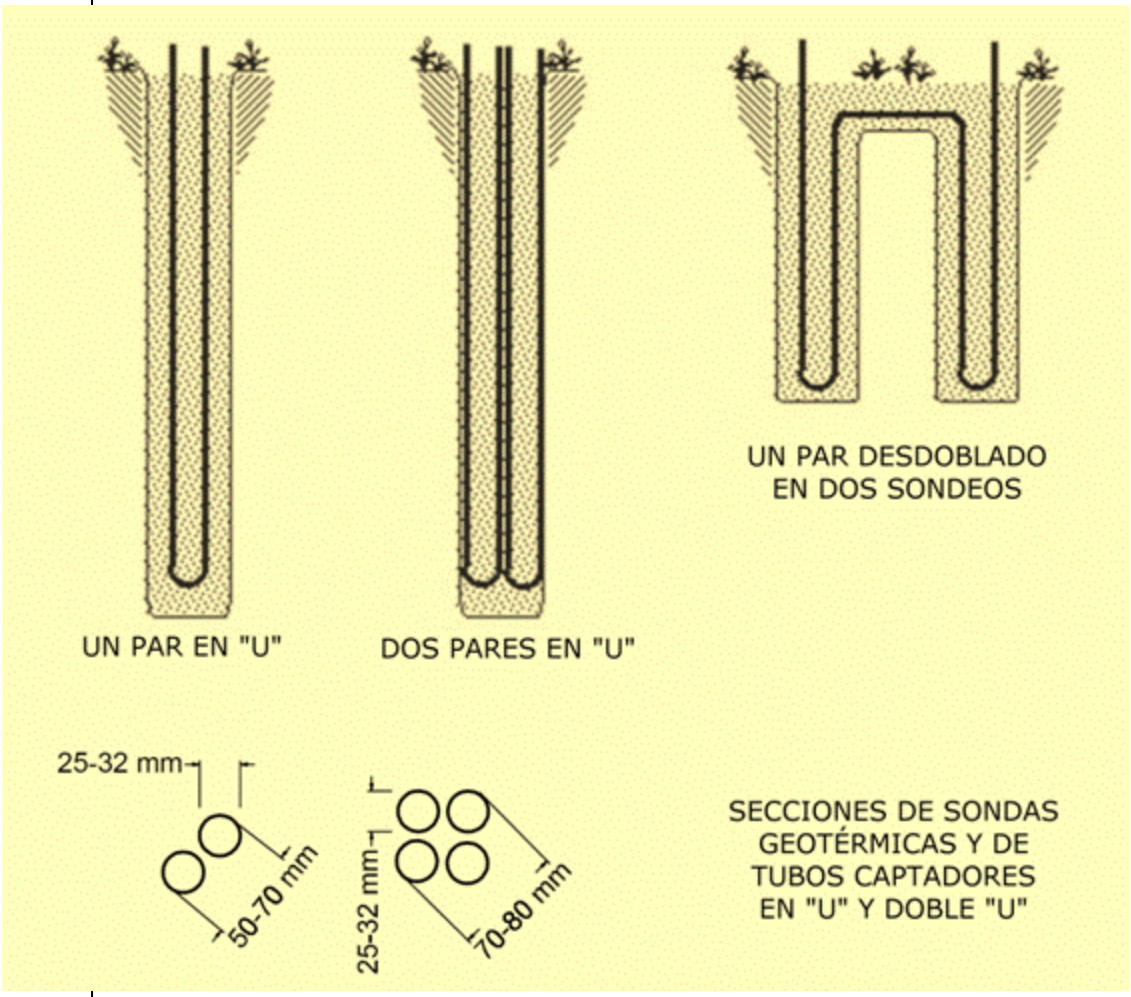
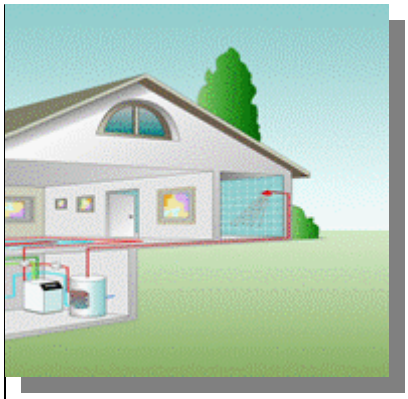


Figura 4.9. Diversos tipos de instalación de tubos captadores verticales en sondas geotérmicas. (Fuente: *Geothermal Aplications. Climate Master. 2006*).

En la Fig. 4.9 se puede apreciar cómo los tubos captadores pueden ocupar el interior del sondeo, formando pares de tubos en “U”, cuyas salidas se conectan al circuito primario de las bombas de calor geotérmicas. También es interesante resaltar las dimensiones y espaciado de los tubos captadores, con lo que un sondeo de un diámetro de 15 mm, puede albergar hasta 4 pares de tubos en “U”. Un detalle de una salida de este tipo aparece en la Foto 4.5, donde se pueden ver las salidas de los tubos en “U” hacia las válvulas que regulan la circulación del líquido que transporta el calor geotérmico.



El dimensionamiento de la red de tubos captadores verticales en sondas geotérmicas se realiza del mismo modo que en el caso anterior de captadores horizontales enterrados. La misma fórmula conduce a determinar la longitud adecuada de tubos captadores. En este caso, se puede aumentar la superficie de terreno a excavar para introducir más tubos captadores. Sin embargo, se puede aumentar el número de pozos, o aumentar los pares de tubos en "U", bien dándoles un mayor recorrido a lo largo de varias sondas geotérmicas, bien aumentando el número de ellos por cada sonda.

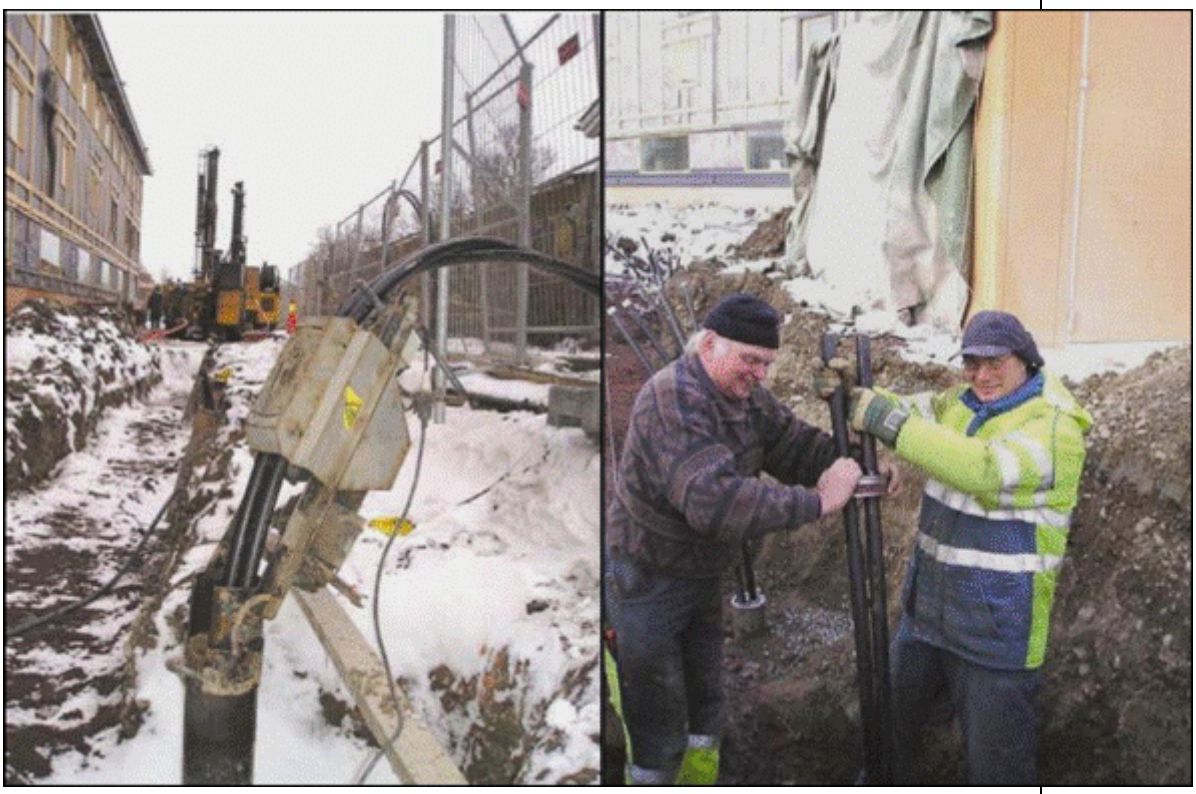
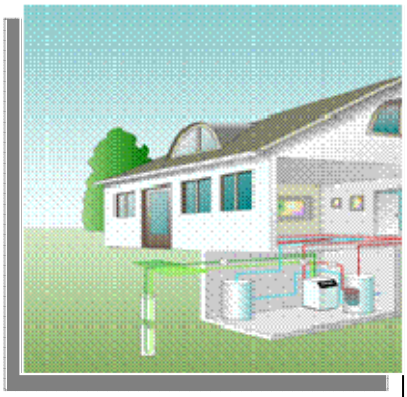


Foto 4.5. Salidas de tubos captadores desde sondas geotérmicas y montaje de una tapa. (Fuente: *Solar Energy Efficiency Contactor*).

Como se ha mencionado anteriormente, varias son las circunstancias que aconsejan la instalación de sondas geotérmicas. A modo de ejemplo es interesante citar que Suiza es el país con más sondas geotérmicas por kW_t instalado, superando con creces otros tipos de intercambiadores de calor. En este caso, dos factores concurren para que las sondas geotérmicas proliferen:

- Poca disponibilidad de terreno para enterrar gran cantidad de captadores horizontales y un precio muy alto del terreno.
- Existencia de aguas freáticas bastante superficiales en los profundos valles entre las cumbres de los Alpes y en las planicies pre-alpinas.



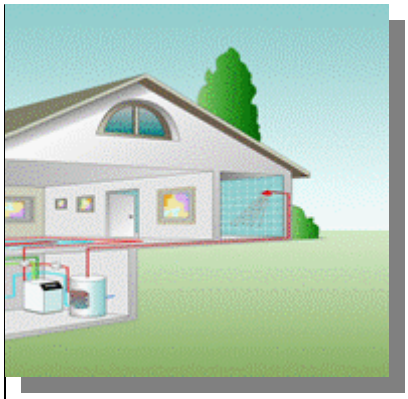
En la Foto 4.6 se observa la sala de calderas de una vivienda con la conexión de los tubos captadores a la instalación de la bomba de calor, y la salida de los tubos de cobre a la distribución.

Foto 4.6. Conexión de tubos captadores a bomba de calor geotérmica en la sala de calderas de una vivienda. Salida de tuberías de cobre a aparatos distribuidores. (Fuente: *Girod Geotermia*).

Las sondas geotérmicas son, por lo general, más caras que los captadores horizontales enterrados a poca profundidad debido a su mayor coste de ejecución. Sin embargo, presentan mejores niveles de conductividad térmica, por lo que la longitud del tubo captador es menor en la sondas geotérmicas que en los captadores horizontales para igualdad de necesidades energéticas. Así mismo, los rendimientos para refrigeración son muy superiores en las sondas geotérmicas.

4.3.3. Campos de sondas geotérmicas

En estudios realizados en la Universidad Politécnica de Lausana (Suiza) en 1997, bajo mandato de la "*Office Fédéral de l'Énergie*" por Fro-



mentin, A. et al., se aportan datos experimentales sobre las necesidades de perforación de sondas geotérmicas, que indican que 2 m² de superficie de piso pueden precisar 1 metro de sonda geotérmica o, con mayor interés para el dimensionamiento de la longitud de captadores:

- Calefacción: 25-40 W/m o bien 60-80 kWh/m/año.
- Refrigeración: 30 W/m promedio o bien 50-60 kWh/m/año.

Estos datos, tomados en mediciones realizadas en pilotes geotérmicos para cimentaciones, permiten calcular la longitud de sondas geotérmicas para unas necesidades concretas de calefacción o refrigeración. Si estas necesidades fuesen tales que originasen una longitud excesiva para una sola sonda geotérmica y hubiese que realizar un número elevado de ellas, se llegaría a formar lo que se denomina un campo de sondas geotérmicas. La Fig. 4.10 ilustra un esquema en el que puede verse un ejemplo de un campo de sondas geotérmicas.

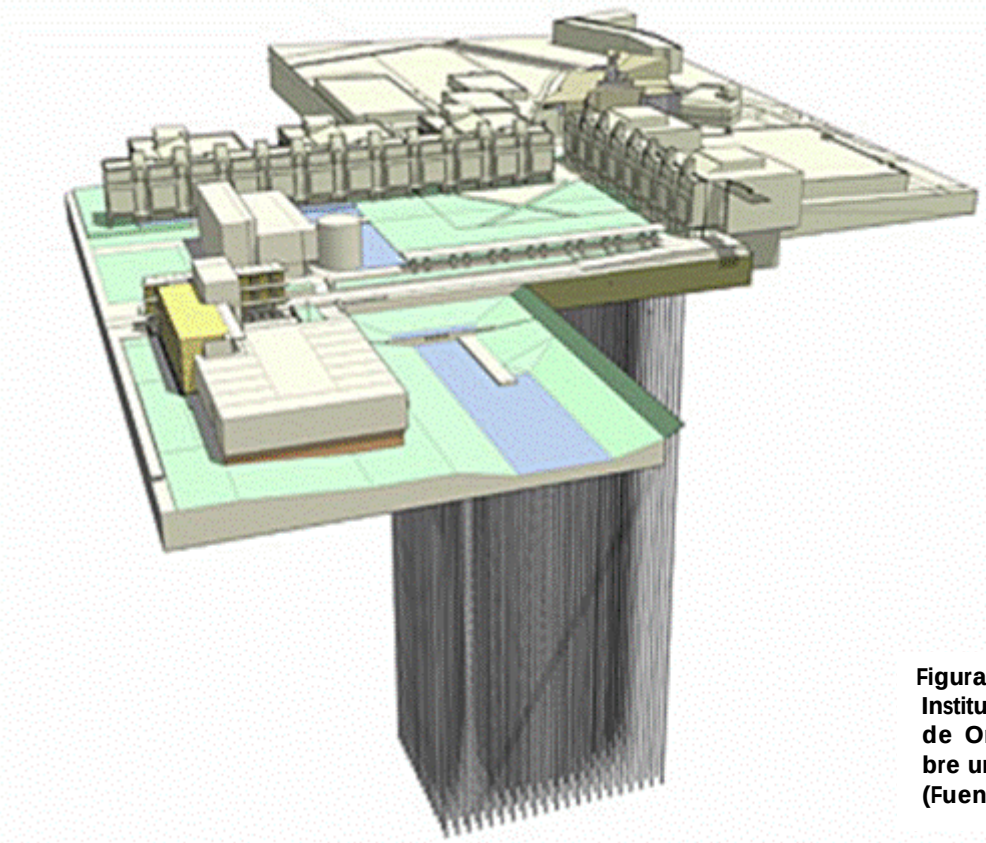
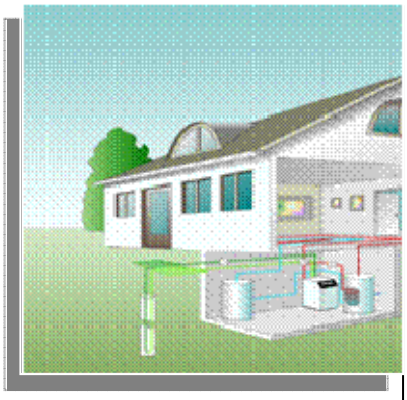


Figura 4.10. Esquema del proyecto del Instituto Tecnológico de la Universidad de Ontario en Oshawa (Canadá) sobre un campo de sondas geotérmicas (Fuente: @*Geoexchange*).

En la citada figura puede observarse la densidad del campo de sondas geotérmicas como base para la climatización de un centro comercial, industrial o público, que precisará asimismo de un número suficiente de bombas de calor geotérmico, cuyo foco frío será el campo de sondas.



Son evidentes las dificultades que presentaría su ejecución si no se realizasen los sondeos antes de la edificación del complejo, aprovechando la maquinaria de excavación para reducir el coste de perforación, al reducir la cota del nivel del terreno base. Desde ahí, la perforación supondrá un coste menor que desde la superficie original, además de la facilidad de integrar los sistemas de canalización y regulación del fluido que llega de los tubos captadores, en los sótanos o infraestructuras de servicios del edificio o complejo.

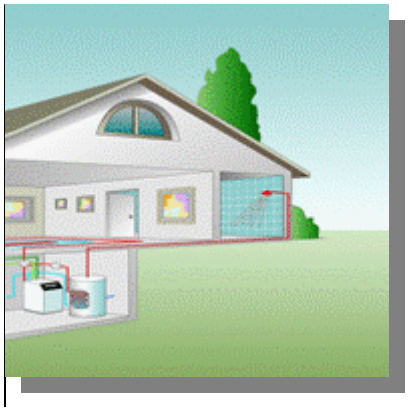
Estos campos de sondas geotérmicas constituyen una base excelente para lo que se denomina almacenamiento de calor, que se verá con más detalle más adelante. Baste aquí decir que un número elevado de sondas permite la utilización de una fracción del campo en verano y de otra en invierno, con la mejora de rendimientos de las bombas de calor geotérmico en cada caso.

4.3.4. Cimentaciones geotérmicas. Pantallas de sostenimiento

Esta aplicación puede considerarse como un caso particular de lo expuesto en el apartado anterior. En realidad, se trata de convertir la estructura resistente de cimentación a base de pilotes de un edificio, en un campo de sondas geotérmicas, en las cuales el propio pilote de la cimentación actúa como una de las citadas sondas. Todo el circuito de intercambio se situaría debajo del propio edificio, con un considerable ahorro de trabajo y espacio, por el simple hecho de incluir el proyecto de climatización en el proyecto de construcción, desarrollando ambos en conjunto.

Aún en los casos más desfavorables del terreno, como en el caso de la Europa Central, con inviernos muy fríos, la temperatura del suelo entre 10 y 20 metros de profundidad es bastante estable, en torno a 12-14 ºC. Bastaría con excavar a esa profundidad para tener una garantía de temperatura estable, alejada de fenómenos de climatología o estacionalidad, que constituye la base de aplicación de las sondas geotérmicas.

Pero esa excavación ya tiene lugar en la mayor parte de los edificios de capacidad superior a la vivienda unifamiliar característica, como bloques de viviendas, edificios administrativos o simples bloques industriales o de oficinas privadas. Su construcción requiere una cimentación, incluso una sobreexcavación para la construcción de aparca-



mientos para vehículos, que sobrepasarían las profundidades mencionadas para garantizar una temperatura estable. Puede verse un esquema de lo que constituiría una cimentación con pilotes utilizados como intercambiadores de calor en la Fig. 4.11.

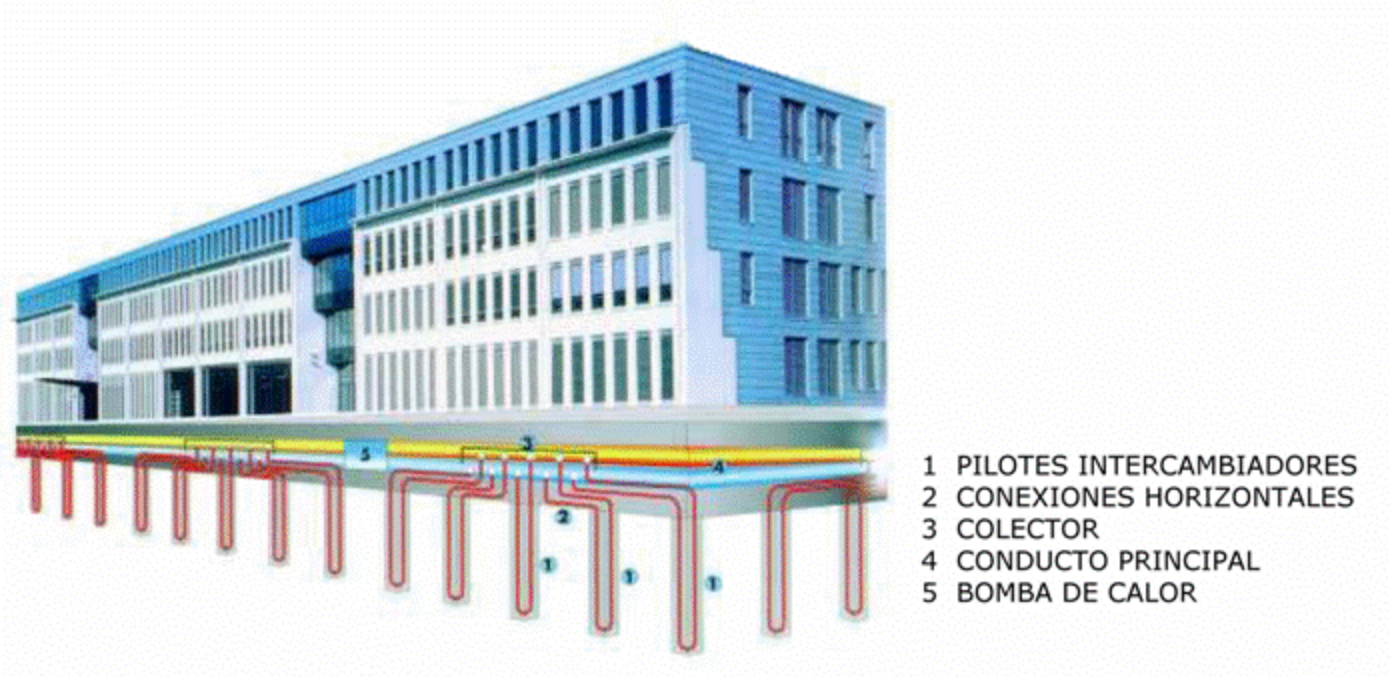
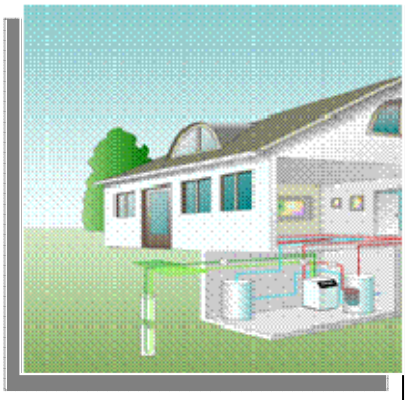


Figura 4.11. Esquema de edificio con pilotes intercambiadores de calor. (Fuente: *Geothermal energy and heat storage. Pahud, D. 2002*).

La cimentación, del tipo que sea, incluye unas obras de fábrica que forman la sustentación del edificio en cuestión y que se realizan, casi de forma exclusiva, en hormigón armado y masivo. El aprovechamiento geotérmico de los terrenos excavados consiste en dotar a los sistemas de cimentación de una red de intercambiadores, como los que se muestran en la Foto 4.7, en los que se aprecian las tuberías de intercambio sujetas a las armaduras por su parte interior.

Los tubos captadores siguen siendo del tipo de propileno, PVC o de polietileno de alta densidad (algunos autores citan tubos captadores de cobre), y se conforman como tubos en “U”. En cada pilote pueden alojarse varios pares de tubos independientes, sujetos a la armadura metálica de dicho pilote y que convergen en superficie como un mazo de tubos coincidentes en una misma llave reguladora.

Una vez realizada la excavación, se inserta la armadura del cimiento o pilote, sobre la que va sustentada la red de tuberías captadoras; a continuación, bien de forma maciza, bien con el centro hueco, se re-

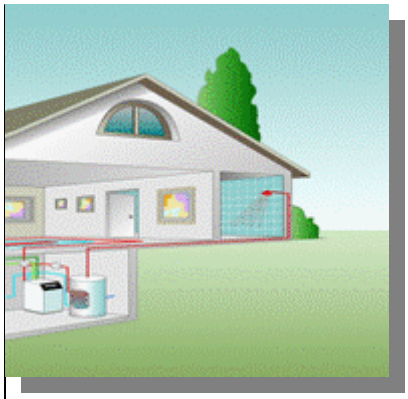


llenaría el pilote con hormigón, quedando la red de intercambiadores embebida en el seno de la fundación resistente del edificio. Es evidente la necesidad de un perfecto cálculo de la sección resistente, que en ningún caso recaería sobre los tubos captadores, pudiendo dar lugar, en algunos casos, a un cierto sobredimensionamiento adicional de sección para cumplir los requisitos necesarios de resistencia del pilote o cimiento.

Foto 4.7. Armadura de pilote con captadores antes y después de su colocación. (Fuente: *www.enercret.com*).

Esta red de tubos intercambiadores, formada por conductos en "U" embutidos en los cimientos, y que confluyen en un colector común, sería la alimentación a una bomba de calor geotérmica y conformarían la dotación de climatización e, incluso, de agua caliente sanitaria del edificio. En función del tamaño del mismo, una o varias bombas de calor atenderían a las necesidades del edificio en cuestión, concentrando en el piso más inferior, o en las propias paredes del mismo, todos los accesorios necesarios, como válvulas, distribuidores por plantas, separación del ACS y la climatización, etc.

En la Foto 4.8 pueden observarse los tubos captadores que sobresalen del suelo una vez realizada la instalación de los pilotes ya hormigona-

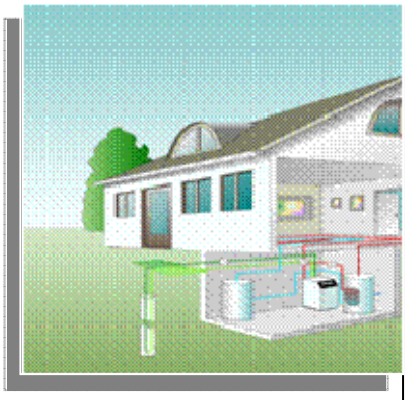


dos, y una sala subterránea donde confluyen dichos tubos, así como la salida de las tuberías de distribución a los servicios del edificio, cuya vista general se muestra y que corresponde al *Strabag Headquarters*, en Viena. Este edificio dispone de una capacidad de calefacción de 1.680 kW y de una capacidad de refrigeración de 2.026 kW, con unos consumos anuales de 840 MWh de calefacción y 1.450 MWh de refrigeración.

Foto 4.8. Edificio Strabag Headquarters en Viena (Austria). Fases de construcción y aspecto final. (Fuente: *www.enercret.com*).

Otro ejemplo que presenta caracteres novedosos, pero que debe llamar la atención de un futuro inmediato en grandes ciudades, es el que se puede apreciar en la Fig. 4.12 y que muestra una sección del falso túnel del ferrocarril subterráneo Wiener Linien GmbH en Viena.

En estas líneas de ferrocarril o trenes ligeros suburbanos, que circulan bajo las grandes ciudades, las estructuras de sostenimiento lateral o de bóveda están realizadas en hormigón armado con pantallas metálicas. Como, además, para evitar interferencias con cimentaciones de edificios o galerías de servicios, deben circular a una profundidad



que oscila entre 15 y 40-50 metros, con profundidades puntuales de hasta 100 metros, sus elementos resistentes y obras de fábrica subterráneas son estructuras ideales para dotarlas de tubos captadores embutidos en ellas y que alimenten a bombas de calor geotérmicas, con las aplicaciones descritas más arriba.

