

LOS RECURSOS GEOTÉRMICOS

Geothermal Resources

Celestino García de la Noceda (*)

RESUMEN

Se presenta una visión general sobre los recursos geotérmicos, su origen, los conceptos básicos de yacimientos geotérmicos y sus tipos, su investigación y aprovechamiento, así como una panorámica general de la energía geotérmica en el mundo y en España y sus perspectivas de futuro.

ABSTRACT

A general view on the geothermal resources is presented: their origin, the basic concepts of geothermal fields and their classification, their investigation and utilization, as well as a general panoramic of the geothermal energy in the world and Spain and its perspective for the future.

Palabras claves: geotermia, energía geotérmica, yacimiento geotérmico

Keywords: geothermics, geothermal energy, geothermal field

INTRODUCCIÓN

La geotermia es, con toda probabilidad, la gran desconocida entre las denominadas energías renovables. Las razones para ese desconocimiento pueden estar relacionadas con su origen y procedencia, de ese subsuelo igualmente poco conocido. También se esgrime como causa del desconocimiento, esa aparente falta de proximidad. El sol, el viento, las mareas,... se aprecian como cercanos; de la geotermia, sin embargo, se ignora que los manantiales termales, ampliamente distribuidos en el territorio y suficientemente conocidos, no son sino indicios de la existencia de recursos geotérmicos ya que constituyen en muchos casos aliviaderos de los yacimientos geotérmicos. Que la geotermia es una energía próxima ya lo apreciaban incluso los primeros pobladores del planeta Tierra cuando se protegían en las cavernas de los rigores del clima aprovechando la estabilidad térmica de las mismas. El aprovechamiento de las aguas termales es bien conocido ya desde época romana, tal como atestigua la toponimia de muchas poblaciones (Caldas, Caldes, Escaldes, Baños, Bañuelos,...). Acercar el conocimiento de este recurso energético renovable para que no continúe siendo el gran desconocido, es el objeto que se persigue en los siguientes párrafos.

CALOR DE LA TIERRA Y GRADIENTE GEOTÉRMICO

A lo largo de miles de años, el calor interno de la Tierra y sus manifestaciones en superficie se han considerado como un fenómeno caprichoso de la naturaleza. Lo que sí es un hecho cierto es que la cantidad de energía existente en el interior del globo, en forma de energía calorífica, es inmensa. De

hecho, la distribución de temperaturas de las diferentes capas que conforman el planeta desde las zonas más internas así lo atestiguan. Desde el punto de vista de sus características físicas y muy simplificada, se pueden considerar tres capas concéntricas que forman el globo. Desde el centro de éste, situado a unos 6370 kilómetros de la superficie, se localiza una zona interior denominada **núcleo**, cuyas temperaturas se estiman en más de 5000° C. La capa que rodea al núcleo, se denomina **manto**; tiene unos 2900 kilómetros de espesor y las temperaturas van desde los 4000 hasta los 800-1000° C en su parte más exterior, en donde los materiales que lo conforman tienen un comportamiento fluido. Finalmente, la capa más externa del globo, la **corteza**, tiene un espesor variable entre los 4 y los 40 kilómetros y su temperatura va desde los 800° C en su contacto con el manto hasta los aproximadamente 15° C en la superficie (Fig. 1).

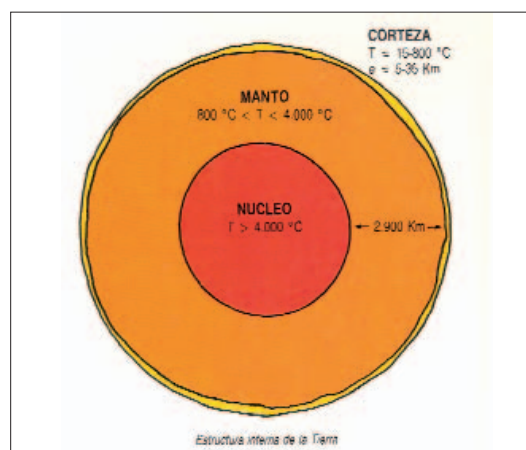


Fig. 1. Estructura interna de la tierra. (IGME, 1985).

(*)Instituto Geológico y Minero de España. C/ Ríos Rosas 23, 28003, Madrid. e-mail:c.garcia@igme.es

Esta estructura en capas con diferentes viscosidades y temperaturas no sólo contribuye a la transmisión del calor interno del globo desde sus capas más profundas, sino que produce fenómenos de transmisión térmica convectiva que implica movimientos de los materiales viscosos que conforman las distintas capas, lo que a su vez produce liberación de calor. La diferencia de temperaturas entre el centro del globo y las diferentes capas implica un flujo continuo de calor desde el interior hacia la superficie; a lo largo de la existencia de la Tierra, se habría producido su enfriamiento si no fuese a causa, entre otras, de la existencia de materiales radiactivos en la corteza terrestre cuya desintegración aporta energía calorífica que mantiene no sólo la aportación permanente de calor a la atmósfera sino que mantiene una elevada cantidad de calor almacenada. Se estima que, tan sólo en los diez kilómetros exteriores de la corteza terrestre, la energía almacenada es del orden unas 2000 veces la energía que producirían las reservas de carbón mundiales (Abad, 1981).

El flujo de calor en la corteza terrestre alcanza un valor medio de $1-1,5 \mu\text{cal}/\text{cm}^2 \text{ seg}$; este valor es el que se encuentra en un 90% de la superficie del globo. Sin embargo, en ciertas zonas del planeta, este flujo es anormalmente elevado, llegando a valores que alcanzan las diez veces el valor medio (Edwards, 1982). Estas zonas coinciden con áreas geológicamente activas en las que existe actividad sísmica, hay o ha habido actividad volcánica reciente o bien se han formado cordilleras en épocas geológicas recientes.

