

# SONDEOS GEOTÉRMICOS PROFUNDOS

A. J. Moraño Rodríguez<sup>1</sup>. J. L. Guillén Viñas<sup>2</sup>

1 Dr. Ingeniero de Minas. Departamento de Ingeniería de Materiales. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas. Universidad Politécnica de Madrid. alfonsoj.morano@upm.es

2 Dr. Ingeniero de Minas. guillensanchez@arquinox.es

## Resumen:

Los sondeos geotérmicos profundos tienen como objetivo la explotación de un recurso geotérmico, siendo el uso principal la generación de energía eléctrica. La tecnología actual permite la explotación de recursos geotérmicos a relativa profundidad para bombear agua caliente o vapor, ya que a profundidades mayores no es viable económicamente, sobre todo después del agotamiento del líquido (agua) calorportador.

La explotación de un sondeo geotérmico profundo para generación de energía eléctrica se podrá realizar con la tecnología actual, en caso de que sea hidrotermal (recarga natural de agua), no pudiendo llevarse a cabo en caso contrario. Para recursos no hidrotermales es preciso realizar la "estimulación" del mismo, mediante la tecnología conocida como Sondeos Geotérmicos Estimulados o EGS (Enhanced Geothermal Systems).

Una técnica de estimulación EGS para un sondeo no hidrotermal o incluso hidrotermal (pero agotado), es la llamada "Fracturación Hidráulica", que consiste en la ampliación, apertura o agrandamiento de las redes de fisuras existentes en los materiales atravesados por un sondeo, incluso la posible generación de nuevas fisuras, gracias a la acción de un fluido inyectado a alta presión en el interior del sondeo y además el mantenimiento de una presión residual durante su explotación o introducción de material (arenas finas) para mantener las fisuras abiertas.

Las técnicas de perforación como la perforación por espalación quizás dan una nueva salida a los problemas de perforación de sondeos profundos actuales, respecto rendimientos, pero sobre todo económicos.

**Palabras clave:** Sondeos, geotermia, fracturación, hidráulica, espelación.

## 1 INTRODUCCIÓN

Los sondeos geotérmicos profundos tienen como objetivo la explotación de un recurso geotérmico, siendo el uso principal la generación de energía eléctrica. La explotación de un sondeo geotérmico es similar a la de un sondeo de agua en lo que se refiere a las operaciones de perforación, entubado y bombeo, debiendo realizarse en zonas con un gradiente geotérmico económicamente interesante. En el caso de un sondeo geotérmico profundo, las labores de perforación y entubado, así como la maquinaria son muy similares a las de los pozos petrolíferos, pero las condiciones de trabajo requieren mayores temperaturas.

## 2 NUEVAS TECNOLOGÍAS PARA LA EXPLOTACIÓN DE RECURSOS GEOTÉRMICOS

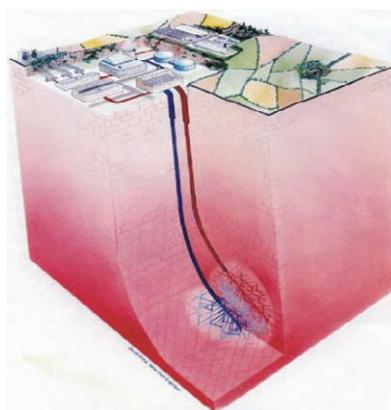
Las nuevas tecnologías para el aprovechamiento de recursos geotérmicos se centran especialmente en la producción de energía eléctrica. Es obvio que la importancia de la geotermia como energía renovable y "limpia" es mucho mayor en el caso de la producción de electricidad que en el caso de las aplicaciones domésticas e industriales. Por contra, las inversiones son igualmente mucho mayores para producir de energía eléctrica que por ejemplo para calentar agua de uso doméstico. Además, la tecnología necesaria para producir energía eléctrica mediante la explotación de recursos geotérmicos profundos está en vías de desarrollo. Consecuentemente, todos los esfuerzos en I+D, y las nuevas inversiones a nivel mundial se centran en desarrollar técnicas de explotación de recursos geotérmicos profundos de alta temperatura.

### 3 TIPOS DE YACIMIENTOS GEOTÉRMICOS DE ALTA TEMPERATURA

Los yacimientos con fluidos geotermales, o con rocas calientes, de más de 150 °C de temperatura, se encuentran en zonas geográficas con un gradiente geotérmico extraordinariamente elevado (hasta 30 °C cada 100 m). Las nuevas tecnologías intentan incidir en este tipo de yacimientos, desarrollando técnicas y sistemas que permitan una explotación económicamente viable.

No todos los yacimientos aunque sean de alta temperatura, reúnen las condiciones necesarias para su explotación. Estos son los Yacimientos geotérmicos estimulados o EGS (Enhanced Geothermal Systems) o también mal denominado como de roca seca caliente (HDR). Un recurso geotérmico es explotable actualmente para producir energía eléctrica si reúne cuatro condiciones: Que no esté a demasiada profundidad, Que en el yacimiento en el que se encuentre esté caliente, Que las rocas sean permeables, Que la cantidad de agua sea suficiente. De esas condiciones, si se exceptúa el calor (proporcionado por el flujo de calor terrestre) y la profundidad (accesible con los equipos de perforación disponibles), las otros dos, permeabilidad y agua en circulación, pueden ser mejoradas artificialmente mediante técnicas de estimulación (Sistemas Geotérmicos Estimulados, EGS).

La permeabilidad en las rocas puede crearse artificialmente inyectando grandes volúmenes de agua a elevada presión a través de un pozo para producir su fracturación. El proceso, llamado hidrofracturación o fracturación hidráulica, es usado frecuentemente en la producción de petróleo y gas. La distribución en profundidad del sistema de fracturas que se crea puede modelizarse utilizando métodos sísmicos de prospección geofísica, con el objeto de determinar la ubicación de un segundo pozo de extracción de agua caliente, que será enviada a una central de ciclo binario para generación de energía eléctrica y posteriormente, reinyectada de nuevo al yacimiento, Fig. 1.



**Figura 1.** Representación esquemática del modelo de un yacimiento geotérmico de alta temperatura de roca seca caliente (HDR) (Fuente: GARNISH, J.D., ed., 1987. *Proceedings of the First EEC/US Workshop on Geothermal Hot-Dry Rock Technology, Geothermics*).

La tecnología EGS, además de poder utilizarse para crear yacimientos de alta temperatura nuevos, puede aplicarse para ampliar la explotación de los yacimientos que están actualmente en producción, con el consiguiente incremento de las reservas geotérmicas y de la productividad.

### 4 TÉCNICAS PARA LA EXPLOTACIÓN DE RECURSOS GEOTÉRMICOS DE ALTA TEMPERATURA

La explotación de un sondeo geotérmico profundo para generación de energía eléctrica se podrá realizar con la tecnología actual, en caso de que sea hidrotermal (recarga natural de agua). Para recursos no hidrotermales es preciso realizar la "estimulación" del mismo, mediante la tecnología indicada de Sondeos Geotérmicos Estimulados o EGS.

## 5 FRACTURACIÓN HIDRÁULICA

La tecnología actual y futura de sondeos profundos, pasa por la explotación de los recursos geotérmicos no hidrotermales, que necesitan ser estimulados. Esta tecnología, actualmente en fase de desarrollo técnico, tiene el objetivo de hacer la explotación económicamente viable.

Los factores que influyen en el diseño y la construcción de un pozo EGS son:

- Profundidad del recurso.
- Influencia de las variaciones litológicas durante la perforación.
- Influencia de las variaciones litológicas durante la estimulación.
- Influencia del estado tensional durante la estimulación.
- Presencia de fracturas naturales.
- Método de simulación para crear depósitos
- Método de explotación.

Los recursos hidrotermales se explotan entre 1 km y 4 km. Para la explotación de EGS será necesario superar todas las dificultades de la extracción de calor a profundidades mayores que los recursos hidrotermales, y van a presentar dificultades durante la perforación por la elevada temperatura, por la formación de fluidos a alta presión, por la dificultad en el entubado y por la complejidad para controlar todos los parámetros de la perforación. Los depósitos geotérmicos suelen ser monolíticos, a diferencia de los hidrotermales, petrolíferos o de gas, que están más estratificados. La roca que se perfora generalmente es dura y abrasiva, encontrándose generalmente desde la superficie hasta el fondo del depósito, pero siendo frecuentes los cambios en la litología de la roca, lo cual dificulta las condiciones de perforación.

El volumen de roca se puede estimar igualando el flujo de calor del depósito (calor extraído) con el cambio de energía almacenada en el depósito, considerando una extracción uniforme. La ecuación sería la siguiente:

$$Q = \frac{\rho \cdot C \cdot V \cdot \Delta T}{\Delta t}$$

siendo: Q = flujo de calor,  $\rho$  = densidad, C = capacidad calorífica de la roca, V = volumen, T = temperatura de la roca, t = tiempo.

Considerando un volumen esférico de radio R, el flujo de calor unitario queda del siguiente modo:

$$\frac{Q}{\Delta T} = \frac{4\pi \cdot \rho \cdot C \cdot R^3}{3 \cdot \Delta t}$$

Si la eficiencia de conversión de energía térmica a eléctrica es del 15%, se considera que aproximadamente 33 MWt de flujo de calor serán necesarios para producir 5 MWe. Para una variación de la temperatura en el depósito de unos 30 °C, se estima que el radio del depósito tiene que ser de unos 500 m, siendo el volumen resultante de 0,5 km<sup>3</sup>. Estudios más recientes y rigurosos mediante simulación numérica han revelado que el ratio de generación de energía eléctrica alcanzable por unidad volumétrica de roca es de 26 MWe/km<sup>3</sup>. Para generar 5 MWe será necesario un volumen de roca de 0,19 km<sup>3</sup>, lo que equivale a un cubo de 575 m de lado, basándose en el supuesto de la uniformidad de las propiedades dentro de la región estimulada (incluida la permeabilidad).

La hidrofracturación o fracturación hidráulica básicamente consiste en la ampliación, o agrandamiento de las redes de fisuras existentes en los materiales atravesados por un sondeo, gracias a la acción de un fluido inyectado a alta presión en el interior del mismo. Cuando se desea alcanzar mayor profundidad en la fracturación, se bombea el fluido mezclado con una arena abrasiva (cuarzo). La arena no sólo permite abrir las fracturas, sino que, al rellenarlas, evita que se cierren como consecuencia de la presión de confinamiento. Es importante que la presión de inyección de la mezcla fluido arena supere la presión de confinamiento. Para que la

arena de cuarzo destinada a labores de fracturación hidráulica realice un trabajo eficiente, debe presentar alto grado de redondez y su tamaño de partícula debe estar comprendido entre la malla 40 (0,516 mm) y malla 65 (0,274 mm) Fig.2. La hidrofracturación se realizará mediante bombas de inyección de agua a altas presiones, superiores a 100 bares.



**Figura 2.** Arena de cuarzo destinada a la fracturación hidráulica (Fuente: Texas Silica, LLC).

Las fracturas hidráulicas son casi planas, con anchos típicos de 6,35 mm a 12,7 mm, aun cuando las longitudes o alturas pueden llegar a varias decenas de metros. Una fractura siempre tenderá a abrirse contra la línea de menor resistencia, es decir, el plano de la fractura será perpendicular al mínimo esfuerzo principal ejercido sobre el yacimiento, indistintamente de la desviación del sondeo. Las fracturas hidráulicas se clasifican de forma general en dos tipos: horizontales y verticales. Generalmente, la fractura que se forma tiene dos extensiones posicionadas en direcciones opuestas al sondeo y orientadas, aproximadamente, en el plano vertical. Existe otro tipo de configuración de fracturas, las horizontales, pero constituyen un bajo porcentaje según la experiencia y los datos que se disponen en la actualidad. Por lo tanto, las fracturas más usadas son las fracturas verticales. En muchas aplicaciones de fracturación hidráulica, es esencial determinar, dentro de lo posible, la orientación de la fractura. Uno de los métodos que pueden ayudar a distinguir entre una fractura horizontal y una vertical, es la presión de fondo medida durante el tratamiento de la fractura. Es decir, si la presión de sobrecarga excede la presión necesaria para vencer la resistencia de la roca, entonces la fractura será vertical. Pero cuando la presión de sobrecarga es menor que la resistencia de la roca (generalmente en el caso de sondeos someros), entonces la fractura será horizontal.

Una vez que la fractura está formada, el fluido actúa como una cuña, forzando su crecimiento. Una fractura se formará más fácilmente usando un fluido penetrante de baja viscosidad. El fluido penetrante ejerce presión en un área mayor, por lo que la fuerza total de la formación es superior a la que ejerce un fluido no penetrante, el cual actúa únicamente cerca de la pared del pozo. Los principales tipos de fluidos fracturantes penetrantes son los siguientes: fluidos base-aceite, fluidos base-agua y fluidos base-ácido. Durante el proceso de inyección, la geometría de las fracturas queda definida por sus tres dimensiones altura, longitud y amplitud. Para predecir la geometría de una fractura, es preciso conocer el tipo de formación geológica. En 1957, Howard y Fast presentaron una ecuación matemática relativa al área de la superficie de una fractura. La ecuación está basada en la cantidad de material fracturante inyectado en el sondeo, en las características físicas de los fluidos fracturantes y en las condiciones específicas de la formación geológica. La ecuación mencionada es:

$$A = \frac{ib}{4\pi\kappa^2} \left( e^{x^2} \cdot \operatorname{erfac}(x) + \frac{2x}{\sqrt{\pi}} - 1 \right)$$

siendo:  $x = 2k\sqrt{(\pi t/b)}$ , y además  $A =$  área total de una cara de la fractura en cualquier tiempo durante la inyección ( $\text{ft}^2$ ),  $i =$  caudal constante de inyección durante la extensión de la fractura ( $\text{ft}^3/\text{min}$ ),  $t =$  tiempo total de bombeo (min),  $b =$  ancho de la fractura (ft),  $k =$  permeabilidad absoluta,  $\text{erfc}(x) =$  función error complementaria de  $x$ .

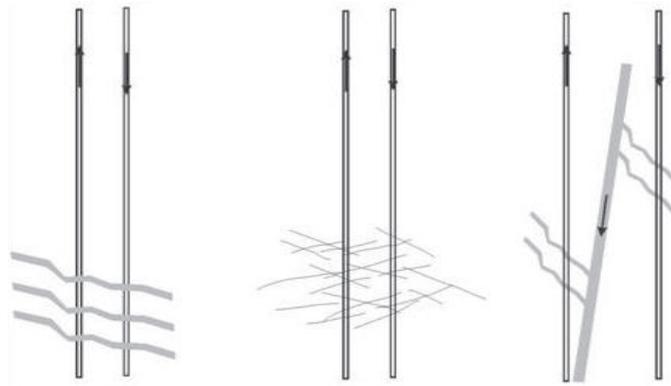
Uno de los aspectos más importantes a destacar es el confinamiento de las fracturas, o su tendencia a extenderse en longitud, en lugar de incrementarse verticalmente. Pero las fracturas que crecen en exceso hacia la dirección vertical, finalmente se extenderán más allá de la zona de influencia del sondeo, hacia zonas improductivas. Una capa impermeable de marga, lutita o arcilla, permite generalmente limitar la extensión vertical de la fractura. La altura de las fracturas se puede determinar mediante la siguiente ecuación:

$$G(t) = -\frac{1}{2\pi t} \int_0^t \frac{u^2 g du}{\sqrt{(t^2 - u^2)}}$$

siendo,  $G(t) =$  altura de la fractura (ft), en función del tiempo,  $t =$  tiempo (s),  $u =$  variable de integración,  $g =$  aceleración de la gravedad ( $\text{ft}/\text{s}^2$ ).

La longitud de las fracturas se determina mediante un balance de volumen. En cualquier momento de la inyección, el volumen de fluido por unidad de tiempo que penetra en cada ala de la fractura es conocido y es una variable de diseño. Se podría determinar la longitud de la fractura teóricamente, ya que todo el fluido inyectado a la fractura no permanece totalmente en la fractura. Una parte del fluido se pierde por la formación, ya que la presión del fluido en la fractura es mayor que la presión de fluido en los poros. Los puntos críticos de presión durante el proceso de fracturación son la Presión de rompimiento (Presión requerida para romper la formación e iniciar la fractura), la Presión de propagación (Presión requerida para que continúe creciendo la fractura) y la Presión instantánea de cierre (Presión requerida para mantener la fractura abierta). Según los investigadores M. King Gubert y David G. Willis, se pueden extraer las siguientes conclusiones de la fracturación hidráulica:

- El estado tensional como consecuencia de la fracturación hidráulica en el interior de un sondeo, no se define sólo por la presión hidrostática, sino que también depende de las condiciones tectónicas. En zonas con una tectónica de poca intensidad (fallas normales), las tensiones mínimas serán horizontales, mientras que en zonas de una fuerte tectónica (plegamientos) las tensiones mínimas serán de tipo vertical. Las fracturas que se producen por inyección hidráulica se deben formar, aproximadamente, perpendiculares a la tensión principal mínima.
- Las tensiones de rotura de los materiales atravesados por un sondeo como consecuencia de la hidrofracturación, se ven afectadas por el estado tensional pre-existente en la formación, por la geometría del sondeo y por la capacidad de penetración del fluido fracturante.
- La presión mínima de inyección depende únicamente de la magnitud del mínimo estado tensional regional y no se ve afectada ni por la geometría del sondeo ni por la penetración del fluido. En zonas poco afectadas por la tectónica, las fracturas serán verticales y se formarán con presiones de inyección inferiores a la presión de confinamiento. En zonas más afectadas por la tectónica, las fracturas serán horizontales y, para su formación, serán precisas presiones de inyección iguales o mayores a la presión de confinamiento.
- En zonas de tectónica poco intensa y geología sencilla, no sólo se pueden producir las fracturas en sentido vertical, sino que, además, se producirán en la dirección del esfuerzo.
- Las fracturas verticales pueden cortar a las barreras de permeabilidad horizontales, lo cual facilita el flujo vertical de los fluidos. Sin embargo, en ausencia de dichas barreras las fracturas verticales tenderán a reducir la circulación del fluido. Fig. 3.



**Figura 3.** Distintas formas de fracturación. (Fuente: <http://climatefix.typepad.com/>).

## 6 PERFORACIÓN POR ESPALACIÓN

La perforación, probablemente una de las más fases más costosas del proyecto geotérmico, es, a menudo, la menos estudiada. La mayoría de los pozos geotérmicos pueden ser perforados utilizando la tecnología y equipos convencionales de los pozos de agua, o para mayores profundidades utilizando tecnología y equipos de exploración petrolífera. Existen dos tipos básicos de perforación que se utilizan para sondeos geotérmicos, La perforación mediante cable o percusión y perforación mediante rotación, esta última es la más usual y puede ser con recuperación de testigo (testiguera) y sin recuperación de testigos (a polvo o destroza).

Los sistemas de perforación avanzados, incrementando la velocidad de perforación, la vida de la cabeza de perforación y resto de materiales y equipos, y obteniendo una mayor producción por pozo, presentan ventajas significativas frente a los sistemas convencionales. Dentro de la línea de innovación de los sistemas de perforación se encuentran líneas tecnologías revolucionarias en fase de investigación y experimentación (alguna ya desarrolladas), como son el "Projectile Drilling" o la perforación con proyectiles, el "Chemical Drilling" o perforación química, la "Spallation Drilling" o perforación por estalación Fig. 4 y la "Laser Drilling" o perforación láser que es una variación de la perforación por espalación.



**Figura 4.** Espalación por llama. (Fuente: *Spallation Drilling for Deep Heat Mining*. July 2, 2007. Tobias Rothenfluh. Karol Príkopský. Philipp Rudolf von Rohr. ETH).

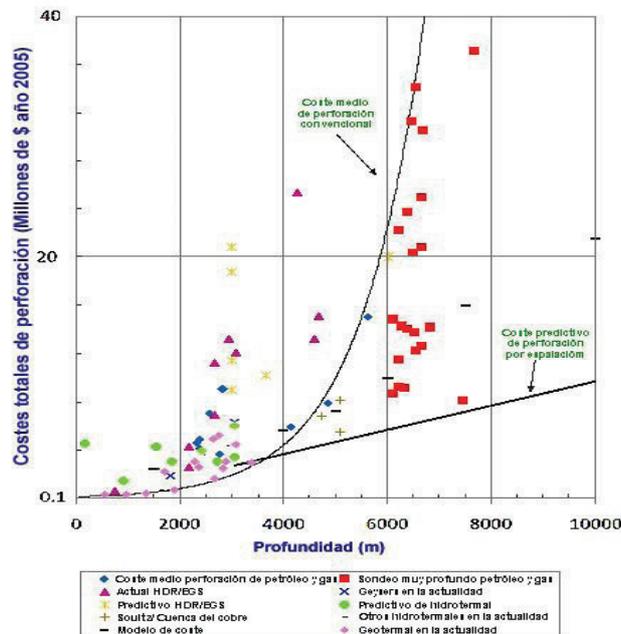
Hay diferentes técnicas que están en continuo desarrollo, pero la "spallation drilling" (perforación por espalación) está disponible para su uso. Espalación es un anglicismo que proviene de "spall" que significa trozo o, en forma verbal, trocear. En general, la espalación es un proceso por el que uno o varios fragmentos de material son expulsados de un cuerpo debido a un impacto o por fatiga. En minería y en geología, la espalación se refiere a la ruptura de una superficie rocosa debido a la fatiga interna. Como explicación de la tecnología, en mecánica de fracturación, la espalación es un proceso bien conocido que combina típicamente el esfuerzo comprensivo y distensivo. La espalación se produce cuando un pulso dinámico comprensivo ataca una superficie libre, generando un esfuerzo distensivo asociado que puede dar lugar a fracturas internas de espalación y a placas que se separan de la superficie libre Fig. 5.



**Figura 5.** Esquema de la tecnología de espalación (Fuente: <http://www.potterdrilling.com>. Modificado por el autor).

Esta técnica tiene entre otras las ventajas siguientes:

- Velocidad de perforación cinco veces mayor que la perforación tradicional para rocas duras y que se ve afectada por el pulso compresivo y distensivo. Rocas muy adecuadas para este método son el granito, el gneis, la cuarcita, etc.
- Mínimo desgaste del trépano al no estar en contacto con la roca.
- Muy buena verticabilidad o direccionabilidad.
- Se puede perforar hasta 9.000 m o más.
- Costes reducidos por tiempos y por mantenimiento, Fig. 6.



**Figura 6.** Predicción de costes de la perforación por espalación (Fuente: <http://www.potterdrilling.com>. Modificado por el autor).

## 7 REFERENCIAS

- DAVENPORT, B. (1984).: "Handbook of Drilling Practices". Gulf Publishing Company.
- GARNISH, J.D., (1987).: "Proceedings of the First EEC/US Workshop on Geothermal Hot-Dry Rock Technology". Geothermics.
- KING HUBBERT M, WILLIS DAVID G. (1957).: "Mechanics of Hydraulic Fracturing". Shell Development Co. Huston Texas. Journal of Petroleum Technology.
- LÓPEZ JIMENO, C. et al. (2000).: "Manual de sondeos. Tecnología de perforación". U. D. proyectos. E. T. S. I. de Minas. U. P. M.
- LLOPIS TRILLO G. y RODRIGO ANGULO V. (2008).: "Guía Energía Geotérmica". Edita Fundación de la Energía de la Comunidad de Madrid y Comunidad de Madrid.
- POTTER DRILLING INC. <http://www.potterdrilling.com/geothermal-energy/>
- TOBIAS ROTHENFLUH et al. (2007).: "Spallation Drilling for Deep Heat Mining". July 2, ETH.
- YAROM POLSKY et al. (2008).: "Enhanced Geothermal Systems (EGS) Well Construction Technology Evaluation Report". Sandia Report Sand 2008-7866.