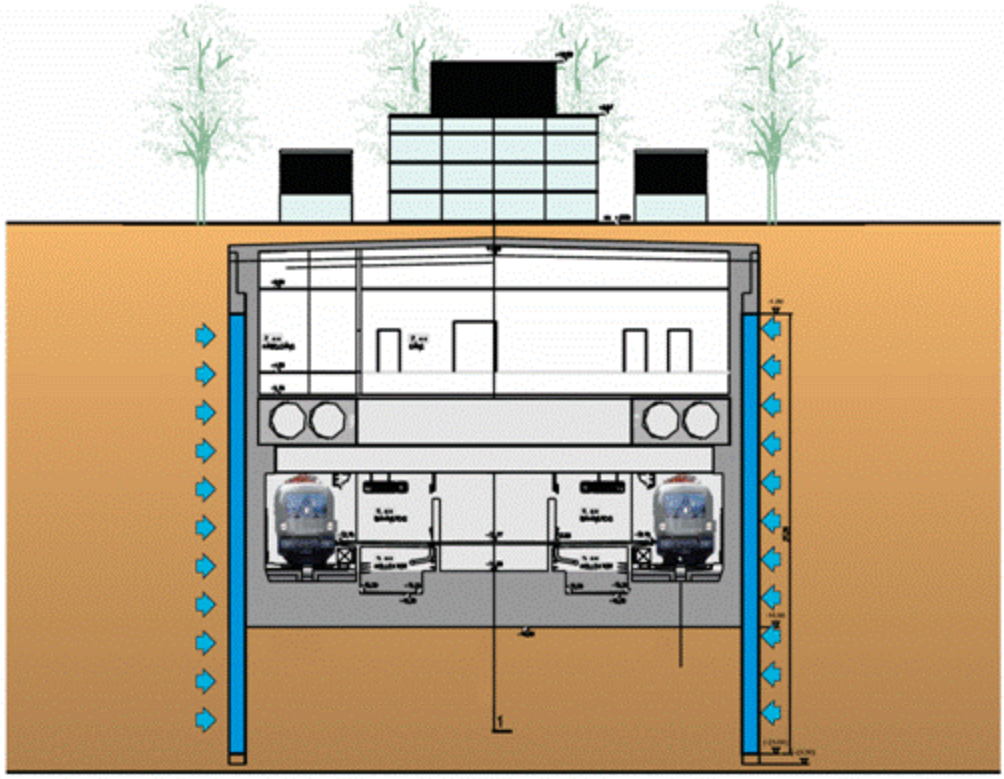
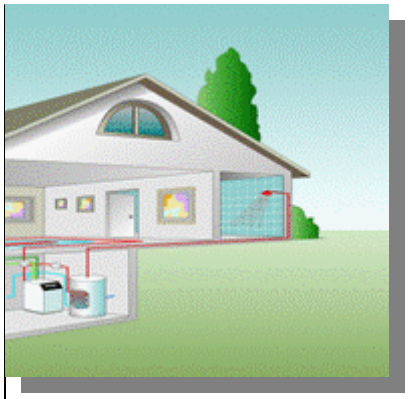


Figura 4.12. Pantallas geotérmicas en la estación U2/3 Praterstern del ferrocarril subterráneo de Viena (Austria). (Fuente: *www.enercret.com*).

Este caso, con grandes posibilidades de superficie intercambiadora y una profundidad adecuada, puede servir para la climatización de las propias estaciones del ferrocarril o, incluso, a la de grandes edificios en zonas próximas. Es una aplicación de muy bajo coste, pues la inclusión de los tubos captadores se realiza durante la ejecución de la obra, de la cual constituye una sobreinversión mínima.

El único inconveniente reseñable es que cualquier daño que sufra un tubo captador no presenta fácil reparación, por no calificarla de imposible, pues no es posible acceder a dicho tubo una vez colocado y hormigonado el pilote o la pantalla resistente. La solución es sobredimensionar el número de pares de tubos captadores, de forma que si alguno debe ser inutilizado, siempre se cuente con el número mínimo calculado para cubrir las necesidades de aportación de calor a las bombas geotérmicas. El tubo captador quedaría fuera de uso, aun-



que permanecería "*sine die*" embutido en la estructura resistente del sostenimiento.

Este sistema de aplicación de la energía geotérmica de muy baja temperatura ha tenido su mayor desarrollo en los últimos 15 años, sobre todo en Suiza, Austria y algo menos en Alemania. En el caso suizo es frecuente que las cimentaciones geotérmicas busquen el nivel freático más superficial, aprovechando que en este país se encuentra a muy poca profundidad. Aunque suponga una pequeña sobreexcavación para colocar el pilote, la circulación del agua freática sirve para mantener la temperatura del foco frío y evitar el posible agotamiento del recurso.

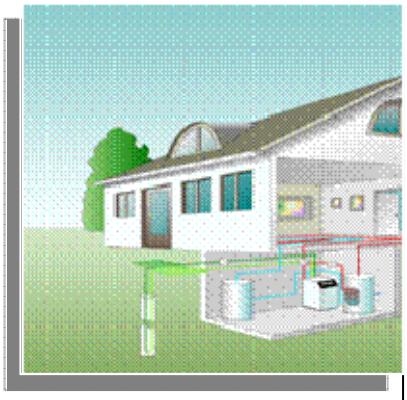
4.3.5. Aprovechamiento de aguas en túneles

El ejemplo de climatización de la estación de ferrocarril en el subterráneo de Viena corresponde a lo que, en perforación de túneles, se conoce como "falso túnel", pues se ha realizado despejando el terreno hasta la superficie, construyendo la infraestructura necesaria y rellenando de tierras el hueco sobre la bóveda de dicho túnel.

Pero las grandes obras de tunelación, que atraviesan grandes macizos rocosos, drenan las aguas subterráneas que encuentran a su paso, al objeto de estabilizar la estructura de las paredes del túnel y mantener saneado el interior de la obra. Estas aguas son canalizadas al exterior y vertidas a las redes hidrográficas de superficie más próximas. Pero, en función del espesor del macizo rocoso que recubre el túnel y del gradiente geotérmico de los terrenos atravesados, esas aguas subterráneas pueden constituir un potencial geotérmico importante, alcanzando, en grandes túneles de Suiza, temperaturas de hasta 30 ºC.

En este país y en los adyacentes que comparten la cadena de los Alpes, existen hoy día más de 1.000 túneles ferroviarios y de carretera. Al realizar las labores de investigación geológica y geotécnica, está prácticamente asegurada la investigación geotérmica, sin sobrecoste alguno, lo cual permite adelantar la capacidad del recurso potencial y realizar las obras de captación de las aguas subterráneas y de su conducción, al tiempo que se realiza la construcción de la infraestructura resistente del túnel.

La Foto 4.9 muestra la galería habilitada en el interior del túnel de Got-

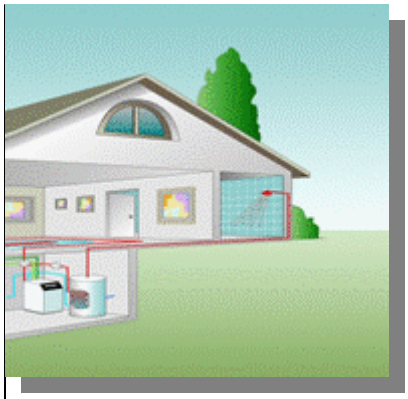


hard AG, realizada al tiempo que la obra general de dicho túnel y que sirve para alojar la sala de confluencia de las aguas drenadas y su regulación de salida al exterior.

Foto 4.9. Galería con decantador y depósito para el agua subterránea drenada por el túnel de Gothard (Suiza). (Fuente: *Site Geothermie-Perspectives de l'ADEME et du BRGM*).

Entre los más famosos túneles funcionando en la actualidad con un aprovechamiento geotérmico real se pueden citar los de Furka, Valais, el túnel ferroviario de Ricken, St Gall y el de carretera de St Gothard, en el Tessin. En este último, en la salida sur de Airolo, el centro de mantenimiento del túnel está climatizado por geotermia, aprovechando el caudal de 6.700 l/min a 17 ºC de sus aguas subterráneas. Una bomba de calor con una gran superficie de evaporadores de placas sumergidas, enfrían el agua 2,3 ºC y proporcionan una potencia térmica total de 1.800 kW_t. Cálculos actualizados han demostrado que, modernizando la instalación, sería posible enfriar con más eficacia la fuente de calor y ganar 4.000 kW_t suplementarios.

Las aguas del túnel de Furka, aunadas en una sola tubería a la salida de dicho túnel y transportadas por gravedad hasta la ciudad de Oberwald, son capaces de climatizar 177 apartamentos y un centro deportivo. Los 5.400 l/min de su caudal, a 16 ºC, son distribuidos a las diversas bombas de calor que atienden a cada sector. La potencia instalada en la actualidad alcanza los 960 kW.



Un caso particular de esta prometedora forma de utilizar el calor geotérmico lo constituyen las antiguas explotaciones mineras subterráneas. Sus galerías abandonadas, túneles al fin y al cabo, proporcionan una fuente de aguas subterráneas, con un potencial geotérmico nada despreciable.

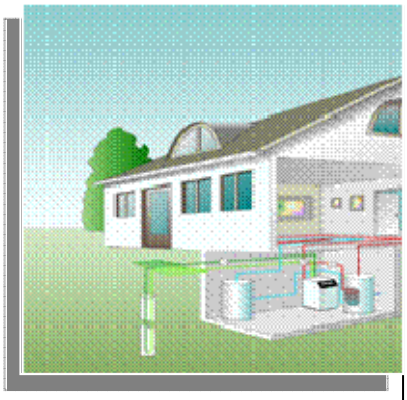
Es interesante el proyecto que, en la cuenca central de carbón de la minería asturiana, se centra en el denominado Proyecto Barredo. En dicho proyecto, concentrando en un solo caudal las aguas de los pozos cerrados o en vías de cierre de Figaredo, Santa Bárbara y San José, drenadas a través del Pozo Barredo, se prevé un caudal próximo a los 10 hm^3/año, a una temperatura de unos 20 ºC. En estas condiciones, con tan propicias temperaturas del foco frío, los rendimientos de las bombas geotérmicas alcanzarían valores próximos de COP = 5. Las previsiones son de un consumo eléctrico de 6,11 MW_e, que generarían una potencia térmica de calefacción de 30,54 MW_t.

4.3.6. Pozos canadienses o provenzales

Otra aplicación de la inercia térmica del terreno es la refrigeración de las viejas casas solariegas de la región francesa de la Provenza, en las que se hacía circular el aire ambiente de la época estival por unos conductos subterráneos (pozos provenzales), que discurrían enterrados bajo la edificación. El aire rebajaba su temperatura al circular por un medio más frío que el exterior y llegaba al interior de la vivienda a una temperatura menor que la del exterior.

En Canadá se utiliza el mismo sistema, pero con efecto de calefacción en la época invernal. En este caso, el aire llega al interior a mayor temperatura que la del ambiente exterior, calentado al circular por tuberías enterradas en el terreno. Por este motivo, son conocidos también como pozos canadienses.

Hoy día existen varias aplicaciones de tamaño suficientemente grande como para tener importancia práctica, aunque no se ha extendido demasiado. En la Fig. 4.13 se muestra un esquema del edificio industrial y administrativo Schwerzenbacherhof, cercano a la ciudad Suiza de Zürich. Este edificio, que tiene un sistema de calefacción basado en 8.050 m^2 de planchas calefactoras, solamente utiliza el aire proveniente del pozo canadiense cuando la temperatura exterior desciende por debajo de los 7 ºC, pues a temperaturas superiores no mejora el rendimiento frente a una toma directa del exterior.



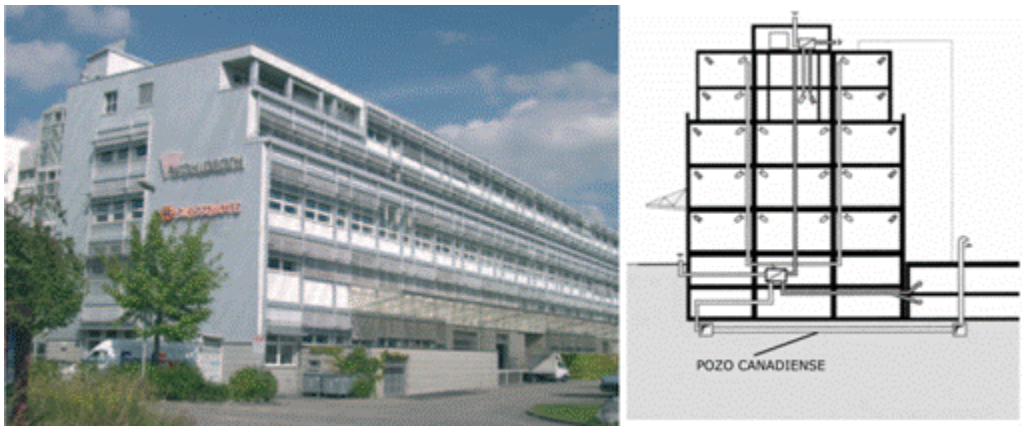


Figura 4.13. Edificio Schwerzenbacherhof cerca de Zurich (Suiza). Corte del inmueble e implantación de un pozo canadiense. (Fuente: *Infos-Géothermie nº 10. Suisse énergie. 2005*).

En cambio, se utiliza durante las horas de oficina para refrigeración cuando la temperatura exterior excede de los 22 ºC, con un flujo de 17.100 m^3/h. Unido a una ventilación nocturna con toma directa del exterior, el pozo canadiense llega a mantener el edificio, en los períodos de canícula, a una temperatura media confortable, de 24,7 ºC. La temperatura del aire interior no sobrepasa los 26 ºC más que durante un 15 % de las horas, pero nunca sobrepasa el umbral de tolerancia de los 28 ºC.

La renovación forzada de aire en construcciones con fuerte exposición al ambiente exterior se verá sometida a la temperatura de dicho ambiente en cada estación. Aprovechando esa temperatura prácticamente estable del subsuelo (entre 10 y 14 ºC, según la región), hacer circular el aire por un pozo canadiense mejorará sensiblemente esa temperatura y, aunque no consiga la temperatura adecuada de refrigeración (o calefacción), siempre mejorará el rendimiento al partir de una temperatura más próxima a la de demanda. En la Foto 4.10 se puede observar parte del trazado de una tubería doble utilizada como pozo canadiense.

Vuelve aquí a tener importancia el binomio tiempo/superficie de contacto para calcular la energía geotérmica que se podrá recuperar del subsuelo. Las tuberías que pueden observarse en esa foto muestran un pozo canadiense de grandes dimensiones, con 700 metros de tuberías enterradas, en el Grand Dijon. Con la gran superficie de las tuberías enterradas, y dotando al aire de una velocidad de circulación suficientemente baja, se logra un aprovechamiento exhaustivo de la energía geotérmica de baja temperatura.

Otra posible aplicación de este tipo de conducciones de aire puede

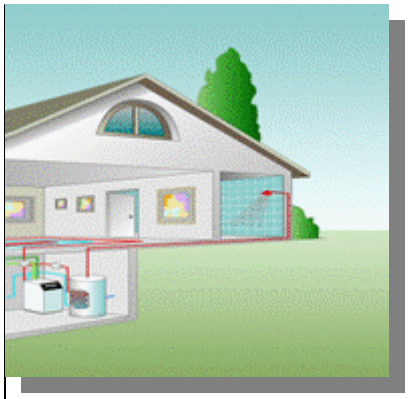


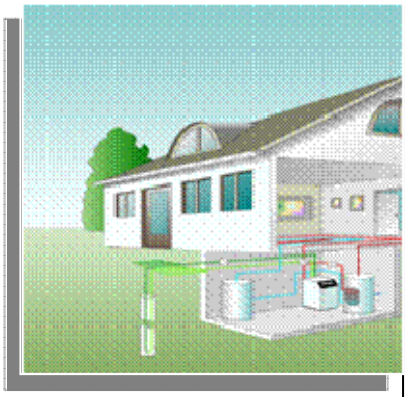
Foto 4.10. Conducciones de 700 m de longitud utilizadas como pozo canadiense en Dijon. Francia. (Fuente: *Site Geothermie-Perspectives de l'ADEME et du BRGM*).

provenir de los túneles en explotación, fundamentalmente de los de carretera, aprovechando el calor de los gases de escape de la combustión de los vehículos, que elevan la temperatura del aire circulante en el interior del túnel. Al requerirse circulación forzada de gases para garantizar su respirabilidad en límites idóneos, dichos gases son aspirados y obligados a circular por tuberías, creando una depresión en el túnel, que se rellena con aire del exterior.

Estos gases calientes pueden utilizarse directamente en la ventilación climatizada de algunos edificios, aunque ello implicaría una depuración drástica de los citados gases. Pero, si se hacen circular por un circuito intercambiador de calor, atravesando un entramado de tubos captadores, con el líquido que circule por ellos se podrán alimentar bombas de calor geotérmicas con un foco frío a temperatura algo superior, mejorando por lo tanto su rendimiento. En cualquier caso es una utilización de la energía geotérmica que aún no está demasiado extendida y de la que no constan datos sobre su implantación en los sistemas de recuperación del calor.

4.3.7. Sondeos geotérmicos

Como se ha indicado en epígrafes anteriores, dado el gradiente geotérmico medio del subsuelo de 3 ºC/100 m, a 500 metros de profundi-



dad se tendría una temperatura muy próxima a los 30 ºC, con lo cual se podría considerar todavía entre los recursos geotérmicos de muy baja temperatura, según la clasificación por intervalos de temperatura que se ha venido manejando.

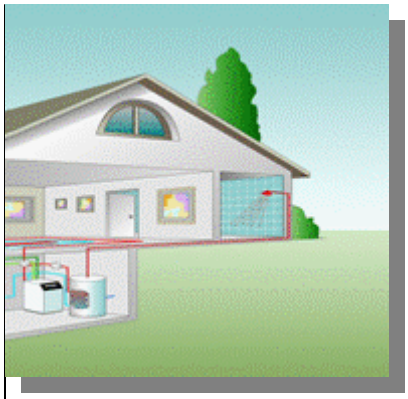
Aunque se podría, en este momento, exponer una serie de aplicaciones posibles de este tipo de explotación similares a las enunciadas en los apartados anteriores, el modo de acceder al recurso geotérmico y las formas de intercambio de calor con el subsuelo permiten englobar su tratamiento dentro de los de baja, media y alta temperatura, y serán comentados en el capítulo siguiente.

4.3.8. Sistemas de almacenamiento del calor geotérmico

En las aplicaciones expuestas hasta aquí, dependientes de una o varias bombas de calor geotérmicas, se ha desarrollado la idea de que cuanto mayor sea la temperatura del foco frío (captación geotérmica) en funcionamiento invernal, mejores serán los rendimientos de dichas bombas y, por lo tanto, al aumentar el COP, mayor ahorro de aportación de energía eléctrica exterior. En funcionamiento estival, para refrigerar los mismos ambientes, sucederá todo lo contrario.

Por otra parte, como se ha expuesto también, en los sistemas de calefacción de instalaciones o viviendas en invierno, la bomba de calor devuelve agua más fría que la captada. Por el contrario, en verano, cuando la bomba actúa como enfriadora de los ambientes citados, el agua que se devuelve al medio geotérmico es de mayor temperatura que la captada. Si fuese posible mantener el calor del foco frío que se devuelve en verano para aprovecharlo en invierno y viceversa, se habría conseguido una importante mejora de los rendimientos de las bombas de calor geotérmicas y, por lo tanto, del ahorro de energía eléctrica y, la consecuencia más importante, de los costes de explotación de la instalación.

En la Fig. 4.14 se puede apreciar una estructura de sondas verticales en la que los captadores centrales recogen el retorno de agua más caliente (funcionamiento en verano) que los de la periferia y transmiten el calor al terreno, convirtiéndolo en un foco de captación para el invierno. En el funcionamiento de invierno, la captación se recoge de esta zona de terreno calentado en verano, devolviendo un agua más fría a los captadores exteriores, que enfrían el terreno y lo convierten



en el foco adecuado de captación para el siguiente verano, repitiéndose el ciclo anualmente.

Este esquema corresponde al Centre D4, próximo a Lucerna, compuesto por dos edificios, climatizados por el mayor sistema de almacenamiento subterráneo de calor y frío de Suiza. En él se aprecia cómo unas placas solares refuerzan la producción de calor para alimentar las bombas geotérmicas y la producción de agua caliente sanitaria.

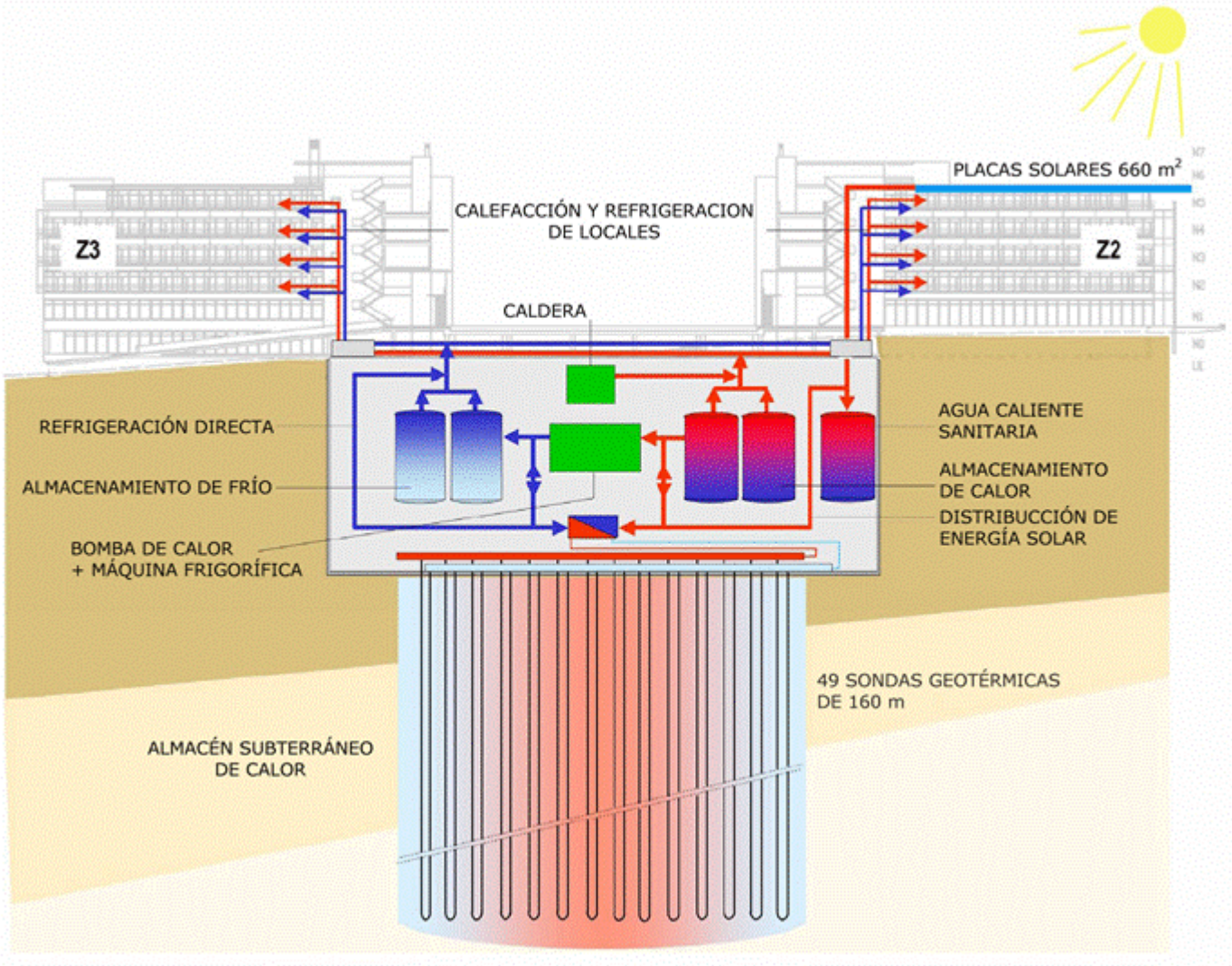
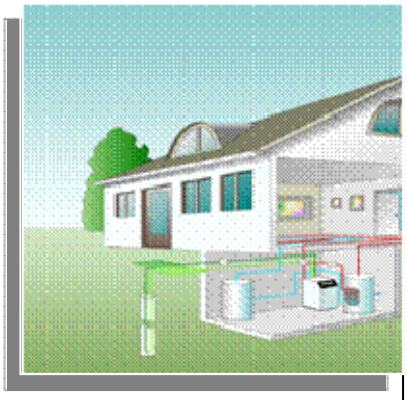


Figura 4.14. Esquema del mayor centro de almacenamiento de calor subterráneo de Suiza. Centre D4 en Root. (Fuente: *La géothermie. Une technologie efficace. Suisse énergie*).

Varias son las ventajas de este sistema, entre las que se pueden citar:

- Mejora del rendimiento de la instalación, incluso funcionando a carga inferior a la máxima.



- Ahorro de energía eléctrica, con la consecuente disminución de costes.
- Mantenimiento del medio geotérmico, impidiendo un eventual agotamiento estacional.
- Mayor durabilidad de la maquinaria, al funcionar con menores diferencias térmicas.

Por el contrario, se producen inevitables inconvenientes:

- Mayor número de sondas o tuberías enterradas, con el consiguiente sobrecoste.
- Mayor necesidad de espacio, no disponible en todas las posibles aplicaciones.
- Necesidad de un terreno con posibilidades adecuadas de inercia térmica, capaces de almacenar el calor (o el frío) y que dependen de las características del terreno para transmitir o absorber calor.

Quizás el sistema de campos de sondas geotérmicas sea el más adecuado para los sistemas de almacenamiento de calor; pero, en suma, cualquiera de los sistemas de intercambio de calor descritos anteriormente, constituye un potencial almacén de calor (o de frío). Por ejemplo, aunque las cimentaciones geotérmicas sean un caso específico de un campo de sondas geotérmicas, constituyen uno de los aspectos más favorables, por su propia instalación, para futuros campos de almacenamiento de calor, manteniendo el recurso alejado de un posible agotamiento.

En suma, será preciso un estudio detallado del sistema de recuperación de calor y de los costes añadidos, así como del ahorro que se producirá en el funcionamiento del mismo en el período de su vida útil, para compararlo con una instalación convencional, sin almacenamiento del calor (o frío) residual. Cada caso puede producir resultados diferentes en función de los parámetros de cálculo indicados, y la solución más rentable, siempre dentro de las posibilidades de instalación, será la que el usuario final decida adoptar.

5 UTILIZACIÓN DIRECTA DEL CALOR GEOTÉRMICO

Bajo la denominación de utilización directa, o inmediata, de la energía geotérmica se engloban diferentes formas de obtener calefacción, refrigeración o aire acondicionado, y de producir agua caliente sanitaria, que excluyen el empleo de dicha energía para producir energía eléctrica.

Como ha quedado reflejado en la Tabla 2.1 o en la Fig. 2.4, se trata de un conjunto heterogéneo de aplicaciones, que abarca la calefacción del agua de piscinas y recintos para baños, la climatización y producción de ACS en edificios y viviendas, calefacción de invernaderos y secado de cosechas, acuicultura o piscifactorías, la fabricación de productos industriales, la recuperación de metales, e incluso, aunque sólo sea a nivel estadístico, las instalaciones de bombas de calor geotérmicas que explotan energía de muy baja o de baja temperatura.