El flujo de calor en la corteza terrestre implica un incremento de temperatura con la profundidad que, para los valores de conductividad térmica de las rocas que conforman la corteza y como valor medio, es de $2-4^\circ \text{C}$ cada cien metros (Fig. 2). Es lo que se conoce como gradiente geotérmico normal, que en zonas anómalas puede superar los $20-30^\circ \text{C}$ cada cien metros de profundidad.

Como antes se ha señalado las zonas de flujo elevado coinciden con áreas geológicamente activas. De hecho, considerando el globo desde un punto de vista mecánico, no se puede olvidar que la litosfera está formada por "placas" que se mueven

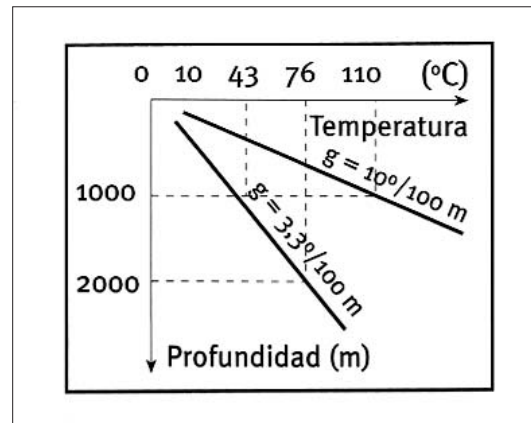


Fig. 2. Gradiente geotérmico. (IDAE-IGME, 2008).

separándose entre sí y flotando sobre el resto del manto que se comporta como un fluido pastoso sujeto a movimientos de convección térmica, porque la periferia del núcleo (rígida) está a más temperatura que el límite más profundo de la litosfera, igualmente rígida.

Como consecuencia de los movimientos de las placas y, sobre todo en sus límites, se produce una aproximación a la superficie del magma del manto, y por tanto, del calor interno, posibilitando los fenómenos de manifestaciones superficiales: mayor flujo, actividad sísmica, formación de cordilleras recientes, actividad volcánica...

Todos estos fenómenos geológicos se producen siempre asociados a distintos tipos de áreas geológicas relacionadas con la citada tectónica de placas (Fig. 3):

- áreas de extensión o separación de placas, en donde existe una generación continua de corteza a partir de magmas ascendentes (caso de las dorsales centro-oceánicas);
- áreas de convergencia de placas, en donde se produce la subducción de una bajo la otra con la consiguiente fusión de corteza y generación de magmas (caso de los arcos circumpacífico);
- áreas de actividad distensiva dentro de una placa, en las que debido al adelgazamiento de corteza

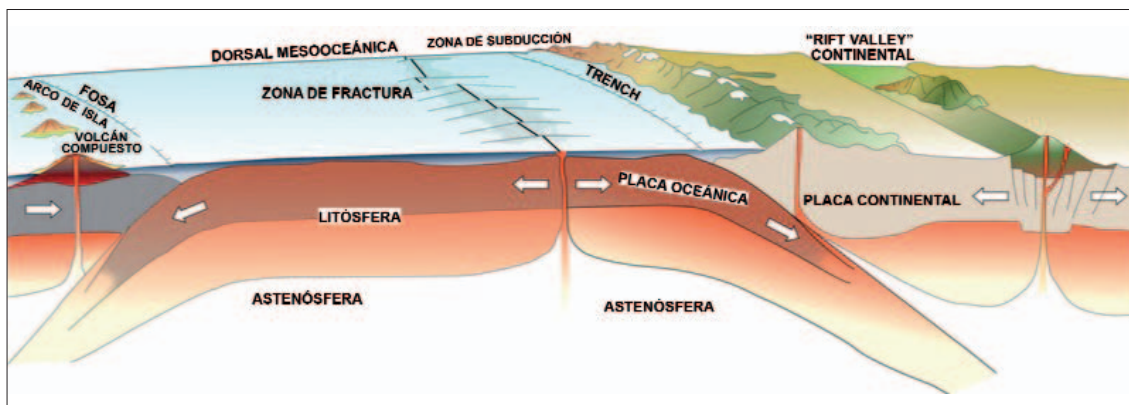


Fig. 3. Implicaciones geotérmicas de la tectónica de placas. <http://iga.igg.cnr.it/index.php>.

producido se pueden originar asimismo ascensos de magmas procedentes del manto (fallas transformantes, que se producen por expansión de los fondos marinos a la altura de las dorsales medio-oceánicas, caso de las fosas africanas, europeas y del medio oeste americano);

- áreas con presencia de fallas de cierta profundidad que motivan el ascenso de fluidos.

De este modo, la generación del flujo calorífico (fundamentalmente el flujo anómalo) está directamente relacionado con el movimiento relativo de las placas litosféricas. Las zonas anómalas se encuentran en regiones de actividad tectónica volcánica (fin de terciario o más reciente) y sísmica: crestas de las dorsales medio-oceánicas, sobre fallas transformantes o sobre áreas internas de las cadenas alpinas. Las zonas de gradiente normal se corresponden con los grandes escudos continentales, dominios externos y plataforma de las cordilleras alpinas-peripacíficas y las vastas llanuras abisales situadas a una media de cuatro mil metros bajo el nivel del mar.

YACIMIENTOS GEOTÉRMICOS. CLASIFICACIÓN

En su más amplio sentido, la energía geotérmica define la energía que, en forma de calor, está almacenada o se genera en el seno de nuestro planeta. En ese mismo sentido, la geotermia es la ciencia que trata del aprovechamiento del calor de la Tierra.

