

ARTÍCULO

ESCENARIO FUTURO DE EXPLORACIÓN DE LA ENERGÍA GEOTÉRMICA: HACIA UN DESARROLLO SUSTENTABLE

*Edgar Santoyo-Gutiérrez e Ignacio S. Torres-Alvarado
Centro de Investigación en Energía, UNAM*

Escenario futuro de explotación de la energía geotérmica: hacia un desarrollo sustentable

Resumen. La energía geotérmica, una energía renovable madura, se utiliza hoy en día en 78 países, tanto para la producción de electricidad, como en otros usos directos, que inciden en sus programas de ahorro de energía. No obstante de la inmensa cantidad de energía disponible en los sistemas geotérmicos mundiales, su aprovechamiento en la generación de electricidad ha sido limitado ya que la capacidad total instalada a la fecha es de ~10,715 MW, lo cual representa un pequeño porcentaje de las necesidades mundiales de energía (~0.4%) con una producción de ~67,246 GWh. La tecnología desarrollada para su aprovechamiento, si bien ha sido completamente asimilada, se ha concentrado sólo en la explotación de los sistemas convectivos hidrotermales de alta temperatura, los cuales se encuentran presentes en forma limitada en el mundo. Estudios de prospección energética sobre el uso de estos recursos en la generación de electricidad indican que para el 2015, la capacidad instalada aumentará hasta los ~18,500 MW produciendo con ello una cantidad de energía equivalente a los ~75,000 GWh.

Existen ya algunos proyectos de prospección y explotación de estos nuevos sistemas que prevén, que en el futuro, la generación geotermoeléctrica se convertirá en una pieza clave dentro del panorama energético mundial. Estas nuevas tecnologías convertirán a la geotermia en recursos energéticos ilimitados y formarán parte del portafolio energético básico de muchos países. En el presente trabajo se describe el estado actual de desarrollo de la geotermia, así como algunas de sus tendencias tecnológicas futuras de explotación en un esquema de desarrollo sustentable.

Palabras clave: Energías Renovables, Geotermia, Roca Seca Caliente, Sistemas Hidrotermales.

Introducción

En el presente siglo se ha hecho más evidente, a nivel mundial, el acelerado proceso de extracción de los recursos del petróleo con efectos negativos, tanto en sus costos de producción como en el agotamiento de sus reservas (Goodstein, 2005). Dado que la generación de electricidad descansa en los [combustibles fósiles](#), su uso ha causado un deterioro al medio ambiente debido a la emisión continua de contaminantes ([gases efecto invernadero](#), agotamiento de la [capa de ozono estratosférico](#) y [esmog](#) debido a emisiones de gases residuales del transporte y la industria), con consecuencias muy graves al planeta Tierra y a la salud de los seres humanos (Abbasi & Abbasi, 2000). Todos estos problemas se harán más críticos en el futuro con el crecimiento de la población y la demanda creciente de energía eléctrica en el mundo.

La capacidad actual de energía instalada mundialmente es de ~15 TW y se prevé que para el 2050, los requerimientos se incrementen hasta ~30 TW (IEA, 2010). Ante este difícil escenario, el uso eficiente y racional de los recursos remanentes del petróleo, así como el uso de fuentes alternas de energía (p. ej., energías renovables) aparecen como soluciones viables, integrales y tecnológicas para atender la probable crisis energética del futuro. Entre las [Energías Renovables](#) (ER) que actualmente se desarrollan destacan las energías: hidroeléctrica, geotérmica, eólica, biomasa, solar y oceánica (Kruger, 2006; Gupta and Roy, 2007).

El desarrollo tecnológico y [sustentable](#) de estas ER ayudará en el futuro a satisfacer las necesidades y retos energéticos del Mundo, principalmente en países en donde se disponen enormes potenciales, como es el caso de México. Hoy en día las ER contribuyen con un 21.5 % en la capacidad total instalada en el mundo (hidroeléctrica: 19.0%, biomasa: 1.5%, eólica: 0.6%, geotérmica: 0.4%). Se espera que para el 2030 esta contribución se incremente hasta un 25.9% con las siguientes contribuciones: hidroeléctrica: 16.3%, eólica: 4.8%, biomasa: 3.3%, solar: 0.8%, geotérmica: 0.6% y oceánica: 0.1% (Jennings, 2008).

Dentro de este abanico de ER, la [energía geotérmica](#) o geotermia es la energía que ha mostrado una mayor madurez tecnológica con un importante apoyo al [desarrollo sustentable](#) de la humanidad, con una contribución actual a nivel mundial en la producción de electricidad del ~0.4%, lo cual en términos de la capacidad total instalada en el 2010 (~10,715 MW), equivalente a una producción total de energía ~67,246 GWh (Bertani, 2010).

La explotación de la geotermia ha sido también impulsada para efectos de mitigación de los problemas de [cambio climático](#), [efecto invernadero](#) y el [calentamiento global de la Tierra](#) (Fridleifsson *et al.*, 2008). Se tiene documentado que la generación geotermoeléctrica actual ha permitido el ahorro de ~206.5 millones de barriles de petróleo al año, además de evitar emisiones de gases por la operación de plantas de combustóleo (~100 millones de toneladas de CO₂) y de carbón (~116 millones de toneladas de CO₂).

En la presente contribución se describen, conceptos generales de la energía geotérmica, la evolución y desarrollo que ha tenido la explotación, así como las tendencias actuales y futuras que exhibirá la explotación de estos sistemas geoenergéticos en los escenarios nacional y mundial.

Energía geotérmica (conceptos generales)

La geotermia es referida como la energía que se deriva del calor natural existente en el interior de la [Tierra](#). La mayor parte de este calor se genera a partir de material fundido llamado [magma](#). La mayoría del magma producido en la Tierra no llega a la superficie, sino que tiende acumularse a profundidades entre 5 y 10 km, en donde suele calentar grandes regiones de roca o reservorios de fluidos confinados, los cuales dan origen a la formación de los sistemas geotérmicos (Armstead, 1983; Dickson & Fanelli, 2005). Desde un punto de vista práctico, se denomina [energía geotérmica](#) o simplemente [geotermia](#) al estudio y utilización de la energía térmica que, transportada a través de la roca y/o de fluidos, se desplaza desde el interior de la corteza terrestre hacia los niveles superficiales de la misma. Esta energía produce en la superficie terrestre impresionantes manifestaciones tales como [fumarolas](#), manantiales termales, [géiseres](#) (figura 1), así como la manifestación más extraordinaria de todas, los [volcanes](#).



Figura 1. Erupción del géiser Clepsydra, en el parque de Yellowstone, EE.UU. Fuente: Wikipedia.

El flujo de calor promedio que se da través de la [corteza terrestre](#) es del orden de 59 mW/m^2 [$1.9 \times 10^2 \text{ Btu/h/ft}^2$]

(MIT, 2006). El contenido total de [calor de la Tierra](#) se estima que es del orden de 12.6×10^{12} EJ, mientras que en la corteza terrestre se ha estimado en $\sim 5.4 \times 10^9$ EJ (Dickson & Fanelli, 2004). El calor interno de la Tierra es generado continuamente por el [decaimiento natural](#) de sus isótopos radiactivos con una tasa energética de 860 EJ/año, lo cual representa 2 veces la energía primaria consumida en el 2004 (463 EJ/año; MIT, 2006). La [conductividad térmica](#) de la roca de los sistemas geotérmicos es muy baja, de tal forma que se requiere mucho tiempo para agotar este recurso geoenergético (probablemente del orden de billones de años). Con base en estas características, la geotermia es considerada como una fuente inmensa de energía y casi inagotable si se explota sustentablemente.

La explotación comercial de la geotermia, en la generación de electricidad, inició en 1904, en el campo geotérmico de Larderello, Italia, cobrando mayor importancia hace apenas cuatro décadas. En los 70's, con el incremento en el costo de los combustibles fósiles, se le dio a la geotermia una importancia relevante, contribuyendo en parte a solucionar los requerimientos de energía de algunos países (Kagel & Gawell, 2005). En la actualidad, la energía geotérmica se considera ya como un recurso explotable, tanto económica como técnicamente, limpio, flexible, confiable y abundante, con posibilidades de usarse en una amplia variedad de aplicaciones (Lund, 2010). Entre los [usos más comunes](#) se encuentran: (i) [la generación de electricidad](#); (ii) el acondicionamiento de viviendas mediante [bombas de calor geotérmicas](#) (enfriamiento o calentamiento); (iii) [recreación \(balneología y turismo\)](#) y tratamientos medicinales; (iv) [invernaderos](#) (agricultura); (v) criaderos de peces y mariscos; y (vi) [procesos industriales y de manufactura](#) (p. ej., secado de madera o productos agrícolas).