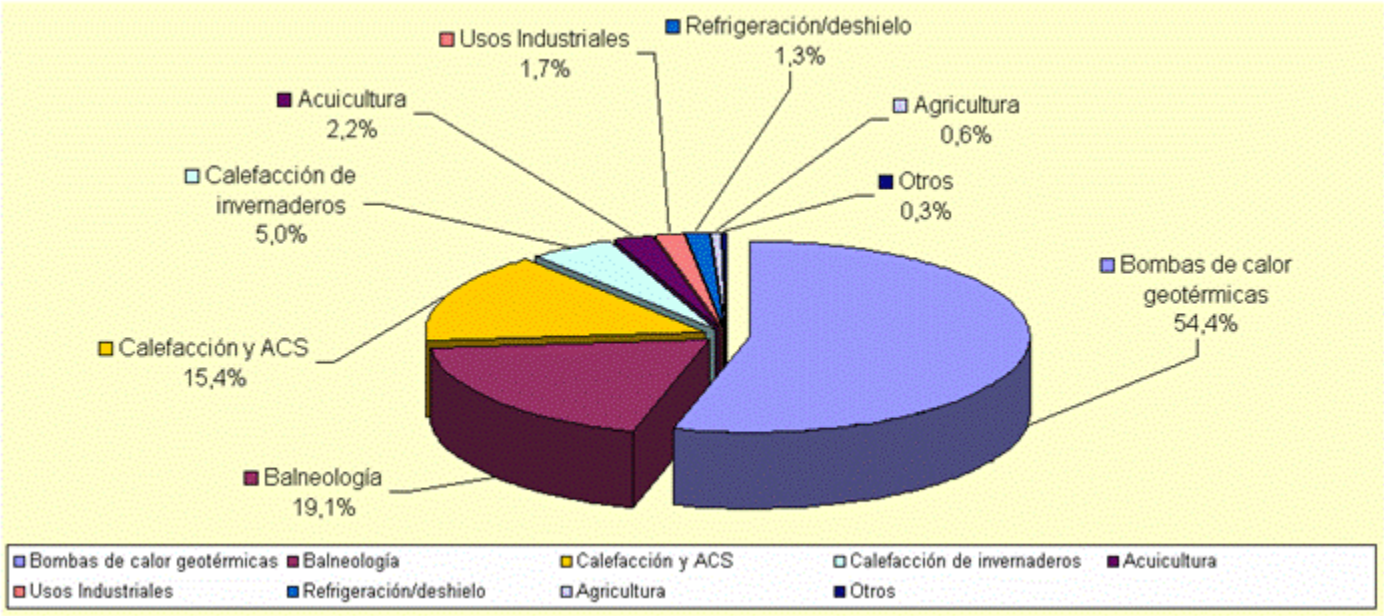
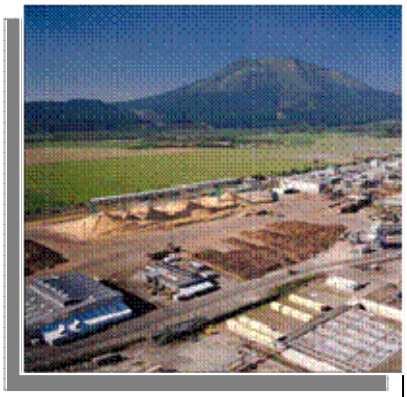


Figura 5.1. Distribución de la utilización del calor geotérmico en el mundo. (TJ/año), en 2005. (Fuente: *Lund, J.W. Direct Heat Utilization of Geothermal Resources Worlwide 2005. Geo-Heat Center. Oregon Institute of Technology*).

En el año 2005 existían en el mundo 72 países con proyectos de uso directo del calor geotérmico, en algunos casos como aprovechamiento complementario, o secundario, de la generación de electricidad. Representaban, en conjunto, una capacidad instalada de



28.268 MW_t, utilizaron 273.372 TJ (75.943 GWh) de energía en forma de calor, ahorrando el equivalente anual de 170 millones de barriles de petróleo (25,4 millones de toneladas), y de 24 millones de toneladas de emisiones de CO_2 a la atmósfera. De ese uso de energía geotérmica en forma de calor, se estima que un 54,4%, cerca de 150.000 TJ/año, procedían de bombas de calor geotérmicas, Fig. 5.1.

Tradicionalmente, el empleo del calor geotérmico en aplicaciones distintas de la generación de electricidad, se ha venido realizando a pequeña escala, a nivel individual, pero los avances experimentados en años recientes incluyen proyectos colectivos a gran escala, como la calefacción urbana y producción de ACS en Islandia y Francia, complejos de invernaderos en Hungría y Rusia, y grandes aplicaciones industriales en Nueva Zelanda y Estados Unidos.

Los intercambiadores de calor son actualmente más eficaces, y están mejor adaptados a los proyectos geotérmicos, admitiendo el empleo tanto de agua a baja temperatura como de fluidos altamente salinos. Las bombas de calor geotérmicas que utilizan fluidos a muy baja temperatura han ampliado la utilización de la energía geotérmica a países tradicionalmente no geotérmicos como Francia, Suecia y Suiza, así como a áreas del medio oeste y la parte oriental de Estados Unidos, Tabla 5.1.

Tabla 5.1. Principales países que hacen utilización directa de la energía geotérmica.

PAÍS	UTILIZACIÓN		CAPACIDAD	FACTOR DE CAPACIDAD	USO PRINCIPAL
	TJ/año	GWh/año	MW_t		
China	45.373	12.605	3.687	0,39	Baños
Suecia	36.000	10.000	3.840	0,30	Bombas de calor
Estados Unidos	31.239	8.678	7.817	0,13	Bombas de calor
Turquía	24.840	6.900	1.495	0,53	Baños / Calefacción
Islandia	24.500	6.806	1.844	0,42	Calefacción urbana
Japón	10.301	2.862	822	0,40	Baños
Italia	7.554	2.098	607	0,39	Baños / Spas
Hungría	7.940	2.206	694	0,36	Baños / Spas
Nueva Zelanda	7.086	1.968	308	0,73	Industrial
Brasil	6.622	1.840	360	0,58	Baños / Spas

Nota: Factor de capacidad = Utilización anual (TJ/año) / Capacidad (MW_t) x 0,03171

(Fuente: *Lund, J.W. Direct Heat Utilization of Geothermal Resources Worlwide 2005. Geo-Heat Center. Oregon Institute of Technology*).

Dado que las bombas de calor geotérmicas han sido incluidas en el capítulo anterior, y que la producción de energía eléctrica se contempla en el capítulo posterior, en los apartados siguientes se comenta la forma de poder acceder a explotar el recurso en el subsuelo, mediante la perforación de sondeos e intercambiadores de calor, y se comentan algunos aspectos relevantes de las aplicaciones del calor de baja, media e incluso alta temperatura, que no incluyen las dos premisas anteriores.

5.1. CAPTACIÓN DE RECURSOS GEOTÉRMICOS

Exceptuando las fuentes termales que manan espontáneamente, la mayor parte de las explotaciones geotérmicas necesitan, en primer lugar, un **sondeo de producción** que permita elevar el agua caliente y/o el vapor hasta la superficie.

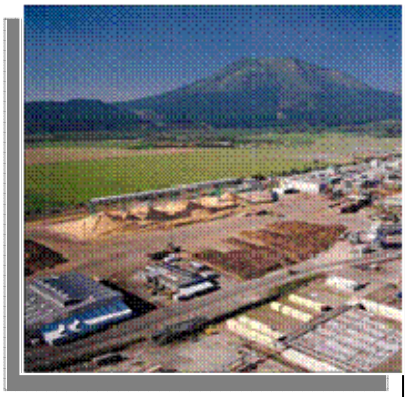
En terrenos duros, la técnica más sencilla, y las más antigua, para realizar un sondeo, es la de percusión con cable. La roca se fractura al ser golpeada por un útil pesado llamado trépano, que se eleva y se deja caer repetidamente, colgado de un cable de acero, sobre la roca que se quiere fracturar. La altura de caída y la frecuencia de los golpes se varían en función de la dureza de las rocas. La extracción de los fragmentos de roca del fondo del sondeo se realiza de forma discontinua mediante una cuchara cilíndrica hueca, provista de una válvula de retención en su fondo.

Es el método más empleado en España en la realización de sondeos de captación de agua para consumo humano o para riego, hasta 600 m de profundidad.

Un procedimiento muy eficaz para terrenos duros y homogéneos, y profundidades de hasta 300 m, es la perforación a rotopercusión con martillo en el fondo del sondeo, Fig. 5.2.

Un martillo neumático que termina en una boca con herramientas de corte, se fija a la base de un tren de varillas, y se le dota de un movimiento de rotación desde el exterior del sondeo, y de percusión, mediante el envío de aire comprimido a alta presión (10 a 25 bar), por el interior del varillaje.

El aire comprimido permite el ascenso de los detritos de perforación hasta la superficie. Una variante consiste en inyectar una espuma por



el conducto del aire comprimido, para favorecer la estabilidad de las paredes del sondeo, y el ascenso de los fragmentos de roca.

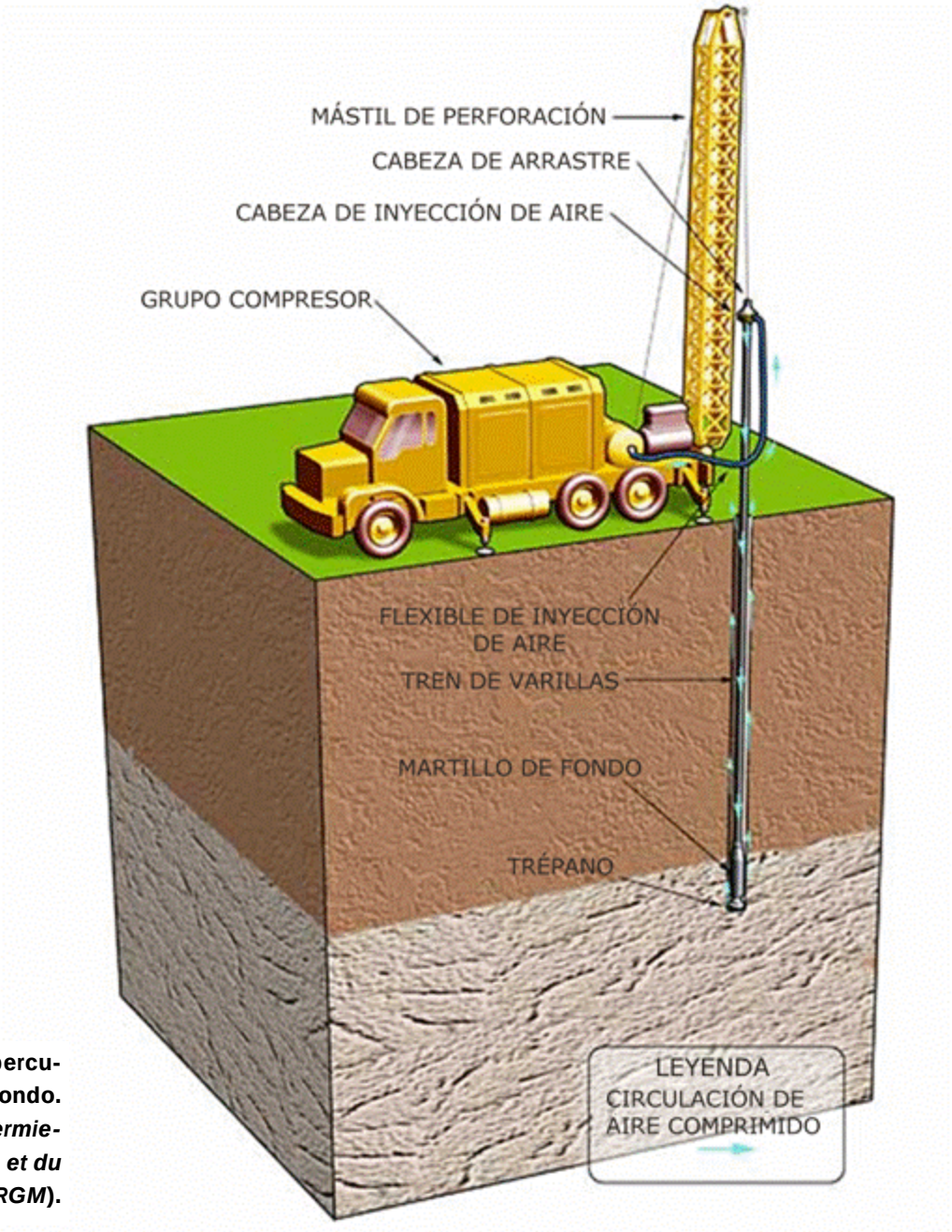


Figura 5.2. Perforación a rotopercusión con martillo en fondo. (*Fuente: Site Geothermie-Perspectives de l'ADEME et du BRGM*).

El método más empleado es el de perforación por rotación, bien mediante equipos autónomos montados sobre camión, para sondeos de poca profundidad, o en enormes plataformas como la que se muestra en la Foto 5.1, para realizar sondeos hasta 5.000 m de profundidad. Esta técnica de perforación, llamada también **Rotary**, consiste en utilizar un trépano provisto de conos dentados en los que van engarzadas piezas de carburo de tungsteno, o de diamantes industriales, que destruyen las rocas por trituración, corte y abrasión, bajo el efecto del peso y de la rotación.

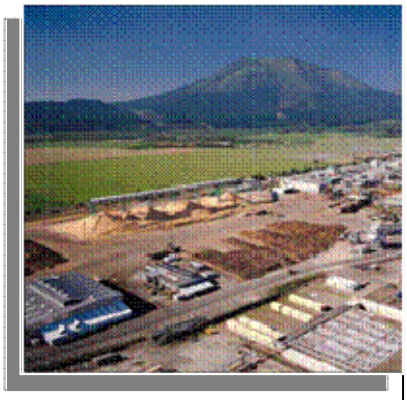
Foto 5.1. Plataforma de perforación a rotación en Estados Unidos.

Un lodo, que circula en circuito cerrado, refrigera el trépano, asegura el arrastre de los fragmentos de roca a la superficie y mantiene la estabilidad de las paredes del sondeo hasta que se proceda a la entubación e inyección de cemento entre la tubería y las paredes del pozo, Fig. 5.3.

El cemento asegura la estabilidad de las paredes, protege las tuberías contra la corrosión y las capas de agua subterránea contra la contaminación, asegurando el aislamiento térmico. Si los terrenos no están suficientemente consolidados, la entubación y la cementación se hacen a medida que avanza el sondeo, de forma telescópica, disminuyendo de diámetro a medida que se profundiza, pudiendo empezar en 660 mm en el brocal del pozo, y terminar en 200 mm de diámetro.

Para reducir peso, los tubos suelen ser de aleaciones metálicas ligeras, de gran resistencia a la tracción, de ánima lisa, sin rebabas en la parte interior de las uniones, y, en algunos casos, forrados de teflón u otro material resistente a la corrosión.

No sólo los tubos de los sondeos, sino también las canalizaciones que enlazan los pozos, los intercambiadores de calor, las juntas y todos los



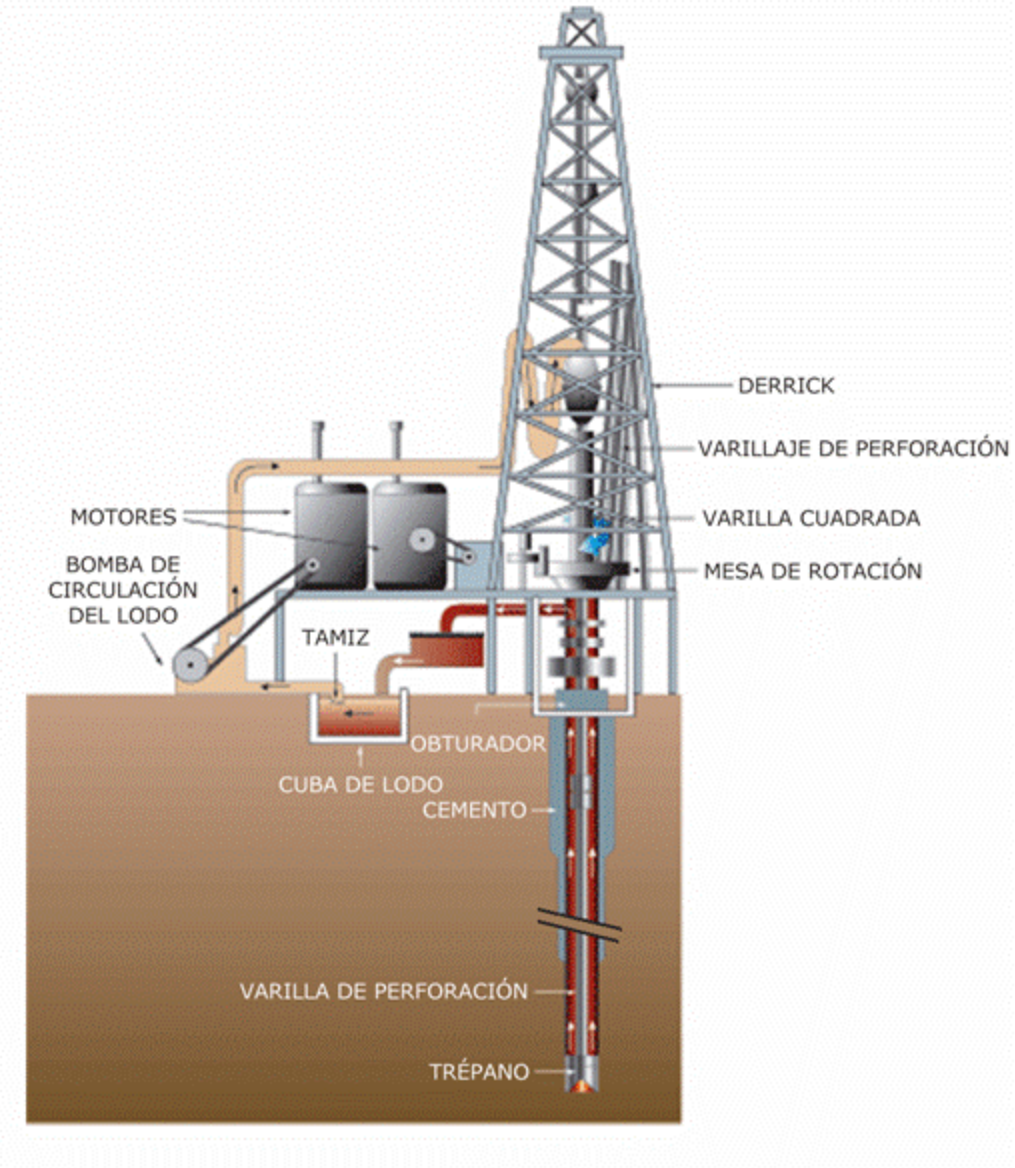


Figura 5.3. Esquema de plataforma de perforación a rotación.
(*Fuente: Site Geothermie-Perspectives de l'ADEME et du BRGM*).

materiales en contacto con el agua geotérmica, son víctimas de diferentes tipos de corrosión. Química, porque el fluido esté cargado de sales minerales muy agresivas; galvánica, provocada por la presencia de corrientes eléctricas parásitas; y también corrosión bacteriológica, pues algunas cepas bacterianas, eventualmente presentes en el yacimiento, pueden reactivarse con el descenso de la temperatura del agua, y los sulfuros, producidos por su metabolismo, aumentan la corrosión del acero.

Las partículas en suspensión que arrastra el agua pueden depositarse en determinados lugares de las canalizaciones formando incrustaciones que pueden llegar a destruirlas o, cuanto menos, a reducir las secciones útiles, provocando disminuciones de caudal.

Para proteger las instalaciones, se aplican tratamientos preventivos: inyecciones de productos inhibidores para obtener una capa protectora o evitar la cristalización de sales y la formación de depósitos; y productos bactericidas para eliminar los microorganismos.

Si la presión del yacimiento geotérmico es superior a la atmosférica, el agua puede brotar de forma natural en el cabezal del pozo de producción, formando un **pozo artesiano**. Si la presión no es bastante elevada, o si el agua no llega a remontar completamente hasta la superficie, que es el caso más común, habrá que proceder a bombearla.

Cualquiera que sea el tipo de bomba empleada, todas conllevan una parte hidráulica sumergida, a profundidades comprendidas entre 100 y 400 m, y un motor, Fig. 5.4.

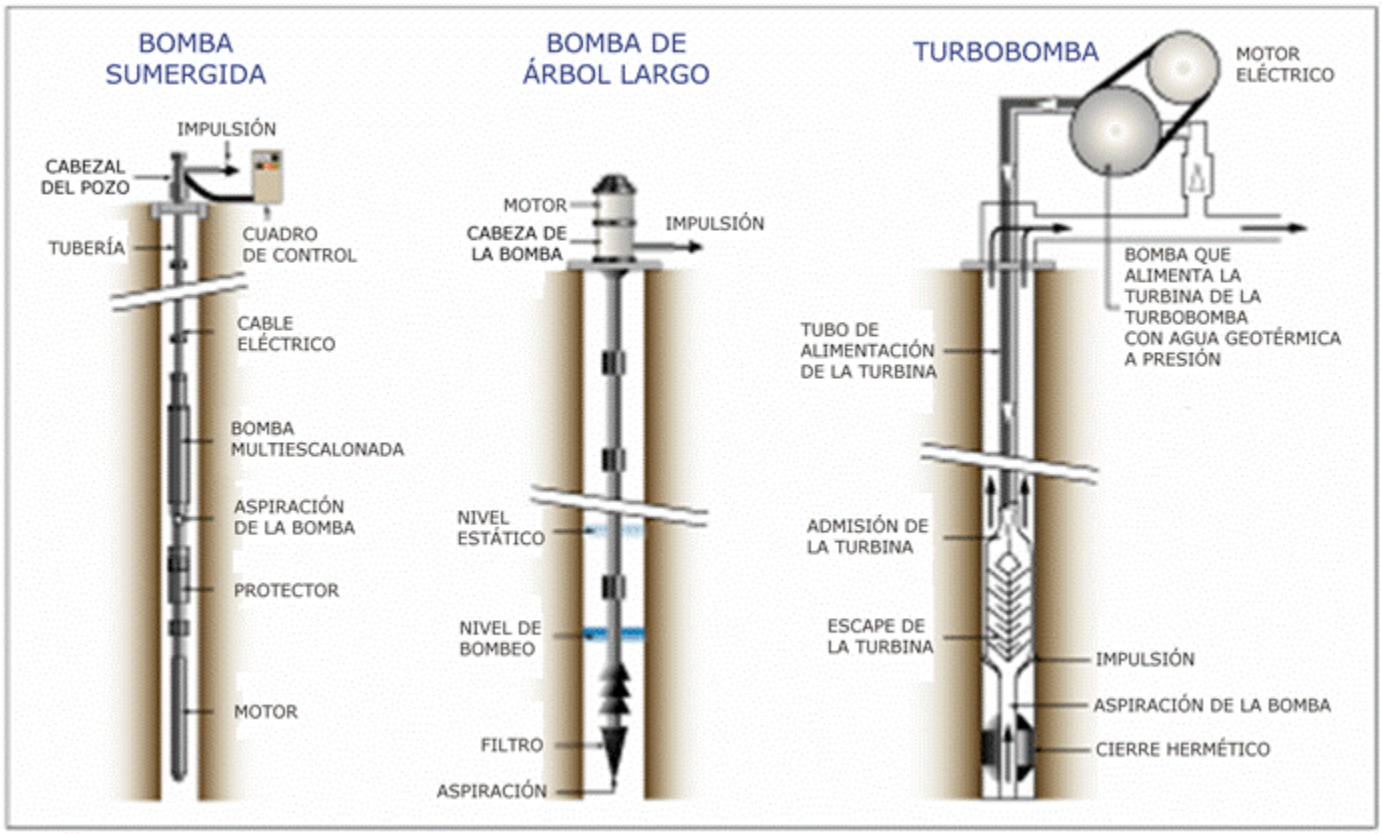
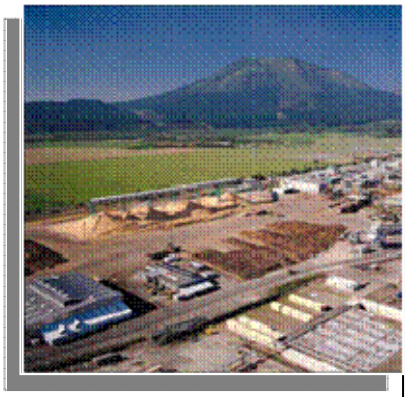


Figura 5.4. Diferentes tipos de bombas.
(*Fuente: Site Geothermie-Perspectives de l'ADEME et du BRGM*).

El motor puede estar sumergido bajo el dispositivo hidráulico (bombas sumergidas), o situado en superficie (bombas de árbol largo). En algunos casos, la bomba puede funcionar gracias a la sobrepresión del agua geotérmica en superficie (turbobomba).



Las bombas sumergidas son las más utilizadas en el acuífero del Dogger de la Cuenca de París. Permiten obtener caudales de 300 m^3/h. Las bombas de árbol largo, hasta 140 m de profundidad, son las más utilizadas en Islandia. Las turbobombas tienen un bajo rendimiento energético, pero su vida útil es más larga que la de las bombas sumergidas.

Si el agua que remonta del subsuelo está poco cargada de sales minerales, se podrá evacuar en superficie sin perjuicio para el medioambiente. Pero si el fluido está muy cargado de sales disueltas, o porque sea necesario para no agotar el recurso, tendrá que volver a reinyectarse a su acuífero original, después de su aprovechamiento, mediante un **pozo de inyección**. Para la reinyección se emplean bombas de superficie de tipo clásico.

El agua debe devolverse al subsuelo en un punto relativamente alejado del punto de extracción, pues, al haber cedido gran parte de su calor en los intercambiadores de superficie, es devuelta al acuífero a menor temperatura que la de captación. En la Cuenca de París se emplea alrededor de 1 km de distancia, según una técnica conocida como **doblete**.

En zonas urbanas, para evitar las molestias que produciría duplicar las obras que conlleva la perforación desde la superficie, el par de pozos, de producción y de reinyección, se suelen perforar con una sola plataforma de sondeos, desviando la trayectoria de uno o de ambos sondeos.

5.2. CESIÓN DEL CALOR GEOTÉRMICO

El contenido en sales disueltas, o de sólidos en suspensión, es la causa de que las aguas geotérmicas no puedan ser conducidas directamente hasta los puntos de demanda final.

Se utilizan unos intercambiadores de calor que permiten la cesión del calor a otros fluidos (agua también, normalmente), que componen el circuito secundario de entrega final del calor a esos puntos de demanda.

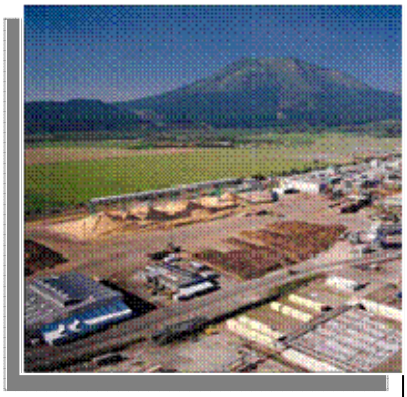
Se tienen, de este modo, dos circuitos: el de la zona de distribución a los puntos de demanda, denominado circuito cerrado o secundario, y otro circuito abierto, que bombea las aguas geotérmicas hasta los intercambiadores de calor y las devuelve al mismo acuífero.

En este tipo de instalaciones, el rendimiento es función primordial de la capacidad del intercambiador de calor, que debe ser capaz de transmitir el calor del circuito primario o geotérmico al secundario o de distribución, con las menores pérdidas posibles de calor al ambiente exterior. En la Foto 5.2 puede apreciarse un sistema de intercambio de calor denominado de placas.

Foto 5.2. Intercambiador de calor de placas.
(Fuente: *@2000 Geothermal Education Office*).

Para el aprovechamiento de la energía geotérmica quizá los intercambiadores más utilizados hasta la fecha hayan sido los de coraza, que se reducen a un depósito que da nombre al equipo, atravesado en su interior por unos tubos que forman el circuito del agua geotérmica, calentando por conducción y convección a la que contiene el depósito, que será la de distribución a los puntos finales. Sus únicas desventajas son su gran volumen y la dificultad de acceso a su interior para cualquier labor de mantenimiento o reparación.

Pero, en la actualidad, están siendo desplazados por los intercambiadores de placas, que son más versátiles y permiten un sencillo montaje por módulos, con lo que se adaptan mejor a cada necesidad particular y permiten una reparación más rápida y sencilla de las placas deterioradas. Así mismo, la capacidad de transferencia de calor es mayor, al disponer de gran superficie de contacto y permitir un salto de temperaturas pequeño entre los fluidos caliente y frío. Sin embargo, están limitados a la temperatura que resistan los materiales elastóme-



ros que separan las placas, y que toleran una presión absoluta de los fluidos algo reducida, lo cual no es un gran inconveniente, pues la diferencia de presiones entre dichos fluidos se reduce a unas pocas atmósferas.