En estas definiciones genéricas no se tiene en cuenta el carácter de la energía geotérmica como recurso energético y que, en este sentido, debe evaluar y sopesar la posibilidad de su utilización por lo que se requiere una clara restricción en su definición. Por ello, cuando se habla de la energía geotérmica se considera la energía calorífica existente en el subsuelo, susceptible de ser explotada económicamente para su aplicación directa en usos de calefacción, industria, agricultura... o bien para su conversión en energía eléctrica, conforme a las tecnologías existentes y aquellas que pudiesen ser desarrolladas en tiempos venideros. Con esta definición se introducen elementos económicos y tecnológicos que afectan claramente a la valorización y cuantificación de los recursos.

Con estas restricciones establecidas, se llega al concepto de yacimiento geotérmico: "cuando en un área geográfica se cumplen las condiciones geológicas y técnicas necesarias para que se pueda explotar la energía geotérmica del subsuelo, se dice que allí existe un yacimiento geotérmico". Aunque la clasificación de los yacimientos geotérmicos debe hacerse de acuerdo con su nivel energético y, por tanto en función de su entalpía, al ser ésta una magnitud de la termodinámica que plantea dificultades para su comprensión, se suele utilizar una magnitud bien conocida como es la temperatura para establecer los distintos tipos de yacimientos.

Teniendo en cuenta únicamente su temperatura, los yacimientos geotérmicos pueden ser (Elder, 1981):

- Yacimientos geotérmicos de baja temperatura: aquellos en los que a profundidades generalmente inferiores a los 2500 metros existen formaciones permeables conteniendo fluidos cuyas temperaturas son del orden de 40-90° C. Por ello, son adecuados para el aprovechamiento directo del calor (calefacción de viviendas, procesos industriales, agricultura, piscicultura...). Estos yacimientos se localizan en zonas estables con gradientes y flujos geotérmicos normales.

- Yacimientos geotérmicos de alta temperatura: aquellos en los que a profundidades técnicamente accesibles, existe un volumen de roca permeable, conteniendo un fluido que puede recorrerla, a una temperatura generalmente superior a los 150° C y que se encuentra sellada o entrapada por formaciones impermeables que impiden el escape del fluido. Son adecuados para la producción de electricidad y se sitúan sobre zonas geológicamente activas y de flujo geotérmico elevado.

Es evidente que esta clasificación tan simple y con varias indeterminaciones puede ser motivo de críticas puristas. Sin embargo una clasificación más precisa exige unas acotaciones geológico-económico-tecnológicas que serían rápidamente invalidadas por criterios de economía-tecnología-demanda local, en cada uno de los casos que se quisiera clasificar. No hay que olvidar que la importancia de la existencia de una fuente de energía está en relación inversa a la existencia de otras fuentes de energía en la misma área.

En este sentido hay que considerar que con recursos geotérmicos de baja temperatura se podría generar electricidad, o que en zonas de gradiente normal se localizan fluidos con temperaturas de 150° C aunque a profundidades generalmente superiores a los 4000 metros.

Sin embargo los logros tecnológicos permiten establecer y considerar otros tipos de yacimientos geotérmicos de interés de los que se señalan a continuación aquellos que disponen de tecnologías maduras o próximas a ellas (IDAE-IGME, 2008):

- Yacimientos geotérmicos de muy baja temperatura: la tecnología de la bomba de calor permite utilizar recursos geotérmicos de muy baja temperatura. En general se podría considerar incluidos en este tipo de yacimientos geotérmicos, todos los acuíferos y el propio subsuelo a escasa profundidad (en general inferior a 250 metros).
- Yacimientos geotérmicos de media temperatura: en los que la temperatura (generalmente entre los 90 y 150° C) permite la producción de electricidad mediante el empleo de fluidos intermedios de bajo punto de ebullición (ciclos binarios). Los ciclos binarios, conocidos ya desde hace décadas, han experimentado un desarrollo importante logrando incrementar sus rendimientos de forma notable, factor que limitaba la valoración de los yacimientos de media temperatura hace tan sólo un cuarto de siglo.
- Yacimientos geotérmicos de roca caliente seca (actualmente incluidos en los denominados sis-

temas geotérmicos estimulados): son aquellos en los que sin previa existencia de fluido (tan sólo una masa de roca a elevada temperatura), mediante técnicas de fracturación artificial e inyección de fluido se consigue establecer un circuito geotérmico con inyección de agua fría y extracción de vapor que es utilizado para la generación de electricidad.

Existen otros tipos de yacimientos cuya tecnología aún está en fase incipiente, entre los que cabe señalar:

- Yacimientos geotérmicos en rocas incompletamente solidificadas: en áreas de volcanismo reciente, se encuentran rocas en estado de fusión o parcialmente solidificadas, a las que se les puede extraer su energía.
- Yacimientos geotérmicos en condiciones hiper-críticas: las condiciones termodinámicas del fluido geotérmico se sitúan por encima del punto crítico. Se trata de futuros desarrollos en zonas muy privilegiadas del globo.