La energía geotérmica que se explota actualmente para generar electricidad proviene del calor transportado por fluidos de alta temperatura, los cuales han sido calentados por el calor transportado de las intrusiones magmáticas a las rocas. Entre más profundo se vaya en dirección al [centro de la Tierra](#), más alta es la temperatura (figura 2).

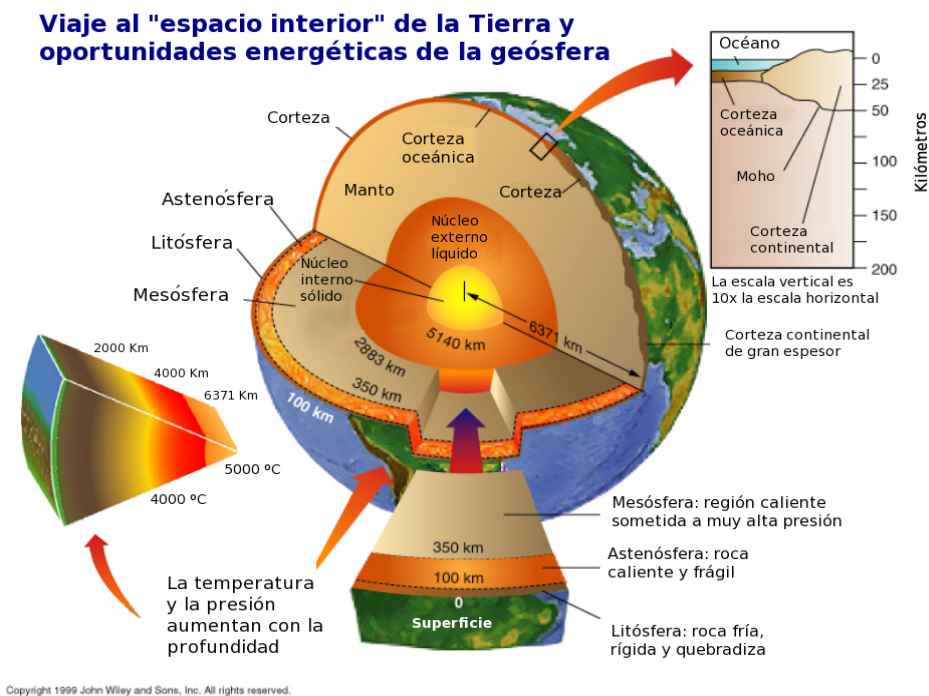


Figura. 2. Estructura interna de la Tierra.

En sitios geotérmicos privilegiados, el [gradiente geotérmico](#) suele llegar a ser varias veces mayor que el gradiente normal (cuyo promedio es de 30 °C/km, ó 1 °C cada 30 metros de profundidad). Por ello, en estas zonas es posible encontrar fluidos con temperaturas entre 200 °C y 350 °C, a profundidades promedio de ~3 km. No obstante, existen actualmente algunos sitios, como en el campo geotérmico de [Kakkonda en Japón](#) en donde se han registrado temperaturas hasta de 500 °C (Muraoka *et al.*, 1998). Los sistemas geotérmicos que presentan fluidos con temperaturas superiores a los 200 °C normalmente justifican la [perforación de pozos](#), los cuales son más apropiados para la generación geotermoeléctrica. Se han identificado nueve tipos de sistemas geotérmicos:

- (1) sistemas convectivos hidrotermales;
- (2) sistemas geotérmicos mejorados (roca seca caliente);
- (3) sistemas geopresurizados;
- (4) sistemas geotérmicos conductivos sedimentarios;
- (5) sistemas geotérmicos radiogénicos;
- (6) sistemas marinos;
- (7) sistemas magmáticos;
- (8) sistemas geotérmicos de agua caliente asociado con yacimientos de petróleo y gas; y
- (9) los sistemas geotérmicos supercríticos.

(1) Sistemas geotérmicos convectivos hidrotermales. Están constituidos por una fuente de calor, fluido

(líquido y/o vapor) y roca, en donde se almacena el fluido geotérmico (yacimiento o reservorio; figura 3). El fluido que existe en los sistemas hidrotermales tiene su origen como agua meteórica (agua de lluvia, hielo o de nieve). Esta agua se infiltra lentamente en la corteza terrestre, a través de poros y fracturas, penetrando varios kilómetros de profundidad en donde es acumulada y calentada por la roca, interacción que puede alcanzar en ocasiones temperaturas de hasta 500 °C.

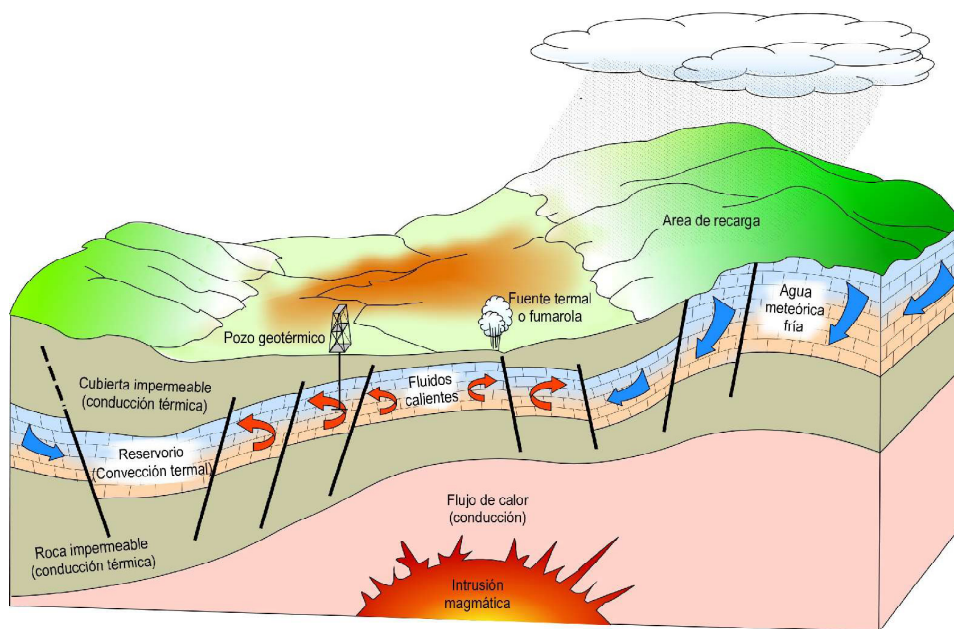


Figura 3. Modelo esquemático de un sistema geotérmico hidrotermal. Fuente: Dickson & Fanelli, 2004.

Estos sistemas pueden a su vez clasificarse en: yacimientos de vapor dominante, líquido dominante de alta entalpía y líquido dominante de baja entalpía. Estos yacimientos pueden estar asociados con sistemas volcánicos o no-volcánicos dependiendo de la temperatura de sus recursos. Cuando las temperaturas son superiores a 200 °C, los yacimientos tienen correlación con sistemas volcánicos y la [tectónica de placas](#), mientras que a temperaturas menores se relacionan generalmente con sistemas no-volcánicos, siendo estos últimos los más comunes. En la actualidad, los [sistemas convectivos hidrotermales](#) son los sistemas geotérmicos más convencionales y los que se explotan comercialmente, tanto para la generación de electricidad, como en usos directos.