Hoy día, con el avance de la tecnología de los plásticos, muchos componentes se fabrican en este tipo de material; las ventajas se deben a su resistencia a los agentes corrosivos que transportan las aguas geotérmicas, e incluso a su rechazo a posibles incrustaciones de sedimentos, además de resistir temperaturas moderadas (hasta 90 -100 ºC).

5.3. APLICACIONES

Para las aplicaciones directas del calor geotérmico se dispone, en virtud de lo expuesto, de un circuito secundario por el que circula un fluido a una temperatura que depende de la del recurso geotérmico a través del circuito primario, y de la eficacia del intercambiador de calor. Dichas aplicaciones dependen precisamente del rango de las temperaturas del circuito secundario que serán, pues, las que permitan clasificarlas.

Se exponen a continuación estas aplicaciones, clasificadas según el porcentaje de usos de las mismas, según quedó expuesto en la Fig. 5.1. Se ha preferido no hacerlo en función de un orden creciente o decreciente de las temperaturas de utilización, pues ello conllevaría, en la mayor parte de los casos, un solapamiento de actividades que no aclararían demasiado la utilización final.

5.3.1. Natación, baños y balneología

La energía geotérmica utilizada en forma de calor, a nivel mundial, para natación, baños y balneología en el año 2005 ascendió a 83.018 TJ (2.306 GWh/año), de acuerdo con la información aportada al Congreso Mundial Geotérmico celebrado en Turquía, por 60 países que contaban con una capacidad conjunta de producción de calor de 5.401 MW_t.

Esas cifras, que representan el 19,1% de los usos directos que refleja la Fig. 5.1, deberían referirse exclusivamente a lo que en casi todo el mundo se conoce como “spas” y “resorts”, que emplean agua geotérmica captada en el subsuelo que intercambia calor con el agua

del circuito secundario, que, a su vez, se emplea para llenar piscinas y proporcionar calefacción y ACS a los recintos de baños, pero es difícil de contrastar, y puede que las estadísticas incluyan aguas termales y medicinales de los balnearios de salud tradicionales, que fluyen libremente en superficie.

El origen de la palabra **spa** se remonta al año 1326, en una ciudad cercana a Lieja (Bélgica), próxima a la frontera alemana. Aguas termales con alto contenido en hierro eran utilizadas por un herrero para remediar sus achaques. Abrió un balneario y al manantial lo llamó **Espa**, que en lengua valona quiere decir Fuente.

Casualmente, spa son las abreviaturas de las palabras latinas "*salud* (S), *per* (P), *aqua* (A)". Realmente, consiste en un conjunto de tratamientos que incluyen baños, tomas de agua, masajes, ejercicio, baños de barro, etc.

Los famosos spas de Francia, Alemania e Inglaterra, del siglo XIX, más que balnearios, eran elegantes centros culturales y sociales donde la gente acudía a ver a la alta sociedad y a ser visto.

En la actualidad, sólo en Japón hay más de 2.200 "*resorts*" de aguas termales que atraen a 100 millones de visitantes al año. En Beppu, en la parte meridional de la isla de Kyushu, el agua caliente y el vapor cubren muchas necesidades: salud, baño, cocina, explotaciones industriales, investigaciones agrícolas, terapia física, baños de recreo y hasta un pequeño parque zoológico. Las aguas se promocionan para: trastornos del aparato digestivo, nerviosos y de la piel.

En la Foto 5.3 se muestra una piscina de agua caliente en un spa situado en Erding (Alemania). El agua del vaso circula por un circuito secundario cerrado, y se calienta en un intercambiador de calor del tipo de los descritos anteriormente.

En estos casos se trata de obtener en los puntos de destino final, un gran volumen de agua para llenar el vaso de la piscina de agua caliente, pero también un circuito de agua caliente para la climatización del espacio que rodea al ambiente de la piscina, por medio de turboconvectores de aire calentado al circular envolviendo las tuberías de agua caliente. La disipación de calor se realiza con mayores pérdidas que en simples casos de calefacción por agua (radiadores o suelo radiante), lo cual requiere temperaturas del agua geotérmica más elevadas.

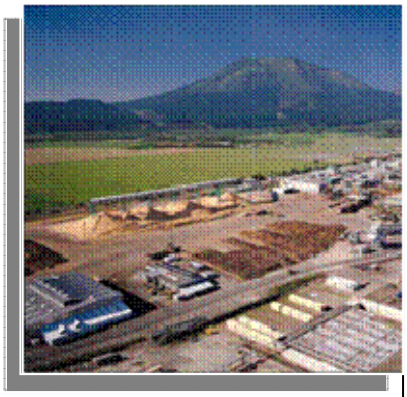


Foto 5.3. Piscina climatizada en Erding, cerca de Munich, al pie de los Alpes. (Fuente: *www.geothermie de 2007*).

En cambio, en otros lugares del planeta, con climatología más benigna, simplemente se requiere la temperatura justa para calentar el agua de una piscina a unos 28 - 30 ºC, cuyo vaso está situado en el exterior, donde el Sol contribuye a mantener la temperatura del agua. Casos de este tipo se contemplan en Japón y Australia con relativa frecuencia.

Es por estas causas por las que el margen de temperaturas recogido en los cuadros de usos directos del calor es uno de los más amplios, desde los 40 ºC hasta los 90 ºC, según el tipo de aplicación que requiera, como los mencionados de piscinas abiertas o cerradas.

Son excepcionales las aplicaciones de acuíferos profundos a la Balneoterapia o baños de aguas medicinales tópicas. Por su propia naturaleza de uso, la aplicación ha de desarrollarse en circuito abierto.

5.3.2. Calefacción de edificios y producción de ACS

La capacidad total instalada en 17 países, para calefacción y refrigeración de edificios y para producción de agua caliente sanitaria, en el año 2005, era de 3.591 MW_t, y el uso global que se hizo del calor geotérmico ascendió a 43.281 TJ (12.857 GWh), lo que representa un 15,4% en el total de usos del calor.

Los sistemas de calefacción de edificios en esos 17 países incluyen grandes instalaciones en Islandia, Polonia, Hungría, Turquía, Japón, China, Rumanía y Estados Unidos.

El sistema de calefacción de Reykjavik, en Islandia, es probablemente el más famoso. Abastece calor a una población de alrededor de 190.000 personas. La capacidad instalada es de 830 MW_t.

En Francia, 37 proyectos diferentes suministran calor directo a 500.000 personas en 170.000 hogares, a partir de una serie de pozos de producción perforados en cuencas sedimentarias, que explotan aguas con temperaturas de 40 a 100 ºC, desde profundidades de 1.500 a 2.000 m.

En la Cuenca de París, un sistema de pozos de producción y de reinyección (dobletes), proporciona agua a 70 ºC. Las pautas de demanda se satisfacen recurriendo a bombas de calor y a calderas de combustibles fósiles.

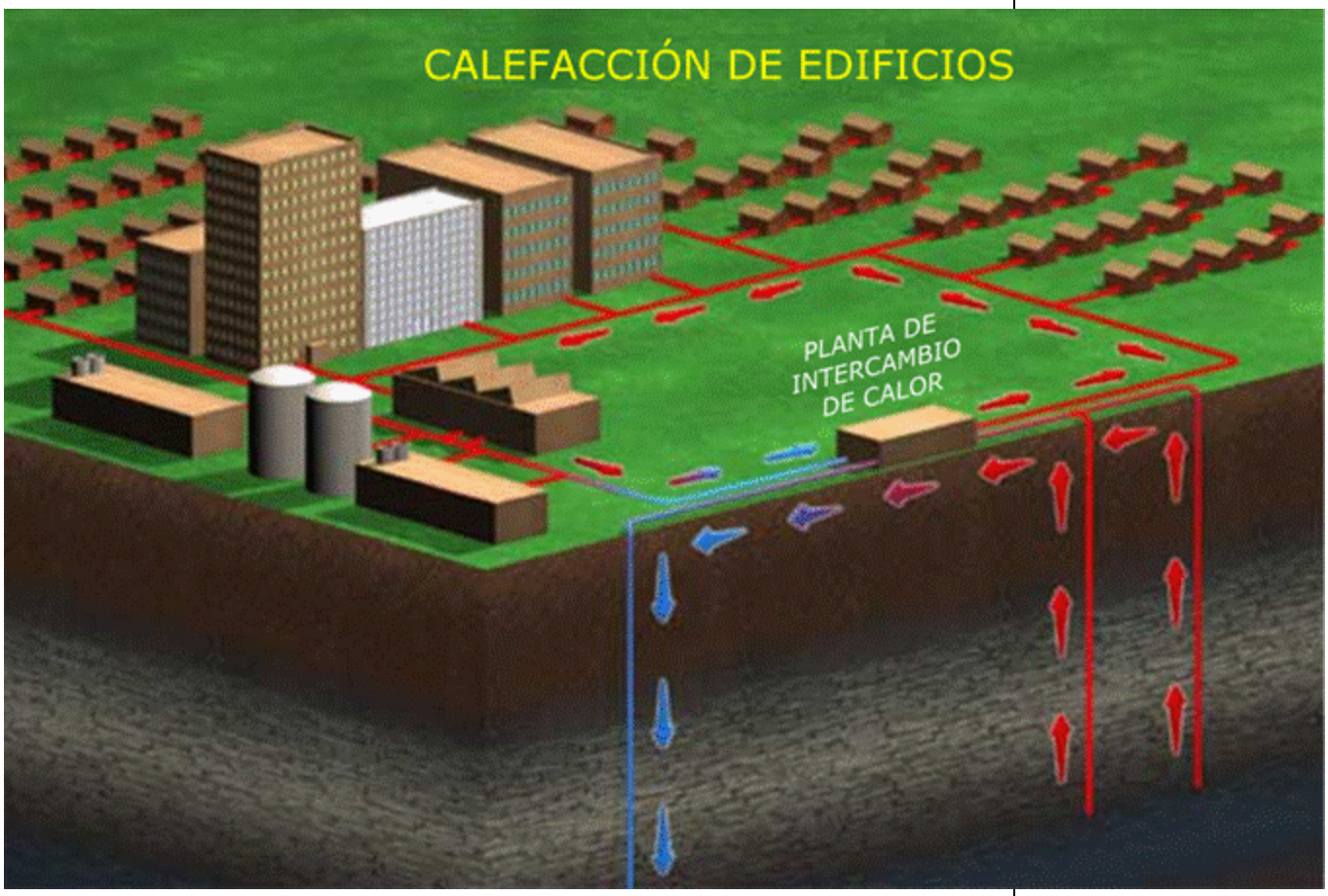
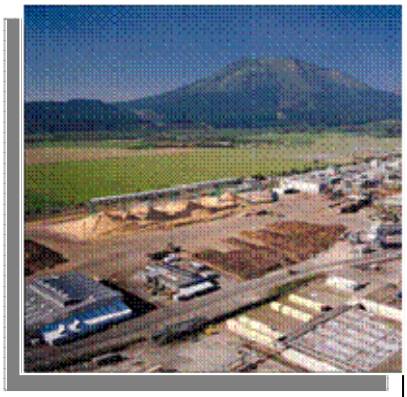


Figura 5.5. Agua geotérmica bombeada desde dos pozos de alimentación a la planta de intercambio de calor. Desde ésta, el circuito secundario abastece a un conjunto de edificios. (Fuente: *@2000 Geothermal Education Office*).



En la Fig. 5.5 se muestra una aplicación típica de circuito cerrado para abastecimiento de calefacción y aporte de ACS. En ella, el agua del circuito secundario se hace circular por tuberías que, con una distribución adecuada, recorrerá una serie de edificios, complejos, centros de gran extensión, o incluso grupos de viviendas particulares, proporcionando tanto calefacción como agua caliente sanitaria. Las necesidades de calefacción prevén temperaturas de uso entre 50 - 60 ºC y las de ACS entre 40 - 50 ºC, con lo cual, y con unos intercambiadores de placas modernos de hasta un 70 % de eficacia, se precisarían unas aguas geotérmicas entre 80 y 90 ºC.

Es de gran aplicación para calentar grandes superficies. La extensión, o mejor expresado, el volumen de los complejos a calentar, dependerá de la capacidad del acuífero y del número de pozos, así como de la capacidad de extracción mediante bombeo. Con un caudal suficiente y cumpliendo los requisitos de temperatura, un solo pozo o varios pueden captar el flujo de agua geotérmica preciso. En la Foto 5.4 se pueden ver las bombas que distribuirán el agua caliente del circuito secundario a los diferentes edificios o grupos de edificios, donde se encuentran los puntos de entrega final del calor.

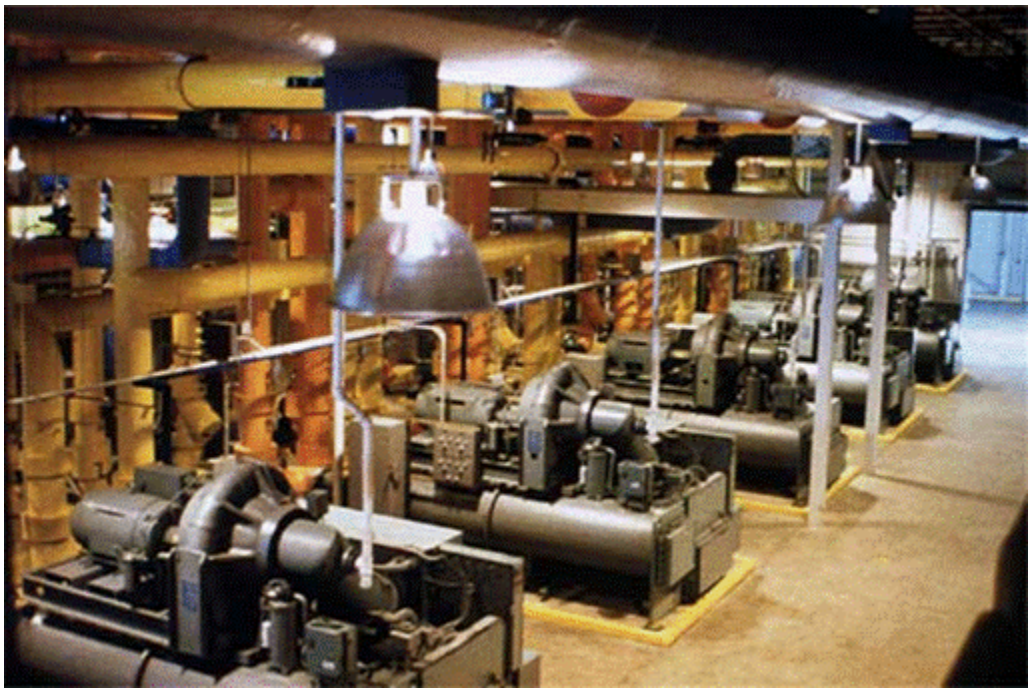


Foto 5.4. Sala de bombas de distribución de agua caliente a los puntos finales de entrega de calor. (Fuente: *@2000 Geothermal Education Office*).

Como se puede apreciar en dicha foto, las bombas están situadas en una sala que forma parte del complejo del intercambiador de calor.

La entrega en los edificios terminales (puntos de demanda) se realiza a través de tuberías calorifugadas convenientemente, al objeto de producir en ellas las menores pérdidas posibles de calor. En los puntos de entrega, los sistemas convencionales de calefacción se encargan de la disipación final del calor en el ambiente a climatizar. Estos sistemas son los ya conocidos de radiadores, suelos radiantes, corrientes de aire calentado, etc., cada uno con sus rendimientos característicos.

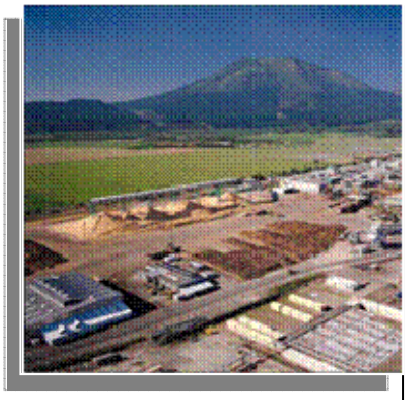
5.3.3. Calefacción de invernaderos

Es de dominio público que el cultivo de plantas en invernaderos, lo que pretende es reproducir las condiciones de humedad y temperatura ideales en ambientes que no las poseen de forma natural. Con las características de los aprovechamientos que se han expuesto hasta el momento, es fácil deducir en que forma se pueden emplear los recursos geotérmicos para la mejora de rendimientos en estas instalaciones agropecuarias.

Es evidente que los invernaderos existentes en zonas del planeta que disfrutan de abundantes horas de sol, no precisan de un calentamiento ajeno al producido por el astro de nuestro sistema planetario; el crear ambientes cerrados con plásticos que permiten el paso a la luz solar y encierran la humedad ambiente, pretende crecimientos rápidos y cosechas de frutos, incluso fuera de estación. Sin embargo, en zonas desfavorecidas por estos elementos, es posible recrear un ambiente similar, con la única ausencia de las radiaciones solares.

Como se puede apreciar en la Fig. 5.6, cada tipo de cultivo requiere una forma óptima de empleo del calor, bien por convección forzada como en las figuras f) o g), o por radiación desde focos de diversa posición. Plantas herbáceas o leguminosas requieren focos apartados e indirectos, mientras frutos carnosos precisan una radiación más directa, como en la figura a).

En la citada figura, en el esquema d), se puede apreciar cómo el agua de climatización del invernadero puede ser incluso empleada para, circulando en su retorno al intercambiador por tubos enterrados junto a las raíces de las plantas, proporcionar un calor adicional por conducción al sustrato mineral, incrementando el rendimiento de las cosechas en las especies que así lo aconsejen.



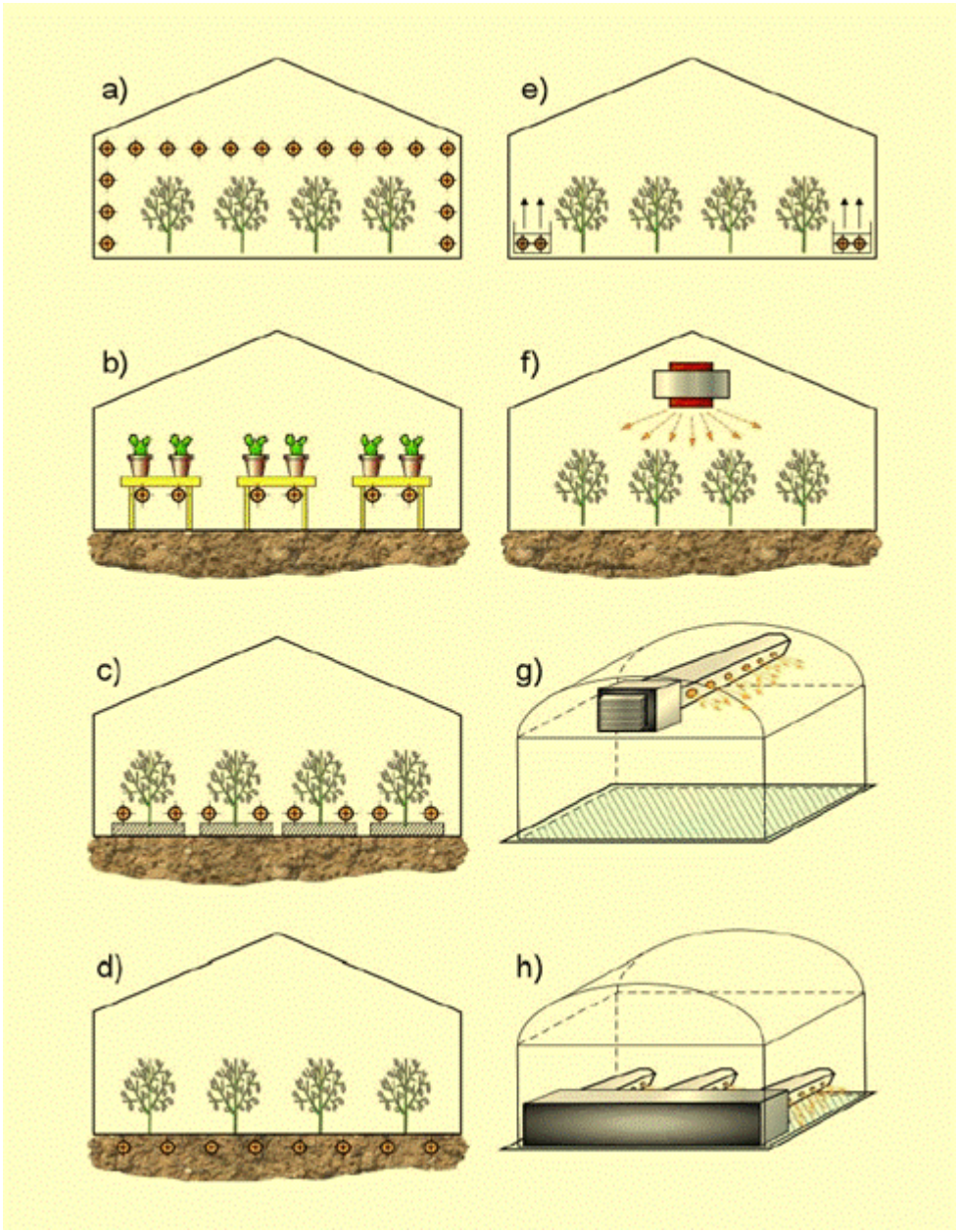


Figura 5.6. Esquemas de diversos tipos de climatización en invernaderos. (Fuente: *Dikson, M.H. y Fanelli, M. ¿Que es la Energía Geotérmica ? Instituto di Geoscience e Georisorse. CNR. Pisa, Italia*).

En una buena parte de cultivos, los resultados obtenidos son espectaculares y las ventajas que aporta el sistema de invernaderos son numerosas:

- Producción de especies no naturales de la zona por su climatología.
- Elección de la época de siembra, según demandas de mercado.
- Aumento del número de cosechas y abundancia de las mismas.
- Mejora de la protección contra enfermedades y parásitos.

En la Tabla 5.2 puede verse una comparación entre las producciones naturales y las obtenidas en invernaderos calefactados por sistemas derivados de la energía geotérmica.

Tabla 5.2. Rendimientos y producciones en invernaderos y con sistemas naturales.

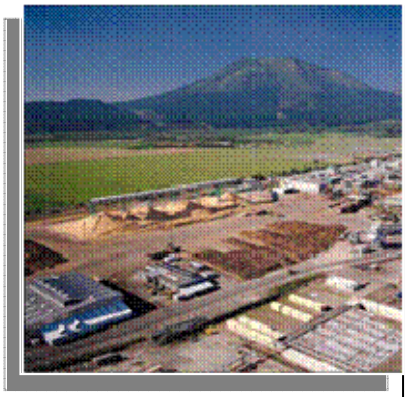
Tipo de Cultivo	Invernadero e Hidroponía			Tradicional
	Producción (t/ha)	Cosechas/año	Rendimiento anual (t/ha)	Rendimiento anual (t/ha)
Fríjol	11,5	4	46	6
Repollo	57,5	3	172,5	30
Pepino	250	3	750	30
Berenjena	28	2	56	20
Lechuga	31,3	10	313	52
Pimiento	32	3	96	16
Tomate	187,5	2	375	100

(Fuente: INDE. División de Desarrollo Geotérmico. Guatemala. 2007).

La citada tabla es una muestra del interés que presentan este tipo de cultivos y el espectacular aumento del rendimiento que puede extraerse de unos suelos y una climatización adecuada. El rango de temperaturas necesarias para un aprovechamiento de este tipo es bastante amplio, oscilando desde los 40 ºC para calentamiento de suelos directamente o por retorno de aguas ya utilizadas, hasta los 80 - 90 ºC de las aguas geotermales para crear corrientes de convección, a partir del circuito secundario, que calentarán el ambiente general del invernadero.

En la Foto 5.5 se observan unas vistas de invernaderos con los disipadores finales de calor por aire (turboconvección) y de la posible combinación de variedades de especies que pueden compartir la serie de procedimientos para climatizar los invernaderos.

Foto 5.5. Dos modalidades de calefacción de invernaderos. (Fuentes: *Infos-Géothermie. Suisse énergie y IEA Geothermal. R&T Annual Report 2004*).



Son numerosos los países que han desarrollado técnicas de invernaderos calefactados aprovechando aguas geotérmicas de media y, sobre todo, baja temperatura, pues los recursos geotérmicos necesarios son relativamente abundantes. El Medio Oeste norteamericano (Boise, Idaho), Grecia (Negrita), Australia, Nueva Zelanda, países del Lejano Oriente y una larga lista que añade nuevos nombres cada año.

En la Foto 5.6 se muestra el mayor invernadero de todo el mundo con climatización de origen geotérmico, situada en Mokai, en la región de Waikato (Nueva Zelanda). Dispone de una estructura acristalada que ocupa 5 ha y en su subsuelo se encuentra una planta de generación eléctrica, también de origen geotérmico.

Foto 5.6. Invernadero de 5 ha de superficie acristalada con calefacción geotérmica en Mokai, Nueva Zelanda. (Fuente: *White, B. New Zealand Geothermal Association. 2006*).

También se ha empleado con éxito la climatización, a partir del calor geotérmico, de criaderos de diversas variedades de hongos. Sin constituir exactamente invernaderos de corte clásico, el principio de utilización es el mismo y con los mismos elementos. Su aplicación es sencilla, pues el rango de temperaturas que precisan abarca entre 30 y 60 ºC.

La calefacción de invernaderos, la acuicultura, la producción agrícola de animales, la calefacción e irrigación de suelos para cultivos, el cultivo de hongos, la producción de biocombustibles a partir de energía geotérmica se llevaba a cabo en el año 2005 en 31 países con

una capacidad instalada de 2.020 MWt y un uso anual de 31.637 TJ (8.789 GWh). Aproximadamente las dos terceras partes correspondían a calefacción de invernaderos, y la mayoría de la parte restante a aplicaciones en acuicultura.

5.3.4. Acuicultura y crianza de animales

Una interesante aplicación del calor geotérmico es la de climatizar las aguas de piscifactorías, tanto de carácter fluvial o lacustre como marina, para algunas especies concretas. Especies como carpas, barbos, róbalos, salmonetes, angulas, salmones, esturiones, camarones, langostas, cangrejos, ostras, mejillones o almejas, son algunas de las principales especies que responden perfectamente a una crianza en ambientes de temperatura constante.

De las curvas que relacionan el crecimiento de especies animales con la temperatura, se deduce que la crianza de especies acuáticas es mucho más delicada que la de animales terrestres de granja, y también mucho más sensible a variaciones de temperatura. Una pequeña variación de temperatura entre los diversos tanques de crianza de alevines y las subsecuentes de crecimiento en etapas, mejora la propagación de la especie y los aumentos de tamaño de las piezas. El mantenimiento de la temperatura a lo largo de las estaciones, implica mejoras de rendimiento en peso de hasta el 35% en peces y crustáceos. En la Foto 5.7 puede verse el momento de trasvase de alevines de un tamaño dado al tanque siguiente de crecimiento.

Foto 5.7. Criadero piscícola climatizado con energía geotérmica en Imperial Valley, California, EE. UU. (Fuente: *@2000 Geothermal Education Office*).

La temperatura del recurso es determinante para dimensionar la capacidad de las instalaciones piscícolas. Lo más normal es que las aguas geotérmicas no puedan usarse directamente en los tanques en circuito abierto, sino que deberá acudirse al proceso de intercambiar el calor geotérmico a un circuito secundario que constituye el agua de crianza de los tanques. La variación de temperatura requerida por las especies piscícolas varía entre 20 y 30 ºC, lo que requiere una temperatura del recurso oscilando entre los 45 - 60 ºC. Un interesante ejemplo de esta actividad se encuentra en Mios-Le-Teich, en la región de Gironde (Francia), con producciones de esturión que alcanzan las 70 t/año y su producción proporcional de caviar.