En todo caso, resulta muy importante considerar el modelo tradicional del yacimiento geotérmico de alta temperatura ya que ilustra claramente sobre las condiciones geológicas necesarias para la existencia de este tipo de yacimientos (Fig. 4):

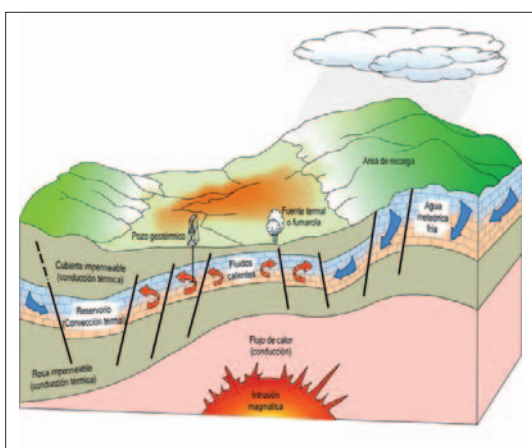


Fig. 4. Yacimiento geotérmico convencional. <http://iga.igg.cnr.it/index.php>.

- Foco de calor activo, o lo que es lo mismo, estar situado en áreas inestables de la corteza, con flujos anómalos de calor.
- Roca almacén permeable: existencia a profundidad adecuada (1,5 -2 kilómetros) de rocas permeables que permiten la circulación de fluidos capaces de extraer el calor de la roca.
- Cobertera impermeable: existencia de rocas impermeables que actúan de sello o cierre de los fluidos contenidos en la roca almacén, de manera que se evite la disipación continua de la energía en cantidades importantes (en general existen pequeños escapes de fluido a la superficie que dan origen a los indicios de existencia del yacimiento: geiser, fumarola, solfatara, fuente termal, etc.).

INVESTIGACIÓN DE RECURSOS GEOTÉRMICOS

Los recursos geotérmicos constituyen un recurso geológico-minero de tipo energético y en gran parte renovable cuyas especificidades hacen que los procesos de investigación de su potencial difieran notablemente del resto de los recursos minerales pero adapte de ellos ciertas técnicas y se diferencie también de la prospección de hidrocarburos aunque utilice buena parte de las herramientas de investigación que este sector desarrolla, adaptándolas a las características del recurso geotérmico.

En todo caso, y unido a lo expuesto con anterioridad al definir la energía geotérmica, el proceso de investigación y evaluación de los yacimientos geotérmicos no sólo incluye el propio proceso de búsqueda con aplicación de diferentes técnicas que permitan evidenciar el recurso sino que requiere también la cuantificación y valoración de las condiciones y medios para su aprovechamiento (Instituto de la Ingeniería de España, 1984; IGME, 1985).

Conforme a la clasificación de los yacimientos anteriormente descrita, hay que diferenciar entre la investigación de yacimientos de baja temperatura y los de alta temperatura.

Los recursos geotérmicos de baja temperatura se investigan con objeto de su aprovechamiento en usos directos. Por lo tanto y en función de sus características, requieren una importante demanda "in situ", se localizan en grandes cuencas sedimentarias y su nivel de temperatura lo alcanzan debido al gradiente geotérmico. Lo que se precisa es un acuífero profundo con buenas características de porosidad y permeabilidad que permita una importante productividad. Habitualmente no existen descargas de estos acuíferos en superficie y su salinidad es elevada por lo que precisan no sólo de un sondeo de extracción sino de otro de inyección a través del que se devuelve el agua al acuífero una vez que se le ha extraído el calor en el intercambiador.

Por ello el proceso de investigación requiere de una recopilación y reinterpretación de información geológica e hidrogeológica de los niveles profundos, fundamentalmente de la información que aportan las prospecciones de hidrocarburos (geología, geofísica y perforaciones) con la selección de los posibles almacenes, dado que difícilmente se justificaría económicamente la realización de nuevas campañas de geofísica por su elevado coste. Los sondeos de reconocimiento en estos casos requieren el empleo de maquinaria de perforación de grandes dimensiones y los sondeos se realizan directamente con los diámetros de los sondeos de explotación por lo que la evaluación del riesgo en la fase previa a la perforación debe ser muy ajustada. Tras la realización del primer sondeo se llevan a cabo pruebas de su productividad térmica y, en función de éstas la evaluación y diseño del aprovechamiento geotérmico con una valoración técnico-económica de su viabilidad.

La investigación de los recursos de alta temperatura es muy diferente, dado que se trata de localizar zonas de flujo geotérmico anómalo y en la que

se suelen presentar indicios en superficie que evidencian el potencial del subsuelo. Se parte de una selección de áreas a nivel regional en la que se valoran los diferentes elementos que pueden condicionar la presencia de un yacimiento: estructuras geológicas favorables, actividad sísmica, volcanismo, presencia de fuentes termales, géiseres, fumarolas o emanaciones gaseosas. En las áreas de interés se llevan a cabo estudios de mayor detalle en cuanto a geología, geoquímica de las diferentes manifestaciones y geofísica de tipo estructural que permitan definir el modelo preliminar del campo geotérmico que se investiga.

Conforme se avanza con la definición del modelo, se circunscribe el área de investigación a las zonas de mayor probabilidad y se emplean técnicas geofísicas de mayor detalle que ofrecen suficiente contraste para localizar los posibles yacimientos. A medida que se avanza en el proceso se encarecen las técnicas que se pueden emplear para minimizar el riesgo de las perforaciones exploratorias que, en estos casos, se pueden emplear equipos de perforación de menores dimensiones y alcanzar los objetivos con menores diámetros de perforación lo que permite llevar a cabo las primeras valoraciones con menores costes de inversión.

Durante todo el proceso de investigación, se procede con la aplicación de las técnicas que implican menores costes y que pueden ofrecer la mejor información para concluir en cada fase del proceso con un modelo del yacimiento y una valoración técnico-económica de su posterior aprovechamiento. Ello permitirá tomar las decisiones adecuadas para la continuación de la investigación utilizando técnicas cada vez más precisas y costosas que permitan validar y adecuar el modelo de yacimiento y por tanto su viabilidad.

