

LA ENERGÍA GEOTÉRMICA

Índice

LA ENERGÍA GEOTÉRMICA	1
EL FENÓMENO GEOTÉRMICO	2
Manifestaciones superficiales	3
DESARROLLO GEOTÉRMICO MUNDIAL	5
EL SISTEMA GEOTÉRMICO	7
Sistemas hidrotérmicos	7
Sistemas geopresurizados	10
Sistemas de roca seca caliente	10
EXPLOTACIÓN DE YACIMIENTOS GEOTÉRMICOS	11
Utilización de yacimientos de alta entalpía	12
Utilización de yacimientos de baja entalpía	16
FACTORES AMBIENTALES	17

EL FENÓMENO GEOTÉRMICO

En un sentido amplio, se entiende como *geotermia* todo fenómeno que se refiera al calor almacenado en el interior de la Tierra, llamándose *energía geotérmica* a la energía derivada de este calor, el cual se produce, principalmente, por la desintegración espontánea, natural y continua de los isótopos radiactivos que existen en muy pequeña proporción en todas las rocas naturales (principalmente uranio, potasio y torio). Normalmente, el calor se transmite por conducción a través de los materiales que forman el subsuelo, llegando hasta la superficie, donde se libera, pero la baja conductividad térmica de estos materiales hace que gran parte de esta energía se almacene en el interior de la Tierra durante largo tiempo.

Estos dos factores, generación constante de calor y baja conductividad, hacen que las temperaturas del interior del planeta sean progresivamente más elevadas, es decir, existe un *gradiente geotérmico* o variación de la temperatura, T , con la profundidad, z . En la corteza terrestre, normalmente la temperatura aumenta de forma regular 1 °C cada 33 m, a medida que se profundiza desde la superficie. Este valor representa el llamado **gradiente geotérmico normal**:

$$\frac{\Delta T}{\Delta z} = -\frac{1}{33} \left(\frac{^{\circ}\text{C}}{\text{m}} \right)$$

De lo dicho hasta ahora se deduce que, al existir un gradiente de temperaturas, necesariamente se producirá un flujo de calor, lo que da lugar a un **flujo geotérmico**, Φ , definido por la ley de Fourier de la conducción:

$$\phi = -k \frac{\Delta T}{\Delta z}$$

siendo k la conductividad térmica del material (W/m.°C).

Para un gradiente geotérmico normal (30 °C/km) y un valor medio de la conductividad de 2 W/m.°C (valor normal para las rocas que componen la corteza terrestre) se obtiene un flujo geotérmico de unos 60 mW/m², correspondiente a la media mundial de las tierras emergidas.

Obsérvese que si se compara este valor con el del máximo flujo de energía solar

(1 kW/m²), se comprueba que la densidad del flujo geotérmico es muy baja, lo que condicionará fuertemente la utilización de esta fuente de energía. No obstante, existen en el interior de la Tierra zonas en las que el flujo geotérmico es más elevado de lo normal, dado que al producirse la fusión parcial de los materiales profundos, éstos, en determinadas condiciones dinámicas, pueden ascender hasta cerca de la superficie como rocas total o parcialmente fundidas. Pueden así situarse masas a veces de gran volumen y a muy altas temperaturas (entre 700 y 1.000 °C) en sectores de la corteza que, en condiciones normales, estarían a temperaturas inferiores en varios centenares de grados, obteniéndose gradientes geotérmicos más de diez veces superiores al normal, lo que significa unos 100 ó 200 °C/km.

En estos lugares, lógicamente será más fácil extraer el calor de la Tierra, por lo que los recursos geotérmicos mundiales (estimados en unos 30 millones de TW) sólo son aprovechables en una pequeña parte, pero lo suficientemente grande como para poder hablar de una fuente energética renovable de gran magnitud, ya que si los volúmenes de masas ígneas son suficientemente grandes, su calor puede tardar millones de años en disiparse, debido a la baja conductividad de las rocas.

Manifestaciones superficiales

Las alteraciones geotérmicas más interesantes están localizadas en sectores de actividad ígnea (volcánica) actual o reciente, considerando *recientes* aquellos sectores donde hay datos para suponer que la actividad ha tenido lugar hace pocos millones de años. Existen varios tipos de manifestaciones superficiales que indican la posible existencia de una anomalía geotérmica en la zona donde se presenta. Estas manifestaciones pueden agruparse de la siguiente manera:

- Volcanismo reciente.
- Zonas de alteración hidrotermal.
- Emanaciones gaseosas.
- Fuentes termales y minerales.
- Anomalías térmicas.