En la Foto 5.8 se puede apreciar una granja en medio acuático para crianza de caimanes en Mosca, Colorado, EE.UU., a 2.500 m de altitud, donde, en condiciones normales, no podrían sobrevivir. Se trata de una operación comercial que vende caimanes vivos, carne y pieles como subproducto de la producción de peces.

Foto 5.8. Granja de caimanes con agua climatizada con calor geotérmico. (Fuente: *@2000 Geothermal Education Office*).

Manteniendo el agua a una temperatura de 30 ºC, los caimanes pueden crecer hasta alcanzar 2 m en 3 años, cuando en condiciones naturales sólo alcanzarían 1,2 m. Además, disminuyen el vertido de residuos sólidos.

Tortugas, caimanes y cocodrilos, nutrias y castores y alguna variedad más de animales constituyen especies que permiten su desarrollo óptimo en granjas de ambiente acuático, y están siendo criados a lo largo del mundo, aunque aún a niveles puntuales. Granjas de caimanes se encuentran en auge en los Estados de Colorado e Idaho, en Estados Unidos y, en la actualidad, se desarrollan proyectos de características similares en Islandia.

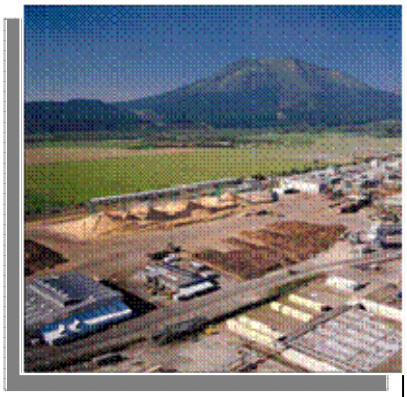
También dentro del ámbito de la acuicultura, merece la pena mencionar la crianza en piscinas de la **spirulina**, una microalga unicelular que ha sido denominada "superalimento", debido a su gran cantidad de nutrientes. En países tropicales, la spirulina se cultiva en lagos o estanques artificiales donde las condiciones para su crecimiento sean adecuadas (gran contenido de CO_2, ambiente alcalino y cálido). En países templados, donde el calor geotérmico puede mantener constante una temperatura adecuada, se cultiva con éxito esta variedad de alga, en la que se cifran grandes expectativas de futuro.

5.3.5. Secado de alimentos y maderas

Se ha extendido la práctica de utilizar el calor geotérmico para el secado de productos agrícolas, carnes y pescados, así como para el secado selectivo de maderas.

La manipulación de alimentos frescos requiere grandes inversiones en transportes de alto coste de oportunidad, pues dependen de márgenes muy escasos de tiempo antes de que dichos alimentos puedan deteriorarse. La deshidratación por secado de los alimentos permite una estabilización de los mismos, un mayor tiempo de almacenamiento y, por ello, disponer de tiempo para transportes compartidos y cadenas de distribución que abaratan costes al crecer el volumen de los productos.

El secado suele hacerse en autoclaves de convección con aire caliente, cuyo intercambio con el circuito de aguas geotérmicas se realiza en un intercambiador de placas, donde el aire circula directamente por entre los conductos del agua caliente, accediendo luego a las



cámaras de secado de alimentos. Cada uno de estos alimentos, dependiendo de su contenido en agua, precisa una temperatura de secado, con lo que la variación de la temperatura del recurso deberá adaptarse a cada necesidad, pero se mantiene en un rango de entre 60 ºC - 120 ºC.

En autoclaves especiales a altas temperaturas y manteniendo la humedad adecuada, pueden ser curados incluso hormigones de fraguado rápido para piezas de hormigón prefabricado en serie.

Es en el secado de la madera donde las aplicaciones de la energía geotérmica han alcanzado una importancia apreciable. El secado de las maderas por medios naturales requiere unos tiempos que no son aceptables para la industria moderna. Los secaderos artificiales de madera requieren tiempos largos, de alto coste de suministro de aire caliente empleando medios convencionales. El calor geotérmico puede producir un abaratamiento de los mismos, pues la fuente es continua una vez puesta en marcha. Si puede compartirse con otra aplicación, su rentabilidad puede ser muy alta.

5.3.6. Otras aplicaciones

En general, serían innumerables las aplicaciones industriales que aprovecharían el calor geotérmico; en realidad, todas aquellas que precisen de un tratamiento de calor o vapor de agua en su elaboración. Atendiendo a su temperatura, las aguas geotérmicas son también adecuadas para procesos como el manipulado de la pasta de celulosa en la industria del papel, o los aportes de calor necesarios en la industria del secado y envasado de ciertos alimentos, o bien, a temperaturas más elevadas, en el propio proceso de los alimentos en la industria conservera. Agua caliente para máquinas de lavado, estaciones de lavado de vehículos, refrigeración por absorción a diversas temperaturas y un largo etcétera de aplicaciones constituyen una muestra de las bondades de un sistema de calor geotérmico, barato y de gran disponibilidad.

En la Foto 5.9 se puede ver el mayor complejo industrial que utiliza calor geotérmico en el mundo, 5.316 TJ/año, para fabricación de pasta de papel, papel de periódico, secado de madera y producción de energía eléctrica.

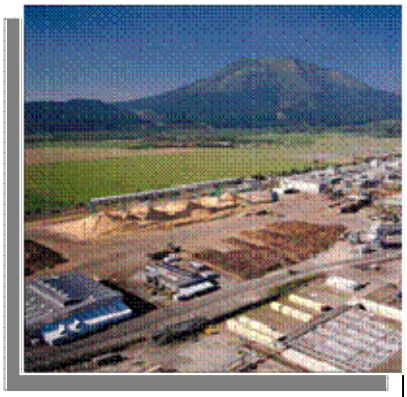
Inició sus actividades en 1958, explotando un fluido geotérmico de

Foto 5.9. Complejo industrial de Kawerau, Bahía de Plenty. Nueva Zelanda. (Fuente: *White, B. New Zealand Geothermal Association. 2006*).

270 ºC de temperatura. En 1991 se empezó a reinyectar agua en el yacimiento, después de su aprovechamiento, sin que se haya apreciado hasta el presente una disminución sensible de la presión en el mismo.

Anualmente se producen 180.000 t de pasta de papel kraft, 363.000 t de papel de periódico, se secan tablones de madera y se genera electricidad en dos centrales con una capacidad conjunta de 5,9 MW_e.

Una aplicación bastante reciente de los yacimientos geotérmicos y, por ello, no muy extendida, es la obtención de productos en la industria química. En efecto, como se ha visto en capítulos anteriores, las aguas de origen geotérmico llevan en disolución gran diversidad de substancias, algunas de las cuales pueden proporcionar beneficios industriales en plantas adecuadas para su extracción. Es bastante frecuente encontrar en disolución gases como metano o hidrógeno, con buenas posibilidades de separación, así como compuestos corrosivos, cuyo beneficio industrial al ser recuperados no es demasiado alto; pero, si se añade el beneficio de un menor coste de instalaciones de bombeo y conducción, el separarlo puede incorporar al proceso unos interesantes puntos de rentabilidad añadida.



En la Foto 5.10 se puede apreciar una espectacular aplicación del calor geotérmico. El tablero de rodadura de un puente ha sido descongelado y licuada la nieve que lo cubría por el simple sistema de introducir, en la fase de su asfaltado, unas tuberías que conducen agua caliente, creando lo que se denomina un suelo radiante. El agua, con algún aditivo anticongelante de la familia de los glicoles, es el circuito secundario de un intercambiador de calor, cuyo circuito primario proviene de una fuente de calor geotérmico. Dada la cantidad de horas de funcionamiento que este sistema de descongelado necesitaría, el calor geotérmico proporciona una solución barata y con garantía de servicio en el tiempo.

Foto 5.10. Puente Deck en Oklahoma State University, Stillwater, EE. UU. (Fuente: *Bose, J.E. et al. Oklahoma State University*).

Otras aplicaciones se enmarcan en el sector de la minería, para explotación de minerales industriales y recuperación de metales.

En Islandia se explota tierra de diatomitas desde el fondo de lago Mytatn mediante dragado por succión, y se bombea por una tubería de 3 km de longitud hasta la planta de secado que utiliza vapor a 183 ºC. Anualmente se producen 25.000 t de tierra de diatomitas para filtros.

En Nevada, Estados Unidos, se usa la energía geotérmica para calentar las soluciones de cianuro sódico que se emplean para la recuperación de oro y plata por el procedimiento de lixiviación en pilas, al aire libre. Calentar las soluciones cianuradas permite aumentar la recuperación entre un 5 y un 17 %, y prolongar el periodo de máxima producción, de tan sólo los meses de verano a siete meses, entre mediados de marzo y finales de octubre.

En la Tabla 2.1 y en la Fig. 2.9 se muestran otras aplicaciones que no han sido comentadas en los apartados anteriores, bien porque son minoritarias, porque se hallan en fase de experimentación o porque no se ha encontrado información disponible.

Esas y otras que, sin duda, aparecerán próximamente, abren expectativas para que se incremente la producción de una energía que enfrenta los retos de futuro con unas características que la convierten en puntera:

- Rendimientos equiparables a los convencionales.
- Precio asequible con las modernas tecnologías de perforación.
- Energía renovable, independiente de fenómenos atmosféricos o estacionales.
- Energía limpia, la que más protege el medio ambiente.

Y, sobre todo, constituye una energía disponible en una considerable lista de países, lo cual la convierte en una auténtica proyección de futuro.

6 PRODUCCIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA

Contrariamente a lo que hoy estamos acostumbrados a ver, la primera corriente eléctrica de la que se tiene constancia fue una corriente continua proveniente de una pila (o batería) líquida. Algunos arqueólogos han querido ver en ciertos restos de civilizaciones sumerias, extraídos en las excavaciones de Nínive por Botta, indicios de pilas electrolíticas de hace 4000 años. Estos extremos no han podido ser ratificados, pero aún así, parece que las experiencias del señor Volta en sus pilas eléctricas, pueden haber sido sobrepasadas en la antigüedad.

Por otra parte, después de más de un siglo de utilización de la energía eléctrica, la corriente continua es la única que sabemos almacenar, en pilas o baterías más sofisticadas que antaño, pero basadas en principios similares. Sin embargo, todo el potencial de investigación de producción y utilización de la energía eléctrica parece haberse centrado en la corriente alterna. ¿A qué se debe este presumible contrasentido?.

Pues bien, la corriente continua presta grandes servicios en casos de fiabilidad de regulación, pues es más sencilla de modificar que la alterna, sirviendo para circuitos de control y aplicaciones de su microvoltaje a circuitos electrónicos; incluso almacenada en baterías, puede ser utilizada como corriente de emergencia en algunos casos, aunque limitada por su más importante condicionante: es muy caro y muy limitado obtener grandes potencias de ella, salvo cuando se obtiene por la rectificación de la corriente alterna.

Es por ello por lo que el principal interés de la energía eléctrica se centra en la producción de corriente alterna para cualquier aplicación industrial, rectificándola a corriente continua cuando las aplicaciones así lo requieran.

Y la producción de corriente alterna pasa ineludiblemente por inducir un campo electromagnético en unos bobinados especiales (estátor) al girar a gran velocidad otros bobinados en su interior (rotor), creando así una diferencia de potencial que constituye la corriente eléctrica.

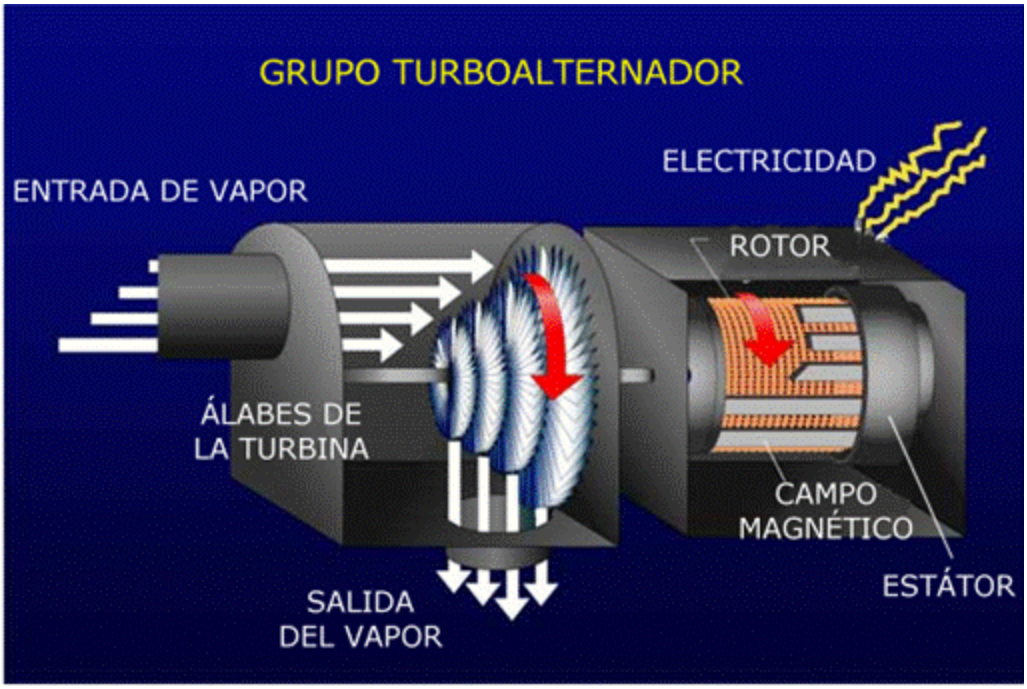


Figura 6.1. Esquema de un turboalternador. La fuerza del vapor obliga a girar al eje de la turbina.
(*©2000 Geothermal Education Office*).

Así pues, y simplificando ampliamente el tema, el problema se reduce a conseguir una máquina que obligue a girar el rotor de un alternador a gran velocidad. Esta máquina se denomina turbina y el conjunto es lo que conocemos como turboalternador.

Para conseguir este giro se utilizan fluidos que deben poseer dos características fundamentales: un caudal aceptable y una presión suficiente para garantizar su continuidad en el tiempo, ambos dentro de unos límites relativamente estrictos.

Así, en la energía hidráulica es un salto de agua el que se canaliza por una tubería hacia una turbina, o en la eólica es la fuerza del viento la que mueve unas palas del aerogenerador acoplado al rotor. La más extendida de las formas de producción es la de canalizar el vapor a gran presión de algún fluido (generalmente agua), hacia una rueda de álabes dispuestos sobre el eje del rotor, lo que constituye una turbina de vapor en cualquiera de sus más o menos complejas variedades. Este último tipo es el que se emplea en la producción térmica de energía eléctrica.

Es evidente que ésta es una posible aplicación de la energía geotérmica que provenga de un yacimiento de alta temperatura: la producción de vapor a presión, el cual en los medios convencionales se

consigue a base de quemar combustibles fósiles (carbón, petróleo o gas) o por el calor producido por la fisión nuclear del átomo (energía nuclear). Todos estos sistemas se han revelado como de gran rendimiento, pero con los graves inconvenientes de coste y agresión al medio ambiente, que hoy día se ponen de relieve de forma cada vez más acuciante.

En primer lugar, es necesario estudiar qué posibilidades ofrece la producción de ese vapor a presión que se puede obtener, en el más estricto de los sentidos, de las entrañas de la tierra. Para ello, es interesante estudiar en la curva de la Fig. 6.2 el comportamiento del agua sometida a gran presión y temperatura en las citadas profundidades terrestres.

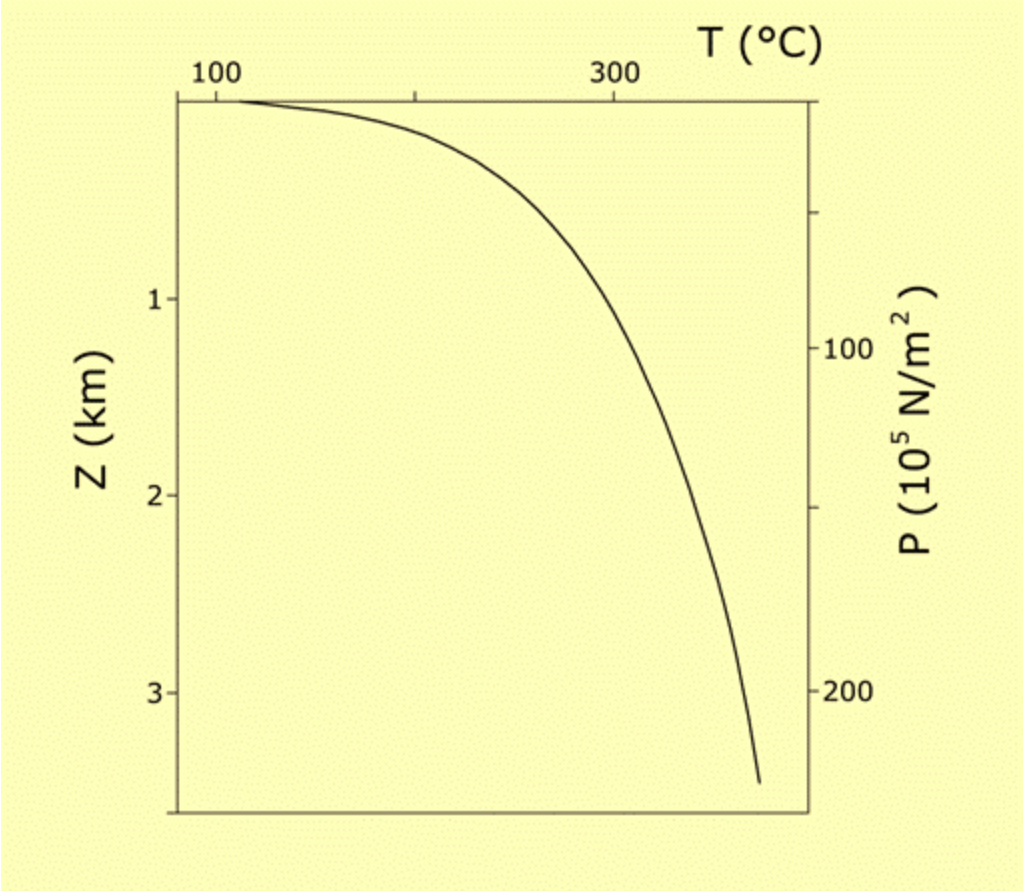


Figura 6.2. Evolución del punto de evaporación del agua con la presión.
(Fuente: *Energía Geotérmica. Pous, J. y Jutglar, L. 2004*).

Esta curva refleja el punto de ebullición del agua en función de la presión producida por los estratos que se encuentran sobre el acuífero, y de la temperatura que el efecto del gradiente geotérmico produce.

Según se puede apreciar en ella, a unos tres km de profundidad, con una presión próxima a los 200 x 10^5 N/m^2, el agua permanece líquida

hasta el entorno de los 350 ºC - 400 ºC. Cuando se perfora un sondeo hasta esa profundidad y se extrae el agua, en parte por depresión y en parte por bombeo, el agua va perdiendo su presión de confinamiento, por lo cual baja su punto de ebullición, convirtiéndose en vapor.

6.1. CIRCUITO ABIERTO

En las condiciones que se acaban de exponer, se puede ya disponer de vapor de agua a gran presión para alimentar una turbina y generar electricidad, siempre que el caudal que el yacimiento geotérmico proporcione, garantice un suministro suficiente y continuado.

Este es el caso más sencillo de producción eléctrica, en el que el agua de origen geotérmico es absorbida desde el pozo de alimentación, ya en forma de vapor, hacia una turbina a la que obliga a girar a gran velocidad, perdiendo en el trabajo su energía, que se traduce en una pérdida paulatina de presión y de temperatura, que la devuelven a su estado líquido (aún con la presencia de alguna parte en fase vapor), con la opción de incorporarla al exterior (vapor a la atmósfera y agua a la red hidrográfica), o bien reinyectarla al acuífero de procedencia o a través del pozo de reinyección, una vez utilizada. Una esquematización de tan simples principios se ilustra en la Fig. 6.3.

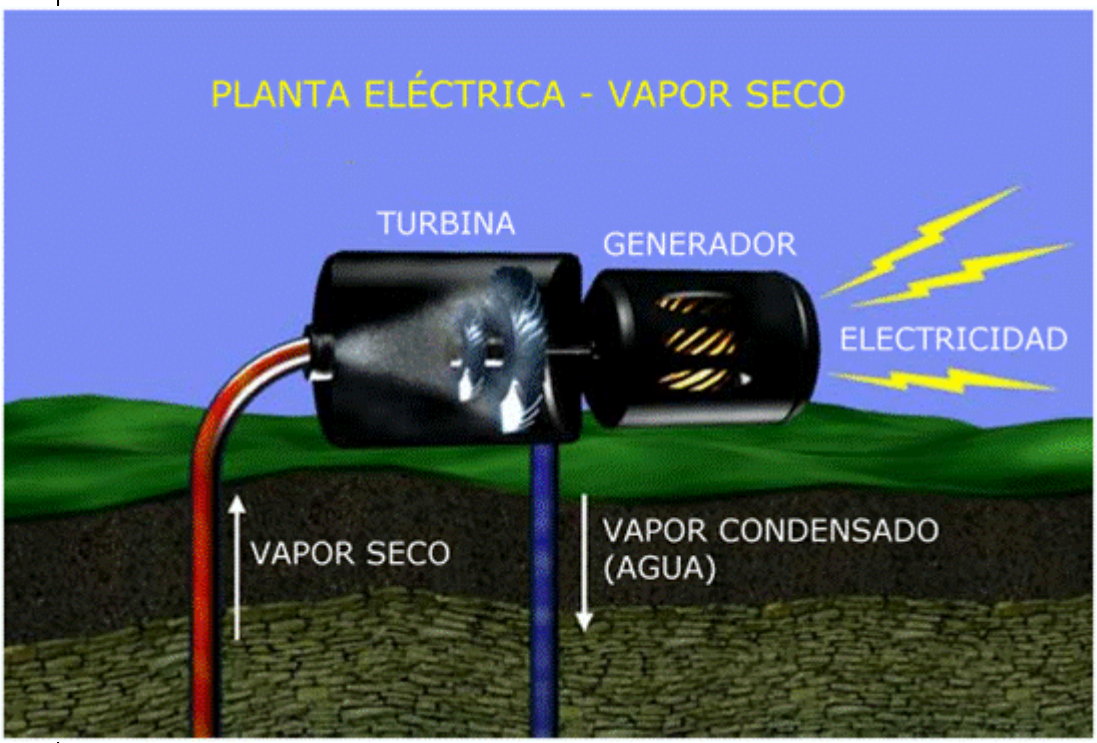


Figura 6.3. Esquema de un turboalternador funcionando con vapor seco. (*©2000 Geothermal Education Office*).

Esta situación, aparentemente sencilla, se complica cuando se estudian con más profundidad las características del vapor. Es prácticamente imposible conseguir que el vapor esté absolutamente seco, lo cual constituye el primer inconveniente para la producción de energía eléctrica. En efecto, las pequeñas gotas de agua que puede arrastrar el vapor, a la presión a la que impactan con los álabes de la turbina, producen un desgaste excesivo, cuando no su ruptura.

Para evitar este extremo, es práctica habitual colocar a la salida del vapor del pozo de alimentación un separador centrífugo de agua, que elimina una buena parte del agua que contenía el vapor. Se dispondría así de un nuevo esquema de funcionamiento, que puede apreciarse en la Fig. 6.4.

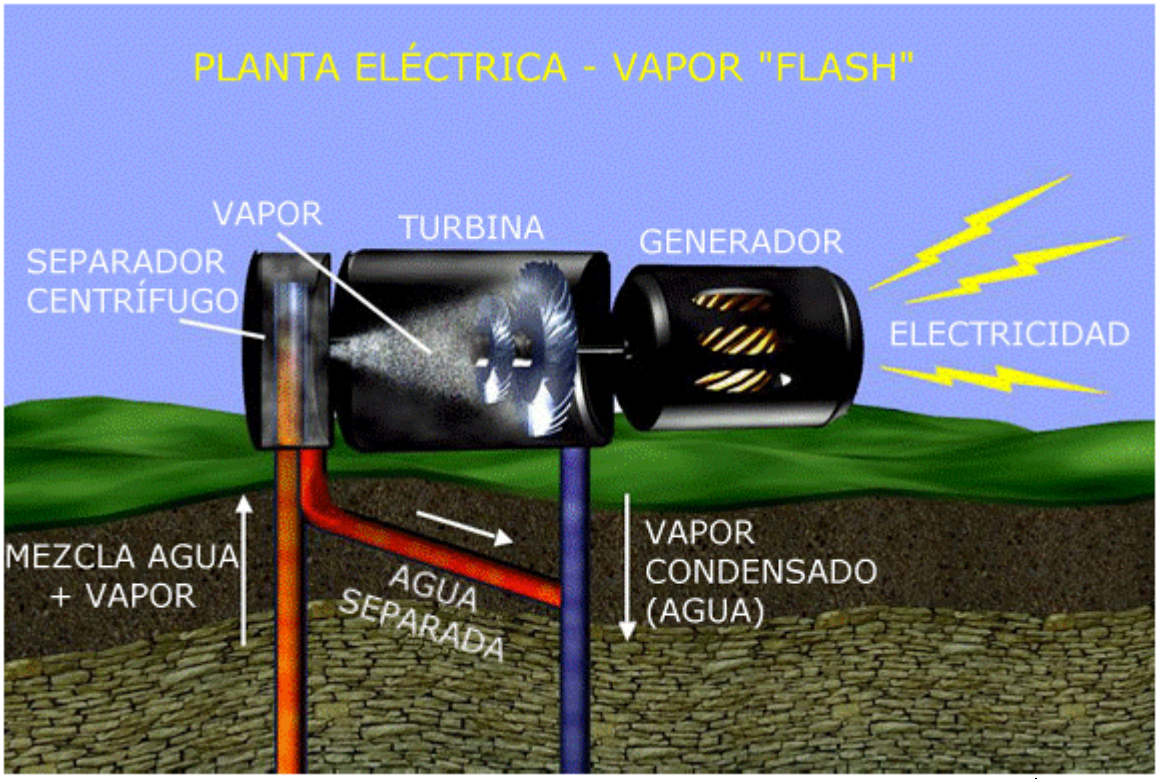


Figura 6.4. Esquema de un turboalternador funcionando con vapor "*flash*". El agua separada puede tener utilización antes de ser reinyectada al acuífero. (©*2000 Geothermal Education Office*).

Con ello se consigue mejorar la calidad del vapor, elevando así el rendimiento de la turbina y ahorrando recursos económicos en el mantenimiento y operación de la misma. Es el llamado proceso "*flash*" simple, que da nombre a las centrales de este tipo. Existe otro procedimiento para conseguir vapor seco, que consiste en "secar" artificialmente el vapor de procedencia geotérmica, mediante cualquiera de los procedimientos clásicos (quemando combustibles fósiles), aunque con ello se pierde gran parte del rendimiento económico del proceso, aparte de incorporar un nuevo tipo de energía. Si el vapor seco y recalentado por cualquiera de los procedimientos mencio-

nados más arriba, se inyecta en la turbina en dos fases, al principio y en un punto intermedio, se obtendrá lo que se conoce como una central de doble "*flash*".

Pero, de nuevo, el análisis no puede simplificarse tanto. Aún considerando todo el vapor procedente del yacimiento geotérmico de alta temperatura, debe volver a considerarse la calidad del vapor que llegará a la turbina. En el subsuelo, las aguas subterráneas circulan a través de estratos geológicos, arrastrando o disolviendo algunas pequeñas partículas de los componentes de dichos estratos. Todos estos materiales que transportan las aguas pueden considerarse como auténticos "venenos" para los álabes de la turbina, haciendo incluso inviable el proceso de producción eléctrica por los elevados costes de mantenimiento y operación que esto acarrearía. En la Foto 6.1 puede verse un ejemplo de una central de este tipo.

Foto 6.1. Planta de ciclo "*flash*" en Japón. El agua separada se reinyecta directamente al entorno del acuífero para no rebajar demasiado la temperatura del mismo. (©*2000 Geothermal Education Office*).