El abanico de técnicas empleadas en cada fase del proceso exploratorio permite garantizar en cada momento las posibilidades de éxito del proyecto de investigación y descartar aquellas áreas y modelos que ofrezcan menores garantías para la consecución de los objetivos propuestos.

APROVECHAMIENTO DE LOS RECURSOS GEOTÉRMICOS

Como ya se ha señalado anteriormente, el recurso geotérmico es un recurso energético en el que el agua sirve como elemento de transporte de la energía. Las características de los fluidos existentes en el yacimiento definen sus posibilidades de aprovechamiento.

Aplicaciones y usos

Los recursos geotérmicos de baja temperatura permiten el aprovechamiento directo del calor. Dado que el transporte del calor requiere infraestructuras de elevado coste y con pérdidas energéticas importantes, se requiere en estos casos que la demanda se sitúe próxima al centro geotérmico, donde se ubican las cabezas de los sondeos y se lo-

caliza el intercambiador. De esta forma, el circuito geotérmico que actúa como la caldera del sistema de calefacción que se va a utilizar, está compuesto únicamente por los dos sondeos que conforma el doblete geotérmico (el sondeo de extracción y el de inyección) y el intercambiador. El resto es el sistema de superficie que prácticamente es un sistema convencional de distribución de calefacción.

Además de los usos en calefacción de viviendas y locales, existen multitud de aplicaciones de tipo industrial en las que se necesita aporte de calor. La mayor parte están relacionadas con las industrias del sector agrícola y alimentario si bien cabe destacar los usos en calefacción de invernaderos, piscicultura, etc.

Los recursos geotérmicos de alta temperatura se aprovechan fundamentalmente para la producción de electricidad (Duffield, 2003). Dependiendo de las características del fluido geotérmico se diseñará el tipo de planta precisa para la generación eléctrica.

Tecnologías

Las tecnologías de aprovechamiento geotérmico dependen básicamente del nivel energético del fluido. En usos directos y cuando se trata de recursos de baja temperatura, los circuitos geotérmicos deben estar protegidos contra los procesos de corrosión producidos por los fluidos con altos niveles en sales disueltas así como los problemas de precipitación de sales y encostramientos. Dado que los circuitos los componen únicamente los dos sondeos del doblete y el intercambiador, son únicamente estos elementos los que deben ser protegidos. En cuanto a los sistemas de calefacción, la geotermia se adapta con mayor facilidad cuando se utilizan elementos de calefacción de baja temperatura como son los suelos radiantes. Normalmente la cobertura energética total de la demanda de calefacción mediante la geotermia dificulta la rentabilidad del sistema al desaprovechar gran parte de la potencia térmica disponible; por esta razón se suele usar un sistema de apoyo que cubra las puntas de demanda, garantizando la geotermia la mayor parte de la demanda de energía (Harrison, 1990).

Cuando se trata de recursos geotérmicos someros (geotermia de muy baja temperatura) se requiere el empleo de bomba de calor. Estos equipos permiten suministrar calefacción a sistemas convencionales a partir de enfriar fluidos que inicialmente se encuentran a bajas temperaturas (15-20° C); mediante la bomba de calor se enfría el fluido del denominado foco frío y la energía que se le quita a éste es aportada al fluido del foco caliente (el circuito de calefacción) que llega a la bomba de calor a mayor temperatura que la del foco frío.

Este tipo de recurso poco profundo aprovecha la estabilidad térmica del subsuelo (a escasos metros de profundidad la temperatura del terreno es estable todo el año) o de las aguas subterráneas y, mediante la tecnología de la bomba de calor que, a diferencia con los intercambiadores, permite extraer calor de un foco frío y trasladarlo a un foco más caliente, pa-

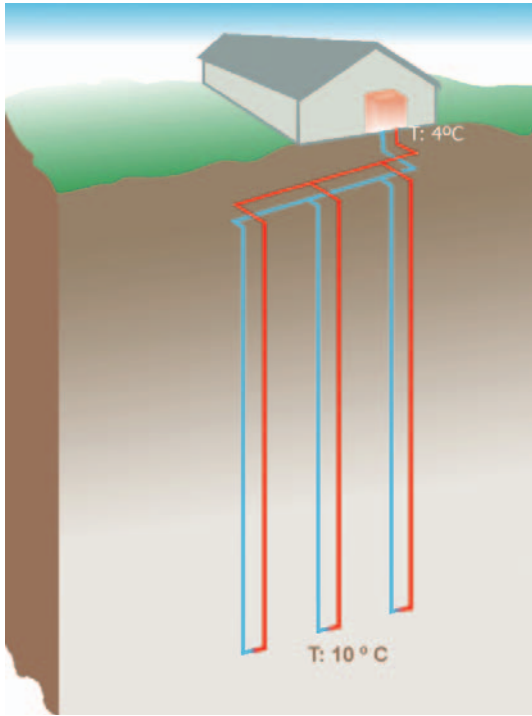


Fig. 5. Geotermia somera. Circuito cerrado. <http://www.igme.es/internet/Geotermia/inicio.htm>.

ra disponer de un sistema de suministro de energía térmica de gran eficiencia (G^a de la Noceda, 2007).

Existen varios sistemas que permiten el aprovechamiento geotérmico en sistemas someros. Los sistemas cerrados (Fig. 5) se realizan formando bucles de tubería por los que circula agua con anticongelante que toma calor del subsuelo y lo cede a la bomba de calor. Estos bucles se realizan en disposiciones horizontales bajo el terreno a poca profundidad, en perforaciones verticales de menos de 250 metros habitualmente o conjuntamente con elementos estructurales de construcción como son los pilares de edificación.