(2) Sistemas geotérmicos mejorados o de roca seca caliente. Los sistemas geotérmicos mejorados, SGM ("[Enhanced Geothermal Systems](#)", [EGS](#) por su acrónimo en inglés), también conocidos como sistemas de roca seca caliente, son concebidos actualmente como una nueva generación de sistemas con un alto potencial térmico. Se caracterizan principalmente por la disponibilidad de una fuente de calor (roca caliente)

y la ausencia de fluidos debido las características geológicas propias de estos sistemas, generalmente rocas cristalinas y no permeables (Tester *et al.*, 2007). La explotación de un SGM implica la creación artificial de un yacimiento fracturado mediante técnicas de fracturamiento hidráulico y acompañado por la inyección de agua a temperatura ambiente a través de un pozo inyector perforado para estos fines. Esta agua es calentada por conducción al entrar en contacto con la roca seca caliente y después de adquirir condiciones adecuadas de presión y temperatura, es extraída mediante un segundo pozo productor para su aprovechamiento en la superficie (figura 4).

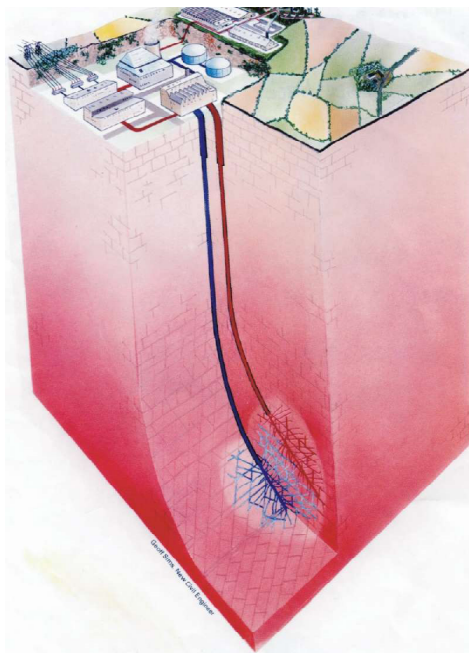


Figura 4. Modelo esquemático de un sistema geotérmico mejorado.

Fuente: Dickson & Fanelli, 2004.

Este recurso se encuentra disponible en el subsuelo a 2-4 km de profundidad en todo el planeta, con temperaturas atractivas para la generación de electricidad (en el intervalo 90-350°C), por lo que se consideran sistemas más abundantes y prácticamente inagotables. No obstante que el proceso de explotación de los [SGM](#) parece ser muy simple, tecnológicamente todavía presenta algunas barreras y retos por resolver para su explotación comercial, entre las cuales destacan: (a) la creación de un volumen apropiado de roca fracturada; (b) la disposición segura de un sistema tecnológico comercialmente atractivo; (c) la minimización del enfriamiento en el agua geotérmica producida; (d) la minimización de pérdidas de agua inyectada hacia la formación fracturada; y (e) la minimización de problemas de micro-sismicidad inducida por estos proyectos.

Por estas razones, el avance de estos sistemas ha sido lento. De hecho, la mayoría de los proyectos están todavía en fase de I+D y evaluación preliminar de su potencial, aunque cabría mencionar que existen ya algunos proyectos de [demostración tecnológica](#) con centrales de generación. Este importante desarrollo se

está dando en [Australia](#), Francia, Suiza, Inglaterra, [Japón](#) y E.U.A. y podría ser indicativo de lo que ocurrirá a nivel mundial en el futuro (Chamorro-Camazón, 2009). Estudios realizados por el Servicio Geológico de los E.U.A., reportan que la energía almacenada en estos yacimientos equivale a más de 500 veces la energía acumulada en todos los yacimientos de gas y petróleo del mundo, lo que habla de un recurso inmenso ([MIT, 2006](#)). Las reservas recuperables de esta energía en los E.U.A. se han estimado en más de 200,000 EJ, equivalentes a más de 2,000 veces la demanda anual de energía primaria. Pronósticos energéticos sobre estos recursos indican que para el 2050 se podrían instalar más de 100,000 MWe con una inversión de 1 billón de dólares americanos ([MIT, 2006](#)).

(3) Sistemas geotérmicos geopresurizados. Contienen agua y metano disuelto a alta presión (~700 bar) y mediana temperatura (entre 90 y 200°C) y están generalmente confinados en yacimientos de roca sedimentaria (Sanyal, 2010). Este tipo de recursos de alta presión pueden ofrecer energías: térmica (agua caliente), química (metano) y mecánica (energía cinética debido a que los fluidos con alta presión). Actualmente no se explotan comercialmente, aunque existen detectados algunos sistemas en [Texas](#) y [Louisiana](#) (E.U.A.: Lund *et al.*, 2010). Se ha estimado el potencial energético solamente en las costas de Texas en unos 40,000 MW_t. Se desconoce el potencial de este recurso en México.

(4) Sistemas geotérmicos asociados con cuencas sedimentarias. Estos sistemas pueden producir recursos de baja y mediana temperatura (20 a 150°C) debido a su flujo de calor y a la baja conductividad térmica de las rocas con gradientes geotérmicos superiores a los normales >30°C/km (Lund *et al.*, 2010). Algunos intentos están siendo evaluados para desarrollar proyectos geotérmicos en cuencas sedimentarias con flujos de calor atractivos. Estos sistemas se han detectado en regiones típicas de la formación Madison en el Norte y Sur de Dakota, Montana and Wyoming en los E.U.A., así como en la cuenca Pannonian de Europa central ([Hungría](#), en donde se usan como recursos de baja entalpía).

(5) Sistemas geotérmicos radiogénicos. Sistemas asociados a intrusiones graníticas que con el calor generado por el decaimiento radioactivo de los [isótopos](#) de torio, potasio y uranio calientan el agua subterránea local. Este calentamiento incrementa los gradientes geotérmicos arriba del promedio global y provee un fluido factible de aprovecharse con la perforación de pozos profundos. Este tipo de recursos geotérmicos se tienen disponibles en el Este de los E.U.A., aunque no han sido todavía explotados comercialmente (Lund *et al.*, 2010).

(6) Sistemas geotérmicos marinos. Recursos geotérmicos de alta entalpía existentes en el fondo del mar y manifestados como descargas hidrotermales, [chimeneas](#) o [fumarolas](#). Los sistemas marinos han sido poco estudiados hasta ahora, aunque se han detectados ya algunos en México en el Golfo de California con temperaturas hasta de 350 °C y flujos de calor de hasta 0.34 W/m² (Mercado, 1988; Villanueva *et al.*, 2006). No se explotan comercialmente en la actualidad.

(7) Sistemas geotérmicos magmáticos. Sistemas de roca fundida asociados con aparatos volcánicos activos o detectados a gran profundidad en zonas de debilidad cortical (Wohletz & Heiken, 1992). Existen algunos proyectos piloto desarrollados en Hawaii ([Volcán Mauna](#)) y [Heimaey](#) en Islandia (una de las islas Westmann) para tratar de extraer la energía térmica de los procesos de fusión de roca. El atractivo más importante de este tipo de recursos son las altas temperaturas disponibles >800 °C (Iglesias-Rodríguez *et al.*, 2005). No se explotan comercialmente en la actualidad por falta de tecnología apropiada. A largo plazo, cuando se disponga la tecnología y los materiales adecuados para resistir la corrosión y las altas temperaturas, se podría explotar la enorme cantidad de energía almacenada en las cámaras magmáticas de los volcanes activos.

(8) sistemas geotérmicos de agua caliente asociados con yacimientos de petróleo y gas. Existen hoy en día, otro tipo de recursos geotérmicos disponibles para su posible explotación a partir del calor contenido en el agua producida en pozos profundos de petróleo o gas (Davis & Michaelides, 2009). Esta agua caliente puede ser co-producida ya sea con petróleo o extraída a partir de los pozos petroleros que han sido abandonados por no tener una producción rentable, o simplemente por agotamiento del yacimiento. Su explotación no se ha hecho aún atractiva debido a que no se tiene evaluado completamente el recurso térmico disponible, en términos de las temperaturas y la producción de agua en estos sistemas.

(9) Sistemas geotérmicos supercríticos. Son sistemas muy profundos caracterizados por disponer fluidos geotérmicos en estado supercrítico y con temperaturas de hasta 600 °C. Hoy en día se han detectado en Islandia, en donde se lleva a cabo un proyecto de perforaciones profundas conocido por su acrónimo [IDDP](#) ("[Iceland Deep Drilling Project](#)"). El fluido supercrítico puede proveer hasta 10 veces más energía que la de un fluido almacenado en un sistema geotérmico convencional (Fridleifsson & Elders, 2005).

[Tecnologías](#) usadas actualmente en la generación de electricidad

Existen en la actualidad tres tipos de [plantas de energía comerciales](#) usadas para la [producción de electricidad](#) a partir de la explotación de sistemas hidrotermales: (i) plantas de vapor seco; (ii) plantas de evaporación súbita o flasheo; y (iii) plantas de ciclo binario. El tipo de planta a utilizar depende del estado termodinámico del fluido disponible en el yacimiento (vapor, agua líquida o mezcla de ambos), así como de su presión y temperatura. En las figuras 5 a 7 se presenta esquemáticamente el funcionamiento de cada una de las plantas citadas.

- (i) **Plantas geotermoeléctricas de vapor seco.** Una planta geotérmica de vapor seco usa el vapor extraído del yacimiento mediante pozos perforados profundos, y conduciéndolo directamente hacia un turbogenerador para producir electricidad (Fig. 5). Generalmente, el tipo de recurso

geotérmico que usan estas plantas requieren fluidos con altas temperaturas ($> 250\text{ }^{\circ}\text{C}$), razón por lo cual son muy escasas.

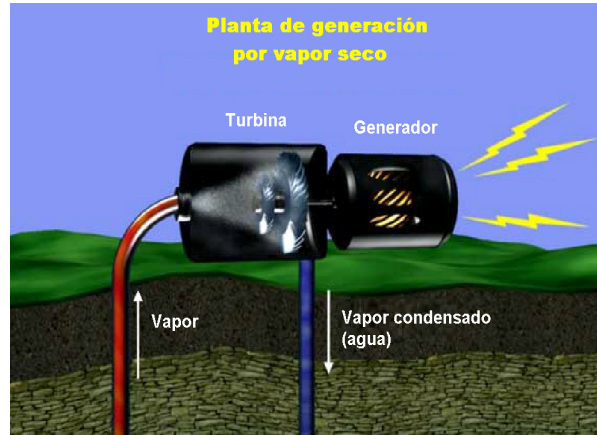


Figura 5. Esquema de una planta geotermoeléctrica de vapor seco.

- (ii) **Plantas de evaporación súbita (o flasheo de vapor).** Las unidades de flasheo de vapor son las plantas comerciales más usadas en la actualidad. Estas emplean fluido geotérmico (fase líquida o una mezcla líquido-vapor), con temperaturas superiores a $180\text{ }^{\circ}\text{C}$ y presiones relativamente elevadas (figura 6). La disminución de la presión del fluido en interior del pozo o a la salida de éste provoca una evaporación súbita ("flasheo") de parte de la fase líquida del fluido para formar vapor, el cual es eficientemente separado del agua en separadores centrífugos. El vapor separado es conducido a turbinas para la producción de electricidad, mientras que la salmuera (agua separada caliente) puede ser sometida a una segunda separación para un mejor aprovechamiento de su energía remanente. Este vapor secundario es empleado para incrementar la producción de electricidad a través de turbinas de baja presión. La potencia instalada en una planta de este tipo es menor que la de vapor seco, pero al ser más comunes los yacimientos que producen estos recursos, y estar distribuidos en forma más generosa, el número de plantas de este tipo es mayor y consecuentemente la capacidad total instalada es mayor.

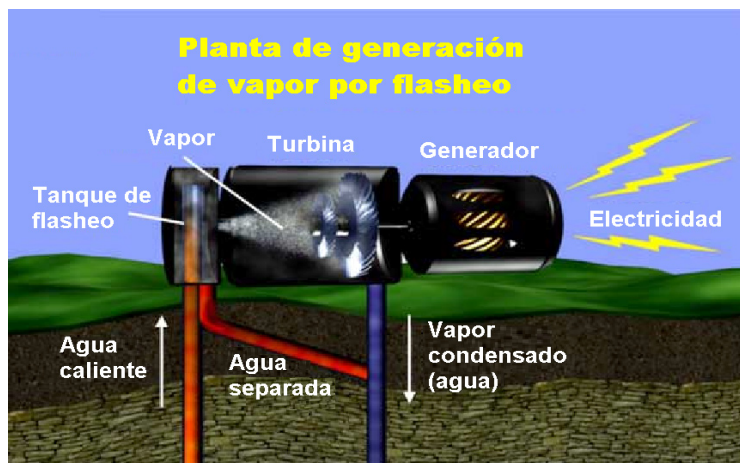


Figura 6. Esquema de una planta geotermoeléctrica de evaporación súbita.

(iii) **Plantas de ciclo binario.** Las plantas de ciclo binario permiten el aprovechamiento de yacimientos de baja entalpía, esto es de recursos geotérmicos de baja a mediana temperatura. En estas plantas, el fluido geotérmico no pasa a través de la turbina generadora, sino que transfiere su energía térmica a un fluido orgánico de bajo punto de ebullición (fluido secundario) mediante un intercambiador de calor. El fluido orgánico de trabajo se evapora en el [intercambiador de calor](#), y mediante un proceso termodinámico ([ciclo Rankine](#)) produce energía eléctrica al pasar a través de una turbina acoplada a un generador (figura 7).

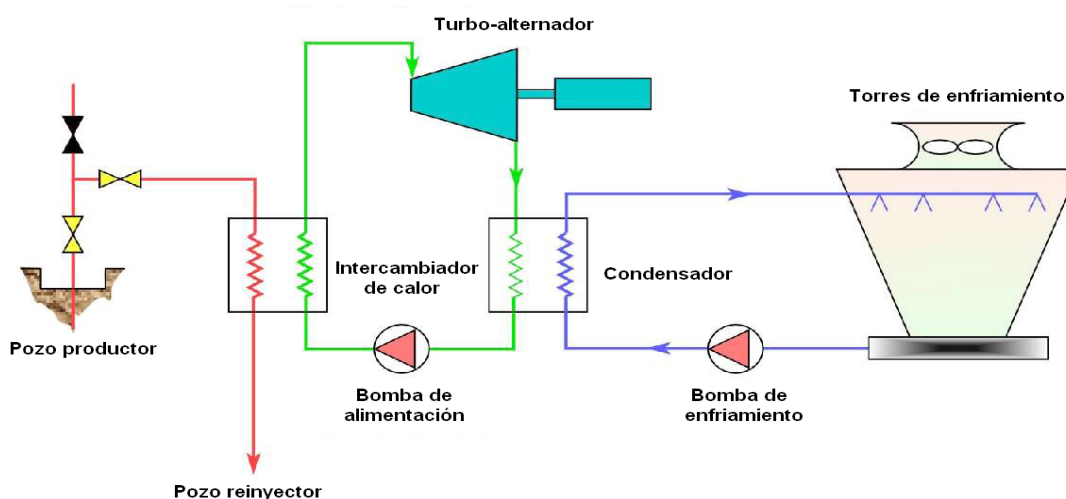
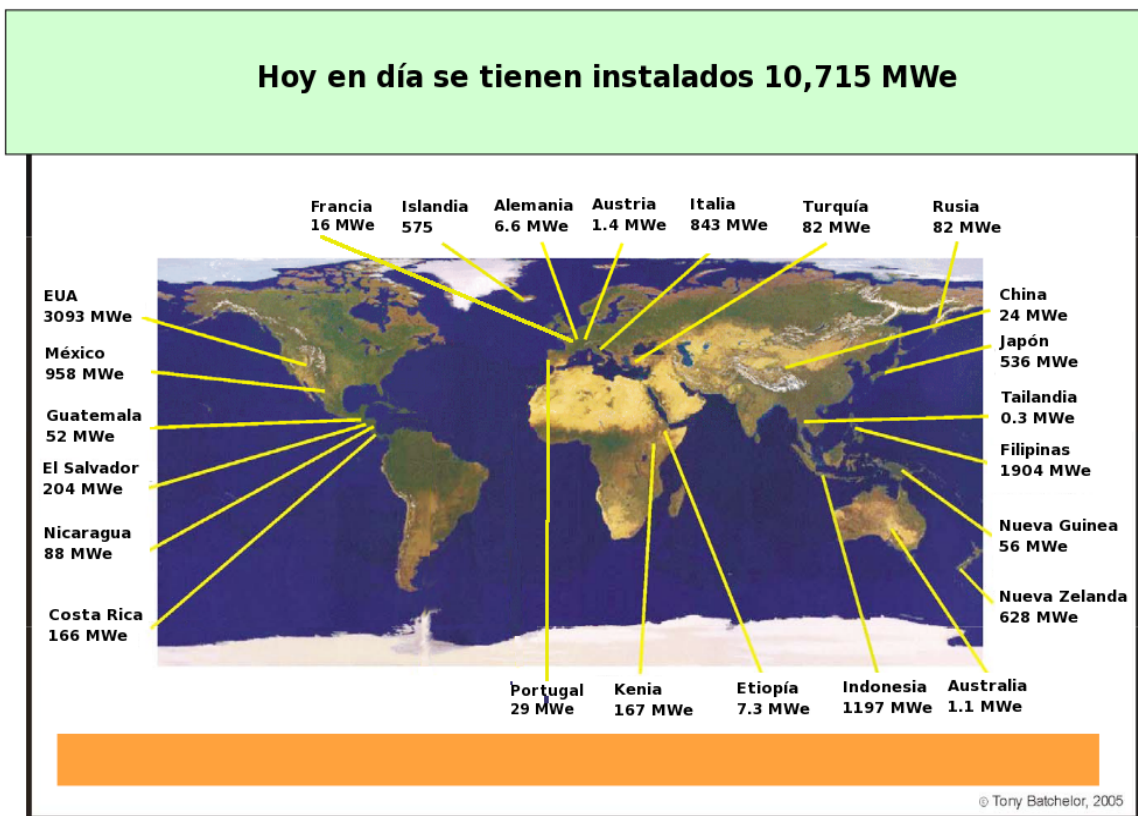


Figura 7. Esquema de una planta geotermoeléctrica binaria. El color rojo indica el flujo del fluido geotérmico, el verde el fluido secundario y el azul el agua fría. Fuente: Dickson & Fanelli, 2004.

Una de las mayores ventajas de la generación eléctrica obtenida mediante recursos geotérmicos es el hecho que estas plantas presentan un factor de capacidad muy alto (horas anuales de funcionamiento frente al total posible), mucho mayor que otras tecnologías de energías renovables. A diferencia de otras energías, como la solar o la eólica, con fuertes dependencias estacionales u horarias, una central geotérmica puede estar totalmente operativa, salvo necesidades de mantenimiento, 24 horas al día y 365 días al año.

Escenarios de la generación geotermoeléctrica

Escenario actual mundial. En 2010, la capacidad instalada a nivel mundial alcanzó los 10,715 MWe en 39 países (Figs. 8 y 9) y se pronostica que para el 2015, alcanzará los 18,500 MWe, con un factor de capacidad del ~77-85% (Fig. 10). Otros pronósticos más optimistas indican que la capacidad geotermoeléctrica podría alcanzar los 140 GWe en el 2050 (1,104 TWh/a con un factor de capacidad del 90%), implicando un crecimiento de ~14.5 veces la capacidad actual.



A.S. Batchelor, 2005; Bertani, 2008; and GEA, 2009

Figura 8. Capacidad instalada para la generación de energía eléctrica mediante recursos geotérmicos mundiales (Bertani, 2010).

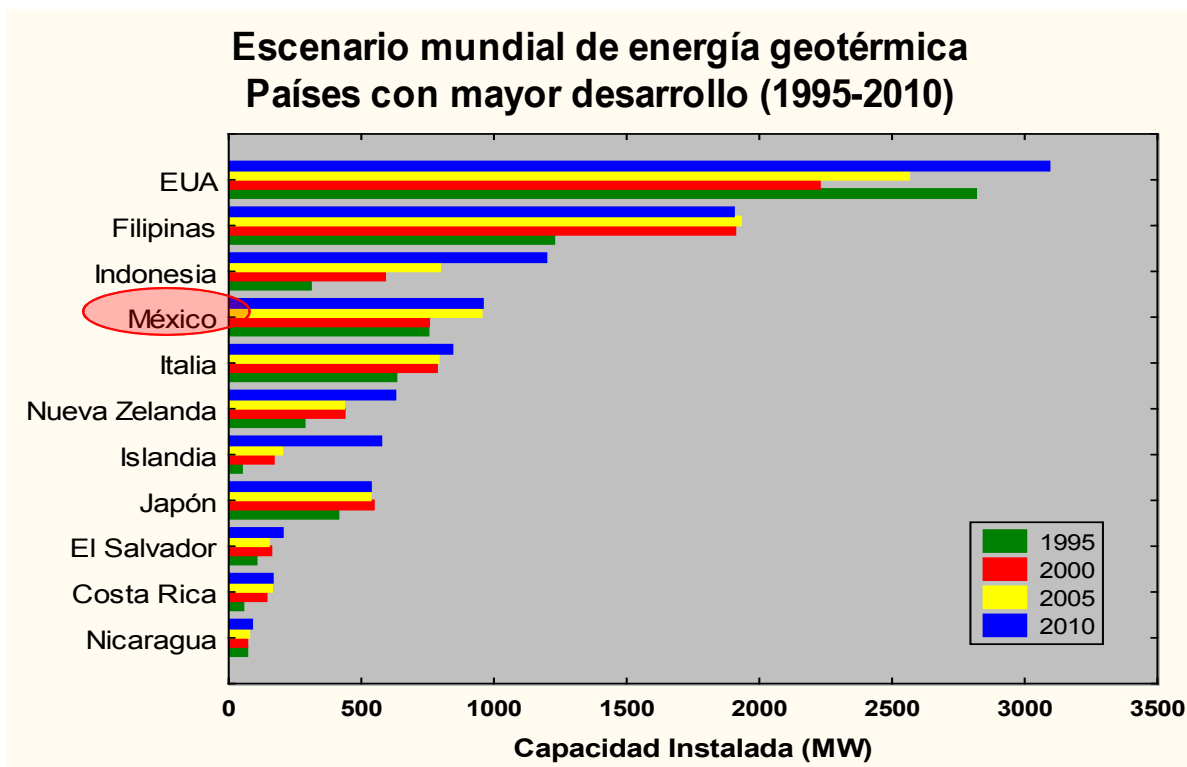


Figura 9. Escenario mundial de producción de energía eléctrica a partir de recursos geotérmicos.

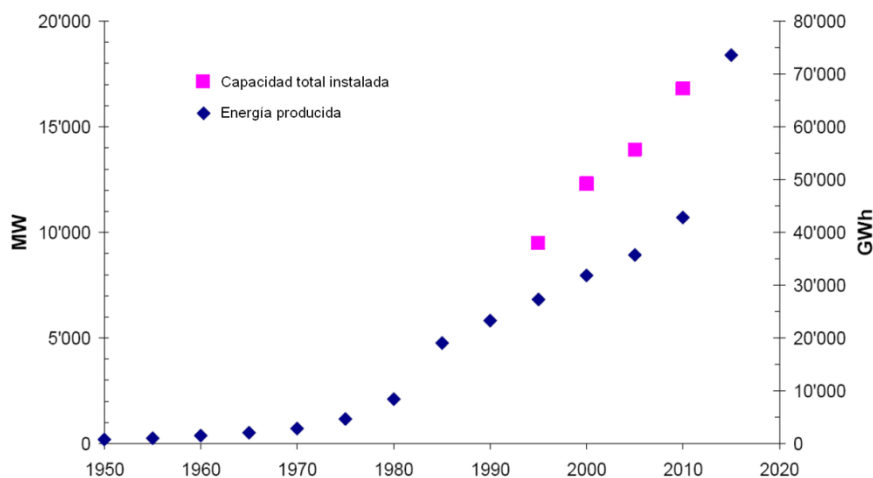


Figura 10. Evolución mundial de la producción de energía eléctrica a partir de recursos geotérmicos.

Escenario actual en México. La generación geotermoeléctrica producida en México alcanza ya los 958 MWe de capacidad instalada (~2% de la capacidad efectiva de generación, ~3.07% de generación por fuente) a través de la explotación comercial de cuatro campos geotérmicos (CFE, 2008; figura 11): Cerro Prieto en Baja California (720 MWe); Los Azufres en Michoacán (188 MWe); Los Humeros en Puebla (40 MWe) y Las Tres Vírgenes en Baja California (10MWe).



Figura 11. Localización de campos geotérmicos de México actualmente en explotación. Se muestran también dos campos geotérmicos con potencial evaluado y el Cinturón Volcánico Mexicano, región con el mayor potencial geoenergético del país por la presencia de un número importante de volcanes recientes o aún activos.

México se encuentra en cuarto lugar a nivel mundial en generación eléctrica, después de E.U.A. (3,093 MWe), Filipinas (1,904 MWe) e Indonesia (1,197 MWe): Bertani, 2010; figura 9. Estudios prospectivos indican que la capacidad instalada será incrementada a través de la construcción de nuevas plantas: Cerro Prieto V (100 MW) y Los Humeros II (25 MW; Gutiérrez-Negrín *et al.*, 2010). Por su alta viabilidad técnica y económica, el proyecto Cerritos Colorados (anteriormente La Primavera, Jalisco) con un potencial estimado de 75 MW, podrá sumarse a la capacidad instalada en el futuro. Este proyecto entraría en operación una vez que se clarifique la naturaleza sustentable y ambiental del proyecto con autoridades y comunidades locales.

Datos reportados por CFE indican que la capacidad geotermoeléctrica actualmente instalada ha requerido la perforación de 556 pozos y la producción de ~65.9 millones de toneladas de vapor al año (~7,504 t/h), de los cuales 66.4% corresponden a Cerro Prieto, 15.3% a Los Azufres, 7.7% a Los Humeros y 1.8% a Las Tres Vírgenes (Gutiérrez-Negrín, 2010). El costo de generación se considera competitivo a nivel mundial, oscilando entre 2 y 10 US¢/kWh y con costos de retorno de inversión que fluctúan entre 800 y 3000 US\$

kW. Se espera que en el futuro estos costos puedan reducirse entre 1 y 8 US¢/kWh. Los costos promedio de generación en México han sido variables: Cerro Prieto (3.46 US¢/kWh); Los Azufres (3.29 US¢/kWh); Los Hornos (3.45 US¢/kWh); Tres Vírgenes (3.45 US¢/kWh); y se estiman que en La Primavera (4.11 US¢/kWh).

Usos directos de la geotermia

Escenario mundial. Los sistemas geotérmicos de mediana y baja entalpía (temperaturas < 180 °C), son los recursos que se destinan en aplicaciones de usos directos. En el 2010, el uso total de recursos de baja entalpía en el mundo (78 países) fue de 121,696 GWh/yr, lo que significó un incremento del 60% respecto al 2005 con una tasa de incremento anual del 9.9% (Lund et al., 2010; figura 12).

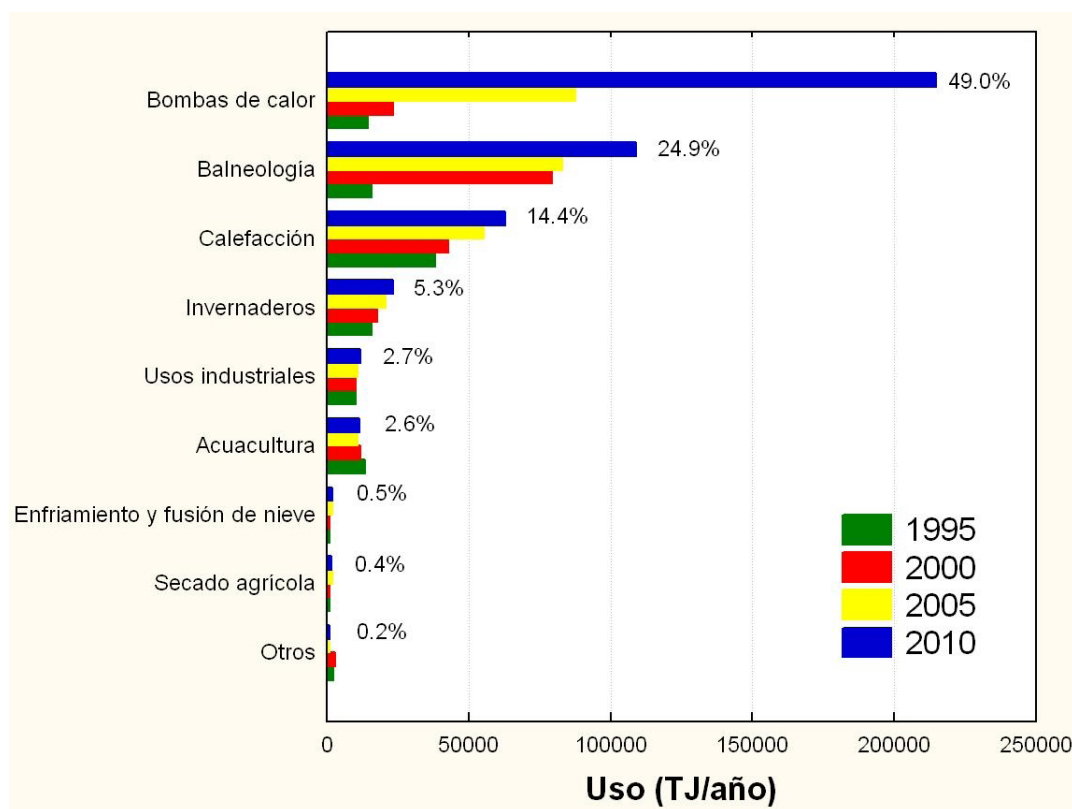


Figura 12 Evolución de los usos directos de la energía geotérmica de 1995 al 2010. Los porcentajes junto a la barra azul indican la proporción de la aplicación con respecto al total para el año 2010.

Escenario en México. Los usos directos de la energía geotérmica en México se han limitado en aplicaciones de recreación (balneología) y tratamientos terapéuticos. Se estima que la capacidad instalada es de ~164

MWt distribuidos en más de 160 sitios en 19 estados de la República (Torres *et al.*, 1993; Iglesias & Torres, 2003). Estos recursos representan ~12,939 t/h de agua caliente con una temperatura promedio de 50°C. La capacidad instalada de 155.8 MWt podrían generar 3,721.6 TJ/a con un factor de capacidad promedio de 0.82 (Gutiérrez-Negrín *et al.*, 2010).

Asimismo, es importante señalar que ya han existido algunos proyectos piloto, desarrollados por la CFE, sobre usos directos en los campos geotérmicos de Cerro Prieto, Los Azufres y Los Humeros, entre las cuales destacan: extracción secundaria de minerales en lagunas de evaporación; calefacción de oficinas e invernaderos, aplicaciones agrícolas en el secado de alimentos y madera. Asimismo, se han realizado trabajos de investigación con bombas de calor operadas con energía geotérmica para aplicaciones de refrigeración (Ayala *et al.*, 1998) y purificación de efluentes industriales (Holland *et al.*, 1999).

Se estima que, tal y como ocurre en países de Europa, el uso del calor geotérmico y las bombas de calor constituirán una aplicación muy importante en el futuro ya que permitirá un ahorro importante de energía para el acondicionamiento de espacios (calefacción o refrigeración) en ciudades con temperaturas extremas. En este aspecto, la geotermia tiene la posibilidad de hacer muy eficiente el uso de la energía, ya que el fluido que sale a una temperatura puede ser usado en una segunda aplicación directa, en lo que se llama "uso en cascada" de la energía geotérmica (figura 13).

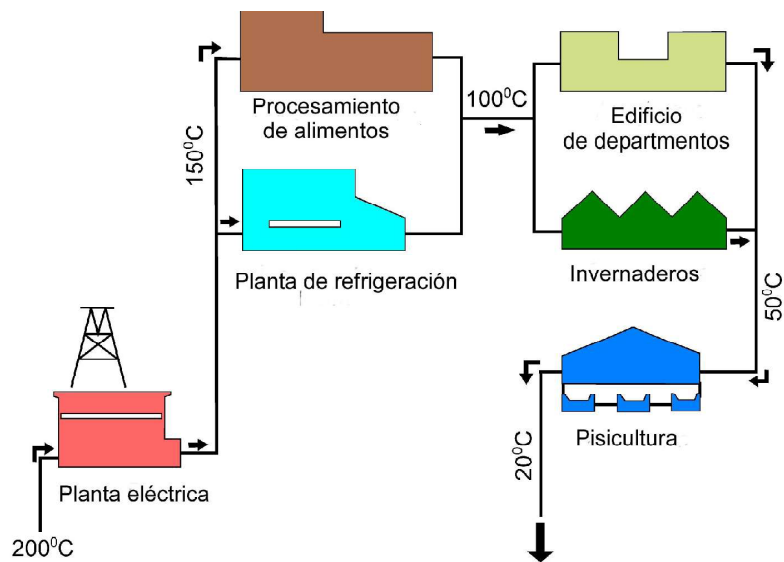


Figura 13. Uso en línea o "en cascada" de la energía geotérmica. Fuente: Dickson y Fanelli, 2004.

Potencial Geotérmico Disponible en México

La evaluación del potencial geotérmico disponible en México es una tarea de investigación muy compleja y aún no resuelta. Existen trabajos muy preliminares orientados a estimar dicho potencial, sin embargo éstos se han concentrado en el estudio de los yacimientos productores de los campos geotérmicos ya en explotación. La CFE considera que la capacidad instalada del campo geotérmico de Cerro Prieto puede incrementarse de 100 a 150 MWe adicionales, usando tecnologías apropiadas para el aprovechamiento de las zonas más explotadas del campo, así como plantas de ciclos binarios para aprovechar el calor residual del agua separada. El campo de Los Azufres se podría ampliar en 50 MWe adicionales, una vez que esté operando el proyecto Azufres III y se conozca mejor la respuesta del yacimiento. Estimaciones más realistas del potencial geotérmico almacenado deben venir de estudios geológicos, geofísicos, térmicos y químicos involucrados con el estudio de las fuentes primarias de calor o cámaras magmáticas de estos sistemas (Verma & Andaverde, 2007).

A partir de la identificación de sitios geotérmicos promisorios de alta entalpía, la CFE ha establecido nuevos programas de exploración para la evaluación de sitios potenciales, entre los cuales destacan: Acoculco, Pue.; La Soledad, Jal.; El Domo San Pedro, Nay.; Maguarichic, Chih.; Bahía Concepción, B.C.; Volcán Tacaná, Chis.; San Diego el Naranjo, Nay.; Los Borbollones, Jal.; Los Hervores de la Vega, Jal.; Ixtlán de los Hervores, Mich.; Los Negritos, (Mich.), Purúandiro, (Mich.), Comajilla, (Gto.), San Bartolomé de los Baños, (Gto.), Pathé, (Hgo.), Las Derrumbadas, Pue.; Tulechek, B.C.; Laguna Salada, B.C.; Riito, B.C.; Santispac, B.C.S.; Agua Caliente, B.C.S.; y Los Volcanes de Saquisismunde, B.C.S. La probable capacidad de estos yacimientos geotérmicos individuales ha sido estimada entre 25 y 50 MWe y su potencial total estimado podría alcanzar los 1,000 MWe (Gutiérrez-Negrín, 2007).

Por otro lado, estudios sobre los recursos de media y baja temperatura ($< 200^{\circ}\text{C}$) disponibles a lo largo del país, reportan un potencial disponible para usos directos del calor geotérmico. Existe un inventario de focos termales con recursos de temperaturas mayores a 28°C que incluye el censo de $\sim 2,332$ manifestaciones geotérmicas, distribuidas en 27 estados del país (Torres *et al.*, 1993). Evaluaciones preliminares de reservas geotérmicas en México han sido realizadas sólo en 276 manifestaciones hidrotermales (Iglesias & Torres, 2003). A partir de estos estudios se estimó que las reservas de estos sitios están en el intervalo 7.7×10^{16} y 8.6×10^{16} kJ. La distribución de temperaturas asociadas en estos sitios está entre 60°C y 180°C . Se estima que las cantidades de energía recuperables estén entre 3.08×10^{17} y 3.45×10^{17} kJ (esto es, de 8.56×10^{10} a 9.58×10^{10} MWt).

Impacto ambiental

La generación de electricidad mediante recursos geotérmicos contribuye a minimizar efectos de degradación del medio ambiente y a mitigar problemas de cambio climático y calentamiento global. Los proyectos geotermoeléctricos emiten concentraciones de CO_2 menores a las producidas por plantas convencionales de

combustibles fósiles: gas natural (453 g/kWh); hidrocarburos (906 g/kWh) y carbón (1042 g/kWh). Estudios reportados por Murphy & Niitsuma (1999) muestran emisiones variables de CO₂ para diferentes campos geotérmicos del mundo: Wairakei, Nueva Zelandia (13 g/kWh); Los Geysers, E.U.A. (33 g/kWh); Krafla, Islandia (96 g/kWh); Cerro Prieto, México (175 g/kWh); Tiwi, Filipinas (272 g/kWh); y Larderello, Italia (380 g/kWh).

Tecnologías para el futuro

El futuro de la explotación geotérmica muestra dos escenarios definidos. A corto plazo, se vislumbra un mejor aprovechamiento de los sistemas convectivos hidrotermales con fluidos de mediana temperatura y el uso de plantas de ciclo binario más eficientes (se prevé el uso de variantes del [ciclo termodinámico Rankine](#), p. ej., el [ciclo Kalina](#): Chamorro-Camazón, 2009). A mediano-largo plazo, se buscará desarrollar una tecnología más confiable para empezar a explotar los sistemas de roca seca caliente, lo cual sin duda alguna, multiplicará los recursos disponibles y la capacidad instalada geotermoeléctrica, así como en otros usos directos.

Futuro de la Energía Geotérmica en México. México, al ser un país pionero en el aprovechamiento de recursos geotérmicos, tiene una amplia experiencia en la explotación de sistemas hidrotermales. Sin embargo, se deben hacer todavía esfuerzos para optimizar el aprovechamiento de estos recursos, además de la urgente necesidad de desarrollar tecnología para explotar la nueva generación de SGM. Esto hace necesario que el gobierno apoye más las tareas de investigación y desarrollo tecnológico para explotar estas nuevas fuentes de geoenergía, y de esta forma, ayudar a satisfacer la futura demanda energética del país. Para que la energía geotérmica sea más competitiva se requiere fomentar algunas acciones para el aprovechamiento integral del potencial de los sistemas geotérmicos, principalmente a través de:

- 1) Mejorar las técnicas de exploración que contribuyan a reducir la incertidumbre de localización de recursos geotérmicos y los costos de exploración;
- 2) Mejorar las metodologías experimentales para la caracterización de materiales (rocas y fluidos) y propiedades de los componentes de un sistema geotérmico;
- 3) Mejorar las técnicas de perforación que logren subsanar los obstáculos de altas temperaturas, fluidos corrosivos y localización confiable de zonas productoras;
- 4) Desarrollar materiales avanzados que se adapten a las nuevas necesidades tecnológicas ante la exploración de sistemas más profundos y más calientes;
- 5) Mejorar las técnicas de ingeniería de yacimientos para la optimización de la extracción de energía geotérmica y su uso comercial con el fin de generar electricidad a menor costo;
- 6) Desarrollar programas de investigación y desarrollo en el área de equipos de superficie;
- 7) Enfocar la investigación para mejorar la eficiencia y operación de las plantas y de los ciclos termodinámicos usados actualmente, la evaluación de algunas combinaciones de ellos, y el uso de

- nuevos ciclos termodinámicos;
- 8) Fomentar las acciones de investigación y desarrollo tecnológico requeridas para evaluar el potencial de los recursos geotérmicos de roca seca caliente, geopresurizados, marinos y magmáticos en nuestro país;
 - 9) Evaluar el recurso geotérmico disponible en México, para definir su potencial en la generación de electricidad y en otros usos directos;
 - 10) Establecer un programa de investigación sobre las posibles aplicaciones de la geotermia de baja y media temperatura en los sectores residencial, comercial, servicios, agrícola e industrial;
 - 11) Canalizar mayores recursos financieros al desarrollo de nuevas tecnologías para el aprovechamiento integral de los recursos geotérmicos existentes en el país, en especial los procesos en cascada que contemplen la generación de energía eléctrica aunada a otros usos directos, para apoyar programas de ahorro y uso eficiente de energía;
 - 12) Formar recursos humanos de alto nivel a través de los programas de especialización y posgrado; y
 - 13) Reducir las barreras tanto jurídicas como burocráticas, con el fin de que los inversionistas puedan tener seguridad legal y acceso expedito a la utilización de los recursos geotérmicos.

Bibliografía

- Abbasi, S. A., & Abbasi, N. (2000). The likely adverse environmental impacts of renewable energy sources, *Applied Energy*, Vol. 65, 121-144.
- Armstead, H.C.H. (1983) *Geothermal Energy: Its Past, Present and Future Contributions to the Energy Needs of Man*. Spon Press; 2nd edition, 448 p.
- Ayala, R., Heard, C.L., Holland, F.A. (1998) Ammonia lithium nitrate absorption/compression refrigeration cycle. Part II. Experimental. *Applied Thermal Engineering*, Vol. 18, 661-670.
- Bertani, R. (2010) *Geothermal Power Generation in the World 2005–2010 Update Report*. Proc. of the World Geothermal Congress 2010, Bali, Indonesia, 41 p.
- Chamorro-Camazón, C. (2009) *Energía eléctrica a partir de recursos geotérmicos. Estado actual y perspectivas a nivel mundial*. *Dyna*, Vol. 84, pp. 44-51.
- Comisión Federal de Electricidad, CFE (2008) Datos compilados - página Web: <http://www.cfe.gob.mx/es/LaEmpresa/generacionelectricidad>.
- Davis, A.P., Michaelides, E.E. (2009) Geothermal power production from abandoned oil wells. *Energy*, Vol. 34, 866-872.
- Dickson, M.H., Fanelli, M. (2004) *¿Qué es la energía geotérmica?* Istituto di Geoscienze e Georisorse, CNR, Pisa, Italia. International Geothermal Association, 62 p.
- Dickson, M.H., Fanelli, M. (2005) *Geothermal Energy: Utilization and Technology*. Earthscan Publications Ltd., 226 p.
- Fridleifsson, G.Ó., Elders, W.A. (2005) The Iceland Deep Drilling Project: A search for deep unconventional geothermal resources. *Geothermics*, Vol. 34, 269-285.
- Fridleifsson, I.B., Bertani, R., Huenges, E., Lund, J.W., Ragnarsonn, A. y Rybach, L. (2008). The possible role and contribution of geothermal energy to the mitigation of climate change, In: *IPCC Scoping Meeting on Renewable Energy Sources*, Proceedings, Germany, pp. 59-80.
- Goodstein D. (2005) *Out of Gas: The End of the Age of Oil*. W. W. Norton & Company, USA, 148 p.
- Gupta, H.K., Roy, S., 2007. Worldwide status of geothermal resource utilization (Chapter 8). In: *Geothermal Energy: An Alternative Resource for the 21st Century*, Elsevier Science, Amsterdam, 199-229.
- Gutiérrez-Negrín, L.C.A. (2007) 1997-2006: A decade of geothermal power generation in Mexico. 2007 Annual Meeting GRC, Sparks, Nevada, 11 p.
- Gutiérrez-Negrín, L.C.A., Maya-González R., Quijano, J.L. (2010) Current Status of Geothermics in Mexico. Proc. World Geothermal Congress 2010, Bali, Indonesia, 11 p.
- International Energy Agency, IEA (2010) *Perspectivas sobre tecnología energética: Escenarios y estrategias hasta el año 2050. Resumen Ejecutivo*, International Energy Agency: http://www.iea.org/textbase/nppdf/free/2010/key_stats_2010.pdf, 24 p.
- Holland, F.A., Siqueiros, J., Santoyo-Gutierrez, S., Heard, C.L., Santoyo, E. (1999) *Water Purification using* 22 -xx

- Heat Pumps. E & FN SPON/Routledge, U.K., 256 p.
- Iglesias, E.R., Torres, R.J., 2003. Low- to medium-temperature geothermal reserves in Mexico: A first assessment. *Geothermics*, Vol. 32, 711-719.
- Iglesias-Rodríguez, E., Arellano-Gómez, V.M., Torres, R.J. (2005). Estimación del recurso y prospectiva tecnológica de la Geotermia en México. Instituto de Investigaciones Eléctricas, Reporte Interno Proyecto No. 3753, 63 p.
- Kagel, A., Gawell, K. (2005) Promoting geothermal energy: Air emissions comparison and externality analysis. *The Electricity Journal*, Vol. 18, 90-99.
- Kruger, P. (2006) *Alternative Energy Resources: The Quest for Sustainable Energy*. Wiley, 276 p.
- Lund, J.W., Freeston, D.H., Boyd, T.L. (2010) Direct Utilization of Geothermal Energy 2010 Worldwide Review. *Proc. of the World Geothermal Congress 2010, Bali, Indonesia*, 23 p.
- Mercado, S. (1988) High temperature marine hydrothermal vents (350 °C) located at 21 °N, a 2600 m depth on the East Pacific Rise. *Geothermal Resources Council, Transactions*, Vol. 12, 175-183.
- 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*. MIT, USA, 372 p.; http://www1.eere.energy.gov/geothermal/future_geothermal.html
- Muraoka, H., Uchida, T., Sasada, M., Yagi, M., Akaku, K., Sasaki, M., Yasukawa, K., Miyazaki, S., Doi, N., Saito, S., Sato, K., Tanaka, S. (1998) Deep geothermal resources survey program: igneous, metamorphic and hydrothermal processes in a well encountering 500°C at 3729 m depth, Kakkonda, Japan. *Geothermics*, Vol. 27, 507-534.
- Murphy, H., Niitsuma, H. (1999) Strategies for compensating for higher costs of geothermal electricity with environmental benefits. *Geothermics*, Vol. 28, 693-711.
- Sanyal, S.K. (2010) Future of geothermal energy. *Proc. Thirty-Fifth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*, Stanford University, Stanford, California, 6 p.
- Savage, L. (2006) *Geothermal Power (Fueling the Future)*. Greenhaven Press, 128 p.
- Tester, J., Blackwell, D., Petty, S., Richards, M., Moore, M., Anderson, B., Livesay, B., Augustine, Ch., DiPippo, R., Nichols, K., Veatch, R., Drake, E., Toksoz, N., Baria, R., Batchelor, A.S., Garnish, J. (2007) The future of geothermal energy: an assessment of the energy supply potential of engineered geothermal systems (EGS) for the United States. *Proc. of the Thirty-Second Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*, Stanford University, Stanford, California, USA, 10 p.
- Torres, V., Arellano, V., Barragán, R.M., González, E., Herrera, J.J., Santoyo, E., Venegas, S. (1993) *Geotermia en México*. Programa Universitario de Energía, Coordinación de la Investigación Científica, UNAM, Programa Universitario de Energía - UNAM, 161 p.
- Verma S.P., Andaverde J. (1996) Temperature distribution from cooling of a magma chamber in Los Azufres geothermal field, Michoacán, Mexico. *Geofísica Internacional*, 35, 105-113.
- Verma, S.P., Andaverde, J. (2007) Coupling of Thermal and Chemical Simulations in a 3-D Integrated Magma Chamber-Reservoir Model: A New Geothermal Energy Research Frontier. In: *Geothermal Energy*

Research Trends, Nova Science Publishers, New York, USA, Chapter 7, pp. 149-188.

Villanueva, R.E., Prol-Ledesma, R.M., Torres-Vera, M.A., Canet, C., Armienta, M.A., de Ronde, C.E.J. (2006) Comparative study of sampling methods and in situ and laboratory analysis for shallow-water submarine hydrothermal systems. *Journal of Geochemical Exploration*, Vol. 89, 414-419.

Wohletz, K., Heiken, G., (1992) *Volcanology and Geothermal Energy* (Los Alamos Series in Basic and Applied Sciences). University of California Press, 450 p.

Se agradece a la Geothermal Education Office (USA) por proporcionar algunas de las figuras presentadas en este trabajo, así como a la Lic. Esther O. García Mandujano por el apoyo brindado en la preparación de algunas de las figuras del manuscrito.