Otro serio inconveniente para el funcionamiento en ciclo abierto es la emisión de vapor a la atmósfera o a los cauces fluviales una vez licuado. Son muy escasos los yacimientos geotérmicos en los que la calidad de las aguas permite su incorporación al medio ambiente vital

de los seres vivos. Las sales que porta el agua, bien disueltas, bien en suspensión, se incorporarían también a ese medio ambiente, con gran riesgo de contaminación en una buena parte de los casos. La contrapartida es la reinyección en el mismo acuífero del que proviene el vapor, lo que obliga a perforar para ello un pozo, con el consiguiente gravamen económico.

6.2. CIRCUITO CERRADO O CENTRALES DE CICLO BINARIO

Existe una sencilla manera de evitar que el vapor de origen geotérmico circule por el interior de la turbina, como ilustra la Fig. 6.5. Como puede apreciarse en ella, el vapor de origen geotérmico se emplea para calentar un nuevo fluido, hasta convertirlo en vapor que, ahora libre de impurezas, alimentará en circuito cerrado una turbina. De esta forma se consigue mejorar el rendimiento del grupo turboalternador, desde el punto de vista de la eficiencia del equipo. Sin embargo, el rendimiento general de la totalidad de la instalación se verá reducido por las evidentes pérdidas de una parte de la energía calorífica en el intercambiador de calor.

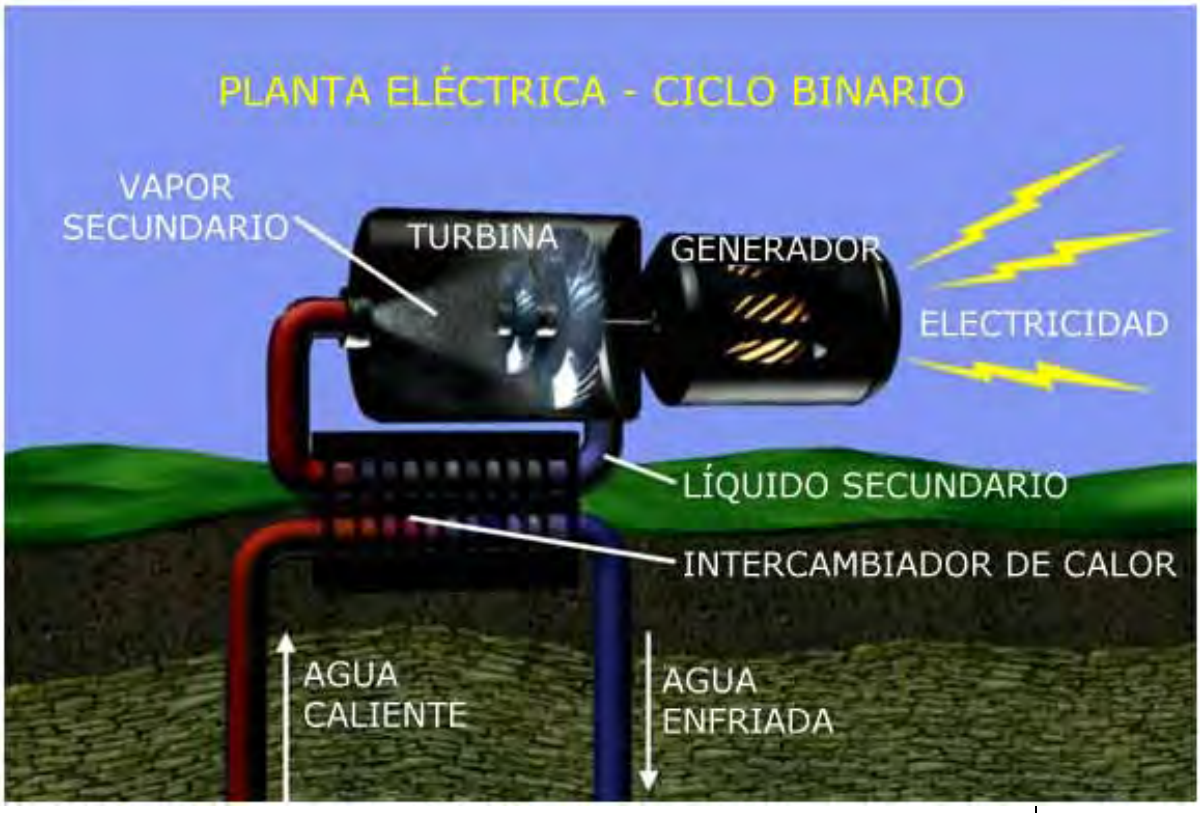


Figura 6.5. Esquema de un turboalternador funcionando en ciclo binario. El fluido del circuito secundario es de bajo punto de vaporización. (*©2000 Geothermal Education Office*).

El denominado ciclo binario, además de proteger la instalación de turbinado con las mejoras de rendimiento citadas, es también ampliamente aplicado cuando el yacimiento geotérmico produce una mezcla de agua-vapor a temperaturas inferiores a las que posibilitan disponer de vapor seco.

Cuando la temperatura del agua geotérmica es suficiente para producir vapor de agua en el circuito secundario (cerrado), el conjunto funcionará como una central convencional de vapor. Lo que ocurre es que, dada la pérdida de calor en el intercambio de los circuitos, es bastante difícil conseguir en el circuito secundario el suficiente vapor seco y a la presión adecuada para el funcionamiento simple del grupo turboalternador.

Por ello, en estos tipos de central con aguas de aporte geotérmico en el límite superior de los yacimientos de media temperatura, el fluido que se suele hacer circular en circuito cerrado, también alternando las fases líquido-vapor, puede ser distinto del agua y debe caracterizarse por disponer de una reducida temperatura de ebullición. Son comunes las mezclas de hidrocarburos altamente volátiles (de bajo punto de ebullición), como propano, n-butano, isobutano o isopentano, que funcionan en el rango de los 35 ºC, en la fase fría, a los 150 ºC de la fase caliente, que será la temperatura del agua de origen geotérmico, que aquí se utilizará en calidad de energía calorífica.

En cualquiera de los casos anteriores, el funcionamiento de un ciclo binario responderá a un esquema como el que se ilustra en la Fig. 6.6, en el que el agua geotérmica tiene su propio circuito, o circuito primario, que intercambia calor a otro circuito cerrado (secundario) de agua u otro fluido más volátil, y un tercer circuito abierto de agua de refrigeración, que toma el agua de la superficie y a ella es devuelta

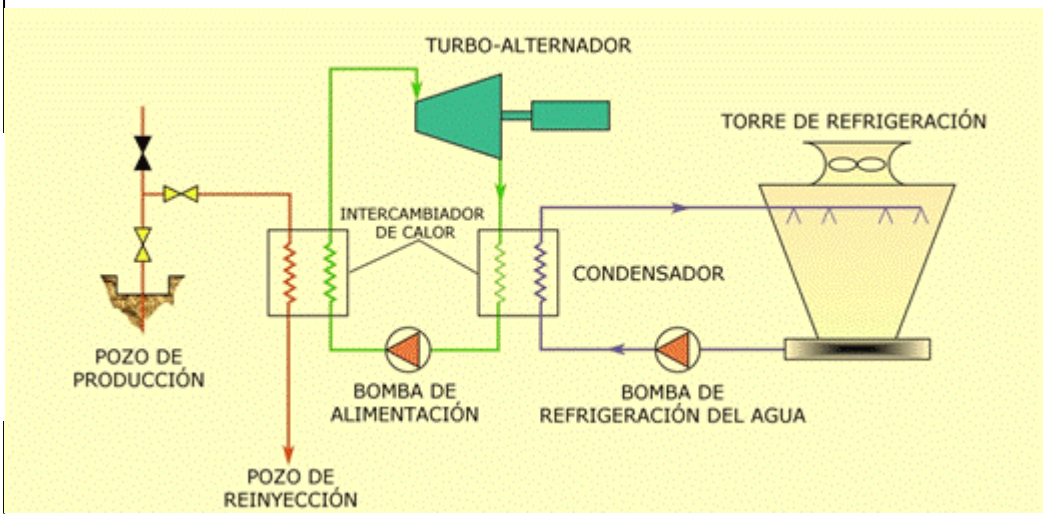


Figura 6.6. Esquema de funcionamiento de una planta eléctrica de ciclo binario. Se pueden ver los tres circuitos de fluidos que intervienen. (Fuente: *Geothermal Energy. Dikson, M.H. y Fanelli, M.*).

sin ningún contacto con aguas subterráneas y, por lo tanto, sin contaminación alguna.

Incorporando a una central diversas mejoras al ciclo termodinámico (*ciclo de Rankine*), como son las inyecciones de vapor recalentado en el proceso de la turbina en dos escalones, la depresión en el condensador y su refrigeración por medio de agua exterior, se consigue la eficiencia máxima en centrales que funcionan en un amplio rango de temperaturas. En la Foto 6.2 puede apreciarse una central de gran versatilidad, que funciona a base de módulos acoplables y en régimen totalmente automático.

Foto 6.2. Planta eléctrica de ciclo binario en Wendell-Amadee, California. Se aprecia su estructura modular. Su funcionamiento es automático, vigilado por control remoto. (©*2000 Geothermal Education Office*).

6.3. PEQUEÑAS CENTRALES ELÉCTRICAS GEOTÉRMICAS

Como se ha visto al estudiar los yacimientos geotérmicos, los de alta entalpía, es decir, los que pueden producir vapor seco a temperaturas de operación superiores a los 300 – 350 ºC, son más bien escasos y reducidos a zonas muy concretas. Sin embargo, son de mayor interés las centrales de potencia más reducida, pues están bastante más extendidas debido a la disponibilidad de yacimientos con un potencial geotérmico de menor entalpía, pero más adecuado a necesidades puntuales.

Según una amplia gama de autores, estas pequeñas centrales eléctricas geotérmicas, de hasta 5 MW, tienen un grado de viabilidad muy superior a las de potencias más elevadas. Autores como Entingh, apuntan una serie de ventajas que aconsejan su empleo y que se reproducen aquí, por ser de más altas posibilidades, ya que existe un mayor número de yacimientos posibles para su empleo:

- Pueden construirse en módulos transportables de muy baja potencia (100-300 kW), de muy reducido tamaño.
- Se adaptan al tipo de ciclo binario, con temperatura del recurso geotérmico entre 100 y 150 ºC, o centrales de tipo *flash* a 150 ºC.
- Pueden trabajar aisladas, alimentando a un pequeño consumidor desconectado de la red, ya que son muy flexibles, pudiendo trabajar al 25% de su potencia nominal en buenas condiciones.
- Su versatilidad permite un diseño automático muy sencillo, que les confiere un alto grado de funcionamiento autónomo.
- Al ser de baja potencia, su alimentación puede reducirse a un pozo único de alimentación, dos a lo sumo, lo que reduce la operación y los costes.
- La inversión es bastante reducida.

Foto 6.3. Planta eléctrica de ciclo binario y pequeña potencia en Fang, Tailandia. Presenta un mínimo impacto visual y se integra en el paisaje con armonía. (*©2000 Geothermal Education Office*).

En la Foto 6.3 se puede ver una central de ciclo binario de muy pe-

queña potencia, utilizada para una red local de consumidores o consumidor único puntual, que se encuentra prácticamente integrada en el ambiente.

Este es un campo de gran potencial para un futuro inmediato de los yacimientos geotérmicos de este tipo, que son ya relativamente abundantes. Su esquema de funcionamiento respondería al de una central convencional, aunque adaptado a su pequeña potencia, pero que se adapta al que se representó en el esquema de la Fig. 6.6.

6.4. SONDEOS DE EXPLOTACIÓN Y DE REINYECCIÓN

Desde un punto de vista puramente técnico, la ejecución de pozos debe atender a la estabilidad de los mismos. La perforación puede llevarse a cabo por medio de sistemas convencionales, idénticos a los empleados en cualquier labor de investigación geológica o geotécnica, tal y como se aprecia en la Foto 6.4. Como en muchos otros casos (por ejemplo, en perforaciones petrolíferas), el elevado coste de perforar a grandes profundidades requiere una estabilización del pozo para rentabilizar su ejecución con un largo período de explotación.

Foto 6.4. Una perforadora para pequeño diámetro, instalada sobre un camión y empleada en prospecciones, puede ser empleada para los pozos de producción y reinyección de una planta de pequeña potencia. (*©2000 Geothermal Education Office*).

Ello requiere un entubado simultáneo a su perforación, al menos en estratos que presenten facilidad para su erosión, que podría descomponer el estrato y dificultar la extracción del agua, cuando no la misma inutilización del mismo. Se ha hablado ya de las posibles sustan-

cias agresivas o corrosivas en suspensión o en disolución en las aguas de origen geotérmico; por lo tanto, las entubaciones de los pozos deben realizarse con materiales resistentes tanto a la compresión como al desgaste o la corrosión, siendo los más indicados los aceros galvanizados o con aleaciones que refuercen su resistencia.

Son bastante típicas las incrustaciones cálcicas o magnésicas, tanto de carbonatos como de sulfatos, que disminuyen su solubilidad con la temperatura, lo que facilitará su precipitación en los pozos de reinyección, mientras que la sílice, cuya solubilidad no aumenta con la temperatura, será más proclive a decantarse en los pozos de extracción. En cualquier caso, la ausencia de remaches y rebabas en la unión de los tubos, contribuirá a evitar deposiciones e incrustaciones de sales o partículas.

En cuanto a las normativas para la realización de pozos y sondeos, aunque de variadas características según los países, suele estar regulada en función de la utilidad prevista para dichos sondeos, requiriendo permisos, justificaciones y controles, tanto en su ejecución como en su explotación posterior. En el caso de explotación de yacimientos geotérmicos, probablemente a causa de su novedad, en gran número de países no existe una regulación específica al respecto, con lo cual es bastante difícil justificar pozos o sondeos para los que existe, ya de partida, dificultad de clasificación.

Quizá lo más adecuado sea tratar un yacimiento geotérmico como un recurso mineral natural y, en consecuencia, aplicarle la legislación o reglamentación relativa a las explotaciones mineras. Es la norma adoptada por la Legislación francesa la que parece más avanzada en Europa a la hora de encuadrar las explotaciones de recursos geotérmicos. Ello conlleva seguir una serie de procedimientos y precauciones tanto en su ejecución como en su explotación, perfectamente regulados por la Administración, desde la solicitud de perforación, hasta la vigilancia del uso adecuado de la instalación.

En realidad, se trata de explotar un acuífero pero con la característica fundamental de que el agua extraída se devuelve en su totalidad al mismo, salvo en el caso de centrales eléctricas con escape directo de la turbina a la atmósfera, como ya se ha visto, un caso más bien raro, y todos los indicios apuntan a que su práctica tenderá a ser regulada. Se puede pues considerar que, tanto en el caso de circuito abierto como en circuito cerrado, el agua extraída vuelve al acuífero en las mismas condiciones de calidad química.

Existe, sin embargo, una contaminación de las aguas de retorno, si no de índole química, sí de tipo físico o físico-químico, porque las aguas se devuelven a temperaturas inferiores a las de extracción, lo cual constituye, si no una contaminación en sentido peyorativo, sí una alteración del medio geotérmico. Es posible que esa inyección de agua más fría en un yacimiento geotérmico pueda producir alteraciones en el medio ambiente externo, aunque es poco probable si no se han detectado afloramientos de las aguas geotérmicas en cuestión.

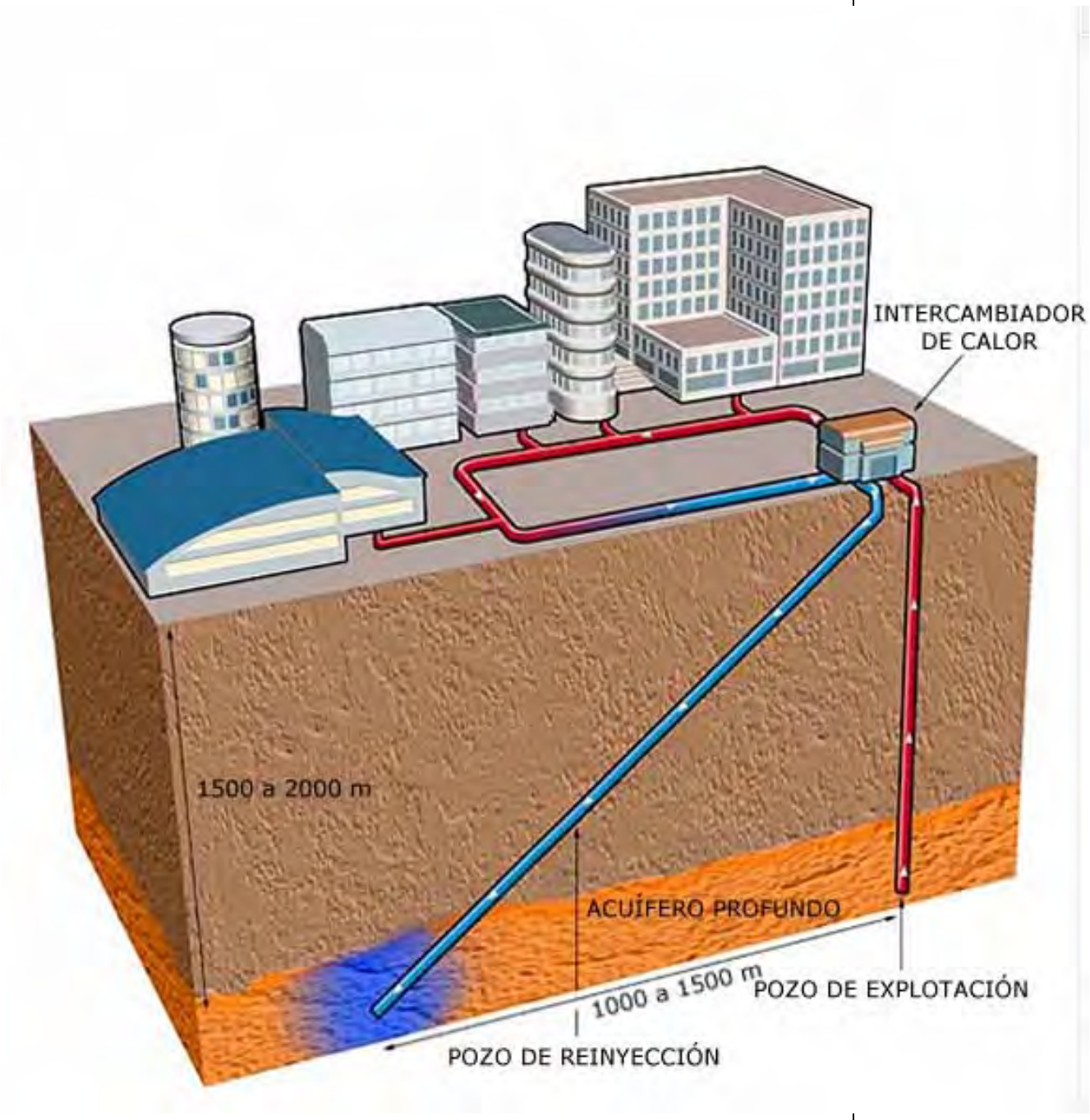


Figura 6.7. El pozo de reinyección ha sido alejado del de producción para mantener la temperatura de la toma de agua.
(Fuente: *Site Geothermie-Perspectives de l'ADEME et du BRGM*).

Lo que sí causa es alteración en el propio yacimiento, sobre todo considerando su explotación, pues puede perder interés como tal si desciende la temperatura del mismo.

Es preciso un riguroso estudio del yacimiento y, sobre todo, del acuífero y del sentido de su flujo para, como se indica en la Fig. 6.7, reinyectar el agua fría (azul) aguas abajo del pozo de extracción de agua caliente (rojo). Se suele recomendar por parte de numerosos autores la conveniencia de que la distancia entre pozos no sea inferior a un kilómetro. También es un criterio seguido por varios autores que el flujo del acuífero sea superior a un valor próximo al de un metro por día en su recuperación. Sea cual sea el criterio adoptado, será necesario cuidar el punto de reinyección del agua en el acuífero en función de su temperatura, pues se corre el riesgo de agotar el recurso desde el punto de vista térmico.

Al considerar la energía geotérmica como renovable, ha de suponerse que el foco de calor, sea cual fuere de los citados en capítulos anteriores y que aporta el calor al acuífero, sea capaz de seguir manteniendo ese aporte que garantice el mantenimiento de la temperatura del yacimiento geotérmico, pese a las reinyecciones de agua a menor temperatura. Esto no constituye una descalificación de la energía geotérmica como renovable; al menos al compararla con otras energías renovables, como, por ejemplo, una minicentral hidráulica fluyente, que se quedaría sin suministro un año de sequía.

6.5. VENTAJAS E INCONVENIENTES DE LA ENERGÍA ELÉCTRICA DE ORIGEN GEOTÉRMICO

Cuando se plantean ventajas e inconvenientes de cualquier instalación, la valoración siempre se hace por comparación con otras instalaciones similares, fundamentalmente en el capítulo económico. Para realizar dicha comparación en el caso que nos ocupa, es preciso recordar el concepto de COP que se mencionó en el Capítulo 4, aunque ahora aplicado al caso de producción de energía eléctrica. En este concepto, podrá plantearse:

$$\eta_{bruto} = E_p / E_c$$

donde
- E_p: Energía producida en la central.
- E_c: Energía calorífica aportada por el agua.
- η_{bruto}: Rendimiento de la central (COP eléctrico).

y un rendimiento neto:

$$\eta_{neto} = E_p - E_{aux} / E_c$$

donde E_{aux} es el consumo eléctrico en la planta en servicios auxiliares.

La energía consumida se centra principalmente en la necesaria para el bombeo del agua geotérmica desde el pozo de producción, aunque habrá de tenerse en cuenta el bombeo de los ciclos secundario y de refrigeración, así como el posible recalentamiento intermedio del vapor en las centrales de ciclo "*flash*" y los consumos clásicos en maquinaria de cualquier central convencional.

Los valores del η_{bruto} en las centrales con aportación de agua geotérmica a unos 200 ºC pueden variar entre 60-50%, según el tipo de central, y netos de unos cinco puntos menos. Para temperaturas del agua geotérmica del orden de los 170 ºC, el rendimiento neto se sitúa en el 10%; cuando la temperatura del agua del pozo de extracción se acerca a los 100 ºC, el rendimiento neto cae hasta un 6%. Sin embargo, para medir la rentabilidad económica han de tenerse en cuenta otros factores.

La diferencia entre las centrales térmicas convencionales y las de alimentación de aguas geotérmicas es que estas últimas prescinden de la caldera de producción de vapor. La inversión que sustituye a la caldera se centra en los pozos de producción y de reinyección, y en la potencia de las bombas de aspiración e impulsión del agua geotérmica. Y este dato puede ser tan variable como lo es el del precio de las calderas de producción de vapor en las centrales térmicas convencionales. Por ejemplo, realizar dos sondeos a poca profundidad relativa (1.500 m) y la bomba necesaria de extracción, es bastante más barato que una caldera de carbón pobre (2.800-3.000 cal/kg), que puede alcanzar 100 m de estructura para garantizar suficiente superficie de intercambio de calor. Sin embargo, dos sondeos profundos (3.000 m) y sus bombas correspondientes resultan mucho más caros que una caldera de gas natural o de un carbón de alto poder calorífico.

Por todo esto, es muy difícil deducir una ventaja económica de las centrales geotérmicas sobre las convencionales. Como datos orientativos, aunque deben utilizarse con mucha precaución, y usando datos promedios, una central geotérmica requiere una inversión del 150% de una de gas, el 120% de una de fuel-oil, el 100% de una de carbón

de alto poder calorífico, el 60% de una de carbón pobre y el 10-15% de una nuclear.

Las ventajas con respecto a las otras comienzan a partir de estos puntos:

- Menores gastos de mantenimiento y operación.
- Reducción de la plantilla de operación-mantenimiento (prescindiendo de su componente social).
- Versatilidad para montaje por módulos.
- Limpieza ecológica, sin vertidos a la red hidrográfica.
- Producción más limpia. Con rendimientos del 60-50%, la contaminación se reduce al 33-20% de la de las centrales convencionales.
- Mayor eficiencia en funcionamiento a carga reducida, sobre todo en las que se han definido como de pequeña potencia.
- Simplicidad de regulación.
- Se acomodan mejor a redes particulares o consumidores locales, con menores pérdidas que las acopladas a redes generales.

Sus inconvenientes nacen de la propia esencia de los yacimientos geotérmicos sobre los que se asientan:

- Los yacimientos ocupan una reducida extensión sobre la superficie terrestre, por lo que no pueden ser muy abundantes.
- Las centrales han de situarse a pie de yacimiento, pues el vapor perdería gran eficiencia en transportes largos, lo que refuerza el inconveniente anterior.
- Las garantías de estabilidad y funcionamiento de los pozos conllevan inversiones suplementarias. Son muy difíciles de reparar.

En cualquier caso, las ventajas parecen superar con creces a los inconvenientes, y es previsible que la tecnología aporte nuevas soluciones a perforaciones profundas e incida en investigaciones de nuevas posibilidades de extracción de aguas geotérmicas, por lo que es de esperar un futuro halagüeño para este tipo de energía que, por encima de todo, se alza como la más limpia y aséptica de las actuales.

6.6. LA PRODUCCIÓN ELÉCTRICO-GEOTÉRMICA EN EL MUNDO

Es bastante indicativo el nivel de crecimiento de la potencia eléctrica

instalada de origen geotérmico, como puede verse en la Tabla 6.1, en la que puede apreciarse de modo general que dicha potencia casi se ha duplicado entre 1990 y 2005.

Tabla 6.1. Capacidad de producción instalada.

País	1990 MW_e	1995 MW_e	2000 MW_e	2005 W_e
Alemania	0,00	0,00	0,00	0,20
Argentina	0,67	0,67	0,00	0,00
Australia	0,00	0,17	0,17	0,20
Austria	0,00	0,00	0,00	1,00
China	19,20	28,78	29,17	28,00
Costa Rica	0,00	55,00	142,50	163,00
EE. UU.	2.774,60	2.816,70	2.228,00	2.544,00
El Salvador	95,00	105,00	161,00	151,00
Etiopía	0,00	0,00	8,52	7,00
Filipinas	891,00	1.227,00	1.909,00	1.931,00
Francia (Guadalupe)	4,20	4,20	4,20	15,00
Guatemala	0,00	0,00	33,40	33,00
Indonesia	144,75	309,75	589,50	797,00
Islandia	44,60	50,00	170,00	322,00
Italia	545,00	631,70	785,00	790,00
Japón	214,60	413,71	546,90	535,00
Kenia	45,00	45,00	45,00	127,00
Méjico	700,00	753,00	755,00	953,00
Nicaragua	35,00	70,00	70,00	77,00
Nueva Zelanda	283,20	286,00	437,00	435,00
Papua Nueva Guinea	0,00	0,00	0,00	39,00
Portugal (Islas Azores)	3,00	5,00	16,00	16,00
Rusia (Kamchatka)	11,00	11,00	23,00	79,00
Tailandia	0,30	0,30	0,30	0,30
Turquía	20,60	20,40	20,40	20,40
TOTAL	**5.831,72**	**6.833,38**	**7.974,06**	**9.064,10**

Nota: MW_e = Megavatios eléctricos.

Fuente: *IGA. International Geothermal Association. 2007.*

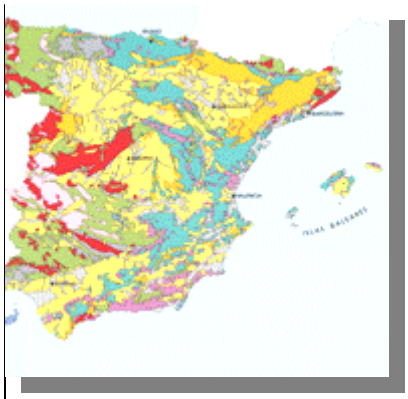
Hay crecimientos espectaculares a nivel relativo, aunque en valores absolutos muy reducidos, como Rusia o Islandia. Sin embargo, potencias como Estados Unidos o China mantienen unos valores bastante constantes, cuando no en franca recesión. El resto de países mantiene un crecimiento discreto, en general, salvo excepciones que habrá que considerar como tales.