Los denominados circuitos abiertos (Fig. 6) aprovechan la temperatura estable de las aguas subterráneas (o de otras aguas como las aguas de mina o de drenaje de túneles) para suministrar calor a la bomba de calor; una vez enfriada, el agua subterránea se suele devolver al acuífero.

Las posibilidades de funcionamiento reversible

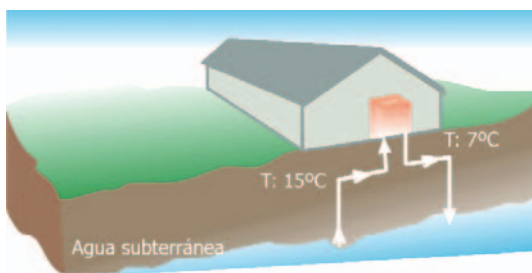


Fig. 6. Geotermia somera. Circuito abierto. <http://www.igme.es/internet/Geotermia/inicio.htm>.

de la bomba de calor permiten que estos sistemas puedan funcionar como elementos de climatización durante la época estival. El subsuelo actúa en ese caso como sumidero o almacén del calor que se aporta desde la edificación (G^a de la Noceda, 2008).

Los diferentes tipos de centrales de generación eléctrica a partir de geotermia dependen de las características del fluido. En los contados casos en los que existen yacimientos de vapor seco, éste se turbiniza directamente. Lo habitual es la mezcla de vapor y agua sobrecalentada. Las plantas requieren la instalación de un separador de fases que podrán ser en una o varias etapas, lo que da origen a las plantas “flash”, con los diferentes elementos de la turbina (alta y baja presión).

Cuando las temperaturas no son suficientes para que el fluido geotérmico se lleve directamente a turbinas (o cuando el contenido salino pueda ser dañino para los elementos de la turbina), se utilizan ciclos binarios. En este tipo de plantas, el fluido geotérmico intercambia su energía con un fluido de bajo punto de ebullición que es el que se lleva a la turbina. El desarrollo de numerosos y novedosos ciclos en las últimas décadas, ha permitido incrementar el rendimiento de este tipo de plantas, cada vez más numerosas en el mundo.

Desde el comienzo de los años 70 se investigó la posibilidad de aprovechar el calor existente en masas de roca calientes a ciertas profundidades, aún sin existencia de fluido geotérmico. Fueron así denominados los yacimientos de Roca Caliente Seca (HDR), en los que se trataba de crear artificialmente una zona fisurada en el macizo rocoso en la que posteriormente se inyectase agua y se extrajese vapor para producir electricidad. Los esfuerzos innovadores en este campo se centraron en la forma de crear una zona permeable en el interior de la masa rocosa. La adaptación de técnicas utilizadas en los yacimientos de hidrocarburos fue la clave para lograr el éxito en este tipo de yacimientos creados artificialmente. La inyección de agua a presión a través de una primera perforación que alcance la zona objetivo, permite abrir las fisuras preexistentes en la roca objetivo y que éstas se mantengan abiertas de forma permanente, por lo que se crea en el macizo rocoso una zona permeable limitada localmente. Tras alcanzar esta zona alterada mediante una segunda perforación, se establece un circuito geotérmico en el que uno de los sondeos se utiliza para la inyección de agua y por el segundo sondeo se obtiene esta agua a la temperatura suficiente para poder llevarla a una planta geotérmica en la que se turbiniza para producir electricidad (Fig. 7). Estas técnicas desarrolladas para los yacimientos de roca caliente seca, pueden ser usadas para aquellos en los que pueda existir fluido aunque la permeabilidad sea muy baja; por ello se ha extendido su campo de aplicación a los yacimientos que puedan ser objeto de mejora en su productividad, incluyendo aquellos que fueron descartados en épocas anteriores debido a su baja permeabilidad; se denominan por tanto a todos ellos como Sistemas Geotérmicos Estimulados (EGS) que engloba a los anteriores yacimientos HDR. La demostración de la viabilidad técnica y económica de

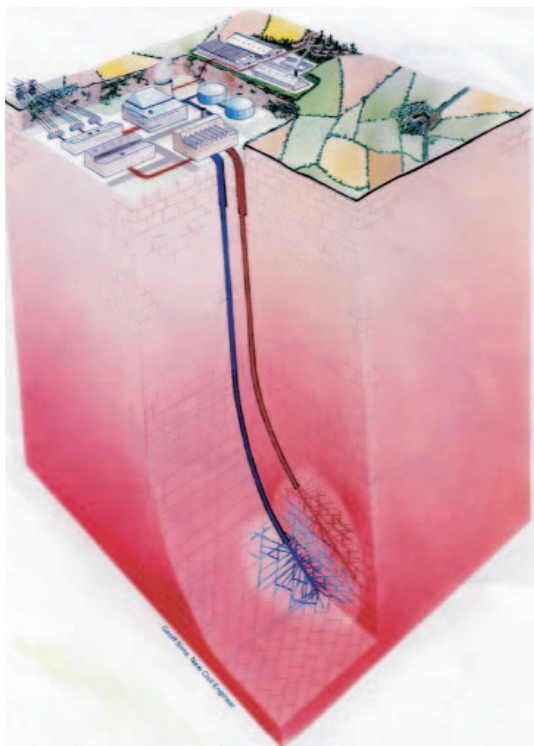


Fig. 7. Yacimiento de roca caliente seca. <http://iga.igg.cnr.it/index.php>.

este tipo de yacimientos permite albergar grandes expectativas para estos nuevos recursos.

Características de la energía geotérmica

Por contraposición con una gran parte de las energías renovables, la geotermia es una energía que puede garantizar el suministro durante las 24 horas del día y los 365 días del año sin sufrir variaciones de suministro ni limitaciones en ningún momento del año. Se trata, por tanto de una energía gestionable.

La geotermia debe ser aprovechada de forma sostenible dado que se trata de un recurso que recupera lentamente su nivel energético, hecho que caracteriza a esta energía renovable. El fluido geotérmico ha de ser considerado como el elemento transmisor de la energía, por lo que nunca debe ser aprovechado como recurso minero en el sentido de su uso consuntivo, sino que debe ser planteada su reinyección en el yacimiento una vez que se haya hecho uso de su energía.

La energía geotérmica es una energía respetuosa con el medio ambiente y no produce emisiones contaminantes. Existen las adecuadas tecnologías para garantizar que nunca se producirían escapes de gases o elementos químicos disueltos en los fluidos geotérmicos que pudiesen ser perjudiciales.

Factores económicos

La energía geotérmica es una energía que requiere una importante inversión económica previamente a su puesta en funcionamiento. No sólo en

los procesos de investigación sino en los propios elementos de la instalación geotérmica como son los sondeos, la inversión es elevada. Sin embargo tiene unos bajísimos costes de mantenimiento y explotación. Ello permite que los tiempos de retorno de la inversión sean moderadamente bajos.

Son los proyectos con menores inversiones los que, por tanto, obtienen mayores rentabilidades. Dado que los sondeos significan un montante importante de la inversión, serán los proyectos en los que, a igualdad de condiciones del fluido, los recursos se encuentren a menor profundidad los que ofrezcan mejores perspectivas económicas.

La disminución del riesgo en estas fases finales de la exploración (geofísica de detalle y perforación) y en los sondeos de explotación, así como el coste de éstos, serán fundamentales para garantizar la rentabilidad económica de los proyectos.

En relación con la geotermia somera o de muy baja temperatura, ha de tenerse muy en cuenta que la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA) valora las bombas de calor geotérmicas (GHP) como la tecnología más eficiente en calefacción y climatización. No sólo desde el punto de vista de la eficiencia sino del confort y el ahorro en coste, la geotermia somera permite tasas de retorno de inversión muy aceptables, por debajo de los 9 años. La utilización de este tipo de sistemas en forma reversible (calefacción en invierno y climatización en verano) permite mejorar notablemente la rentabilidad económica de los proyectos.

LA GEOTERMIA EN EL MUNDO

Los recursos potenciales de energía geotérmica en el mundo alcanzan cifras de gran importancia, no sólo en cuanto a los recursos convencionales (baja, media y alta temperatura) sino cuando se considera el potencial que ofrecen las nuevas tecnologías ya en desarrollo como son los Sistemas Geotérmicos Estimulados, respecto de los cuales el Instituto Tecnológico de Massachusetts elaboró un informe en 2006 titulado *El Futuro de la Energía Geotérmica. Impacto de los Sistemas Geotérmicos Estimulados (EGS) en los Estados Unidos en el siglo XXI*. En él se señala que, con la inversión adecuada, esta tecnología podría suministrar en 2050 hasta el 10% de la energía eléctrica que actualmente está instalada en USA (MIT, 2006).

La energía geotérmica ha sido ampliamente utilizada durante cinco décadas en numerosos países evaluándose su aprovechamiento en el orden de cientos de MW tanto para la producción de electricidad como para usos directos y su mayor crecimiento se produce en las últimas tres décadas (Gupta, 2007).

La geotermia para producción de electricidad se utiliza en 24 países. Con una potencia actual instalada que supera los 9 GW (Tabla I), se espera alcanzar los 11 GW en 2010.

País	MW
Estados Unidos	2.687
Filipinas	1.970
Indonesia	992
Méjico	953
Italia	811
Japón	535
Nueva Zelanda	472
Islandia	421
Otros 16 países	896
Total	9.737

Tabla I. Potencia eléctrica instalada en 2007 de origen geotérmico. Principales países productores.

País	MWt
Estados Unidos	3.766
China	2.282
Islandia	1.469
Japón	1.167
Turquía	820
Suiza	547
Hungría	428
Alemania	397
Resto de países	4.269
Total	15.145

Tabla II. Potencia térmica instalada en 2000 de origen geotérmico. Principales países productores.

Los usos directos de la geotermia, aunque mas difíciles de contabilizar debido a su dispersión y uso heterogéneo, se cuantifican en el orden de los 15 GWt de potencia instalada en mas de 60 países (Tabla II), con una producción energética de mas de 190000 TJ/año.

RECURSOS GEOTÉRMICOS EN ESPAÑA. PERSPECTIVAS

El potencial de recursos geotérmicos en España fue puesto en evidencia por el Instituto Geológico y Minero de España (IGME) a lo largo de las décadas de los 70 y 80.

Las investigaciones se extendieron a lo largo de todo el territorio, aunque se concentraron en las áreas consideradas de mayor potencial. Sin duda las Islas Canarias fueron objeto de estudios detallados fundamentalmente en las islas de Lanzarote, La Palma (Hurter, 2002), Gran Canaria y sobre todo Tenerife (Sánchez, 2005) en donde las posibilidades de existencia de geotermia de alta temperatura se continúan evaluando en la actualidad.

En el territorio peninsular los esfuerzos en investigación se concentraron en las Cordilleras Béticas en las que destaca el potencial existente en las denominadas depresiones internas, fosas tectónicas

donde las formaciones sedimentarias del terciario tiene gran permeabilidad y en las que aparecen numerosas manifestaciones termales. Las depresiones catalanas también fueron objeto de los proyectos de investigación (Cuchí, 2000); se trata de importantes fosas con saltos de fallas superiores a los 3000 metros en algunos casos y con algunas de las manifestaciones termales de mayor temperatura en España. Igualmente en Galicia, en materiales graníticos situados próximos a fallas importantes se investigó su potencial con detalle y se alcanzaron temperaturas del orden de los 80° C a tan sólo unos centenares de metros de profundidad. En otras áreas sedimentarias, la información proveniente de los sondeos de hidrocarburos permitió definir niveles de interés geotérmico sin existencia de surgencias en superficie.

Fruto de estas investigaciones se localizaron áreas de elevado potencial en recursos de baja y media temperatura así como posibles yacimientos de alta temperatura (Tabla III y Fig. 8) y se realizaron diversos sondeos profundos de reconocimiento y preexplotación con vistas al desarrollo de proyectos de demostración en este campo.

Los problemas surgidos en los proyectos de demostración iniciados en la década de los 80 no fueron debidos a problemas técnicos ni básicamente a problemas de rentabilidad económica sino a monta-

Yacimientos Geotérmicos	Baja temperatura T < 100°C	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: isla de Gran Canaria
	Media temperatura 100°C < T < 150°C	Cordilleras Béticas: Murcia, Almería, Granada Cataluña: Vallés, Penedés, La Selva y Olot Galicia: áreas de Orense y Pontevedra Pirineo Oriental: zona de Jaca-Sabiñánigo	
	Alta temperatura T > 150°C	Islas Canarias: Tenerife, Lanzarote y La Palma	

Tabla III. Principales áreas geotérmicas en España.



Fig. 8. Síntesis de áreas geotérmicas en España. (Calvo, 2006).

jes empresariales inadecuados para este tipo de proyectos (Calvo, 2006). Estos problemas causaron la práctica paralización de la actividad en geotermia durante casi dos décadas.

La llegada del nuevo siglo ha traído nuevas perspectivas para la geotermia en España; se retoman viejos proyectos abandonados años atrás; se plantea la continuación de las investigaciones que el IGME llevó a cabo dos o tres décadas atrás, con vistas a la utilización de los recursos tanto para usos directos como para producción de electricidad, probablemente mediante ciclos binarios; se estudian las posibilidades de existencia de yacimientos profundos que puedan ser aprovechados para la producción de electricidad mediante las tecnologías de EGS; finalmente, el crecimiento ya detectado del sector de geotermia somera evidencia un fuerte incremento de este tipo de sistemas en los próximos años, tal como ha sucedido en otros países de la Unión Europea, aunque en el caso español con notables ventajas dado las posibilidades de uso no sólo en calefacción y agua caliente sanitaria sino en climatización (García de la Noceda, 2009).

BIBLIOGRAFÍA

- Abad, J. y Pinuaga, J.I. (1981). *Conceptos Generales de Energía Hidro-Geotérmica*. IGME (inédito).
- Calvo, J.P. (2006). Energía Geotérmica para el siglo XXI. *Cuadernos de Energía* 14, 64-68.
- Cuchí, J.A., Baeza, J. y García de la Noceda, C. (2000). Overview of hydrogeothermics in Spain. *Environmental Geology* 39, 482-487.
- Duffield, W.A. y Sass, J.H. (2003). *Geothermal Energy. Clean power from the earth's heat*. United States Geological Survey (USGS). Circular 1249.
- Edwards, L.M., Chilingar, G.V., Rieke III, H.H. y Fertl, W.H. (1982). *Handbook of Geothermal Energy*. Gulf Publishing Company. Houston.
- Elder, J. (1981). *Geothermal Systems*. Academic Press. London.
- García de la Noceda, C. (2007). Energía geotérmica y bomba de calor. *Actualidad Minera* 40, 20-24.
- García de la Noceda, C. (2008). Perspectivas para la geotermia en el sector de la edificación. *Obras Urbanas* 12, 50-52.
- García de la Noceda, C. (2009). La Energía Geotérmica en España. *IngeoPress* 189, 60-64.
- Gupta, H. y Roy, S. (2007). *Geothermal Energy. An alternative resource for the 21st century*. Elsevier. Amsterdam.
- Harrison, R., Mortimer, N.D. y Smarason, O.B. (1990). *Geothermal Heating. A Handbook of Engineering Economics*. Pergamon Press. Oxford.
- Hurter, S. y Haenel, R. (2002). *Atlas of Geothermal Resources in Europe*. European Communities. Luxembourg.
- IDAE-IGME (2008) *Manual de geotermia*. Ed. IDAE, Madrid.
- IGME. (1985). *La energía geotérmica*. Ed. IGME. Madrid
- IGME. *Los recursos geotérmicos*. URL: <http://www.igme.es/internet/Geotermia/inicio.htm>. Con acceso: mayo 2009
- Instituto de la Ingeniería de España (IIE). Comité de Energía (1984). *Energía Geotérmica*. Ed. IGME, Madrid.
- International Geothermal Association (IGA). *¿Qué es la Energía Geotérmica?* URL: <http://iga.igg.cnr.it/index.php>. Con acceso mayo 2009.
- Massachusetts Institute of Technology (MIT) (2006). *The Future of Geothermal Energy. Impact of Enhanced Geothermal Systems (EGS) on the United States in the 21st Century*. U.S. Department of Energy's Office of the Geothermal Technology Program. Idaho.
- Sánchez, J. y García de la Noceda, C. (2005). *Geothermal Energy Development in Spain - Country Update Report*. Proceedings World Geothermal Congress. ■

Este artículo fue solicitado desde E.C.T. el día 29 de noviembre de 2008 y aceptado definitivamente para su publicación el 23 de junio de 2009.