Ahora bien, las manifestaciones superficiales no representan un signo definitivo de la existencia de un gradiente geotérmico aprovechable; del mismo modo, la ausencia de las mismas tampoco permite desechar unas zonas determinadas como

posibles campos geotérmicos. La falta de métodos y técnicas precisas para la exploración geotérmica hace que la identificación de las anomalías superficiales sea el punto de partida de una prospección.

Son muy numerosas las zonas de alto gradiente geotérmico asociadas a un **volcanismo reciente**, por lo que es de gran interés realizar un estudio geológico y volcanológico detallado de la región, que incluya datos técnicos, hidrogeológicos, petrográficos y geoquímicos que, una vez interpretados, serán muy útiles para la localización del foco calorífico.

En las áreas geotérmicas suelen encontrarse casi siempre **alteraciones hidrotermales** de las rocas, originadas por líquidos o gases que han circulado a través de los poros y fracturas de mayor o menor importancia. Esta alteración se manifiesta al producirse un cambio químico y mineralógico en las rocas por las que han circulado estos fluidos. La identificación y delimitación de las distintas zonas de la alteración pueden ayudar a establecer las condiciones físicas y químicas de formación de las rocas, lo que proporciona una valiosa ayuda en la investigación de un campo geotérmico.

Las **emanaciones de gases y de vapor** pueden tener un significado muy limitado. Se pueden originar sustancias volátiles simplemente por calentamiento de las rocas. Otras veces las emanaciones son volcánicas, ya sea relacionadas con un volcanismo activo o con uno residual.

Las **fuentes termales y minerales** están muy extendidas en las áreas geotérmicas. En general, las áreas hidrotermales son muy características de las regiones volcánicas recientes, pero no sólo se encuentran relacionadas a ellas, ya que también existen en regiones ocupadas por otro tipo de rocas.

Hay que destacar las sales que precipitan en las fuentes termales, que pueden ser muy distintas desde el punto de vista químico, y el que precipiten una u otra supone un mecanismo de formación y sedimentación diferente. Por consiguiente, la composición de las aguas termales juega un papel muy importante en la exploración geotérmica, ya que puede servir para calcular la temperatura en profundidad. Asimismo pueden producirse depósitos de sales lo suficientemente grandes, incluso, como para proceder a su explotación.

Lo más frecuente es que, en presencia de un foco calorífico en profundidad, se

produzca una **anomalía térmica** en superficie, que se pondrá de manifiesto por la existencia de un gradiente geotérmico anómalo, superior al normal, en la zona. Es, por tanto, de gran interés, proceder a la localización y delimitación precisa de estas anomalías, para lo cual se emplea una prospección termométrica detallada.

En definitiva, la falta de otros medios más precisos para las investigaciones previas de localización de zonas geotérmicas aprovechables ha hecho que, hasta ahora, las exploraciones se hayan centrado principalmente en áreas con manifestaciones superficiales, entendiéndose que la mayor o menor importancia de éstas no puede servir para evaluar la de un futuro campo y que cualquier manifestación, hasta la más pequeña, puede ser motivo para comenzar una exploración.

DESARROLLO GEOTÉRMICO MUNDIAL

Desde tiempos inmemoriales, las aguas termales han sido utilizadas en diversas tareas domésticas (baño, limpieza, cocina, etc.), pero sólo desde comienzos del siglo XX el vapor natural y el agua caliente geotérmicos han sido destinados a otros usos, más sofisticados.

Durante el siglo XIX ya se extraían productos químicos (en especial, ácido bórico) a partir de las emanaciones gaseosas en Larderello (Italia), hasta que en 1904 se realizó el primer intento para utilizar el vapor geotérmico en la generación de electricidad.

La corrosión que los gases ácidos ejercían sobre las partes metálicas de las turbinas obligó a utilizar circuitos secundarios, lo que producía grandes pérdidas de calor, pero el desarrollo posterior de aleaciones metálicas resistentes a la corrosión, permitió el uso directo del vapor geotérmico.

Las instalaciones actuales de Larderello son capaces de producir 3.000 TW.h/año de electricidad y al mismo tiempo, los gases son la base de una importante industria química de extracción de ácido bórico, dióxido de carbono, amoníaco y helio.

En Islandia se utilizó por primera vez agua caliente de origen geotérmico en 1925 para calentar viviendas e invernaderos, y tres años después comenzaron las perforaciones de pozos de agua caliente. La utilización de vapor geotérmico de alta presión en la generación de electricidad comenzó en 1964, con la instalación en Hvergerdi de una central geotérmica de 15 MW.

En la actualidad, Islandia es el país con mayor aprovechamiento de calefacción geotérmica del mundo, extendiéndose su uso tanto en el ámbito doméstico como en el agrícola e industrial, al 80% de la población.

En California, EE.UU., se perforaron pozos para la obtención de vapor geotérmico desde 1921, pero el proyecto fue temporalmente abandonado. Se recuperó en 1955 y tan sólo cinco años después estaba en operación una planta generadora de electricidad de 12,5 MW. En la actualidad existe una capacidad instalada en esta zona de más de 1.200 MW.

En muchos otros países se han desarrollado explotaciones geotérmicas, ya sea de uso exclusivamente térmico, o bien para la generación de electricidad. Así, en Nueva Zelanda se producen más de 300 MWe, en México, alrededor de 200 y en El Salvador, más de 300, con la característica especial de que este país resulta ser el mayor productor relativo, ya que cerca del 40% de su consumo eléctrico total es de origen geotérmico.

Puede afirmarse que el interés mundial por la energía geotérmica partió de las recomendaciones de la *Conferencia de Nuevas Fuentes de Energía*, patrocinada por la O.N.U. en 1961 y celebrada en Roma. En la actualidad existen en funcionamiento diversas plantas de producción de electricidad geotérmica, con una potencia total instalada de unos 6.000 MW, estimándose que los usos térmicos de esta fuente de energía son unas 5 veces superiores.

Obsérvese que, en general, los aprovechamientos geotérmicos suelen localizarse en los cinturones sísmicos y áreas de volcanismo reciente. Se comprende así que los países con mayor producción actual de energía geotérmica sean Italia, Nueva Zelanda, EE.UU., URSS y Japón, y que se hagan estudios de explotación en Centro y Sudamérica, Sureste de Africa y Extremo Oriente, afrontándose bajo diferentes puntos de vista, partiendo de las realidades y previsiones energéticas de cada país. Esto se debe a que, según sean las circunstancias, este recurso puede ser desde prohibitivo hasta cubrir totalmente las necesidades energéticas, pasando por el caso más general de que sea un componente más en el abastecimiento energético, sujeto a las vicisitudes de oferta y demanda.

EL SISTEMA GEOTÉRMICO

La presencia de extensas zonas a elevada temperatura localizadas a profundidades asequibles es la primera condición para poder utilizar la energía geotérmica, pero no es la única. Debido a la baja conductividad térmica de las rocas naturales, éstas se enfrían con la misma lentitud con la que fueron calentadas y, por tanto, la extracción directa del calor contenido en ellas sólo es posible si se dan ciertas condiciones adicionales. La extracción del calor de forma natural sólo es posible cuando cerca de la zona de anomalía geotérmica existen formaciones geológicas porosas o fisurales capaces de retener agua que, en general, procede de una infiltración superficial.

Teniendo en cuenta las consideraciones anteriores, se puede definir un **yacimiento geotérmico** como un volumen de roca con temperatura anormalmente elevada para la profundidad a la que se encuentra, susceptible de ser recorrida por una corriente de agua, que pueda absorber calor y transportarlo a la superficie. Obsérvese, no obstante, que esta definición no implica, necesariamente, que el agua se encuentre en el yacimiento a priori.

Así pues, según las condiciones en que el calor se transporta hacia la superficie y según las características geológicas de los yacimientos, éstos se suelen dividir en tres categorías básicas:

- Sistemas hidrotérmicos.
- Sistemas geopresurizados.
- Sistemas de roca seca caliente.

La más importante de ellas es la primera, que constituye la única forma de la energía geotérmica que ha sido comercialmente desarrollada hasta la fecha. Ni los sistemas geopresurizados ni los de roca seca caliente parecen tener posibilidades de explotación comercial a una escala significativa por el momento. Sin embargo, a continuación se revisarán las características fundamentales de cada uno de estos tipos básicos de yacimientos geotérmicos.

Sistemas hidrotérmicos

Un sistema hidrotérmico está formado por una fuente de calor situada a una profundidad relativamente pequeña (de 1 a 10 km), que garantiza un elevado flujo

térmico por un largo período de tiempo. Por encima de esta fuente de calor se halla situado un estrato profundo de roca permeable conteniendo agua (acuífero), que permita la circulación de la misma cerca de la roca basal a alta temperatura. Por encima del acuífero se encuentra una capa de roca impermeable que impide las pérdidas de fluido por la parte superior y generalmente se encuentra presente una falla que restringe las pérdidas laterales del fluido geotérmico.

El fluido normalmente se origina en la superficie a partir de precipitaciones de lluvia o nieve (origen meteórico), se filtra a través del suelo poroso y llega a los estratos permeables a través de diferentes fallas.

Si la formación permeable está aislada de la superficie por otras formaciones impermeables, el agua adquirirá la temperatura del sistema y se encontrará en estado líquido, en forma de vapor o como mezcla de líquido y vapor en equilibrio, según las condiciones de presión y temperatura del yacimiento.

Se distinguen así dos grandes grupos de sistemas hidrotérmicos, según se clasifiquen por las fases presentes en el yacimiento o por la temperatura de las mismas:

- Según las fases presentes:
 - Sistemas con predominio de vapor.
 - Sistemas con predominio de agua.
- Según la temperatura del yacimiento:
 - Sistemas de alta entalpía (o alta temperatura).
 - Sistemas de baja entalpía (o baja temperatura).

Evidentemente, los sistemas hidrotérmicos en los que predomina la fase vapor han de ser necesariamente de alta entalpía, mientras que los yacimientos en los que predomina el agua pueden ser tanto de alta como de baja entalpía.

En un sistema hidrotérmico con **predominio de vapor**, la ebullición del agua subterránea produce vapor, que a veces está sobrecalentado, con un contenido entálpico de unas 600 kcal/kg. Se cree que al desplazarse el vapor hacia la superficie, los niveles de rocas más superficiales y, por tanto, más frías, inducen a una condensación, fenómeno que, junto con las infiltraciones meteóricas recarga el yacimiento. Como en el seno del fluido se produce un fenómeno constante de convección, la temperatura del yacimiento es relativamente uniforme, por lo que un

pozo perforado en una zona de este tipo permitirá obtener un vapor sobrecalentado seco de alta calidad.

Los yacimientos hidrotérmicos con **predominio de agua** (agua caliente o vapor húmedo) son mucho más frecuentes que los de vapor seco. Los sistemas de agua caliente generalmente están asociados a una fuente termal que descarga en la superficie. Cuando se forman yacimientos de vapor húmedo a grandes profundidades, su temperatura es generalmente muy superior al punto de ebullición normal del agua a presión atmosférica. Estas temperaturas oscilan entre los 40 y los 400 °C a presiones comprendidas entre 3 y 10 kg/cm² y con entalpías entre 200 y 400 kcal/kg. Cuando el fluido llega a la superficie, bien de forma natural (anomalías geológicas) o bien de forma artificial (perforación de pozos), frecuentemente el agua se expande súbitamente a vapor.

Los sistemas con predominio de agua contienen muy frecuentemente una gran cantidad de impurezas, ya que el agua caliente es un excelente disolvente de muchas sales. Así, las sales que se presentan con mayor asiduidad en el fluido geotérmico procedente de estos sistemas son los cloruros, sulfatos, bicarbonatos y silicatos de sodio, potasio y litio. Su concentración puede variar desde uno hasta varios cientos de gramos por litro.

Ahora bien, además de los yacimientos de agua de alta entalpía, situados a lo largo de las fallas corticales, se pueden encontrar asimismo yacimientos de baja entalpía, situados generalmente en cuencas sedimentarias, en las que el gradiente geotérmico es de alrededor de 30 °C/km, de manera que la temperatura del yacimiento oscila entre 60 y 150 °C. Evidentemente, el agua saldrá a la superficie por debajo del punto de ebullición, con lo que sólo será aprovechable como agua caliente.

Obsérvese que los yacimientos de vapor seco son fácilmente explotables, y su principal aplicación es la producción de electricidad en turbinas de vapor, obteniéndose en estos casos agua caliente como subproducto. Los sistemas de agua caliente, tanto de alta como de baja entalpía, pueden presentar serias dificultades de uso, si el contenido en sales es elevado o sus propiedades resultan corrosivas. Aunque a partir de ellos se pueden obtener también las sales como subproductos, el equipo instalado para el aprovechamiento de la fuente geotérmica puede ser muy caro debido a que es necesario prevenir la corrosión, por lo que este tipo de yacimientos puede no ser

rentable en ciertas condiciones.

Sistemas geopresurizados

Existen cuencas sedimentarias, geológicamente jóvenes, en donde el fluido localizado en la formación rocosa subterránea soporta una parte de la carga de las rocas superiores, por lo cual la presión en el yacimiento es considerablemente alta. Los sistemas de este tipo se denominan geopresurizados y se piensa que pueden ser fuentes de energía muy prometedoras en las próximas décadas.

En numerosas ocasiones el agua de estas formaciones está contenida en lechos aislantes de arcilla, por lo que el flujo geotérmico normal puede aumentar su temperatura hasta casi 300 °C. El agua de estos sistemas es generalmente de una salinidad inferior que la de las formaciones normales y, en muchos casos, está saturada con grandes cantidades de gas natural. Por ello, en la formaciones geopresurizadas hay energía acumulada en tres formas:

- Presión hidráulica.
- Agua caliente.
- Metano.

Parece, pues, que el motivo inicial para el desarrollo de los yacimientos geopresurizados será la recuperación del metano. por ello, un parámetro crítico que puede afectar el potencial comercial de estos sistemas es la solubilidad del metano, que depende de la presión del yacimiento, de la temperatura y de la salinidad del agua.

A pesar de ello, de momento estos sistemas están aún lejos de poder ser sometidos a una explotación comercial rentable.

Sistemas de roca seca caliente

En algunas zonas, las anomalías geológicas tales como el movimiento de placas tectónicas y algún tipo de actividad volcánica han creado bolsas de rocas impermeables que recubren una cámara magmática. La temperatura en estas bolsas aumenta con la profundidad y con la proximidad a la cámara magmática, pero debido a su naturaleza impermeable, estas bolsas carecen de acuífero, por lo que se conocen generalmente como sistemas geotérmicos de roca seca caliente.

Las técnicas para la extracción del calor de estos sistemas están actualmente

en estado de investigación. El concepto básico es muy simple: se perfora un pozo lo suficientemente profundo como para alcanzar una zona de temperatura suficientemente alta, se crean grandes superficies de transmisión de calor fracturando la roca (hidráulicamente, con explosiones o por tensión térmica) y se intercepta la zona fracturada con otro pozo. Haciendo circular agua de un pozo a otro a través de la región fracturada, se puede extraer el calor de la roca.

Aunque el concepto sea muy simple, todavía se han de resolver muchas cuestiones antes de considerar un proyecto de este tipo como económicamente rentable. Sin embargo, se han hecho progresos importantes en el conocimiento de las características de los yacimientos, fundamentalmente desde el punto de vista de la iniciación y propagación de las fracturas, velocidad de pérdida de agua y fenómenos de mezcla. Sin embargo, hasta que la tecnología de la extracción del calor de estos sistemas esté convenientemente desarrollada y su aplicabilidad económica esté demostrada a gran escala, los primeros usos de sistemas de roca seca caliente han de restringirse a regiones con gradientes geotérmicos superiores a los 50 °C/km.

EXPLOTACIÓN DE YACIMIENTOS GEOTÉRMICOS

Antes de proceder a la explotación de un yacimiento geotérmico es preciso conocer una serie de variables y condiciones, las cuales permitirán asegurar si dicha explotación es técnica y económicamente posible. Así, es necesario conocer:

- Profundidad y espesor del acuífero.
- Calidad, caudal y temperatura del fluido.
- Permeabilidad y porosidad de las rocas.
- Conductividad térmica y capacidad calorífica, tanto del acuífero como de las rocas circundantes.

Conocidas estas premisas, la explotación se realiza mediante sondeos, de manera análoga a como se hace en la industria del petróleo. Para la utilización racional del yacimiento, es necesario que el fluido suministre una potencia constante, lo que implica un caudal constante a temperatura constante.

Sin embargo, el caudal no puede ser mantenido constante durante mucho tiempo, debido a la descompresión que se produce en el yacimiento; ésto hace que no se pueda recuperar más del 2% del calor contenido en el mismo. Como en geotermia

se busca el aprovechamiento del calor y no del agua, es práctica habitual el reinyectar el fluido extraído después de enfriado (realimentación), con lo que se consigue mantener la presión del yacimiento. Ello hace necesario prever la evolución de las temperaturas a fin de optimizar la tasa de recuperación de energía en el yacimiento.

Asimismo, la calidad del fluido geotérmico suele plantear problemas de corrosión en las instalaciones, debido principalmente a la agresividad de las aguas y a la presencia de gases disueltos. Normalmente se suele evitar la corrosión de varias formas: utilizando intercambiadores de calor especiales, inyectando en el fluido geotérmico un inhibidor de corrosión o usando materiales no atacables.

También hay que tener en cuenta los factores económicos, puesto que en este tipo de explotación es precisa una inversión inicial muy elevada.

La energía geotérmica puede ser utilizada en dos campos, definidos por la temperatura que alcanza el fluido geotérmico: aprovechamiento de yacimientos de baja entalpía (aplicaciones de baja temperatura) y aprovechamiento de yacimientos de alta entalpía (aplicaciones de alta temperatura). El límite práctico entre ambos no está claramente fijado, pero se puede situar entre 130 y 150 °C.

Actualmente, la localización de yacimientos de alta entalpía y su explotación, constituiría una ayuda apreciable para el autoabastecimiento energético de una zona. Sin embargo, los recursos geotérmicos de alta entalpía son muy escasos comparados con los de baja entalpía, e incluso estos últimos son claramente insuficientes para pensar que la participación geotérmica en el contexto energético permita la sustitución de las fuentes energéticas tradicionales, pero sí puede ser importante para paliar las necesidades de energía de una región determinada.

Utilización de yacimientos de alta entalpía

Los campos geotérmicos de alta entalpía, ya sean de predominio de vapor o de predominio de agua se utilizan en la producción de electricidad de forma muy competitiva, con niveles mínimos de potencia de 1 a 2 MW, ya que el coste de la electricidad producida por fuentes geotérmicas oscila entre el 50 y el 65% del coste de la electricidad producida en una central térmica convencional.

Ahora bien, al poseer la fuente geotérmica un nivel entálpico mucho menor que el de los combustibles convencionales, el rendimiento de conversión es muy pobre.

Así, independientemente del sistema de conversión, el trabajo disponible y la eficacia del proceso aumentan con la temperatura del fluido geotérmico; sin embargo, los máximos alcanzables son muy limitados, no llegando a sobrepasar nunca el 50% de rendimiento termodinámico, en las condiciones más favorables (temperatura del fluido, 300 °C, enfriado hasta una temperatura ambiente de 20 °C), encontrándose los rendimientos reales del proceso alrededor del 30%.

El diseño de las centrales geotérmicas de producción de electricidad depende, pues, de las siguientes variables:

- Caudal del pozo.
- Temperatura del yacimiento.
- Composición del fluido (líquido - vapor).
- Temperatura del agua de refrigeración.
- Contenido en materias extrañas (gases incondensables, sales en disolución).

Las tres primeras variables determinan de forma fundamental la potencia eléctrica obtenible de un pozo; la temperatura de refrigeración generalmente no plantea problemas.

El contenido en materias extrañas afectará al diseño mecánico, pudiendo exigir un amplio sistema de extracción de gases y el uso de materiales resistentes a la corrosión.

En función de las características del fluido geotérmico se han desarrollado varias opciones básicas referentes a la conversión de la energía geotérmica en electricidad, opciones que se desarrollan de forma simplificada a continuación.

Cuando la fuente geotérmica está formada por vapor seco (sobrecalentado), se utiliza el proceso de **conversión directa** para generar electricidad. El vapor a presión procedente del pozo geotérmico se conduce a la planta generadora, donde se expande a través de una turbina acoplada a un generador, que produce corriente eléctrica. Esta conducción se hace de forma directa, salvo el paso de separación de sólidos y el de separación de posibles gases incondensables (CO_2 , SH_2 , CH_4 , N_2 , O_2 , H_2 y NH_3). Los vapores de escape de la turbina se llevan a un condensador, donde pasan a fase líquida, reinyectándose ésta generalmente en el mismo acuífero. La torre de enfriamiento disipa el calor residual a la atmósfera para poder reutilizar el fluido de refrigeración.

Este proceso es el más eficiente de todos los que convierten la energía geotérmica en electricidad, pero sólo es utilizable en campos geotérmicos de vapor seco, hasta ahora sólo encontrados en Larderello (Italia), The Geysers (EE.UU.) y Matsukawa (Japón).

Ahora bien, la mayoría de las fuentes geotérmicas no producen vapor seco, sino una mezcla líquido-vapor, con predominio de la fase líquida. La mayoría de las plantas que actualmente operan en estos yacimientos utilizan el proceso de **expansión súbita** (evaporación *flash*). Sistemas de este tipo están actualmente en operación en Nueva Zelanda, Japón, Islandia y México.

Además de la turbina, el condensador y la torre de refrigeración, también utilizados en el proceso directo, una planta de este tipo utiliza un evaporador *flash* o recipiente de expansión, donde se deja expandir bruscamente el fluido geotérmico, con lo que una parte del mismo se vaporiza de forma instantánea. El vapor se lleva a la turbina, mientras que el líquido no evaporado se reinyecta en el acuífero. El resto del proceso es similar al de conversión directa.

Este sistema es interesante a pesar de las considerables pérdidas de calor a través de la fase líquida desechada, porque emplea turbinas de vapor simples y de costes relativamente bajos. Sin embargo, a menudo se utiliza el sistema en dos etapas para mejorar el rendimiento térmico del proceso, recuperando el calor residual a través de la segunda etapa. Aunque el diseño multietapa aumenta significativamente la complejidad de la planta y, por tanto, la inversión inicial, se prefiere frente al de una sola etapa, debido al ahorro que produce en ciertos costes de explotación.

En este proceso, el líquido que abandona el primer recipiente de expansión entra en una segunda unidad de este tipo, que opera a una presión inferior, provocando una nueva evaporación súbita. El vapor de baja presión producido se lleva a la sección de baja presión de la turbina, donde se recupera la energía que se habría perdido si se hubiese utilizado un sistema de una sola etapa.

Aunque el sistema de dos etapas aumenta el rendimiento del de etapa única en más de un 35%, la utilización de tres etapas sólo incrementa el rendimiento del proceso de dos etapas en algo más de un 5%, por lo que no ha resultado rentable su utilización.

Un sistema alternativo al de evaporación súbita para yacimientos geotérmicos

donde predomina la fase líquida es el proceso de **ciclo binario**. Este proceso utiliza un fluido secundario (generalmente un hidrocarburo o un hidrocarburo fluorado) como fluido de trabajo en un ciclo de Rankine (compresión-expansión), usándose el fluido geotérmico para calentarlo. Las plantas de ciclo binario no están tan bien desarrolladas y probadas comercialmente como las de evaporación súbita, pero se tiene cierta experiencia de funcionamiento en plantas piloto.

El fluido geotérmico se conduce desde el pozo hasta un cambiador de calor, donde transmite su calor sensible al fluido secundario; el líquido geotérmico enfriado se reinyecta al acuífero. El fluido secundario se vaporiza en dicho cambiador y se expande a través de una turbina acoplada al generador eléctrico. Los gases de escape de la turbina son condensados, comprimidos y devueltos al primer cambiador de calor para completar el ciclo. Un sistema de refrigeración de agua elimina el calor residual a la atmósfera a través de una torre de enfriamiento.

El proceso de ciclo binario puede ser una alternativa atractiva al proceso de expansión súbita para yacimientos geotérmicos que suministran agua conteniendo gran cantidad de sales. Como el fluido geotérmico no pasa a través de la turbina, se reducen extensamente los problemas de precipitación de sales, incrustaciones, corrosión y desgaste. Los ciclos binarios ofrecen la ventaja adicional de que el fluido de trabajo puede ser elegido de tal forma, que sus características termodinámicas sean superiores a las del propio vapor de agua, proporcionando un proceso global más efectivo.

Sin embargo, el proceso de ciclo binario no carece de desventajas, ya que los fluidos secundarios son muy caros, y pueden ser inflamables o tóxicos. Debido a la existencia de dos circuitos independientes de circulación, también aumenta la complejidad y el coste de la planta.

Aunque su tecnología está aún en desarrollo y no se está utilizando a nivel comercial, los procesos de **flujo total** emplean ambas fases (líquida y vapor) del fluido geotérmico para producir electricidad mediante válvulas de expansión y turbinas especialmente diseñadas para este fin. Aunque los problemas de incrustaciones y de gases incondensables aparecen también en este tipo de proceso, su rendimiento teórico es bastante superior a los de los dos sistemas anteriormente descritos.

Utilización de yacimientos de baja entalpía

Aunque en un principio las investigaciones geotérmicas estaban dirigidas preferentemente a la localización de yacimientos de alta entalpía, la mayor abundancia de yacimientos de baja entalpía, así como su distribución superficial más regular, han obligado a reconsiderar esta postura y a desarrollar nuevos procesos que permitan el aprovechamiento de estos yacimientos (de agua caliente), cuya temperatura no suele ser superior a los 100 °C.

De forma general, son tres los campos en que la geotermia de baja entalpía puede encontrar aplicación:

- Calefacción urbana.
- Calefacción industrial.
- Calefacción agrícola.

En cada uno de ellos se ha desarrollado gran número de procesos, de manera que la lista de sus posibles aplicaciones es muy extensa. Sin embargo, la utilización de la energía geotérmica en estos campos debería ir precedida de un estudio de viabilidad económica, que compare la solución geotérmica con el empleo de la solución convencional más barata.

Una instalación geotérmica de baja entalpía consta básicamente de los siguientes componentes:

- Dos pozos, uno de producción y otro de inyección.
- Dos bombas, una de extracción del fluido caliente y otra de reinyección de los efluentes fríos.
- Un intercambiador de calor al pie del pozo de producción.
- Una conducción conectada al intercambiador para la transmisión del agua calentada por el fluido geotérmico hasta el consumidor.

Los principales obstáculos que se oponen a la geotermia de baja entalpía son básicamente tres:

- Grandes inversiones iniciales.
- Bajo rendimiento.
- Imposibilidad de transporte.

El tercero de ellos, quizá el más importante, obliga a que, tanto los núcleos urbanos como las zonas industriales o agrícolas que puedan ser suministradas por esta

forma de energía deban estar ubicadas en las inmediaciones del campo geotérmico en explotación, lo cual en la mayoría de los casos no es posible y, por tanto, esta energía no puede ser siempre aprovechada.

FACTORES AMBIENTALES

La creencia generalizada de que los yacimientos geotérmicos representan una fuente energética no contaminante ha jugado un papel importante respecto al interés por el desarrollo de esta fuente de energía. En efecto, aunque el conocimiento del impacto ambiental que estas explotaciones pueden ocasionar todavía es incompleto, parece ser que las fuentes geotérmicas ofrecen ventajas ambientales significativas sobre otras fuentes de energía. Sin embargo, se han planteado algunas dudas con relación al equilibrio del medio ambiente, que hasta el momento actual no tienen respuesta, dada la falta de experiencia a alto nivel al respecto. Entre los posibles factores adversos más significativos cabe enumerar:

- Utilización del terreno.
- Influencia sobre el suelo.
- Niveles de ruido.
- Contaminación del aire.
- Uso y contaminación de las aguas.
- Contaminación térmica y efectos climáticos.
- Alteración de ecosistemas.

La explotación de un campo geotérmico tiene un impacto significativo sobre la **utilización del terreno**, ya que requiere la instalación de una considerable infraestructura. La superficie total necesaria para el aprovechamiento de un yacimiento es función, básicamente, de la producción eléctrica de las plantas generadoras, del número y la densidad de los pozos de suministro y de la topografía del lugar.

El impacto ambiental resultante de estas necesidades será, pues, inherente al proceso de explotación, por lo que una buena planificación y administración de la explotación puede contribuir de forma significativa a prevenir los efectos adversos.

Las actividades relacionadas con la explotación de las fuentes geotérmicas pueden tener **influencia sobre el suelo**, tanto respecto a su estabilidad como a la influencia que se pueda ejercer sobre las formaciones geológicas profundas. Entre los

efectos adversos potenciales más significativos se encuentran la erosión, el hundimiento del terreno y la inducción de actividad sísmica. Aunque su incidencia no ha sido determinada de forma adecuada, se están realizando las investigaciones pertinentes en los tres aspectos citados para establecer las prevenciones adecuadas a estos posibles peligros.

Probablemente, el efecto más generalizado que puede producir una explotación geotérmica son los altos **niveles de ruido**, que se ocasionan tanto durante la perforación como en la operación de la planta. No obstante, el ruido no representa un problema mayor que otros de los mencionados, porque sus efectos están limitados a la zona más inmediata de la explotación. Además, cada vez son más utilizadas diversas técnicas de reducción de ruido, aplicadas a la industria convencional, que también serían utilizables en la explotación geotérmica.

En la producción de energía a partir de una fuente geotérmica se puede producir **contaminación del aire** de dos formas: por salida directa de vapor geotérmico a lo largo de todas las etapas de la explotación y por salida de gases incondensables durante la operación de la planta generadora de electricidad. Ello hace necesario el desarrollo no sólo de técnicas de control, sino de sistemas de eliminación. En este aspecto sería ideal el desarrollo de una tecnología económicamente factible para recuperar productos de desecho que puedan ser útiles. Para impulsar esta solución se debería conceder prioridad al desarrollo de proyectos geotérmicos híbridos, que combinen el aprovechamiento energético con la producción química.

La explotación geotérmica suscita tres cuestiones principales relacionadas con las **fuentes de agua**: contaminación del agua, efectos sobre la hidrología e impacto sobre las disponibilidades locales de agua.

La contaminación del agua puede producirse por la eliminación de los fluidos geotérmicos conteniendo sustancias nocivas. Por su parte, una extracción y eliminación a gran escala de los fluidos geotérmicos puede asimismo alterar tanto la hidrología superficial como la freática de la zona de explotación. Ambos inconvenientes se pueden paliar reinyectando el fluido geotérmico utilizado en el mismo acuífero, cuidando, sin embargo, evitar la fuga de aguas residuales hacia los posibles acuíferos circundantes, presentando este método la ventaja adicional de regenerar el yacimiento primitivo.

Por su parte, el consumo de agua de refrigeración de una instalación geotérmica hace que sea necesario un estudio preliminar del impacto que pueda tener la explotación energética sobre las disponibilidades locales de agua, para evitar cualquier tipo de perjuicio al respecto.

Asimismo, la explotación geotérmica puede provocar varios tipos de **efectos térmicos y climáticos**. Los más importantes son los causados por la emisión a la atmósfera de calor residual, vapor de agua y dióxido de carbono, procedentes de los pozos, conducciones de vapor y plantas de proceso, aunque por la experiencia de que se dispone, se ha considerado que estos efectos son relativamente insignificantes si se comparan con otros tipos de impacto ambiental.

Por otro lado, la utilización de fuentes geotérmicas puede causar inevitablemente alguna **alteración de los ecosistemas** biológicos naturales en las inmediaciones del lugar de emplazamiento. Un examen minucioso del medio ambiente antes de la explotación ha de ser completado con una observación adecuada para detectar posibles cambios durante el desarrollo de la instalación. La rápida identificación del impacto ambiental puede prevenir un daño ecológico, y la información reunida puede ser de gran valor para su uso en áreas de explotación posteriores, con objeto de proteger convenientemente los sistemas biológicos naturales.

En definitiva, resulta evidente que un abuso indiscriminado de esta energía (igual que todas las demás) podría afectar negativamente el actual equilibrio ecológico, lo cual, en las condiciones actuales y con horizontes a largo plazo no debe suponer un freno a la utilización de las fuentes energéticas de origen geotérmico como complementarias a las de masiva utilización actual.