Es de esperar que un gigante de la producción, como es China, recién despertada a la organización de consumo y tecnología occidentales, pronto se vea inmersa en un crecimiento más substancial. Casos de grandes potencias, como Alemania o el Reino Unido (que no llega a aparecer en la tabla), no son de extrañar en absoluto. Cuando se pasó revista, en el Capítulo 3, a la distribución de los yacimientos de alta entalpía sobre la superficie de la Tierra, se presentaba un mapa global de distribución de dichos yacimientos.

Es bastante relevante la coincidencia de los yacimientos que allí se presentaban con la distribución de las centrales geotérmicas, que se puede apreciar en la Fig. 6.8, y que es la pauta fundamental que, como ya se ha mencionado, constituye una de las grandes limitaciones para la utilización de este tipo de energía eléctrica.

Figura 6.8. Distribución mundial de plantas de producción eléctrica de origen geotérmico. (©*2000 Geothermal Education Office*).

La realidad es que este tipo de energía ni siquiera alcanza el 1% de la energía eléctrica producida en el mundo. Quizás en este campo, a un nivel lo más global posible, haya que apostar por centrales de pequeña potencia, como las mencionadas en el apartado 6.3, con consumidores locales, y no tender a incorporar estas centrales en grandes redes estatales, donde su operatividad se verá oscurecida por sistemas demasiado estrictos de uso y tarifa.



7 LA ENERGÍA GEOTÉRMICA EN ESPAÑA

La situación del uso de la energía geotérmica en España se puede resumir en muy pocas palabras:

El número de bombas de calor geotérmicas instaladas en el país en el año 2006, según fuentes del sector, era de alrededor de 300. La mayoría se encontraban en Cataluña, principalmente en viviendas residenciales de nueva construcción.

La potencia instalada para utilización de calor geotérmico en el año 2005, era de 22,28 MW_t, ascendiendo la energía empleada a 347,24 TJ.

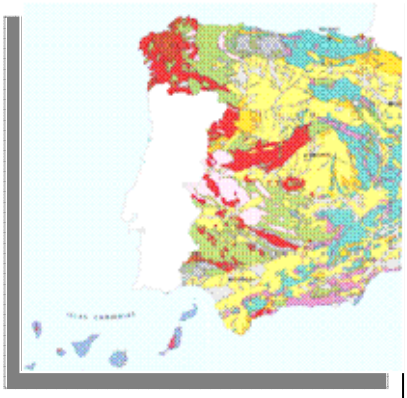
La potencia instalada para producción de energía eléctrica de origen geotérmico es nula.

La conclusión a la que se llega es que la aportación de la energía geotérmica al consumo de energía primaria en España es insignificante. En el año 2004 era del 0,01%, y actualmente será menor, pues en los últimos años se ha producido un espectacular crecimiento de la energía eólica y de la energía solar, térmica y fotovoltaica, mientras que la energía geotérmica ha permanecido estancada.

En los apartados siguientes se intenta buscar explicación al escaso aprovechamiento que se hace en España de los recursos geotérmicos de muy baja temperatura, y se expone una visión resumida del conjunto de los recursos geotérmicos de más de 30 ºC de temperatura que, por su pequeña relevancia, se han agrupado en un solo apartado sin diferenciación de temperaturas.

7.1. ENERGÍA GEOTÉRMICA DE MUY BAJA TEMPERATURA

Resulta extraña la escasa implantación que tienen las bombas de calor geotérmicas en España, alrededor de 300, aún más si se compara, no ya con los países del norte de Europa, con inviernos muy fríos, sino con nuestro vecino Francia, de clima más benigno, que con 28.500 unidades, en 2005 ocupaba el cuarto lugar dentro de la Unión Europea, por detrás de Suecia, Alemania y Austria.



Si hubiese que señalar los motivos, se podrían apuntar entre otros:

Clima y población: la mayor parte de la superficie interior de España está sometida a un clima continental con inviernos largos y fríos, con veranos frescos en el norte y cálidos en el sur. Las mayores concentraciones de población se dan, principalmente, en Madrid y su área de influencia, y una parte importante de la misma, la Meseta Norte, está muy despoblada.

Hay mayor número de habitantes en las zonas periféricas e insulares del país, y en ellas se ubican la mayoría de las plazas turísticas, los establecimientos hoteleros y las segundas residencias de las gentes del interior de la Península.

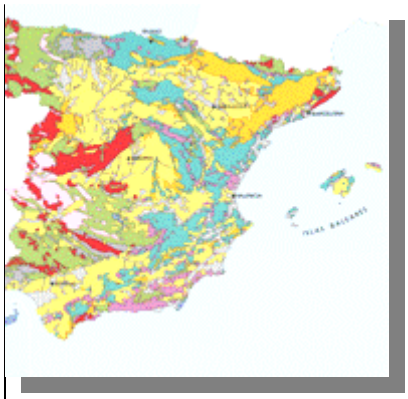
Estas otras regiones cuentan con temperaturas suaves en invierno y elevadas en verano, como en toda la Zona Mediterránea, Zona Atlántica Andaluza e Islas Baleares, o con temperaturas suaves todo el año, ya sea con precipitaciones abundantes, como en Galicia y la Zona Cantábrica, o con precipitaciones escasas, como en las Islas Canarias.

El periodo de utilización de calefacción en muchos hogares es muy corto, y la refrigeración o aire acondicionado, hasta hace relativamente pocos años, se ha considerado un lujo por una gran mayoría de españoles.

Falta de promoción: la gran demanda de bombas de calor geotérmicas habida en los países del centro y norte de Europa en los últimos años ha originado que los principales fabricantes de Suecia, Estados Unidos, Francia e Italia, no hayan tenido capacidad de exportación a nuestros país hasta hace pocos años. Las primeras bombas de calor geotérmicas empezaron a instalarse en España en 2000-2001.

Poco interés: por parte de los promotores inmobiliarios, y por parte de los compradores de vivienda nueva, más preocupados por la evolución del "euribor" que por la reducción de las emisiones de CO_2 a la atmósfera, y no dispuestos a ver incrementadas sus hipotecas con el coste adicional, no desdeñable, que representa una instalación para aprovechamiento de energía geotérmica de muy baja temperatura.

Falta de apoyo institucional: los organismos competentes de la Administración Central han apoyado la construcción de parques eólicos y solares fotovoltaicos, y la implantación de paneles solares para la pro-



ducción de ACS en los hogares, llegando a hacerlo obligatorio en los edificios de nueva construcción, olvidándose de la energía geotérmica.

Sólo recientemente se ha producido una inflexión en este aspecto y, actualmente, son muchas las comunidades autónomas que subvencionan parte de los costes de inversión en instalaciones de bombas de calor geotérmicas.

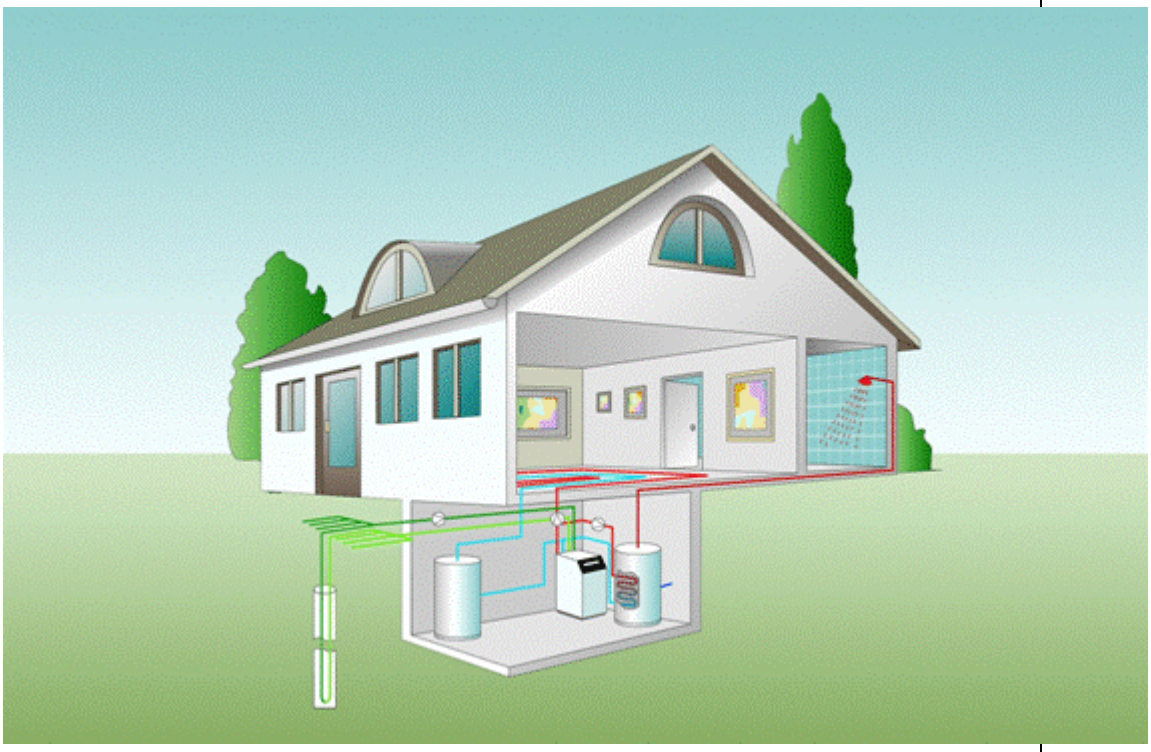
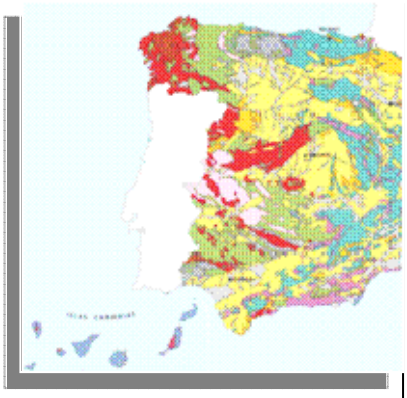


Figura 7.1. Esquema de vivienda unifamiliar con instalación geotérmica de climatización.

Ausencia de reglamentación específica: relativa a la perforación de sondeos para instalar sondas geotérmicas. Instaladores, usuarios potenciales y, particularmente, empresas de sondeos, han visto retrasarse sus proyectos porque la persona responsable de conceder la autorización no disponía de reglamentación pertinente, o porque no la ha considerado de su competencia.

Si a esto se une el poco volumen de mercado que representan las sondas geotérmicas, se comprende la falta de interés de las empresas de sondeos españolas por especializarse y dedicarse a este ámbito.

Éstas, y puede que algunas más, se vislumbran como las principales causas del escaso aprovechamiento de la energía geotérmica de muy baja temperatura en España.



Si la escalada de los precios de los combustibles fósiles continúa, y si las tarifas de la energía eléctrica para consumo doméstico siguen aumentando, la situación puede revertir significativamente en los próximos años.

El clima, apuntado como primer argumento, cuenta a su favor con la radiación solar. La Península Ibérica recibe una radiación media de unos 15 MJ/m^2·d, que calienta la superficie de unos suelos que, en grandes zonas del país, está desprotegido de vegetación, con elevada temperatura ambiental, que recibe escasas precipitaciones anuales y que, cuando se cubre de nieve, lo hace durante un corto periodo de tiempo.

Estas circunstancias propician que el suelo almacene más calor solar que en otros países europeos. Si en los países del centro y norte de Europa aprovechan temperaturas del subsuelo a pocos metros de profundidad de sólo 10 – 12 ºC, e incluso de tan sólo 8 ºC en Suiza, en España, a partir de 5 m de profundidad, la temperatura es de alrededor de 15 ºC con pequeñas variaciones. Entre 15 y 20 m de profundidad, la estabilidad térmica suele ser de 17 ºC todo el año. La inercia térmica condiciona también el desfase temporal, alcanzando el subsuelo los valores más frescos en primavera, tras el invierno, y los valores más cálidos en otoño, tras el verano.

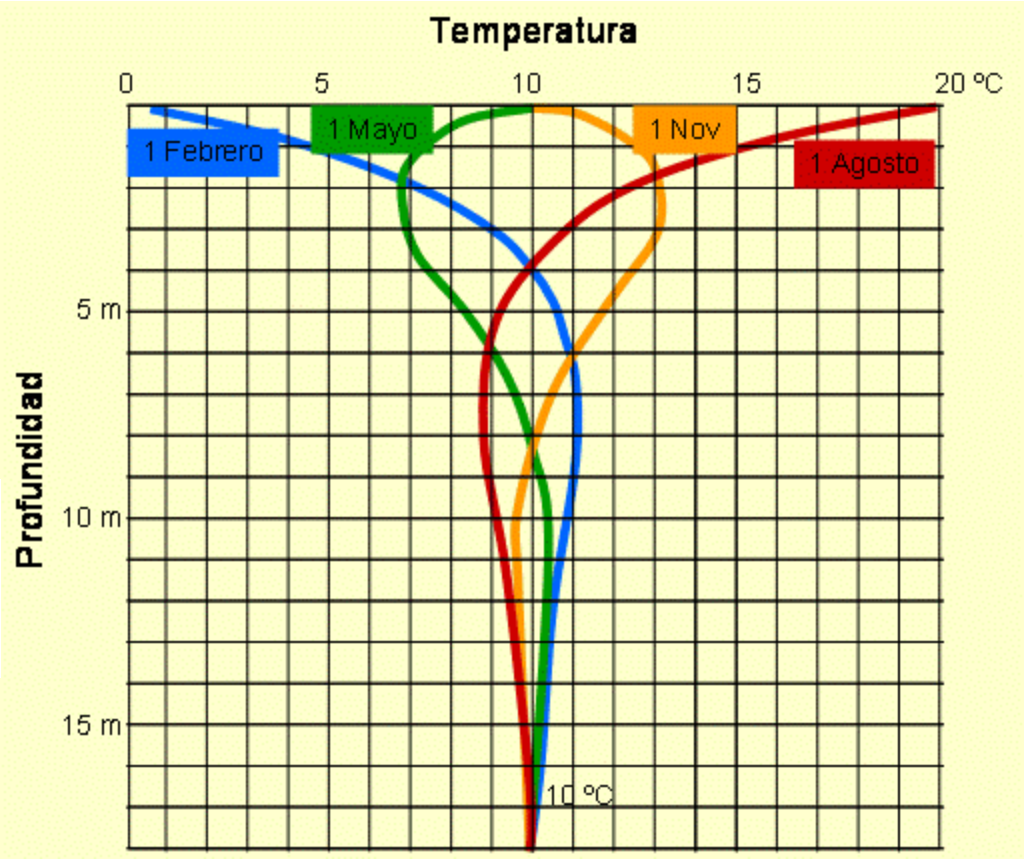
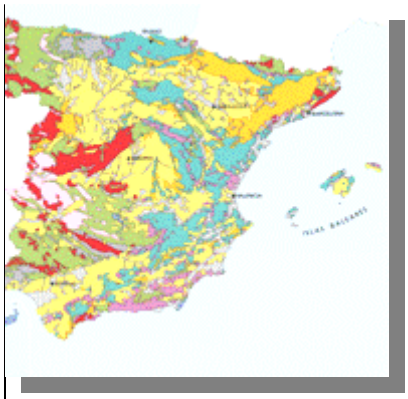


Figura 7.2. Temperaturas en el subsuelo en un emplazamiento registradas en perforaciones y en distintas épocas del año.



Se podría afirmar que el suelo español reúne mejores condiciones para almacenar e intercambiar calor, que el de la mayoría de los países donde las instalaciones de bombas de calor geotérmicas están más implantadas.

La situación de las compañías eléctricas, obligadas a comprar a particulares energía eléctrica procedente de energías renovables, con costes de generación mayores que las que ellas producen de combustibles fósiles, no podrá mantenerse mucho tiempo sin repercutirlo a los consumidores. En la medida que esto ocurra, la energía geotérmica de muy baja temperatura saldrá del olvido en el que parece estar recluida.

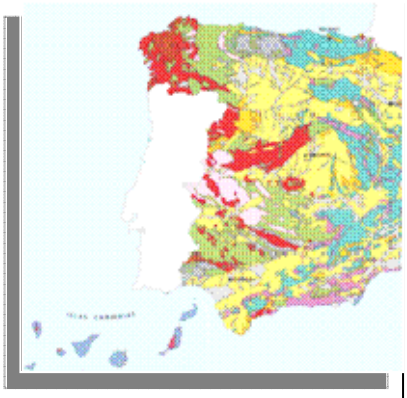
La adaptación y transposición, por parte de los organismos competentes de las comunidades autónomas, de reglamentación y normativa que ya existe en otros países europeos sobre realización de sondeos para aprovechamiento geotérmico, facilitará la labor de instaladores y perforistas, y reducirá la demora que soporta un usuario desde que hace su elección por la energía geotérmica hasta que puede disfrutar de ella.

7.2. ENERGÍA GEOTÉRMICA DE BAJA, MEDIA Y ALTA TEMPERATURA

En España no se explotan recursos geotérmicos de alta ni de media temperatura, con los que se podría llegar a producir energía eléctrica. En la Tabla 7.1 se puede apreciar que el recurso geotérmico de mayor temperatura, 78 ºC, se aprovecha en Montbrió del Camp, en Tarragona, para calefacción de invernaderos.

Esta utilización es la de mayor implantación en España, pues junto con otros invernaderos situados en Cartagena y Mazarrón (Murcia), y en Zujar (Granada), reúnen una capacidad de 14,93 MW_t, que dan calefacción a 10 ha de invernaderos. El resto de usos comprende balnearios en Lugo, Arnedillo (La Rioja), Fitero (Navarra), Montbrió del Camp, Archena (Murcia) y Sierra Alamilla (Granada); y calefacción de hogares y colegios en Orense y en Lérida.

Los motivos de tan escasa utilización de los recursos geotérmicos de más de 30 ºC en España hay que atribuirlos a causas geológicas y económicas, pues investigación de recursos se ha venido realizando en el país desde 1974, por parte del Instituto Geológico y Minero de



España (IGME), y de otras empresas del sector energético que han investigado la posibilidad de explotar recursos de alta temperatura, aunque fuese en yacimientos de roca seca caliente, para producción de energía eléctrica.

Tabla 7.1. Utilización de la energía geotérmica para calor directo en España.

LOCALIDAD	TIPO	TEMPERATURA (ºC)		CAPACIDAD (MW_t)	UTILIZACION ANUAL	
		Entrada	Salida		Energía (TJ/año)	Factor de Capacidad
Lérida	E	58	25	1,24	26,11	0,66
Arnedillo	E+B	50	30	0,92	21,10	0,73
Fitero	E+B	52	30	0,73	14,50	0,63
Lugo	E+B	44	25	0,32	5,01	0,50
Orense	E	75	30	0,94	23,74	0,80
Archena	E+B	48	25	0,96	18,20	0,60
Sierra Alamilla	E+B	52	30	0,74	14,51	0,62
Montbrió	E+B	42	18	1,50	31,65	0,67
Montbrió	I	78	25	1,33	20,97	0,50
Cartagena	I	38	18	12,55	158,26	0,40
Zujar	I	45	20	1,05	13,19	0,40
TOTAL				**22,28**	**347,24**	

Notas:
E = Calefacción de espacios particulares (no incluye bombas de calor)
B = Baño y natación (incluye balneología)
I = Calefacción de invernaderos y suelos
Factor de capacidad = Utilización anual (TJ/año) / Capacidad (MW_t) x 0,03171

(Fuente: *Sánchez-Guzmán, J. y García de la Noceda, C. Geothermal Energy Development in Spain-Country. Update Report. Proceedins World Geothermal Congress 2005*).

La Geología no ha dotado al país de condiciones favorables para ocupar un lugar destacado entre los países geotérmicos de la Unión Europea. En la Fig. 7.3 se adjunta una síntesis geológica de España a escala 1:10.000.000 (en el original de tamaño 15 x 10,5 cm).

En ella se puede apreciar que una gran parte del territorio peninsular está formado por rocas graníticas y metasedimentos antiguos que ocupan la mayor parte de la mitad occidental y noroccidental, y las zonas axiales de la Cordillera Ibérica, los Pirineos y las Cordilleras Béti-

cas. Una gran proporción de estas rocas fueron generadas o transformadas durante los procesos que tuvieron lugar durante la Orogenia Hercínica. En las Béticas hay áreas que se originaron durante la Orogenia Alpina.

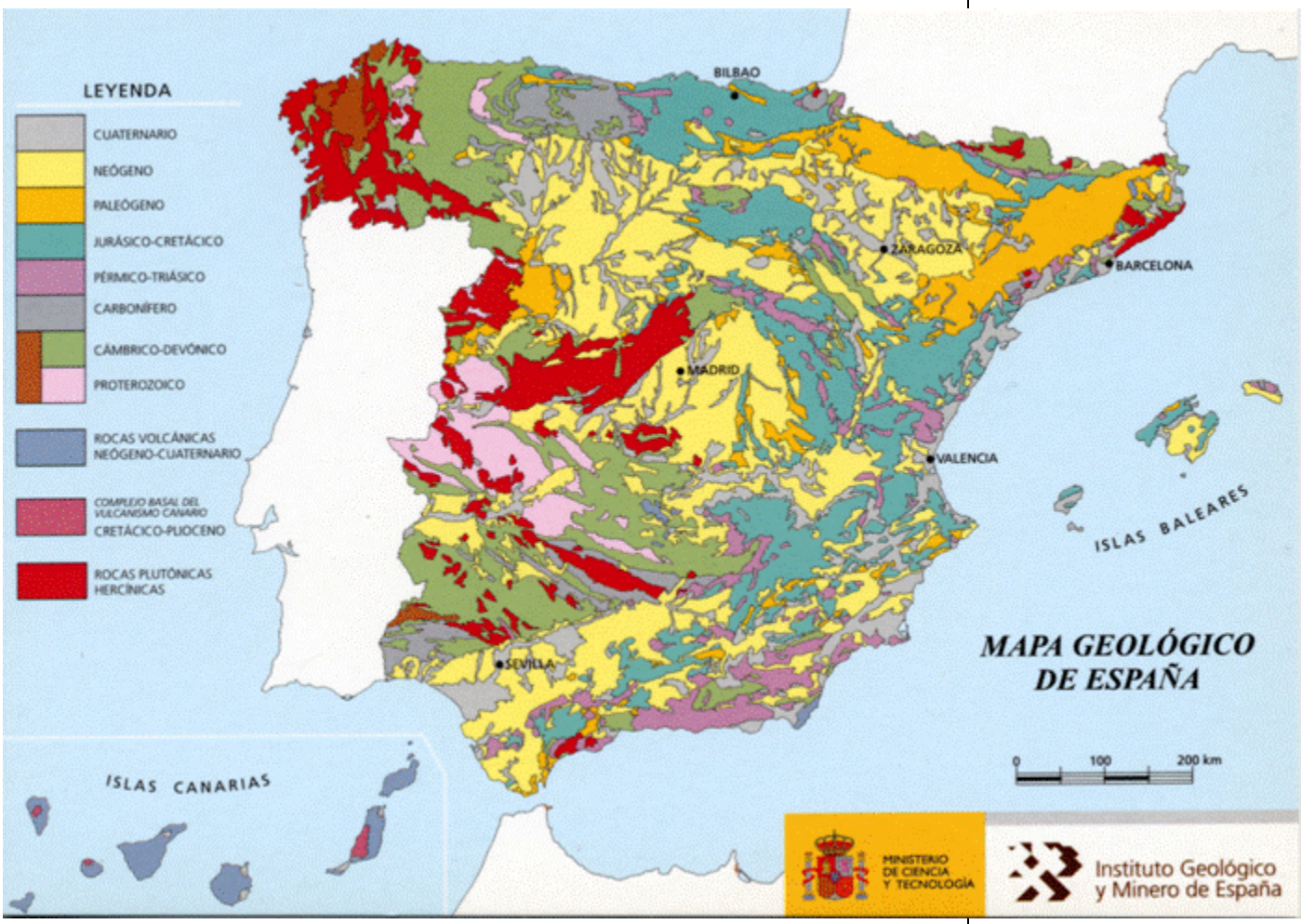
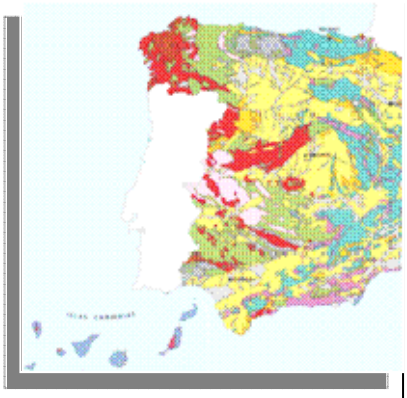


Figura 7.3. Mapa geológico de España. (Fuente: *IGME. 2003*).

El resto son rocas sedimentarias que se han depositado desde el Tríasico, hace unos 250 millones de años, hasta la actualidad, tanto en ambientes marinos como continentales, en diferentes cuencas. Ocupan grandes áreas en el centro, mitad oriental y sur de la Península, y en su mayor parte se encuentran deformadas por la Orogenia Alpina.

Volcanismo reciente, de edad Neógeno, se ha dado en Gerona, Ciudad Real, Murcia y Almería, y la única región con volcanismo actual son las Islas Canarias.

Las manifestaciones geotérmicas existentes se encuentran asociadas a fallas y fracturas en las cadenas montañosas y en las cuencas de

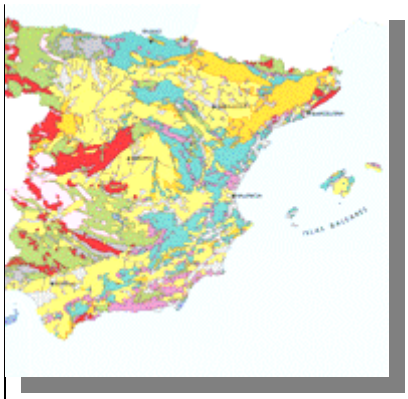


sus flancos, particularmente en las cuencas neógenas de la Cordillera Costero Catalana, en la parte nororiental de la Península, y en las cuencas intramontañosas de las Cordilleras Béticas.

La investigación de recursos geotérmicos por parte del IGME se inició en 1974, financiada con cargo al Plan Energético Nacional (PEN), y abarca hasta bien avanzados los años ochenta. Se centró en yacimientos de baja, media y alta temperatura, sin contemplar posibles recursos de roca seca caliente, materia prácticamente impensable por aquella época.

Hasta 1988 se llevaron a cabo más de setenta proyectos de exploración, llegando a realizar sondeos profundos y estudios de viabilidad técnico-económica para aprovechamiento de los recursos descubiertos en calefacción de viviendas, locales e invernaderos que, en parte, no llegaron a fructificar debido a planteamientos empresariales y financieros inadecuados, pero otros, los situados a menor profundidad, con escasa salinidad, sin reinyección al acuífero y destinados a calefacción de invernaderos, por su menor complejidad de montaje y menores riesgos técnicos y económicos, siguen en explotación.

Figura 7.4. Síntesis de áreas geotérmicas en España. (Fuente: *Calvo Serando, J.P. IGME. Energía geotérmica para el siglo XXI. Cuadernos de Energía nº 14. Octubre 2006*).



Con la transferencia de competencias a las comunidades autónomas y la extinción del PEN, la actividad investigadora que realizaba el IGME declinó a lo largo de los años noventa, pudiendo datar el último proyecto realizado en el año 2002, sobre recursos geotérmicos en Mallorca (Islas Baleares).

Las áreas peninsulares e insulares de mayor potencial geotérmico han quedado plasmadas en un mapa, con indicación de intervalos de temperatura, y profundidades estimadas del recurso geotérmico. Dicho mapa se reproduce en la Fig. 7.4.

Sobre las investigaciones de recursos geotérmicos efectuadas por empresas del sector energético, y sobre sus frutos, no existe información pública relevante.

En la Tabla 7.2. aparecen agrupadas por tipo de yacimiento, las áreas del territorio español que ofrecen mayor potencialidad de recursos geotérmicos, que han sido mostradas anteriormente de forma gráfica en la Fig. 7.4.

Tabla 7.2. Áreas de interés geotérmico en España.

Baja temperatura	Almacenes sedimentarios profundos	Cuenca del Tajo: Madrid
		Cuenca del Duero: León, Burgos y Valladolid
		Área Prebética e Ibérica: Albacete y Cuenca
	Zonas intramontañosas y volcánicas	Galicia: zonas de Orense y Pontevedra
		Depresiones catalanas: Vallés, Penedés, La Selva y Ampurdán
		Depresiones internas de las Cordilleras Béticas: Granada, Guadix, Baza, Cartagena, Mula, Mallorca.
		Canarias: Gran Canaria
Media temperatura		Cordilleras Béticas: Murcia, Almería, Granada
		Cataluña: Vallés, Penedés, La Selva y Olot
		Galicia: áreas de Orense y Pontevedra
		Pirineo Oriental: zona de Jaca-Sabiñanigo
Alta temperatura		Canarias: Tenerife, Lanzarote y La Palma

(Fuente: *García de la Noceda, C. IGME. La Geotermia, una energía renovable de gran potencial. Jornada sobre Energía Geotérmica. Madrid 2007*).

8 UNA VENTANA AL FUTURO

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

Pero condicionantes como los de dependencia de terceros países, precios disparados por demandas de nuevos consumidores, agresión al medio ambiente de estas fuentes de energía y, no en último lugar de importancia, unas fuentes cuyo final está cada vez más presente en la mente de todos, están haciendo recapitular a esta sociedad post-industrial. Es de dominio público una tendencia hacia medios energéticos que cumplan condiciones de limpieza, precio asequible y disponibilidad a largo plazo.

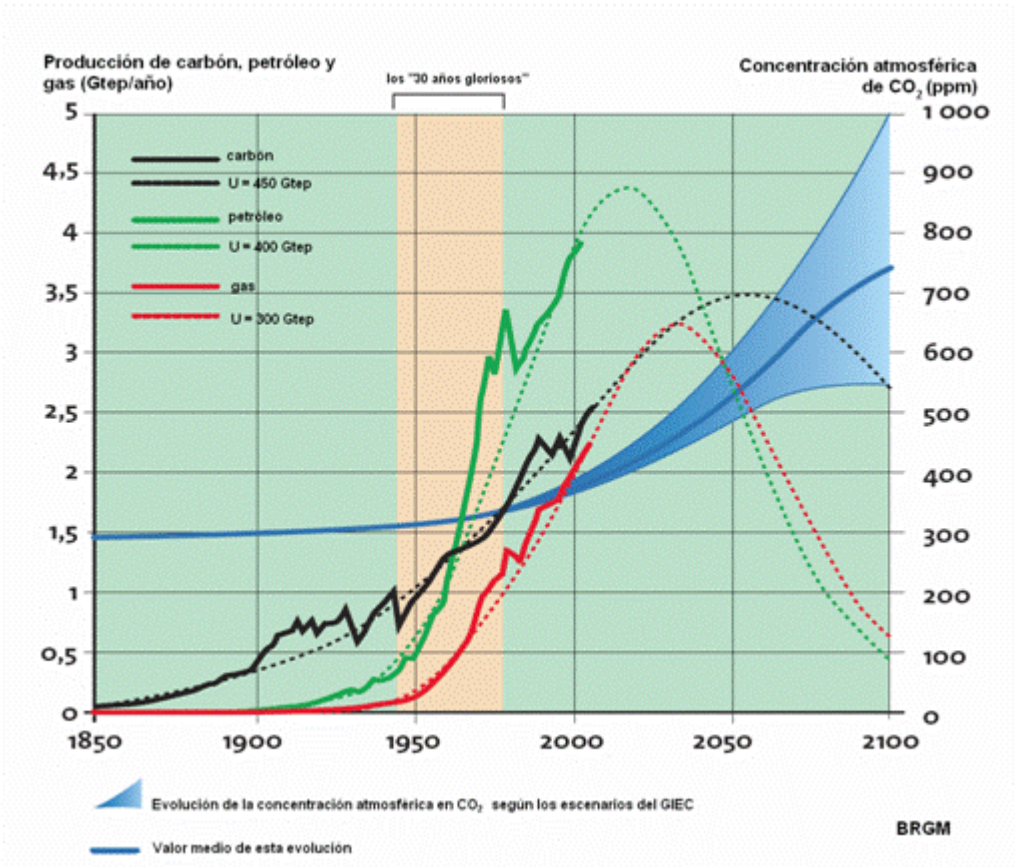


Figura 8.1. Evolución del consumo de combustibles fósiles y concentración de CO_2. (Fuente: *La Géothermie. ADEME - BRGM*).

La respuesta a todas estas pretensiones se dirigen inevitablemente hacia las energías renovables. Y dentro de estas, el marco en el que se desenvuelve la energía geotérmica permite cualquier grado de comparación con el resto de alternativas renovables para la producción de energía.

Si se explota correctamente, se mantiene la temperatura de los acuíferos geotermales u otros recursos geotérmicos con los sistemas de almacenamiento de calor, o alejando los puntos de reinyección, y se sigue una política de control de las explotaciones, la energía geotérmica podría ser la solución a la posible crisis futura en un gran número de países, con carácter indefinido. Por otra parte, las emisiones al medio ambiente que la energía geotérmica produce son mínimas frente a otros combustibles mucho más agresivos.

La energía geotérmica, tanto en su versión para producir energía eléctrica como para utilizar directamente su calor, se muestra altamente competitiva frente a otras energías renovables, ya catalogadas como energías de futuro por diversas asociaciones internacionales. Con mayor razón habría de inscribirse en esta categoría a la energía de origen geotérmico, por sus características de renovabilidad, limpieza y competitividad.

8.1. OPTIMIZACIÓN DE LA UTILIZACIÓN DE LA ENERGÍA GEOTÉRMICA

Tanto en las aplicaciones destinadas a la producción de energía eléctrica, como en los usos directos del calor geotérmico, el agua geotérmica pierde su calor en el proceso y sufre un progresivo descenso de su temperatura en el mismo. Esto no quiere decir que, finalizado el proceso para el cual estaba destinada, el agua no presente ya utilidad.

Es muy posible que la temperatura de salida del agua geotérmica que convierta en vapor el agua del circuito secundario de una central eléctrica, finalice el proceso a una temperatura que sirva para una aplicación de uso directo del calor, desde calefacción hasta aplicaciones a la acuicultura, con aprovechamiento intermedio de procesos industriales de secado de alimentos o maderas, o en balneología termal. En la Fig. 8.2 se puede apreciar el esquema de una instalación en Klamat Falls (Oregon, EE. UU) abastecida de agua geotérmica en cadena.

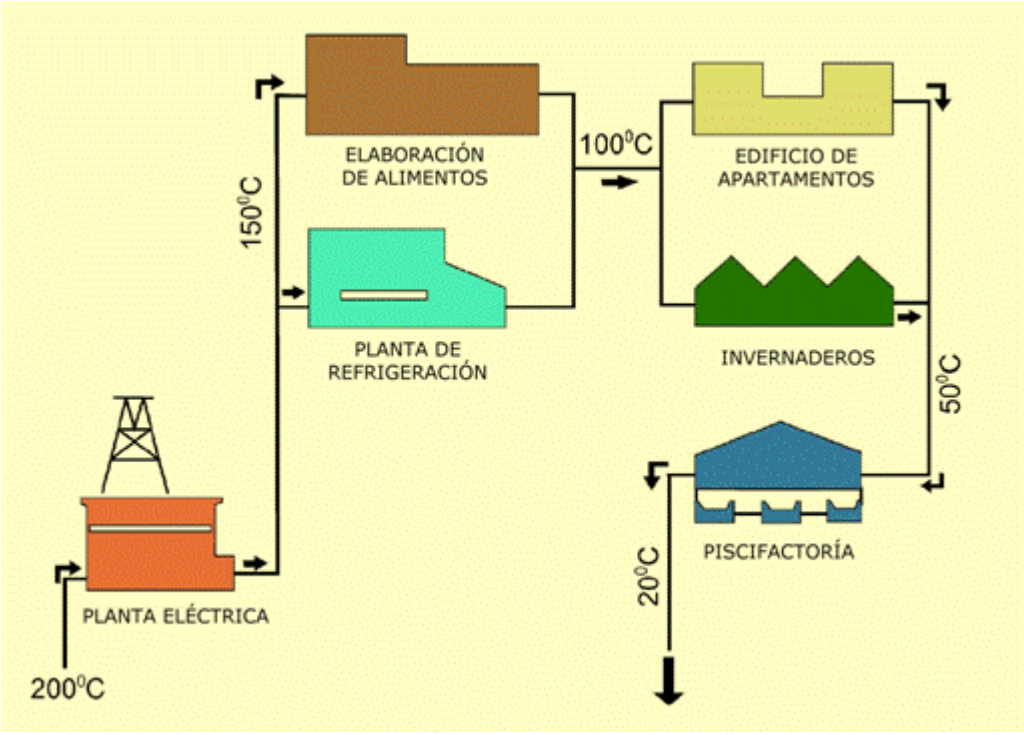


Figura 8.2. Usos en línea de la energía geotérmica. (Fuente: *Geo-Heat Center. Klamath Falls, Oregon. EE.UU.*).

Es evidente el ahorro en costes de inversión que se produce. Uno de los principales factores que contribuye a dicho coste es el precio de los sondeos de captación o alimentación y el/los de reinyección. Contar con la inversión de una sola unidad de extracción-reinyección para varias aplicaciones encadenadas, supondrá un importante ahorro en el conjunto total de la inversión. Del mismo modo, el bombear agua de un solo pozo siempre será más barato que bombear desde varios. Aquí solamente se producirá un ligero sobrecoste para bombear el agua de los circuitos secundarios desde una aplicación a la siguiente, pero siempre será más barato que bombear el agua geotérmica desde las profundidades del recurso.

La rentabilidad de procesos encadenados de este tipo puede llegar a ser importante, incluso aunque la temperatura descienda por debajo de los límites requeridos por alguna aplicación. Es muy posible que sea más rentable "recalentar" este agua de la salida de alguna aplicación antes de pasar a la siguiente, por medio de bombas geotérmicas, que tener que perforar nuevos pozos tanto de extracción como de reinyección.

Existen incluso estudios y aplicaciones en fase experimental en los que se ha colocado una bomba en el fondo del pozo de reinyección. Di-

cha bomba, invirtiendo el sentido de giro de los álabes, se convierte en un generador de electricidad, que puede suplir, en parte, la energía necesaria para extraer el agua geotérmica. El requerir pozos más profundos no implica una menor rentabilidad por costes de extracción, pues se hace más rentable la reinyección, ya que la potencia eléctrica generada siempre será proporcional al producto del caudal por la altura de salto de agua.

Para los países a los que haya caído en suerte disponer de recursos de alta, media o baja temperaturas, este sistema de aplicaciones en cadena augura rendimientos de futuro difícilmente mejorables por cualquier otro tipo de energía renovable.

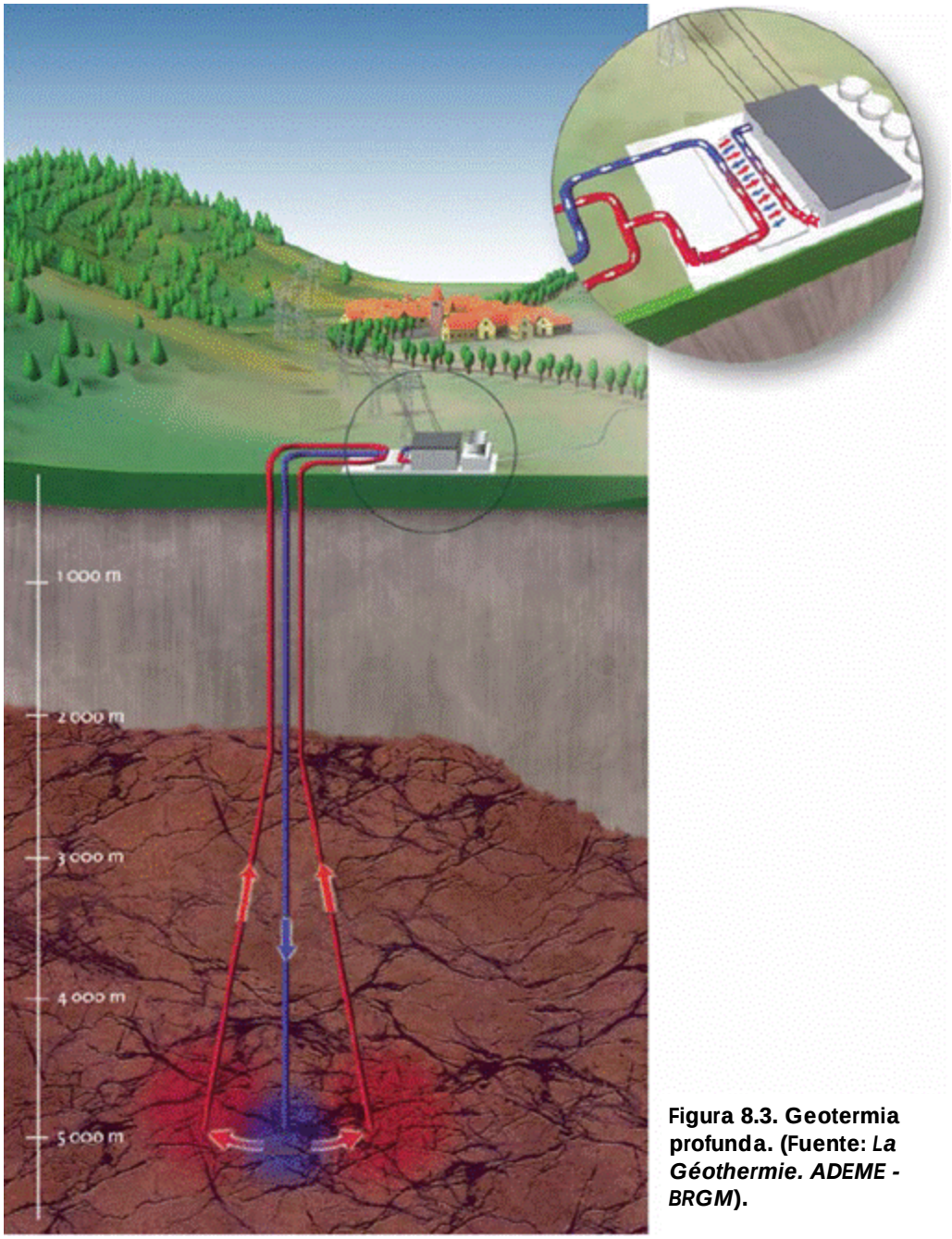


Figura 8.3. Geotermia profunda. (Fuente: *La Géothermie. ADEME - BRGM*).

8.2. FUTURO DE LOS RECURSOS DE MUY BAJA TEMPERATURA

Para la energía geotérmica de muy baja temperatura, su perspectiva de futuro reside, fundamentalmente, en la gran disponibilidad de los recursos, extendidos a la práctica totalidad del planeta. Su mayor proyección a futuro reside en su capacidad de ahorrar otros tipos de energía, mientras que su principal inconveniente se cifra en la baja temperatura.

Si se consigue aumentar esa temperatura del recurso para los funcionamientos invernales y reducirla para las épocas estivales, se habrá dado un gran paso para rentabilizar más el empleo de la energía geotérmica de muy baja temperatura. Una forma es la descrita en el Capítulo 4, al hablar de los sistemas de almacenamiento del calor.

En la Fig. 8.4 se aprecia el clásico sistema de almacenamiento de calor: en época estival, el agua de retorno al recurso se hace a mayor temperatura que la de captación de los pozos interiores, por lo que se devuelve a los exteriores; en época invernal, el agua retorna más fría, por lo que se devuelve a los pozos interiores que, el verano siguiente, serán de nuevo los de alimentación.

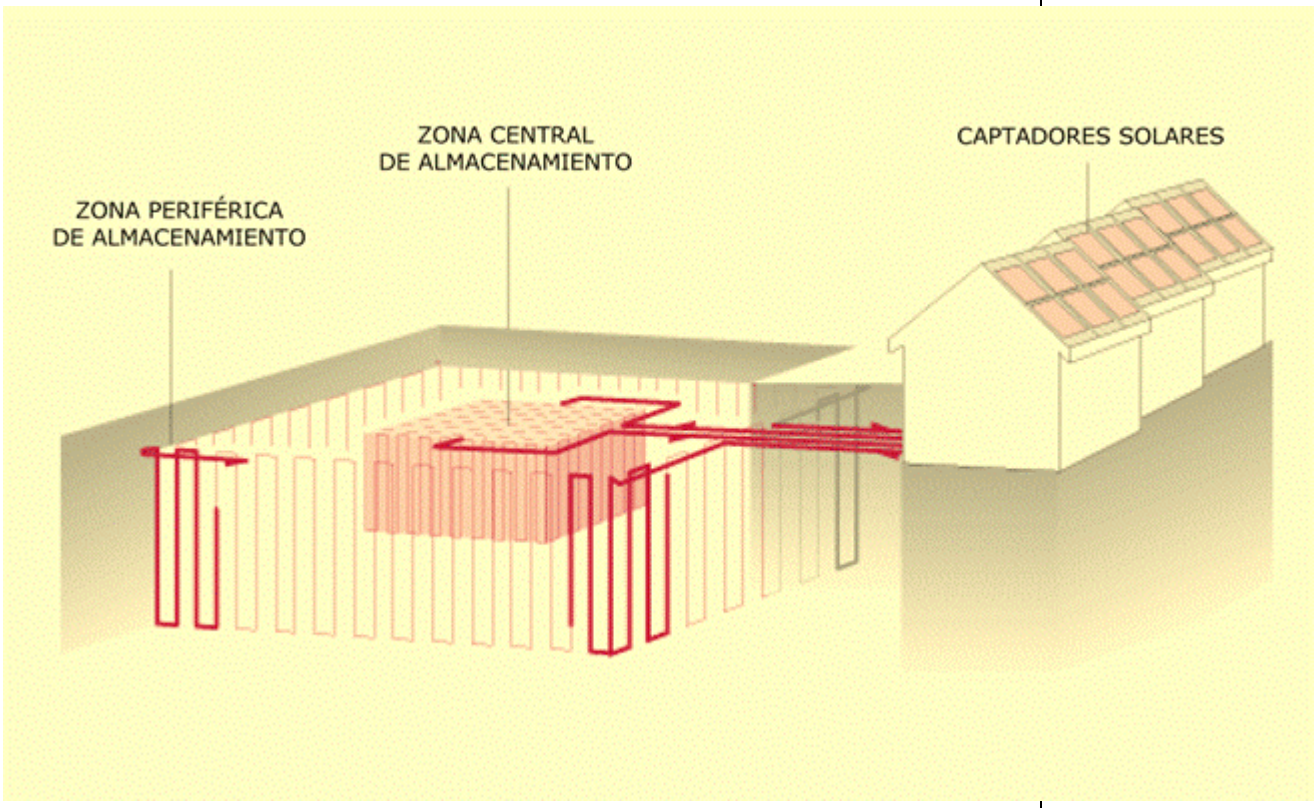


Figura 8.4. Sistema de almacenamiento de calor en el terreno con apoyo de placas solares. (Fuente: *Pahud, D. Geothermal energy and heat storage. 2002*).

En la figura se representa el proyecto de climatización de una vivienda unifamiliar, climatizada con energía geotérmica y con doble campo de intercambiadores de calor, que sirven de almacenamiento de dicho calor (o ausencia del mismo, es decir, de frío). Pero en este proyecto se incluye un nuevo componente al sistema de climatización, a través de unas placas solares que aportan una cantidad de calor que ahorra más energía eléctrica a la bomba de calor, mejorando su rendimiento.

Proyectos de este tipo han superado la fase de experimentación y comienzan a extenderse por toda la geografía. En la Foto 8.1 puede verse una vivienda unifamiliar que responde exactamente al esquema de la Fig. 8.4. Es un pequeño chalet, de 180 m^2 de superficie en la Saboya francesa, a 490 metros de altitud. El sistema completo está compuesto por una bomba de calor, dos intercambiadores verticales de calor de 90 metros de profundidad, un emisor de baja temperatura enterrado horizontal extendido sobre 157 m^2 y, por último, 12 m^2 de captadores solares térmicos, además de calderones de almacenamiento de agua, bombas de circulación y tuberías calorifugadas.

Foto 8.1. Vivienda unifamiliar con placas solares de apoyo a la instalación de aprovechamiento de calor geotérmico. (Fuente: *Trillat-Berdal, V. et al. Synthèse du projet GEOSOL. Université de Savoie. France*).

Esta vivienda unifamiliar ha servido de modelo para mediciones de todo tipo de temperaturas a fin de determinar la idoneidad del sistema. Después de mediciones desde noviembre de 2004 hasta abril de 2006, se ha mostrado altamente efectivo.

- La integración de la energía geotérmica y la solar es operacional:

  ⇒ COP global de todo el sistema de 2,4.
  ⇒ Consumo eléctrico global < 30 kWh/m². año

- La recarga térmica del suelo se muestra efectiva:

  ⇒ Evita el sobrecalentamiento de las placas térmicas solares.
  ⇒ Mejora el COP de la bomba de calor en media estación, aunque sin una ganancia significativa sobre el balance eléctrico anual.

Foto 8.2. Introducción de los intercambiadores en una perforación. (Fuente: *La Géothermie. ADEME - BRGM*).

Este tipo de aplicaciones de los recursos de muy baja temperatura, con mejoras a base de otras energías limpias alternativas, se presentan con unas perspectivas halagüeñas de futuro para el territorio español. La temperatura media del subsuelo en la Península Ibérica es sensiblemente superior a la media europea, donde presenta gran desarrollo este tipo de aplicación. Si se añade a esto la cantidad media de horas de sol en el sur de Europa, se puede concluir que se dispone en territorio español de dos energías limpias, con un potencial compartido, que presentan una de las mejores alternativas de futuro en el campo energético.

Quizás sea preciso actualizar estructuras administrativas para recoger este novedoso potencial pues, donde en Europa (Suecia, Suiza, Francia, Austria, Alemania) ya han recogido legislación y normativas aplicables a este tipo de recursos, en España no se dispone, de momento, de normas de actuación. Será necesario en un futuro próximo disponer de una reglamentación sobre sondeos o tendido de captadores del calor geotérmico, para prever riesgos futuros o agotamiento de potenciales acuíferos con posibilidad de utilización geotérmica.

Por último, el fomento a la inversión en recursos de tecnologías limpias, siempre ha recorrido sus primeros pasos con el impulso de las administraciones competentes en cada caso. Si las energías eólica, solar o mini-hidráulica han dispuesto de ese impulso de la Administración, bien vía tarifa, bien con seguridad de mercado o bien con simples subvenciones, cualquier soporte de estos tipos a la energía geotérmica, sería de gran ayuda para la implantación de una alternativa que, a través de las páginas precedentes, se ha mostrado como una energía renovable de futuro: limpia, competitiva y, sobre todo, abundante.

9 BIBLIOGRAFÍA RECOMENDADA

La bibliografía utilizada para la presente publicación, procede de las siguientes fuentes:

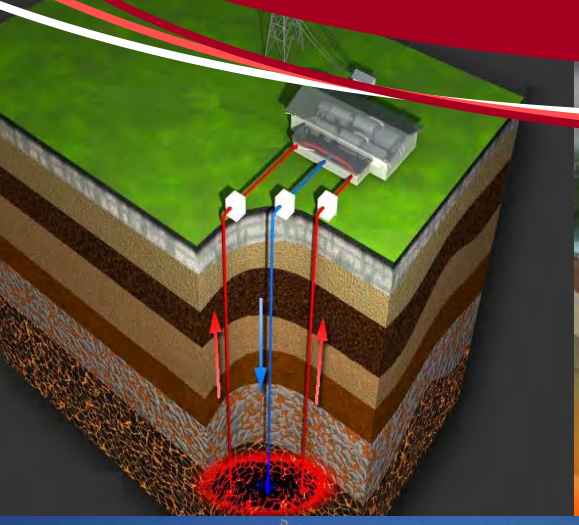
- ADEME-BRGM : www.geothermie-perspectives.fr
- Centre for geothermal research, Switzerland: www.crege.ch
- Climate Master Inc.: //climatemaster.com
- ENERCRET GmbH: //enercret.com
- European Geothermal Energy Council (EGEC): www.egeg.org
- European Heat Pump Association: www.ehpa.org
- Geo-Heat Center, Oregon: //geoheat.oit.edu
- Geothermal Education Office: //geothermal.marine.org
- Geothermal Energy Association: www.geo-energy.org
- Geothermal Heat Pump Consortium: www.ghpc.org
- Geothermal Resources Council: www.geothermal.org
- Geòtics Innova, S.L.: www.geotics.net/esp
- German Geothermal Association: www.geothermie.de
- GIROD Proyectos S.L.: www.girodgeotermia.com
- IDAE: www.idae.es
- INGELCO Ingeniería e Instalaciones: www.ingelco.es
- Instalaciones ALEGRE: www.instalacionesalegre.com
- International Geothermal Association (IGA): //iga.igg.cnr.it
- National Renewable Energy Laboratory: www.nrel.gov
- Natural Resources Canada: www.retscreen.net
- New Zealand Geothermal Association: www.nzgeothermal.org.nz
- Sandia National Laboratories: www.sandia.gov/geothermal
- Swiss Geothermal Society: www.geothermie.ch
- U.S. Department of Energy (DOE): www.eere.energy.gov/geothermal

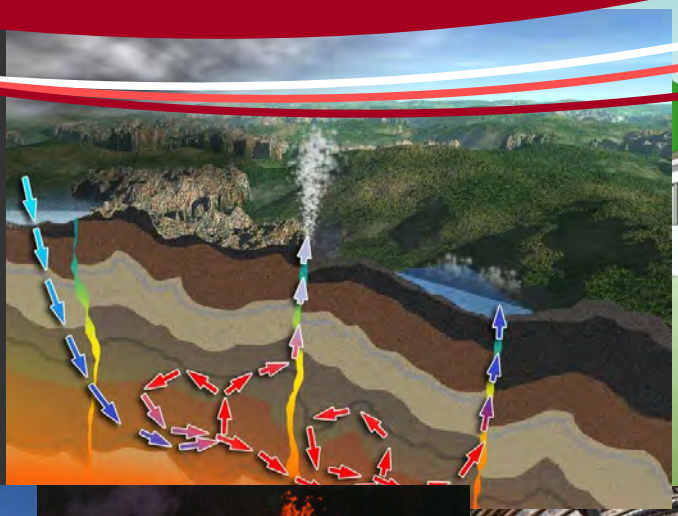
Fundación de la Energía de la Comunidad de Madrid

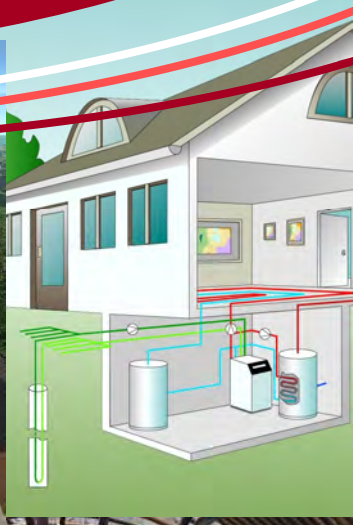
www.fenercom.com

Energy Management Agency

Intelligent Energy Europe







IDAE Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía