CFE Una empresa de clase mundial

COMISIÓN FEDERAL DE ELECTRICIDAD
SUBDIRECCIÓN DE GENERACIÓN
GERENCIA DE PROYECTOS GEOTERMOELÉCTRICOS

# GEOTERMIA

## REVISTA MEXICANA DE GEOENERGÍA

ISSN 0186-5897

*Volumen 25, No. 1*

*Enero-Junio de 2012*

**CONTENIDO**

**Editorial** 1

**Variación de la composición del vapor en pozos del campo geotérmico de Los Azufres, México, por efecto de la reinyección** 3
Rosa María Barragán Reyes, Víctor Manuel Arellano Gómez, Alfredo Mendoza y Lizette Reyes

**Estudio experimental del comportamiento de las rocas del yacimiento de Los Humeros, México, ante soluciones ácidas** 10
Georgina Izquierdo Montalvo, Magaly Flores Armenta, Miguel Ramírez Montes, Pablo García Manuel y Aldo Azoños Figueroa

**Metodología para el cálculo de pérdidas de calor en accesorios de la red de vaporductos del campo geotérmico de Cerro Prieto, BC** 18
Alfonso García Gutiérrez, Rosember Ovando Castelar, Juan Ignacio Martínez Estrella, Ismael Canchola Félix, Carlos Miranda Herrera, Paul Jacobo Galván y Othón Mora Pérez

**Estimulación ácida del pozo Az-68D en el campo geotérmico de Los Azufres, Mich.** 30
Magaly del Carmen Flores Armenta, Elvia Nohemí Medina Barajas, Miguel Ramírez Montes y Lilibeth Morales Alcalá

**Afectación térmica entre pozos interpretada mediante modelado de canales de flujo a partir de pruebas con trazadores** 36
Abraham III Molina Martínez, Magaly del Carmen Flores Armenta y Miguel Ramírez Montes

**Termodinámica del fluido geotérmico en condiciones supercríticas** 45
Mario César Suárez Arriaga

***NOTA TÉCNICA* Cation Exchange Geothermometry: A critique** 53
Mahendra P. Verma

***FORO*** 57

**Congresos de la AGM y del GRC y reunión del Consejo Directivo de la IGA** 58
Luis C.A. Gutiérrez-Negrín

**Maneral operador de válvulas en el campo geotérmico de Cerro Prieto** 63
David Angulo Soberanes y Carlos A. Miranda Herrera

**El hombre detrás del ascenso y la debacle de Solyndra** 66
Dana Hull (traducción de Luis C.A. Gutiérrez Negrín)

**El Mundo de la Energía** 70
Información recopilada por Alfredo Mañón Mercado

La revista **GEOTERMIA** es un órgano virtual de información técnica publicado por la Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos (GPG) de la Comisión Federal de Electricidad (CFE) con el apoyo de la Asociación Geotérmica Mexicana (AGM), de edición semestral. Su Certificado de Licitud de Título es el número 2784 del 2 de octubre de 1985, y su Licitud de Contenido es el número 2514 del 1 de diciembre de 1986, ambos expedidos por la Comisión Calificadora de Publicaciones y Revistas Ilustradas de la Secretaría de Gobernación, México. GEOTERMIA – REVISTA MEXICANA DE GEOENERGÍA es nombre registrado en la Dirección General de Derechos de Autor de la Secretaría de Educación Pública de México, con la Reserva 01.86. Reservados todos los derechos de reproducción del material publicado. Registro ISSN 0186-5897.

Ni la CFE, la GPG o la AGM asumen responsabilidad alguna con relación a la veracidad o exactitud de los datos o conclusiones presentados en los artículos. Tampoco avalan ni sugieren el uso de productos comerciales que pueden ser citados eventualmente sólo con fines descriptivos.

La autorización para citar fuentes ajenas a la CFE corre a cargo de los autores. Las opiniones vertidas son responsabilidad exclusiva de ellos y no reflejan necesariamente las opiniones, políticas o programas oficiales de la CFE ni de la AGM.

## *EDITORES*

**Director**: José Luis Quijano León (AGM)
**Editor**: Luis C.A. Gutiérrez Negrín (AGM)

**Consejo Editorial**:
Alejandro Becerril Zavala
Magaly Flores Armenta
Raúl Sánchez Velasco
Jaime Vaca Serrano
**Editores asociados**:
Víctor Arellano Gómez (IIE)
Víctor Hugo Garduño Monroy (UMSNH)
Susan F. Hodgson (Historiadora de temas geotérmicos y petroleros)
Alfredo Mañón Mercado (Consultor)
José Manuel Romo Jones (CICESE)
Mario César Suárez Arriaga (UMSNH)
**Secretaria**: Enedelia Calderón Ochoa
**Responsable de sitio en página de la UMSNH**: Valdemar Vallejo García

**Oficinas**:
Alejandro Volta 655, Col. Electricistas, Morelia, Mich., 58290
Tel. (443) 314-3411
Correos: luis.gutierrez@geotermia.org.mx, l.g.negrin@gmail.com, luis.quijano@geotermia.org.mx

Esta es una revista digital que puede descargarse de manera gratuita de los portales públicos siguientes:
www.geotermia.org.mx, www.geothermal.org, www.univirtual.umich.mx/revistageotermia/index.html

# Editorial

Pese a que aún no se conjura la posibilidad de una crisis financiera global, detonada por los déficits de las principales economías de la Unión Europea y de Estados Unidos, la industria geotérmica internacional continúa el buen ritmo de desarrollo que empezó a seguir desde fines de 2009, arrastrada por el despegue de la industria de la energía renovable. Como un pálido reflejo de esa tendencia, la Asociación Geotérmica Mexicana (AGM) está preparando lo que vendría a ser el primer congreso geotérmico latinoamericano que se celebraría en Morelia hacia septiembre u octubre de 2012, de manera conjunta con su vigésimo congreso anual. Al cerrar esta edición todavía no se contaba con información definitiva, pero sin duda sería un evento altamente recomendable.

Este primer número de 2012 incluye cuatro trabajos presentados en el XVIII congreso anual de la AGM, realizado en 2010, con lo que concluimos la publicación del material presentado en ese evento. Son los primeros trabajos enlistados en el contenido y referidos a los campos geotérmicos de Los Azufres, Cerro Prieto y Los Humeros. También se presenta un trabajo sobre la probable afectación térmica en pozos productores a partir de la inyección en pozos cercanos, modelada a partir de pruebas con trazadores, el cual se presentó en la V Reunión Interna de Mejora Continua (RIMC) que llevó a cabo la Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos de la CFE en 2011, así como dos trabajos originales. Estos son los de la termodinámica de los fluidos geotérmicos en condiciones supercríticas y la corta pero interesante nota técnica que presenta una provocativa y novedosa crítica sobre la geotermometría catiónica usualmente utilizada en geotermia.

En la sección del Foro, que presenta trabajos no arbitrados, se incluye un corto trabajo que fue parte también de la V RIMC y que describe una sencilla herramienta para auxiliar en la operación manual de válvulas en el campo de Cerro Prieto, y que se puede implementar y utilizar sin mayor problema en cualquier otro campo geotérmico cuyas instalaciones superficiales no estén automatizadas. Se reseñan igualmente los pasados congresos de la AGM y del GRC, así como la última reunión del consejo directivo de la International Geothermal Association (IGA) en 2011; sobre el congreso del GRC, realizado en San Diego, cabe destacar que la geología y la exploración geotérmica siguen siendo los temas con más trabajos presentados, siguiéndole de cerca el tema de los sistemas geotérmicos mejorados (EGS). Finalmente, se incluye la traducción de un interesante reportaje sobre el rápido ascenso y la imprevista caída de la firma Solyndra, centrado en su carismático fundador y ex director general, que produjo un pequeño escándalo en el ámbito de las energías renovables y que ha provocado un fuerte traspié en la política federal norteamericana de apoyo a la energía renovable. Complementa el Foro nuestra sección permanente sobre el Mundo de la Energía.

Esperamos como siempre que este número le resulte interesante, y el Consejo Editorial aprovecha la oportunidad para desear a nuestros lectores todo género de satisfacciones en este nuevo año.

**Luis C.A. Gutiérrez-Negrín**

# Editorial

In spite of the possibility of a global financial crisis, one triggered by deficits in the economies of European Union countries and the United States, the international geothermal industry continues the surge of development begun in late 2009, driven by the start up of the renewable-energy industry. Reflecting on this trend, the Mexican Geothermal Association is preparing what will be the first Latin American Geothermal Congress—to be held in Morelia in September or October 2012 jointly with its twentieth annual meeting. While we still do not have definite information, we highly recommend the event.

This first Geotermia issue in 2012 includes four papers presented at the eighteenth annual meeting of the AGM held in 2010. They refer to the geothermal fields of Los Azufres, Cerro Prieto and Los Humeros. Also included is a paper on the likely thermal affects on production wells of injection into nearby wells—modeled after tracer test results. The paper was presented at the Fifth Internal Meeting of Continuous Improvement (RIMC) in the geothermal-electric projects division (GPG) of the CFE in 2011. An original paper covers the thermodynamics of geothermal fluids at supercritical conditions. A short but interesting technical note presents a provocative and novel critique on cationic geothermometry, usually used in geothermal measurements.

In the Foro section, which has no peer-reviewed papers, a short document that was part of the fifth RIMC describes a simple tool to aid in the manual operation of valves in the Cerro Prieto field. Actually, the tool can be used without a problem in any geothermal field whose surface facilities are not automated. The Foro section reviews past congresses of the AGM and the GRC, and the last meeting of the board of the International Geothermal Association (IGA) in 2011. At the GRC annual meeting, held in San Diego, geology and geothermal exploration remained the topics for most of the papers, closely followed by enhanced geothermal systems (EGS). Finally, the Foro section includes the translation of an interesting article about the rapid rise and sudden fall of the firm Solyndra, focusing on its charismatic founder and former CEO. The firm became the subject of a minor scandal in the field of renewable energy. This, in turn, has led to a strong setback for the U.S. federal policy supporting renewable energy. The Foro section is complemented by the ongoing section on the World of Energy.

We hope, as always, that the issue will interest you, and the Editorial Board wishes for our readers every satisfaction in the coming year.

**Luis C.A. Gutiérrez-Negrín**

# Variación de la composición del vapor en pozos del campo geotérmico de Los Azufres, México, por efecto de la reinyección

***Rosa María Barragán Reyes[1], Víctor Manuel Arellano Gómez[1], Alfredo Mendoza[2] y Lizette Reyes[2]***

[1]Instituto de Investigaciones Eléctricas, Gerencia de Geotermia, Reforma 113, Col. Palmira, 62490, Cuernavaca, Morelos, México. Correo: rmb@iie.org.mx. [2]Comisión Federal de Electricidad, Residencia Los Azufres, Campamento Agua Fría, Mich., México.

**Resumen**

Se modeló el equilibrio químico de la fase gaseosa producida por pozos del campo geotérmico de Los Azufres, Michoacán, con objeto de investigar parámetros de yacimiento (temperatura y calidad de la mezcla de alimentación al pozo) e inferir efectos relacionados con la reinyección de fluidos de desecho (agua-aire) al yacimiento. Se consideraron las reacciones: $CH_4 + 2H_2O = 4H_2 + CO_2$ denominada ―FT" y $H_2 + 3/2\ FeS_2 + 2H_2O = 3\ H_2S + ½\ Fe_3O_4$ denominada ―HSH", que se presume controlan las concentraciones de las principales especies gaseosas ($CO_2$ y $H_2S$) en los fluidos geotérmicos. Por medio de las tendencias obtenidas en diagramas termodinámicos característicos (FT-HSH), es posible identificar procesos (como ebullición o mezcla de fluidos) en el yacimiento. Se presentan resultados del equilibrio combinado en dos pozos representativos a través del tiempo, como respuesta a los gastos reinyectados en otro pozo. Se correlacionó la composición isotópica de los pozos estudiados con los gastos inyectados a través del tiempo para investigar los efectos de la reinyección y comparar los resultados obtenidos del equilibrio gaseoso.

*Palabras clave*: Equilibrio químico gaseoso, yacimientos geotérmicos, fluidos geotérmicos, reinyección.

# Variations in the steam composition due to injection in wells from Los Azufres geothermal field, Mexico

**Abstract**

Gas chemical equilibrium was modeled on wells at Los Azufres (Mexico) geothermal field to estimate reservoir parameters (the temperature and steam fractions of fluids entering the well) and study the effects of waste-fluid injection (water-air) on the reservoir. The following reactions were considered: $CH_4 + 2H_2O = 4H_2 + CO_2$ named ―FT" and $H_2 + 3/2\ FeS_2 + 2H_2O = 3\ H_2S + ½\ Fe_3O_4$ named ―HSH", which are presumed to control the main species concentrations ($CO_2$ and $H_2S$) of geothermal fluids. By using characteristic trends on thermodynamic (FT-HSH) diagrams, it is possible to identify different processes (boiling, mixing) occurring in geothermal reservoirs. Results for the two representative wells (a steam well and a two-phase well) over time are presented as responses to different mass-flow rates injected in another well. Isotopic results of the studied wells were correlated to injection mass-flow rates to study the effects of injection and to support the results obtained from gas equilibrium.

*Keywords*: Gas equilibrium, geothermal reservoirs, geothermal fluids, injection.

## Introducción

El campo geotérmico de Los Azufres es un sistema hidrotermal volcánico de tipo bifásico, localizado en la porción centro-norte de la Faja Volcánica Mexicana en el estado de Michoacán, a una elevación promedio de

2800 m sobre el nivel del mar. La capacidad de generación eléctrica instalada del campo es de 188 MWe (Gutiérrez-Negrín *et al.*, 2010). El yacimiento de Los Azufres se ha explotado por más de 20 años por lo que, con el objeto de investigar sus condiciones actuales, se han realizado diversos estudios tanto sobre los cambios químicos en los fluidos producidos como sobre los cambios en la producción de los pozos (Arellano *et al.*, 2005a,b; Barragán *et al.*, 2005; 2006; 2009a,b; 2010). Uno de los fenómenos encontrados como respuesta a la explotación es una gradual tendencia de los pozos a producir cada vez más vapor y menos agua (Torres-Rodríguez y Flores-Armenta, 2000). Actualmente al menos 17 pozos producen vapor (11 localizados en la zona sur y 6 en la zona norte) aunque tres de ellos, localizados en la zona sur, producen una mezcla bifásica dependiendo de las tasas de reinyección.

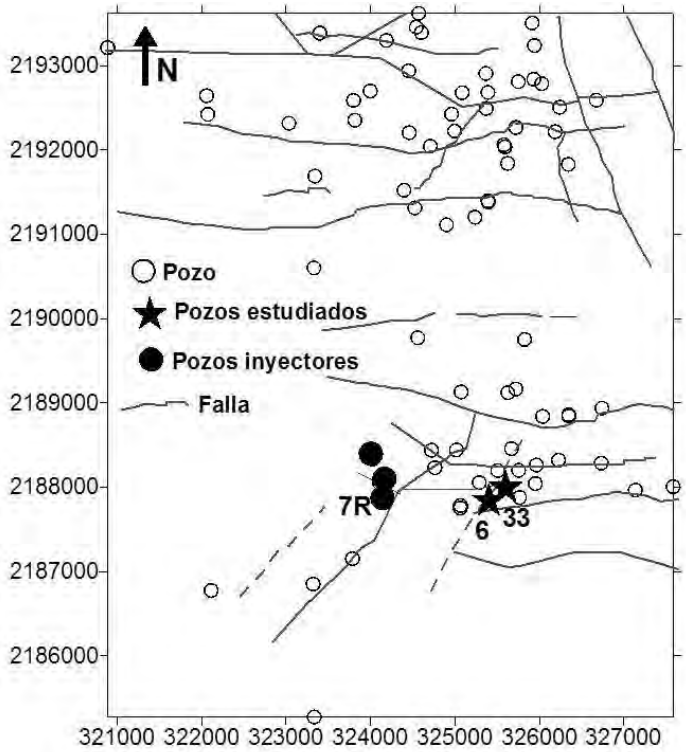



*Fig. 1. Localización de pozos en el campo geotérmico de Los Azufres.*

La estimación de parámetros de yacimiento es una tarea compleja, especialmente en pozos productores de vapor ya que en los que producen líquido el estudio de los cambios en sus iones principales permite realizar inferencias confiables de fenómenos ocurrentes a profundidad. En los pozos de vapor se hace uso de otras herramientas para investigar efectos relacionados con la explotación, como la variación en la composición isotópica del vapor producido o el análisis de datos de producción (Truesdell *et al.*, 1995; Arellano *et al.*, 2005). El método de equilibrio químico FT-HSH representa otra herramienta útil para estudiar estos efectos en los pozos de vapor. La Figura 1 muestra la localización de los pozos.

Las descargas de los pozos en el campo de Los Azufres se caracterizan por un relativamente alto contenido de gases no condensables. El principal constituyente es el $CO_2$ (en promedio 94 % en volumen), presentándose también $H_2S$ (promedio de 2.5 % en volumen) mientras que las concentraciones de $H_2$, $CH_4$, $N_2$ y $NH_3$ son pequeñas (promedio de 3.5 % en volumen, en total). En Los Azufres, con el objeto de minimizar impacto al medio, los fluidos de desecho se inyectan al yacimiento a temperatura ambiente. Los fluidos de inyección consisten de una mezcla de agua producida por los pozos y vapor condensado. Esta mezcla sufre evaporación al ambiente por lo que los fluidos de inyección son más salinos e isotópicamente ($\delta^{18}O$, $\delta D$) más enriquecidos que los fluidos del yacimiento. Los pozos que producen fase líquida proveniente de fluidos de inyección (también denominados "retornos de reinyección"), presentan un aumento tanto en su salinidad como en su composición isotópica, mientras que los pozos de vapor que producen retornos de reinyección presentan una concentración relativamente mayor de $N_2$ así como un enriquecimiento isotópico. El objetivo de este trabajo es correlacionar los cambios de la fase gaseosa producida por pozos de vapor como respuesta a la explotación, utilizando equilibrio químico y resultados isotópicos.

## Metodología

El método FT-HSH correlaciona las composiciones químicas de los gases en descargas de pozos con parámetros físicos a condiciones de yacimiento, usando reacciones químicas entre especies gaseosas que se consideran en equilibrio. Las reacciones consideradas son las siguientes (D'Amore y Truesdell, 1985):

FT: $CH_4 + 2H_2O = 4H_2 + CO_2$ (1)
HSH: $H_2 + 3/2\ FeS_2 + 2H_2O = 3\ H_2S + ½\ Fe_3O_4$ (2)

Las constantes de equilibrio para las reacciones (1) y (2) en términos de las presiones parciales (P), son las siguientes:

$$\log K_{FT} = 4 \log P_{H2} + \log P_{CO2} - \log P_{CH4} - 2 \log P_{H2O} \quad (3)$$
$$\log K_{HSH} = 3 \log P_{H2S} - \log P_{H2} - 2 \log P_{H2O} \quad (4)$$

Usando la ley de acción de masas, las ecuaciones (3) y (4) pueden obtenerse en términos de la presión parcial del agua:

$$\log P_i = \log (n_i/n_{H2O}) - \log A_i + \log P_{H2O} \quad (5)$$

donde $(n_i/n_{H2O})$ es la relación molar de componente ~~"i"~~ con respecto al agua total. El coeficiente A para cada especie ~~"i"~~ se define como función de la temperatura y de la fracción vapor en el yacimiento ~~"y"~~. Si ~~"y"~~ se define como la fracción de vapor presente en equilibrio con el líquido en el yacimiento, entonces:

$$A_i = y + (1-y)/B_i \qquad \text{para } y \geq 0 \quad (6)$$

Si ~~"y"~~ se define como la fracción de vapor perdido desde la fase líquida en el yacimiento (cuando el fluido ebulle lejos del pozo y la fase líquida pierde vapor en su trayecto hacia el pozo), entonces:

$$A_i = 1/(B_i(1+y-yB_i)) \text{ para } y < 0 \quad (7)$$

$B_i$ es el coeficiente de distribución de cada gas y es función de la temperatura (D'Amore, 1992). Para temperaturas entre 100 y 340°C, (t en °C):

$$\log B_{CO2} = 4.7593 - 0.01092\ t \quad (8)$$
$$\log B_{H2S} = 4.0547 - 0.00981\ t \quad (9)$$
$$\log B_{CH4} = 6.0783 - 0.01383\ t \quad (10)$$
$$\log B_{H2} = 6.2283 - 0.01403\ t \quad (11)$$

Sustituyendo las expresiones dadas en (3) y (4) en términos de presión:

$$\log K_{FT} + 4 \log A_{H2} + \log A_{CO2} - \log A_{CH4} - 2 \log P_{H2O} = 4 \log (n_{H2}/n_{H2O}) + \log (n_{CO2}/n_{H2O}) - \log (n_{CH4}/n_{H2O}) \quad (12)$$
$$\log K_{HSH} + 3 \log A_{H2S} - \log A_{H2} = 3 \log (n_{H2S}/n_{H2O}) - \log (n_{H2}/n_{H2O}) \quad (13)$$

donde el lado izquierdo de las ecuaciones (12) y (13) se definen como FT y HSH, por lo que:

$$FT = \log K_{FT} + 4 \log A_{H2} + \log A_{CO2} - \log A_{CH4} - 2 \log P_{H2O} \quad (14)$$
$$HSH = \log K_{HSH} + 3 \log A_{H2S} - \log A_{H2} \quad (15)$$

Las expresiones para las constantes de equilibrio ($\log K_{FT}$ y $\log K_{HSH}$) en (14) y (15) están dadas por (D'Amore, 1992):

$$\log K_{FT} = 15.35 - 3952.8/T + 4.635 \log T + f_1(y,B_i) \quad (16)$$
$$\log K_{HSH} = 6.449 - 6149.7/T - 0.412 \log T + f_3(y,B_i) \quad (17)$$
$$\log P_{H2O} = 5.51 - (2048/T) \quad (18)$$

donde T está dada en °K.

La solución gráfica de de las ecuaciones (16) y (17) según datos termodinámicos para valores constantes tanto de temperatura como de fracción de vapor, produce una malla en las coordenadas (HSH, FT). Mientras que el lado derecho de las ecuaciones (12) y (13) son los parámetros FT y HSH que se obtienen de las concentraciones de gases en las descargas totales de los pozos:

$$FT = 4 \log (H_2/H_2O) + \log (CO_2/H_2O) - \log (CH_4/H_2O) \quad (19)$$

$$HSH = 3\log (H_2S/H_2O) - \log (H_2/H_2O) \quad (20)$$

donde las concentraciones están dadas en la descarga total del pozo. Este es el fluido que asciende por la tubería del pozo antes de separarse en dos fases en el cabezal.

Las siguientes consideraciones deben tomarse en cuenta al usar este método:

(a) Las reacciones consideradas deben alcanzar el equilibrio termodinámico.
(b) En todas las especies consideradas, incluyendo el agua, debe prevalecer un equilibrio químico y de fases.
(c) No debe haber ganancia o pérdida de agua después de alcanzarse el equilibrio original.
(d) Si el fluido en el cabezal consiste de varios aportes al pozo con diferentes características físicas y químicas entre sí, los resultados consistirán en valores promedio de temperatura y fracción de vapor. Esto es importante cuando los aportes tienen diferentes relaciones gas/líquido.
(e) Se asume que no hay re-equilibrio de las especies químicas desde el fondo hasta el cabezal del pozo.

Las tendencias encontradas en las mallas de solución FT-HSH se interpretan tomando las siguientes guías dadas por D'Amore y Truesdell, (1995), donde T es la temperatura del yacimiento y ~~y~~" es la fracción de vapor de yacimiento:

(a) Incremento de T, disminución de *y*: contribución de un fluido más caliente desde una fuente más profunda con alta saturación de líquido.
(b) Incremento de T, incremento de *y*: aparente incremento de T y *y* debido a una fuente lateral de vapor, con prácticamente cero saturación de líquido y con una marcada acumulación de gas.
(c) Disminución de T, disminución de *y*: arribo de agua de menor temperatura sin contenido de gas como en el caso de fluidos de inyección o recarga meteórica.
(d) Disminución de T, incremento de *y*: causado por recarga de fluidos periféricos ricos en gas (como retornos de fluidos de reinyección en fase vapor/aire) o precipitación de sulfuros causada por sobreproducción con bloqueo de fracturas importantes.

**Resultados y discusión**

La zona sur del campo se ha explotado desde 1984 y en esta parte la inyección ha tenido gran impacto. Para este estudio se seleccionaron como representativos los pozos AZ-6, que produce vapor, y AZ-33 que eventualmente llegó a producir mezcla dependiendo de las tasas de inyección en el pozo AZ-7R (1706 m de profundidad). A finales de 2005 este pozo inyector fue sustituido por el pozo AZ-7A, localizado en la misma plataforma que el pozo AZ-7R original. La respuesta del pozo AZ-33 a la inyección en el pozo AZ-7A consistió en una disminución en la producción de líquido, siendo actualmente productor de vapor. Las zonas productoras de los pozos AZ-6 y AZ-33 se localizan a 2015 ± 100 y 2190 ± 40 msnm, respectivamente.

La Figura 2 muestra los datos del pozo AZ-6 en el diagrama característico FT-HSH. Los puntos representan valores promedio en los años considerados. Los resultados para 1987 y 1990 muestran un valor pequeño en la fracción de vapor (0.07) y una temperatura de yacimiento de 295°C. Estas condiciones se pueden considerar representativas del yacimiento en su estado original, ya que el pozo AZ-6 se alimenta de la zona somera de yacimiento en la que existen condiciones bifásicas.

Las variaciones en la composición química del fluido del pozo AZ-6 de 1987 a 1996 en el diagrama FT-HSH muestran una disminución de la temperatura de yacimiento (de 295 a 250°C) y un incremento en la fracción de vapor de yacimiento (de 0.07 a 0.2). Este comportamiento se atribuye a la recarga de fluidos periféricos ricos en gas y a la producción de vapor proveniente de la re-evaporación de condensado. La mezcla de reinyección contiene condensado de vapor que sufre re-evaporación al contacto con la roca a alta temperatura

constituyendo un tipo de recarga con prácticamente cero saturación de líquido. Esta recarga se observa en los datos de 1986, 1994, 1996 y 2004. Los retornos de reinyección en fase vapor contienen una relación $H_2S/H_2O$ menor que los fluidos del yacimiento, caracterizados por los datos de 1987 y 1990. Los datos de 2006 sugieren una temperatura de yacimiento de 260°C y una fracción vapor de 0.2, mientras que el dato de 2007 presenta una temperatura mayor, 278°C y una fracción de vapor de apenas 0.075.

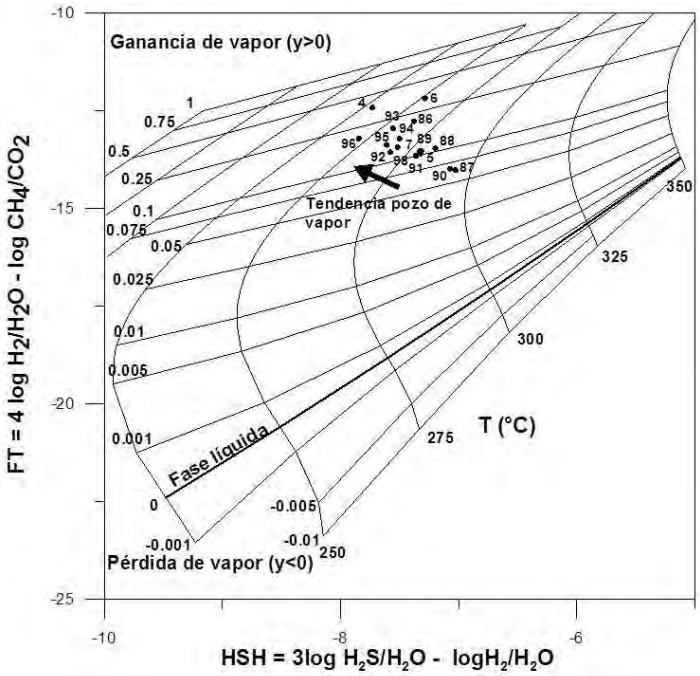



*Fig. 2. Diagrama característico FT-HSH y datos promedio anuales del pozo AZ-6.*

Como se ve en la Figura 3 (modificada de Arellano *et al.*, 2005a), el comportamiento del $\delta^{18}O$ del pozo AZ-6 cualitativamente sigue el patrón de inyección del pozo AZ-7R, confirmando la presencia de retornos de reinyección en la descarga del pozo. En contraste, en 2007 no se nota enriquecimiento isotópico a pesar de los gastos inyectados en el pozo AZ-7A. En la Figura 3 se observa que para altos gastos másicos inyectados en el pozo AZ-7R (1986, 1993, 1994, 1996), los puntos del pozo AZ-6 en el diagrama FT-HSH muestran mayores fracciones de vapor y menores temperaturas de yacimiento, en comparación con los puntos donde los gastos reinyectados son menores (1987) o despreciables (1990).

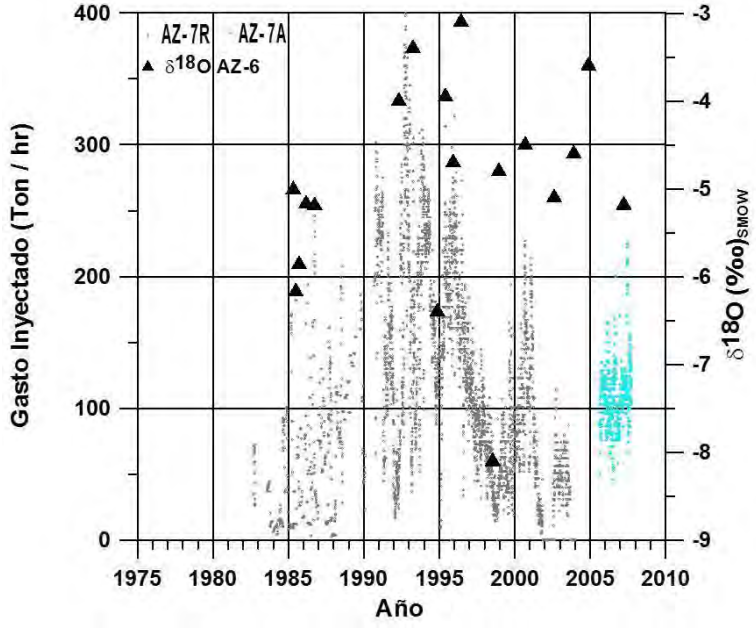



*Fig. 3. Composición isotópica de $\delta^{18}O$ del pozo AZ-6 y patrón de gastos reinyectados en el pozo AZ-7R (hasta 2003) y en el pozo AZ-7A (después de 2005).*

El pozo AZ-33 es productor de vapor. Eventualmente produjo mezcla bifásica dependiendo de las tasas de inyección en el pozo AZ-7R. La Figura 4 muestra los datos del pozo AZ-33 en un diagrama FT-HSH. A pesar de la dispersión de los puntos, se observa una tendencia general de disminución de temperatura y de fracción de vapor de yacimiento, la cual se relaciona con la entrada de fluidos en fase líquida y de menor temperatura. Esta entrada de fluidos de menor temperatura ocurre de forma intermitente dependiendo de las tasas de inyección. La presencia de retornos de reinyección en fase líquida en el pozo AZ-33 se confirma mediante el comportamiento del $\delta^{18}O$ que sigue el patrón de gastos inyectados en el pozo AZ-7R en la Figura 5 (modificada de Arellano *et al.*, 2005a).

La tendencia observada en el diagrama FT-HSH sugiere que el pozo produce una mezcla de dos tipos de fluidos: uno típico del yacimiento (representado por los datos de 1994, 1999, 2000, 2001, 2004 y 2005) y el otro proveniente de condensado de vapor (representado por los datos de 1990, 1991 y 1995). Los demás puntos del diagrama con excepción del

correspondiente al 2003 caen aproximadamente en la tendencia principal, que de acuerdo con D'Amore y Truesdell (1995) significa la entrada de fase líquida desgasificada. La producción de condensado de vapor se identifica en el diagrama FT-HSH por la disminución de temperatura y el aumento en la fracción de vapor y se observa en los datos de 1999-2001 en el pozo AZ-33. La tendencia de los datos de 2004-2005 indica recarga de fluidos del yacimiento mientras que los datos de 2006 indican el ingreso de recarga de fluido de inyección a la zona de alimentación del pozo, probablemente en fase vapor dado que se estima una fracción de vapor mayor que en 2005.

La composición isotópica del pozo AZ-33 en 2007 mostró un enriquecimiento que puede atribuirse a la inyección en el pozo AZ-7 A, aunque el pozo produce prácticamente vapor.

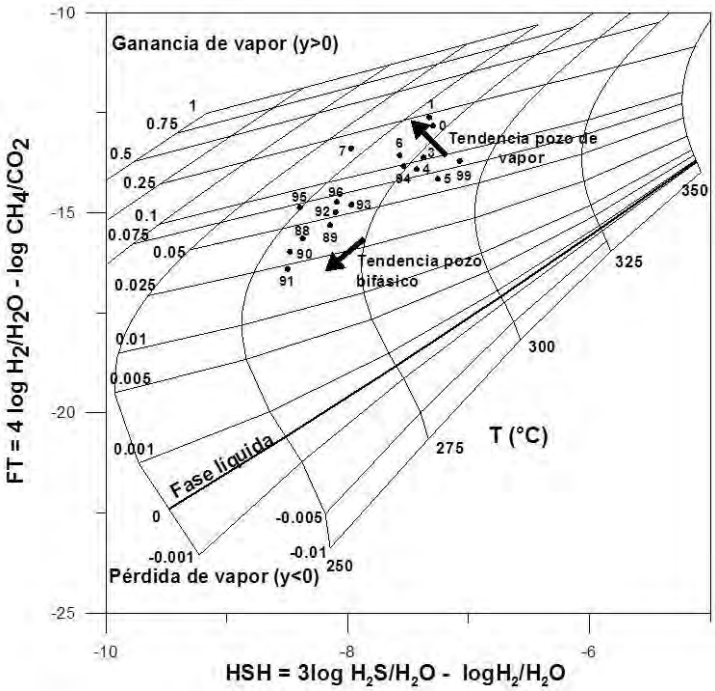



*Fig. 4. Diagrama característico FT-HSH y datos promedio anuales del pozo AZ-33.*

## Conclusiones

- Las variaciones en la composición química de los gases y su estudio mediante equilibrio gaseoso FT-HSH permiten la identificación de procesos de yacimiento que ocurren como respuesta a la explotación.

- El método FT-HSH representa una herramienta adicional para reconocer la producción de vapor proveniente de la re-evaporación de condensado en los pozos productores (particularmente de vapor), en virtud de su menor relación $H_2S/H_2O$, con respecto a los fluidos del yacimiento.

- Las tendencias características de los diagramas de equilibrio gaseoso son útiles también en pozos productores de mezcla ya que permiten reconocer el ingreso de fluidos desgasificados y de menor temperatura al yacimiento.

- En cualquier yacimiento el equilibrio gaseoso tenderá a modificarse por efectos de la inyección. Sin embargo, dado que la mezcla de inyección en Los Azufres contiene aire, éste es útil como "traza" del movimiento de los fluidos en el yacimiento.

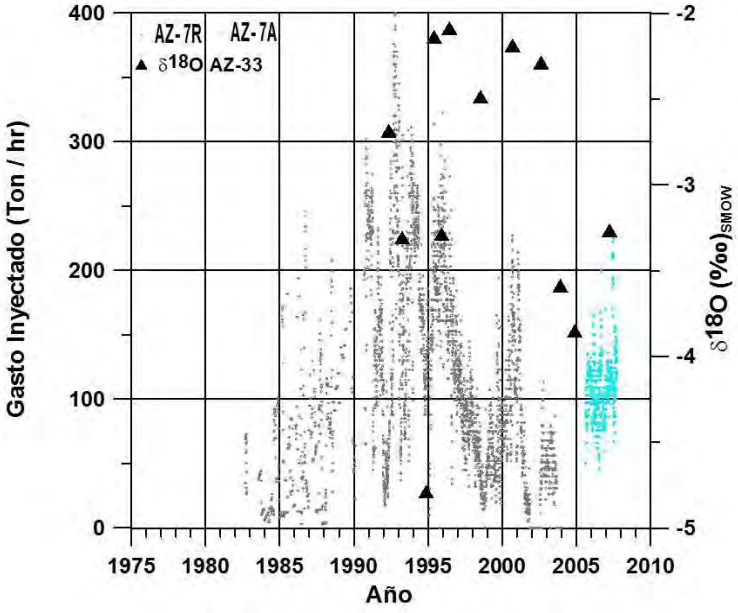



*Fig. 5. Composición isotópica de $\delta^{18}O$ del pozo AZ-33 y patrón de gastos reinyectados en el pozo AZ-7R (hasta 2003) y en el pozo AZ-7A (después de 2005).*

## Agradecimientos

Se agradece a las autoridades de la Comisión Federal de Electricidad, Residencia de Los Azufres, por proveer información y autorizar la publicación de este trabajo. Los resultados son parte del proyecto "Monitoreo isotópico de fluidos de pozos productores y de reinyección del campo geotérmico de Los Azufres, Mich.", desarrollado de forma conjunta CFE-IIE.

**Referencias**

Arellano, V.M., M.A. Torres, R.M. Barragán, F. Sandoval and R. Lozada, 2003. Chemical isotopic and production well data analysis for the Los Azufres (Mexico) geothermal field. *Geothermal Resources Council Transactions*, 27, pp. 275-279.

Arellano, V.M., R.M. Barragán, A. Hernández, R.J. Torres y K.M. Aguilar, 2005a. Estudio de la respuesta del yacimiento geotérmico de Los Azufres a la explotación. Informe IIE/11/12783/I para la Comisión Federal de Electricidad, Cuernavaca, Mor., México, 650 p. Inédito.

Arellano, V.M., M.A. Torres and R.M. Barragán, 2005b. Thermodynamic evolution (1982-2002) of the Los Azufres (Mexico) geothermal reservoir fluids. *Geothermics*, 34, pp. 592-616.

Barragán, R.M., V.M. Arellano, E. Portugal and F. Sandoval, 2005. Isotopic ($\delta^{18}O$, $\delta D$) patterns in Los Azufres (Mexico) geothermal fluids related to reservoir exploitation. *Geothermics,* 34, pp. 527-547.

Barragán, R.M., V.M. Arellano, E. Portugal, F. Sandoval and N. Segovia, 2006. Changes in gas composition of the Los Azufres (Mexico) geothermal fluids related to exploitation. *Geothermal Resources Council Transactions*, 30, pp. 9-13.

Barragán, R.M., V.M. Arellano, A. Aragón, e I. Martínez, I., 2009a. Monitoreo isotópico de fluidos de pozos productores y de reinyección del campo geotérmico de Los Azufres. Informe IIE/11/13768/I 01/F Instituto de Investigaciones Eléctricas, Cuernavaca, Mor., México, 75 p. Inédito.

Barragán, R.M., V.M. Arellano, I. Martínez, A. Aragón y R. González, 2009b. Patrones de comportamiento de especies químicas e isotópicas (2006–2007) en el campo geotérmico de Los Azufres, Mich., en respuesta a la reinyección. *Geotermia* 22(2): 19–27.

Barragán, R.M., V.M. Arellano, A. Aragón, I. Martínez, A. Mendoza and L. Reyes, 2010. Geochemical data analysis (2009) of Los Azufres geothermal fluids (Mexico). *Proc. Water Rock Interaction 2010*, Birkle & Torres Alvarado (eds.), pp. 137-140.

D'Amore, F. and A.H. Truesdell, 1995. Correlation between liquid saturation and physical phenomena in vapor-dominated geothermal reservoirs. *Proceedings World Geothermal Congress 1995*, Florence, Italy, pp. 1927-1931.

Gutiérrez-Negrín, L.C.A., R. Maya-González and J.L. Quijano-León, 2010. Current Status of Geothermics in Mexico. *Proceedings World Geothermal Congress 2010*, Bali, Indonesia, 25-30 April 2010.

Torres-Rodríguez, M.A. and M. Flores-Armenta, 2000. Reservoir behavior of the Los Azufres geothermal field, after 16 years of exploitation. *Proceedings World Geothermal Congress 2000*, Kyushu-Tohoku, Japón, pp. 2269-2275.

# Estudio experimental del comportamiento de las rocas del yacimiento de Los Humeros, México, ante soluciones ácidas

***Georgina Izquierdo Montalvo[1], Magaly Flores Armenta[2], Miguel Ramírez Montes[2], Pablo García Manuel[1] y Aldo Azoños Figueroa[3]***

[1]Instituto de Investigaciones Eléctricas, Gerencia de Geotermia, Cuernavaca, México. Correo: gim@iie.org.mx. [2]Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos, Comisión Federal de Electricidad, México. [3]Instituto Tecnológico de Ciudad Madero, Ingeniería en Geociencias, Cd. Madero, Tamaulipas.

**Resumen**

En México se ha empleado la estimulación ácida en los campos geotérmicos de Los Azufres, Mich., Las Tres Vírgenes, BCS, Cerro Prieto, BC, y recientemente en el campo geotérmico de Los Humeros, Pue. Por ello, y a fin de conocer mejor la respuesta ante soluciones ácidas de las rocas del yacimiento de este campo, se diseñó un experimento para caracterizar las condiciones petrofísicas, químicas y mineralógicas de fragmentos de núcleos de los pozos antes y después de ser expuestos a dos soluciones ácidas comúnmente utilizadas para estimular pozos geotérmicos: una es HCl diluido al 10% y la otra una mezcla de HCl al 10% y de HF al 5%. Las pruebas se realizaron a presión atmosférica y a temperatura controlada. Los resultados indican que la reacción de la roca depende de su composición, del tipo de mineral secundario formado entre fracturas y oquedades y de la intensidad de la alteración hidrotermal previa. La calcita que se encontraba rellenado oquedades, vetas y micro fracturas reacciona rápidamente dejando huecos y mejorando la permeabilidad. Otros minerales como el cuarzo y la epidota reaccionan lentamente a nivel superficial dejando gran parte de la matriz de la roca sin reaccionar. Las soluciones ácidas se conservaron por varios días sin detectarse precipitación de productos secundarios. La permeabilidad se incrementa notablemente como producto del tratamiento con la mezcla ácida.

*Palabras clave:* Los Humeros, estimulación de pozos, acidificación, pruebas experimentales, soluciones ácidas.

# Experimental test on the reservoir-rocks reactions under acid solutions at Los Humeros, Mexico

**Abstract**

Acid stimulation has been used in Mexico at the geothermal fields of Los Azufres, Mich., Las Tres Vírgenes, BCS, Cerro Prieto, BC, and recently at Los Humeros, Pue., to try to improve well production. To better know the response of reservoir rocks in the fields to acidic solutions, we designed an experiment to characterize the petro-physical, chemical and mineralogical conditions of core samples from the wells before and after being exposed to two acid solutions commonly used to stimulate geothermal wells. One is HCl diluted to 10% and the other a mixture of HCl diluted to 10% and HF diluted to 5%. The tests were performed at atmospheric pressure and controlled temperatures. The results indicate the reaction of the rock depends on its composition; the type of secondary mineral formed into fractures and cavities; and the intensity of the previous hydrothermal alteration. Calcite- filled cavities, veins and micro fractures react rapidly, leaving voids and improving permeability. Other minerals such as quartz and epidote react slowly at the surface level, leaving much of the rock matrix unchanged. Acidic solutions were kept for several days without any detectable precipitation of secondary products. Permeability increases significantly as a result of treatment with the acid mixture.

*Keywords:* Los Humeros, well stimulation, acidification, experimental tests, acid solutions.

## Introducción

La disminución de la producción es un proceso natural tanto en un yacimiento de petróleo como en uno geotérmico. Otra causa común que reduce la producción es la obstrucción de la formación rocosa y/o de las tuberías del pozo, sea por la acumulación de lodos y recortes de perforación, por depósito de minerales secundarios en fracturas y oquedades, o bien por incrustaciones tanto en las tuberías y en las paredes rocosas.

Para minimizar o eliminar los efectos de incrustaciones y restaurar o mejorar la permeabilidad, son varias las metodologías empleadas. Entre ellas están los tratamientos ácidos, el fracturamiento hidráulico, el fracturamiento térmico y la estimulación química.

Entre los tratamientos ácidos se conocen tres tipos: lavado ácido, acidificación matricial y fracturamiento ácido. El primero se refiere simplemente a la limpieza del pozo para eliminar incrustaciones. La acidificación matricial se refiere a la inyección de soluciones ácidas por debajo de la presión de fracturamiento. El fracturamiento ácido es el bombeo de una solución ácida a una presión mayor que la presión de fracturamiento de la formación.

La acidificación o estimulación ácida de pozos es la técnica de estimulación más antigua que sigue empleándose en la actualidad. Los primeros tratamientos, y la mayoría de ellos, se han realizado con muy buenos resultados en campos petroleros. En sistemas geotérmicos su aplicación es reciente. Durante la última década esta metodología se ha llevado a cabo en algunos campos geotérmicos en el área de Salton Sea (EUA), Filipinas, Indonesia y América Latina. A diferencia de la mayoría de los yacimientos de petróleo, estos yacimientos están contenidos en rocas ígneas básicamente de composición andesítica.

La acidificación matricial se ha aplicado en calizas y areniscas, donde es común el depósito de calcita. Teóricamente los ácidos fluyen a través del sistema de poros de la roca formando canales llamados *wormholes*. El ácido penetra en la roca más allá de la zona cercana al pozo mejorando la producción. Esta técnica se extendió con éxito a la industria geotérmica en pozos cuya producción se ha reducido sea por obstrucción en los poros y fracturas o por formación de incrustaciones. Las soluciones comúnmente empleadas son HCl al 10% y, para disolver silicatos y sílice, una mezcla de HCl al 12% y de HF al 3% (Malate *et al.*, 1998; Sandrine *et al.*, 2009).

Otros métodos empleados para mejorar la producción son:

Fracturamiento hidráulico. No se conocen muchos casos donde se haya tenido éxito; es considerado como una opción para mejorar la eficacia de los pozos que tienen pobre conectividad en el reservorio (Flores *et al.*, 2005).

Fracturamiento térmico. Se produce un choque térmico mediante la inyección de agua fría. Es un método bien documentado pero no adecuado para eliminar incrustaciones.

Estimulación química con agentes quelantes tales como el ácido etilendiaminotetraacético (EDTA) o el ácido nitrilotriacético (NTA). Este procedimiento ha sido estudiado a escala de laboratorio como un método para ~~"a~~trapar" el calcio de la calcita en yacimientos geotérmicos (Mella *et al.*, 2006). Se ha encontrado que la disolución de calcita no es tan rápida como cuando se usan ácidos minerales.

La estimulación ácida se ha aplicado exitosamente en varios campos geotérmicos. En México se ha realizado en los campos de Los Azufres, Mich., y de Las Tres Vírgenes, BCS, y más recientemente en Los Humeros, Pue., y Cerro Prieto, BC.

En este trabajo se presenta información sobre los cambios mineralógicos, químicos y petrofísicos en muestras de dos núcleos de rocas del yacimiento de Los Humeros, antes y después de interactuar con dos soluciones ácidas.

**Campo geotérmico de Los Humeros**

El campo geotérmico de Los Humeros (CGLH) está localizado en el Centro-Este de México. En la Figura 1, la imagen 1a presenta una panorámica del campo (Xalapazco-Maztaloya), la 1b muestra la localización del campo y la 1c muestra un mapa topográfico. El campo está dentro de una caldera volcánica, localizada en el extremo oriental del Cinturón Volcánico Mexicano. En la actualidad el CGLH es uno de los cuatro campos geotérmicos que operan en México, con una capacidad instalada de 40 MW, estando en construcción dos nuevas unidades a condensación de 25 MW cada una.

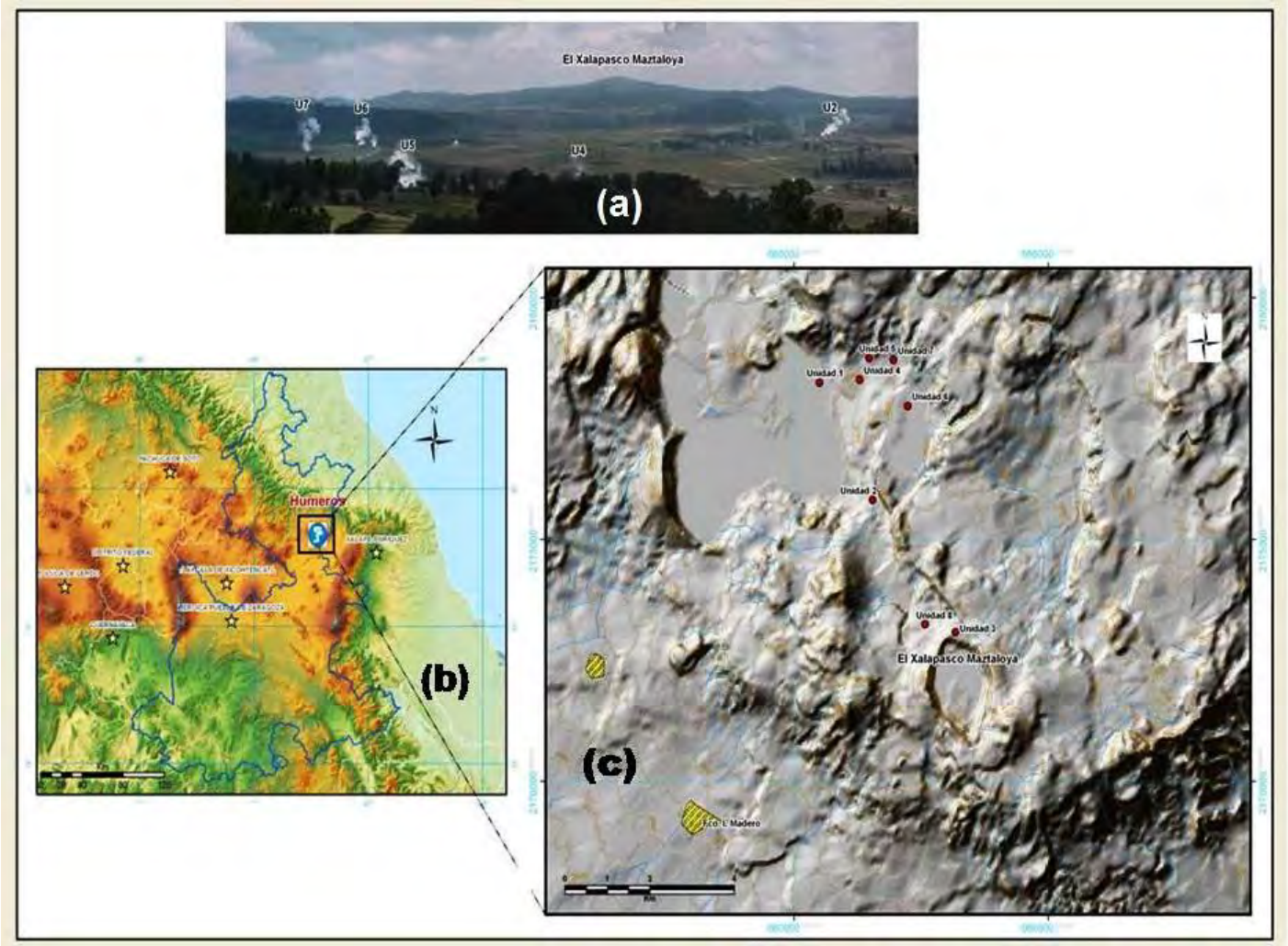



*Fig.1. Localización del campo geotérmico de Los Humeros, Puebla*

Los eventos geológicos en relación con la caldera de Los Humeros han sido descritos por varios autores. Gutiérrez-Negrín (1982) y Viggiano y Robles (1988) han realizado la descripción detallada de las unidades que se encuentran en el subsuelo, las cuales son, de menor a mayor profundidad:

Unidad 1: Vulcanismo post-caldérico. Edad cuaternaria (>100,000 años). Está compuesta por andesitas, basaltos, dacitas, riolitas, flujos y tobas de ceniza, pómez, ceniza y material de erupciones freáticas.

Unidad 2: Vulcanismo caldérico. Edad cuaternaria (510,000-100,000 años). Esta unidad está compuesta principalmente por ignimbritas líticas y vítreas que ocasionaron dos colapsos caldéricos (Los Humeros y Los Potreros). Incluye pómez, tobas y algunas coladas de lava andesítica, así como domos riolíticos.

Unidad 3: Vulcanismo pre-caldérico. Edad terciaria (Mioceno-Plioceno, 10-1.9 Ma). Está compuesta por flujos de lava andesítica, con algunas intercalaciones de horizontes de tobas. El mineral accesorio característico de las andesitas superiores es la augita y el de las andesitas inferiores es principalmente la hornblenda. Ambos paquetes incluyen flujos locales y menores de basalto, dacita y eventualmente riolita. Esta unidad contiene los fluidos geotérmicos.

*Fig. 2. Imagen del fragmento de núcleo del pozo H-13.*

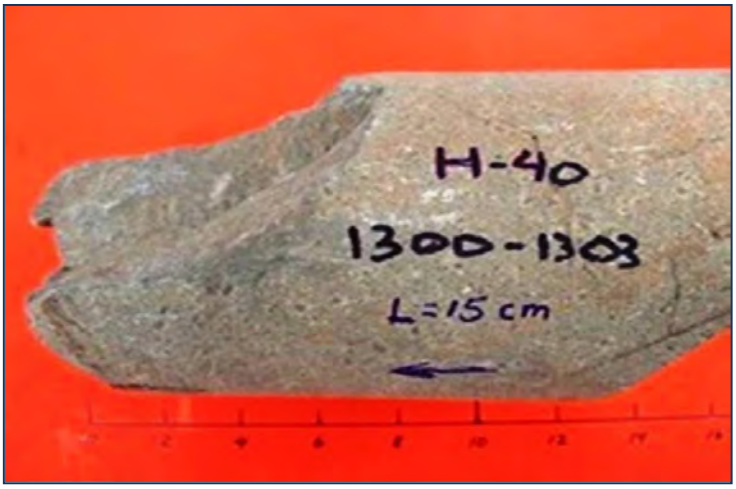



*Fig. 3. Imagen del fragmento de núcleo del pozo H-40.*

Unidad 4: Basamento. Edad mesozoica-terciaria (Jurásico-Oligoceno, 140-31 Ma). Está compuesta por calizas, lutitas subordinadas, pedernal, rocas intrusivas (granito, granodiorita y tonalita) y metamórficas (mármol, skarn, hornfels), y eventualmente algunos diques diabásicos a andesíticos más recientes (Mioceno).

**Trabajo experimental**

Para conocer el comportamiento de las rocas del yacimiento de Los Humeros, el trabajo experimental se llevó a cabo en fragmentos de núcleos obtenidos en la perforación de dos pozos. Los fragmentos de núcleos provienen de la Unidad 3 que es considerada como la zona productora (Cedillo, 2000). Como muestra representativa de la andesita superior o andesita de augita se seleccionó un fragmento del pozo H-13, y como muestra representativa de la andesita inferior o andesita de hornblenda se seleccionó un fragmento del pozo H-40.

El fragmento de núcleo del pozo H-13 se obtuvo de una profundidad de entre 1200 y 1203 m (Fig. 2). Esta roca de color gris se clasificó como andesita, su mineral accesorio característico es augita; se estima un 60% de alteración hidrotermal. Los minerales identificados en el microscopio óptico y por difracción de rayos-X son: plagioclasas, cuarzo, augita alterada a clorita, calcita, epidota, hematita y un poco de zeolitas. La calcita se encuentra rellenando micro fracturas.

El fragmento estudiado del núcleo del pozo H-40 se obtuvo de una profundidad entre 1300 y 1303 m (Fig. 3). Esta roca de color gris se clasificó como andesita, cuyo mineral accesorio característico es la hornblenda; presenta textura micro cristalina con 80% de alteración. Los minerales identificados en el microscopio óptico y por difracción de rayos-X son clorita, epidota, hornblenda, calcita, cuarzo y mica (illita).

Cada núcleo se dimensionó cubriendo los requerimientos para los ensayos físicos, químicos y mineralógicos. Cada espécimen se caracterizó antes y después de ser sometido a las soluciones ácidas. El trabajo experimental se llevó a cabo en recipientes resistentes a ácidos y a alta temperatura (polimetilpenteno), donde una pieza previamente pesada de núcleo fue colocada en cada solución ácida. Se prepararon dos soluciones ácidas empleadas comúnmente durante los trabajos de acidificación matricial, que son una solución de HCl diluido al 10% y otra con una mezcla del mismo HCl diluido al 10% y de HF diluido al 5%. Los experimentos se llevaron a cabo a presión atmosférica en baño de temperatura controlada a 120°C durante cinco horas.

Después de cada tratamiento las muestras se retiraron de las soluciones, se sumergieron en agua destilada y se secaron a temperatura ambiente. Una vez secas se registró el peso de cada espécimen. Para conocer cambios en la mineralogía, pequeños fragmentos fueron analizados en un difractómetro marca Ital Structures, modelo APD 2000 PRO, con radiación filtrada de Cu. Para estimar cambios en la concentración de elementos mayores en las rocas, otros fragmentos se analizaron en un espectrómetro de emisión atómica (ICP-OS) marca Thermo Scientific, modelo iCAP 6300.

La permeabilidad Klinkenberg se determinó en el mismo espécimen antes y después de cada tratamiento ácido, mediante la medición de la permeabilidad absoluta por medio de la técnica de estado estable a 24ºC y presión media del gas desde 0.5 hasta 6 kg/cm$^2$ usando nitrógeno como fluido de trabajo.

**Resultados**

Después de la interacción de las rocas con las soluciones ácidas, el primer cambio aparente a la vista fue la variación del color de las rocas y su textura al tacto. El efecto del HCl diluido al 10% es notable en los especímenes del pozo H-13 donde la calcita que ocupaba huecos y micro fracturas se disolvió desde el primer contacto con el ácido, dejando finalmente espacios vacíos del tipo de huecos o conductos (*wormholes*). Lo mismo ocurrió con la mezcla de ácidos, además de que las cloritas se vieron afectadas por la acción del HF.

En la parte inferior de la Figura 4 se muestra un espécimen del núcleo del pozo H-13 antes de la interacción con la mezcla ácida, mientras que en la parte superior se muestra el mismo espécimen después de su interacción, notándose la penetración del HCl y HF en la roca por el efecto de disolución de calcita y posiblemente clorita.

*Figura 4. Efecto de la mezcla de HCl y HF en un espécimen del núcleo del pozo H-13 (parte superior). En la parte inferior el espécimen antes de la interacción con la solución ácida.*

Otros especímenes del pozo H-40 se trataron bajo las mismas condiciones, mostrando un notable cambio de color después del tratamiento. Puesto que la alteración

de la andesita profunda es principalmente cuarzo y epidota rellenando fracturas y oquedades, el efecto de los ácidos es superficial. Posiblemente la mezcla ácida no fue suficiente para disolver a los minerales silicatados.

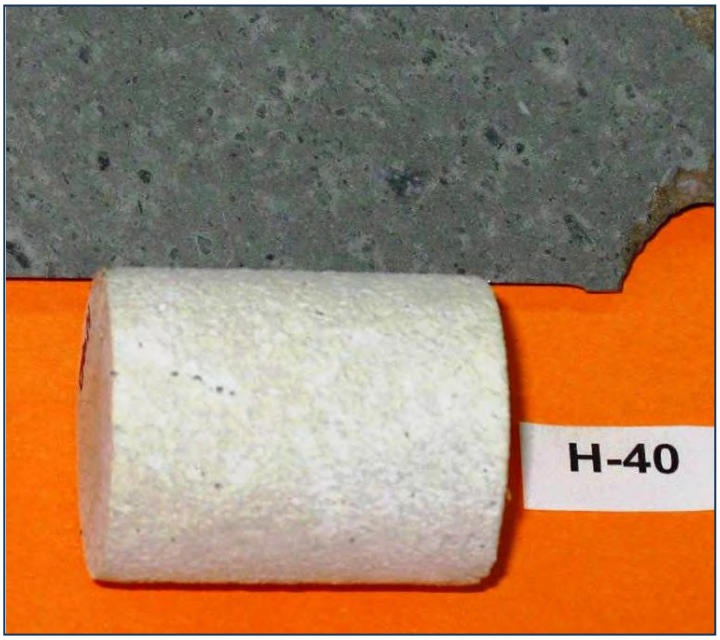



*Fig. 5. Espécimen del pozo H-40. En la parte superior antes del tratamiento con la mezcla de HCl y HF, y en la inferior después del tratamiento.*

En la parte superior de la Figura 5 se muestra un fragmento de la andesita de hornblenda, observándose el anfíbol característico. En la parte inferior el espécimen de la misma roca presenta el efecto de la mezcla ácida, consistente en una leve disolución de epidota y del cuarzo en fracturas.

El análisis por difracción de rayos-X de los especímenes del pozo H-40 tratados con las mezclas ácidas, muestra la misma mineralogía que la roca original. Esto significa que el ácido reacciona disolviendo los minerales con los que hace contacto, dejando gran parte de la matriz de la roca sin tratar. En el caso del H-13 la mineralogía es la misma con la notable disminución de la calcita.

El análisis de elementos mayores de los especímenes tratados muestra una disminución de la concentración de Si, Na, Ca, Mg y Fe., con respecto a las rocas sin tratamiento. Este cambio es una indicación de la disolución de calcita, cloritas y posiblemente plagioclasas.

Los cambios en la concentración elemental de las rocas están en función de la composición de la solución ácida y del tiempo de interacción roca-ácido. Los especímenes del pozo H-13 muestran una notable disminución de Ca debido a la disolución de calcita. La mayor pérdida de peso se observó en el pozo H-13 debido a esa disolución.

La permeabilidad de Klinkenberg, determinada antes y después de la interacción con la mezcla de HCl y de HF, muestra un significativo aumento, particularmente en muestras del pozo H-13, donde varios conductos fueron abiertos por la acción de la solución ácida (Tabla 1).

| Muestras de núcleo del pozo | Permeabilidad Klinkenberg (en milidarcys) | |
|---|---|---|
| | Antes del tratamiento ácido | Después del tratamiento ácido |
| H-13 | 0.004 | 6.66 |
| H-40 | 0.035 | 6.52 |

*Tabla 1. Permeabilidad Klinkenberg antes y después de la interacción con la mezcla de HCl y HF.*

Las muestras se dejaron en las soluciones ácidas durante tres meses posteriores al tratamiento, a temperatura ambiente, a fin de observar si ocurría alguna precipitación o formación de minerales a partir de las soluciones ácidas. Sin embargo, no se observó formación, precipitación ni depósito alguno.

**Conclusiones**

Se probó en laboratorio la posible acción de soluciones ácidas en las rocas que contienen al yacimiento del campo geotérmico de Los Humeros, siendo el cambio más notable un incremento en la permeabilidad de los especímenes tratados con la mezcla de ácidos clorhídrico (diluido al 10%) y fluorhídrico (diluido al 5%). Este incremento es de hasta tres órdenes de magnitud, lo cual es muy significativo para el objetivo de estimular la producción de pozos geotérmicos.

Puesto que no se reprodujo el posible efecto de la presión en el yacimiento, es de esperar que los resultados sean más notables a las condiciones reales del yacimiento.

La eficacia del tratamiento ácido depende de la composición de la roca y de la intensidad y tipo de alteración hidrotermal a la que ha estado sujeta.

La calcita reacciona rápidamente tanto con el HCl como con la mezcla HCl + HF, dejando fracturas y poros abiertos. Los minerales calco-silicatados, con excepción de la clorita, sólo reaccionan superficialmente al tratamiento ácido, dejando gran parte de la matriz de la roca sin afectar.

Bajo las condiciones experimentales de este trabajo, no se detectó la formación ni depósito de minerales debido al tratamiento ácido, lo cual no sería una consecuencia deseable.

Se recomienda trabajo adicional empleando otras mezclas ácidas diferentes a las experimentadas, sobre todo incrementando la concentración de HF, lo que podría disolver minerales silicatados como la epidota, el cuarzo y la clorita que son comunes en las rocas del yacimiento de Los Humeros rellenando oquedades y fracturas.

## Agradecimientos

Los autores expresamos nuestro agradecimiento a las autoridades de la Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos de la Comisión Federal de Electricidad, por su autorización para presentar en este trabajo parte de los resultados obtenidos durante la ejecución del contrato 9400046929 –Estudio para la determinación de parámetros mecánicos, físicos y químicos en muestras de roca de los campos geotérmicos de Los Azufres, Michoacán, y de Los Humeros, Puebla", entre el Instituto de Investigaciones Eléctricas y la Comisión Federal de Electricidad.

## Referencias

Cedillo R., F., 2000. Hydrogeologic model of the geothermal reservoirs from Los Humeros, Puebla, México. *Proceedings World Geothermal Congress 2000,* Kyushu-Tohoku, Japan, pp. 1639-1644.

Gutiérrez-Negrín, L.C.A., 1982. Litología y zoneamiento hidrotermal de los pozos H-1 y H-2 del campo geotérmico de Los Humeros, Pue. CFE, Informe interno 23-82. Inédito.

Flores, M., D. Davies, G. Couples, and B. Palsson, 2005. Stimulation of geothermal wells, can afford it? *Proceedings World Geothermal Congress 2005*. Antalya, Turkey.

Malate, R.C.E., J.J.C. Austria, Z.F. Sarmiento, G. Di Lullo, P.A. Sookprason, and P. Francis, 1998. Matrix stimulation treatment of geothermal wells using sandstone acid. *Proceedings Twenty-Third Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*, Stanford University, Stanford, California.

Mella, M., K. Kovac, T. Xu, P. Rose, and J. McCulloch, 2006. Calcite dissolution in geothermal reservoirs using chelants. *Geothermal Resources Council Transactions*, Vol. 30, pp. 347-352.

Sandrine, P., V. Francois-David, B.N.S. Patrick, and G. André, 2009. Chemical stimulation techniques for geothermal wells: experiments on the three-well EGS system at Soultz-sous-Forêts, France. *Geothermics*, Vol. 38, pp. 349-359.

Viggiano, J.C., y J. Robles, 1988. Mineralogía hidrotermal en el campo geotérmico de Los Humeros, Pue. I: Sus usos como indicadora de temperatura y del régimen hidrológico. *Geotermia*, Vol. 4, No. 1, pp. 15-28.

# Metodología para el cálculo de pérdidas de calor en accesorios de la red de vaporductos del campo geotérmico de Cerro Prieto, BC

***Alfonso García Gutiérrez[1], Rosember Ovando Castelar[1], Juan Ignacio Martínez Estrella[1], Ismael Canchola Félix[2], Carlos Miranda Herrera[2], Paul Jacobo Galván[2] y Othón Mora Pérez[2]***

[1]Instituto de Investigaciones Eléctricas, Av. Reforma 113, Col. Palmira, 62490, Cuernavaca, Mor. Correo: agg@iie.org.mx. [2]Comisión Federal de Electricidad, Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos, Residencia General de Cerro Prieto, Mexicali, B.C.

**Resumen**

La red de vaporductos del campo geotérmico de Cerro Prieto (CGCP) incluye 165 km de tuberías y un gran número de accesorios diversos como válvulas, bridas, soportes, etc., instalados a través de la misma. Al evaluar la eficiencia del proceso de transporte de vapor a través de la red y determinar las principales fuentes de pérdida energética que la impactan, se ha identificado que los accesorios de la red representan una fuente importante de pérdida de calor debido a que, a diferencia de las tuberías, no se encuentran aislados térmicamente. En este trabajo se presenta una metodología para cuantificar la pérdida de calor en los principales accesorios de la red de vaporductos del CGCP, la cual se apoya en la información geométrica de los diferentes tipos de accesorios existentes en la red, las ecuaciones básicas de transferencia de calor y el cálculo de la eficiencia en aletas. Los resultados obtenidos fueron comparados contra datos de temperatura superficial en accesorios medidos en campo con tecnología infrarroja, y contra los resultados que se obtienen al modelar estos accesorios con un programa computacional comercial basado en la técnica de elementos finitos para resolver las ecuaciones de transferencia de calor correspondientes.

*Palabras clave:* Campo Geotérmico de Cerro Prieto, accesorios, red de tuberías, pérdida de calor.

# A methodology for estimating heat losses in fittings of the Cerro Prieto, BC, geothermal field steam pipeline network

**Abstract**

The Cerro Prieto geothermal field (CPGF) steam-pipeline network includes 165 km of pipes and a large number of fittings, such as valves, flanges, and supports installed along the pipelines. When evaluating the efficiency of the steam transport process through the network and determining the main sources of energy loss that impact the network, fittings are known to represent an important source of heat loss since, unlike pipes, they are not thermally insulated. In this work, a methodology is described for quantifying heat loss in the main fitting types installed on the CPGF pipeline network. This methodology is based on the geometry of the installed fittings, basic convective heat transfer equations, and fin efficiency calculations. The results were compared with field surface temperature measurements on fittings made with infrared technology, and with results obtained from modeling the fittings with commercially-available software based on the technique of finite elements to solve the corresponding heat transfer equations.

*Keywords:* Cerro Prieto geothermal field, fittings, pipeline network, heat loss.

## 1. Introducción

El campo geotérmico de Cerro Prieto (CGCP) es el campo de líquido dominante más grande del mundo, con una capacidad instalada de 720 MWe. Opera con 13 unidades generadoras de tipo condensante (Gutiérrez-Negrín *et al.*, 2010), las cuales se alimentan con vapor que proviene de 165 pozos productores a través de una red de vaporductos de unos 140 kilómetros de longitud. Los vaporductos, de diámetros entre 8" y 46", están térmicamente aislados con una capa de material a base de lana mineral o fibra de vidrio, con una cubierta exterior de aluminio o hierro, y dispone de un gran número de accesorios diversos como válvulas, bridas, soportes, etc., instalados a lo largo de la red. Por razones prácticas y debido a la necesidad de aplicar mantenimiento periódico de la red, los accesorios no están aislados térmicamente, razón por la cual representan una fuente importante de pérdida de calor en la red.

Las pérdidas de energía en los campos geotérmicos asociadas con el proceso de transporte de vapor desde los pozos hasta las centrales generadoras a través de una red de ductos, se deben principalmente a la fricción en las tuberías y accesorios, a la transferencia de calor hacia el medio ambiente, y a la condensación de vapor y drenado de líquido a través de las purgas.

El conocimiento de las pérdidas de calor en las tuberías y accesorios de la red asociadas a la condición del aislamiento es un aspecto muy importante en la evaluación de algunas áreas de oportunidad de mejora, puesto que permite determinar la magnitud relativa de estas pérdidas de energía, comparadas con otros mecanismos de pérdida, y con ello evaluar la conveniencia de mantener en buen estado el aislamiento de las tuberías y de sus accesorios en términos de costo-beneficio, por su impacto en la disminución de las pérdidas y en el incremento de la eficiencia del proceso de transporte de vapor.

Como parte de un estudio reciente sobre modelado y simulación numérica de la operación de la red de transporte de vapor del CGCP (Ovando Castelar *et al.*, 2009), se analizó el efecto de la condición física del aislamiento térmico sobre el coeficiente global de transferencia de calor utilizado en la simulación de la red completa de vaporductos, asumiendo condiciones promedio, tanto de operación de la red como ambientales. Se encontró que la transferencia de calor en un vaporducto sin aislamiento se incrementa en más de diez veces con respecto a la transferencia de calor en un vaporducto con buen aislamiento, de manera que el estado del aislamiento impacta directamente en la caída de temperatura a través de los ductos de vapor y en consecuencia determina la calidad del vapor que llega a las plantas generadoras y la eficiencia del sistema.

Por otro lado, el cálculo de la transferencia de calor en los accesorios de la red de vaporductos del CGCP es una tarea compleja, tomando en cuenta los diferentes tamaños y geometrías de los accesorios, así como las distintas condiciones de operación de la red.

En este trabajo se presenta una metodología para determinar la pérdida de calor en los principales accesorios de la red de vaporductos del CGCP, la cual se apoya en la información geométrica de los diferentes tipos de accesorios existentes en la red, las ecuaciones básicas de transferencia de calor y el cálculo de la eficiencia en aletas. Los resultados obtenidos fueron comparados contra datos de temperatura superficial en accesorios medidos en campo con tecnología infrarroja, y contra los resultados que se obtienen al modelar estos accesorios con un programa computacional comercial basado en la técnica de elementos finitos para resolver las ecuaciones de transferencia de calor correspondientes.

## 2. Metodología utilizada en el cálculo de las pérdidas de calor en accesorios

Con base en información geométrica de los diferentes tipos de accesorios existentes en la red de vaporductos del CGCP, es posible establecer que el cálculo de la pérdida de calor en accesorios sin aislamiento debe separarse en dos partes (Ecuación 1). Por un lado, se tiene que una porción del área superficial del accesorio (área base) pierde calor por mecanismo combinado convección-radiación en forma similar al caso de una

tubería descubierta, y por otro lado, el resto del área de superficie (área secundaria) se comporta como una aleta, disipando calor hacia el medio ambiente por convección-radiación, pero con una determinada eficiencia.

$$q_{acc} = U_{me} A_d \left(T_w - T_\infty\right) + \eta_f U_{me} A_f \left(T_w - T_\infty\right) \qquad \cdots(1)$$

En lo referente al tratamiento de la pérdida de calor en el área base, el estudio de la transferencia de calor en tuberías sin aislamiento térmico para el CGCP fue descrito en detalle por Ovando Castelar *et al.* (2010), donde se realizó la evaluación del coeficiente global de transferencia de calor y el cálculo de las pérdidas de calor en tuberías con distinto estado de aislamiento (incluyendo el caso de tubería descubierta), para las condiciones de operación de la red con base en una fecha específica. Las correlaciones y ecuaciones básicas usadas para la determinación de los coeficientes convectivos de transferencia de calor por convección tanto interno como externo, la conducción de calor a través de la pared de la tubería, el tratamiento de la radiación térmica y el cálculo del coeficiente global de transferencia de calor también fueron descritas por Ovando Castelar *et al.* (2011).

Debido a la amplia gama en los diámetros de los vaporductos, así como a las distintas condiciones de operación de la red (presiones y gastos másicos de vapor), fue necesario realizar diferentes estimaciones de los coeficientes globales, tomando como referencia los datos del reporte de producción de pozos del CGCP y asumir un promedio anual para la temperatura y velocidad del aire ambiental medido en el campo. Para facilitar esta tarea, se desarrolló un programa de aplicación basado en MS Excel donde se automatizaron los cálculos del coeficiente global de acuerdo con las características que guarda la red de tuberías del CGCP.

Con relación al área secundaria de los accesorios, que pierden calor en forma semejante al caso de una aleta, el cálculo de la pérdida de calor se apoya tanto en el cálculo del coeficiente global en la superficie externa del accesorio, como en la determinación de la eficiencia de la aleta. Incropera *et al.* (2006) presentan una tabla con las ecuaciones para el cálculo de la eficiencia y el área de superficie de diferentes configuraciones de aleta. Para aletas rectas de sección transversal rectangular, la eficiencia de la aleta está dada por la ecuación (2):

$$\eta_f = \frac{\tanh\left(m L_c\right)}{m L_c} \qquad \cdots(2)$$

donde:

$m = (2h/kt)^{1/2}$

$L_c = L + (t/2)$

En estas ecuaciones, L, h, t y k son la longitud, ancho, espesor y conductividad térmica de la aleta, respectivamente.

En resumen, las consideraciones básicas que se tomaron en cuenta para realizar el cálculo de la pérdida de calor en los accesorios de la red de vaporductos del CGCP, se indican a continuación:

a) Todos los accesorios disponen de un área base ($A_d$), la cual pierde calor por mecanismo combinado convección-radiación. Además, existe un área secundaria ($A_f$) la cual pierde calor como si fuera una aleta.

b) El aire ambiental tiene una temperatura constante, igual al promedio anual de temperatura de bulbo seco, medido en el campo durante el periodo de julio de 2008 a junio de 2009.

c) Por conservadurismo, se asumió que cada accesorio tiene una temperatura superficial igual que la temperatura de saturación a la presión a la que opera este accesorio; esta temperatura se tomará como la temperatura de la base de la aleta.

d) El coeficiente global de cada accesorio es el mismo que se calculó con el programa de aplicación en Excel, para las condiciones de operación del vaporducto asociado a este accesorio (con base en su diámetro).

e) La conductividad térmica del material de construcción del accesorio se tomó igual que la de la tubería desnuda asociada a este accesorio, para las mismas condiciones de operación (programa de aplicación basado en MS Excel).

El cálculo basado en la ecuación (1) permite determinar la pérdida de calor para cada tipo de accesorio (según su diámetro) y de acuerdo con sus condiciones de operación promedio. La pérdida de calor total de los accesorios de la red tendrá que evaluarse multiplicando esta pérdida de calor por el número total de accesorios de las mismas características que existen en la red completa.

Para una mejor estimación de las pérdidas en accesorios, estos se agruparon con base en el tipo de separación (simple y doble) y posteriormente se separaron en vaporductos de Alta, Media y Baja presión. Se contabilizó el número de accesorios por cada tipo de separación y el número total de vaporductos por tipo de separación y por nivel de presión fue determinado con base en el reporte de producción de vapor y agua, basado en la fecha de referencia del cálculo. Con todo esto se determinaron las pérdidas totales de calor en los accesorios de la red.

## 3. Resultados de los cálculos teóricos

A continuación se presentan los resultados que se obtuvieron para las pérdidas de calor por tipo de accesorio, y las pérdidas totales en accesorios agrupados por tipo de separación y por el nivel de presión de los vaporductos del CGCP.

### 3.1 Pérdidas de calor por tipo de accesorio

Tomando en cuenta las dimensiones genéricas de cada accesorio, se programaron ecuaciones para el cálculo de la pérdida de calor por tipo de accesorio con ayuda de MS Excel. Estas ecuaciones dependen de las dimensiones geométricas de cada accesorio y de las condiciones de operación del vaporducto asociado a cada accesorio (presión y flujo másico de vapor). En la Tabla 1 se muestra la pérdida de calor en bridas y bridas ciegas de la red de vaporductos, para condiciones de operación típicas de la red de vaporductos.

| Pérdida de calor en Bridas | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Diámetro | Clase | $r_1$ [m] | $r_2$ [m] | t [m] | $r_{2c}$ [m] | m | $C_2$ | p [barg] | Tsat [°C] | k [W/(m²-°C)] | h [W/(m²-°C)] | Ta [°C] | η [%] | $A_f$ [m²] | $A_d$ [m²] | $q_t$ [W] |
| 10 | 300 | 0.137 | 0.222 | 0.048 | 0.246 | 3.909 | 1.665 | 3.935 | 151.4 | 49.603 | 18.101 | 23.8 | 92.462 | 0.475 | 0.429 | 2005.546 |
| 10 | 900 | 0.137 | 0.273 | 0.070 | 0.308 | 3.232 | 1.108 | 3.935 | 151.4 | 49.603 | 18.101 | 23.8 | 86.839 | 0.901 | 0.429 | 2797.867 |
| 16 | 300 | 0.203 | 0.324 | 0.057 | 0.352 | 3.393 | 1.445 | 4.314 | 154.2 | 49.598 | 16.316 | 23.8 | 89.999 | 1.084 | 0.638 | 3434.042 |
| 16 | 300 | 0.203 | 0.324 | 0.057 | 0.352 | 3.828 | 1.280 | 12.961 | 195.0 | 48.339 | 20.239 | 23.8 | 87.656 | 1.084 | 0.638 | 5501.815 |
| 20 | 300 | 0.254 | 0.387 | 0.064 | 0.419 | 3.086 | 1.481 | 4.494 | 155.5 | 49.665 | 15.020 | 23.8 | 90.114 | 1.280 | 0.798 | 3860.300 |
| 20 | 300 | 0.254 | 0.387 | 0.064 | 0.419 | 3.460 | 1.321 | 12.750 | 194.3 | 48.506 | 18.439 | 23.8 | 87.926 | 1.280 | 0.798 | 6045.064 |
| 24 | 150 | 0.305 | 0.406 | 0.048 | 0.430 | 3.854 | 1.715 | 12.755 | 194.3 | 48.607 | 17.240 | 23.8 | 91.624 | 1.059 | 0.958 | 5666.051 |
| 24 | 300 | 0.305 | 0.457 | 0.070 | 0.492 | 3.187 | 1.281 | 12.755 | 194.3 | 48.607 | 17.240 | 23.8 | 87.107 | 1.626 | 0.958 | 6977.609 |

| Pérdida de calor en Bridas Ciegas | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Diámetro | Clase | $r_1$ [m] | $r_2$ [m] | t [m] | $r_{2c}$ [m] | m | $C_2$ | p [barg] | Tsat [°C] | k [W/(m²-°C)] | h [W/(m²-°C)] | Ta [°C] | η [%] | $A_f$ [m²] | $A_d$ [m²] | $q_t$ [W] |
| 40 | 300 | 0.508 | 0.619 | 0.114 | 0.676 | 2.538 | 2.008 | 11.348 | 189.3 | 48.395 | 17.821 | 23.8 | 93.507 | 2.419 | 1.609 | 11417.540 |
| | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Pérdida de calor en Brida Ciega Inferior | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Diámetro | Clase | $r_1$ [m] | $r_2$ [m] | t [m] | $r_{2c}$ [m] | m | $C_2$ | p [barg] | Tsat [°C] | k [W/(m²-°C)] | h [W/(m²-°C)] | Ta [°C] | η [%] | $A_f$ [m²] | $A_d$ [m²] | $q_t$ [W] |
| 12 | 300 | 0.162 | 0.260 | 0.051 | 0.286 | 3.985 | 1.466 | 3.139 | 145.0 | 49.413 | 19.935 | 23.8 | 90.368 | 0.716 | 0.591 | 2991.131 |
| 12 | 300 | 0.162 | 0.260 | 0.051 | 0.286 | 4.063 | 1.438 | 6.881 | 169.9 | 48.869 | 20.487 | 23.8 | 90.034 | 0.716 | 0.591 | 3698.604 |
| 12 | 300 | 0.162 | 0.260 | 0.051 | 0.286 | 4.265 | 1.370 | 11.779 | 190.9 | 48.250 | 22.291 | 23.8 | 89.144 | 0.716 | 0.591 | 4579.435 |

*Tabla 1. Pérdidas de calor en las bridas y bridas ciegas de la red de vaporductos del CGCP.*

La Tabla 2 muestra los resultados obtenidos para la pérdida de calor hacia el medio ambiente en el registro-hombre de los separadores de vapor, para las tres presiones de separación típicas del CGCP (alta presión, baja presión y presión media en CPU).

| Pérdida de calor en Registro-Hombre | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Diámetro | Clase | $r_1$ [m] | $r_2$ [m] | t [m] | $r_{2c}$ [m] | m | $C_2$ | p [barg] | Tsat [°C] | k [W/(m²-°C)] | h [W/(m²-°C)] | Ta [°C] | η [%] | $A_f$ [m²] | $A_d$ [m²] | $q_t$ [W] |
| 24 | 300 | 0.305 | 0.457 | 0.070 | 0.492 | 2.517 | 1.622 | 4.017 | 152.1 | 50.257 | 11.119 | 23.8 | 91.483 | 1.750 | 0.875 | 3531.679 |
| 24 | 300 | 0.305 | 0.457 | 0.070 | 0.492 | 2.826 | 1.445 | 6.867 | 169.8 | 49.546 | 13.815 | 23.8 | 89.532 | 1.750 | 0.875 | 4925.744 |
| 24 | 300 | 0.305 | 0.457 | 0.070 | 0.492 | 3.179 | 1.284 | 12.784 | 194.4 | 48.618 | 17.163 | 23.8 | 87.158 | 1.750 | 0.875 | 7028.338 |

*Tabla 2. Pérdidas de calor en los registros-hombre de los separadores de vapor del CGCP.*

En la Tabla 3 se muestran los resultados de los cálculos de pérdidas de calor en las válvulas de mariposa y en las válvulas de esfera del CGCP.

| Pérdida de calor en Válvula de Mariposa | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Diámetro | Clase | $r_1$ [m] | $r_2$ [m] | t [m] | $r_{2c}$ [m] | m | $C_2$ | p [barg] | Tsat [°C] | k [W/(m²-°C)] | h [W/(m²-°C)] | Ta [°C] | η [%] | $A_f$ [m²] | $A_d$ [m²] | $q_t$ [W] |
| 20 | 300 | 0.254 | 0.387 | 0.064 | 0.419 | 3.086 | 1.481 | 4.494 | 155.5 | 49.665 | 15.020 | 23.8 | 90.114 | 1.280 | 1.164 | 4583.922 |
| 20 | 300 | 0.254 | 0.387 | 0.064 | 0.419 | 3.460 | 1.321 | 12.750 | 194.3 | 48.506 | 18.439 | 23.8 | 87.926 | 1.280 | 1.164 | 7194.727 |
| Pérdida de calor en Válvula de Esfera | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Diámetro | Clase | $r_1$ [m] | $r_2$ [m] | t [m] | $r_{2c}$ [m] | m | $C_2$ | p [barg] | Tsat [°C] | k [W/(m²-°C)] | h [W/(m²-°C)] | Ta [°C] | η [%] | $A_f$ [m²] | $A_d$ [m²] | $q_t$ [W] |
| 36 | 300 | 0.457 | 0.635 | 0.111 | 0.691 | 1.620 | 2.106 | 4.017 | 152.1 | 50.800 | 7.417 | 23.8 | 94.500 | 2.860 | 0.243 | 2802.918 |
| 12 | 300 | 0.162 | 0.260 | 0.051 | 0.286 | 3.697 | 1.580 | 4.017 | 152.1 | 49.617 | 17.227 | 23.8 | 91.582 | 0.716 | 0.186 | 1859.974 |
| | | | | | | | | | | | | | | | | 4662.892 |
| 36 | 300 | 0.457 | 0.635 | 0.111 | 0.691 | 1.896 | 1.800 | 6.867 | 169.8 | 50.081 | 10.013 | 23.8 | 92.642 | 2.860 | 0.243 | 4228.854 |
| 12 | 300 | 0.162 | 0.260 | 0.051 | 0.286 | 3.933 | 1.485 | 6.867 | 169.8 | 49.032 | 19.269 | 23.8 | 90.591 | 0.716 | 0.186 | 2348.011 |
| | | | | | | | | | | | | | | | | 6576.865 |
| 36 | 300 | 0.457 | 0.635 | 0.111 | 0.691 | 2.247 | 1.519 | 12.784 | 194.4 | 49.033 | 13.773 | 23.8 | 90.007 | 2.860 | 0.243 | 6619.217 |
| 12 | 300 | 0.162 | 0.260 | 0.051 | 0.286 | 4.184 | 1.396 | 12.784 | 194.4 | 48.299 | 21.479 | 23.8 | 89.501 | 0.716 | 0.186 | 3029.354 |
| | | | | | | | | | | | | | | | | 9648.571 |

*Tabla 3. Pérdidas de calor en válvulas de mariposa y válvulas de esfera de la red de vaporductos del CGCP.*

La estimación de la pérdida de calor para el caso de los soportes o silletas de las tuberías se realizó aplicando un procedimiento similar al que se usó para los accesorios de la red. Las silletas fueron tratadas como aletas rectas de longitud finita, usando la temperatura de saturación del vapor como temperatura de su base. El coeficiente global se obtuvo del programa de aplicación en MS Excel, apoyado en los resultados obtenidos para el cálculo de la pérdida de calor en vaporductos desnudos. Los vaporductos se clasificaron con base en el diámetro nominal en tuberías de pozos, subcolectores y ramales, y el número de silletas se determinó dividiendo la longitud total de cada vaporducto entre la distancia de separación típica entre silletas (7 m). Las dimensiones geométricas genéricas usadas para los soportes se basan en el diámetro nominal de los vaporductos. La Tabla 4 muestra los resultados de las pérdidas de calor en los soportes de vaporductos típicos del CGCP.

| Pérdida de calor en silletas | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Diámetro | L [m] | w [m] | t [m] | $L_c$ [m] | m | p [barg] | Tsat [°C] | k [W/(m²-°C)] | h [W/(m²-°C)] | Ta [°C] | η [%] | $A_f$ [m²] | $q_t$ [W] | $m_v$ [Ton/hr] |
| 16 | 0.052 | 0.700 | 0.010 | 0.057 | 8.182 | 6.895 | 169.9 | 49.325 | 16.361 | 23.8 | 93.330 | 0.081 | 180.579 | 0.0003 |
| | 0.203 | 0.697 | 0.006 | | | | T(x) | 155.367 | | | | 0.285 | 614.164 | 0.0010 |
| | 0.052 | 0.700 | 0.010 | 0.057 | 8.182 | | 155.4 | 49.325 | 16.361 | 23.8 | 93.330 | 0.080 | 160.307 | 0.0003 |
| | 0.203 | 0.697 | 0.006 | | | | T(x) | 142.251 | | | | 0.285 | 552.936 | 0.0009 |
| 20 | 0.248 | 0.706 | 0.006 | 0.251 | 9.837 | 6.665 | 168.7 | 49.422 | 15.183 | 23.8 | 39.951 | 0.709 | 622.945 | 0.0011 |
| | 0.184 | 0.446 | 0.006 | 0.187 | 9.837 | 6.665 | 168.7 | 49.422 | 15.183 | 23.8 | 51.613 | 0.334 | 379.802 | 0.0007 |
| | 0.510 | 0.750 | 0.006 | | | | T(x) | 48.213 | 68.590 | | | 0.781 | 410.224 | 0.0007 |
| 26 | 0.286 | 0.706 | 0.006 | 0.289 | 10.053 | 6.881 | 169.9 | 49.201 | 15.789 | 23.8 | 34.233 | 0.816 | 644.196 | 0.0012 |
| | 0.213 | 0.578 | 0.006 | 0.216 | 10.053 | 6.881 | 169.9 | 49.201 | 15.789 | 23.8 | 44.901 | 0.499 | 516.976 | 0.0009 |
| | 0.642 | 0.750 | 0.006 | | | | T(x) | 39.774 | 56.738 | | | 0.981 | 378.544 | 0.0006 |
| 32 | 0.324 | 0.706 | 0.006 | 0.327 | 9.500 | 6.881 | 169.9 | 49.385 | 14.150 | 23.8 | 32.079 | 0.923 | 612.216 | 0.0011 |
| | 0.241 | 0.710 | 0.006 | 0.244 | 9.500 | 6.881 | 169.9 | 49.385 | 14.150 | 23.8 | 42.262 | 0.694 | 606.361 | 0.0011 |
| | 0.774 | 0.750 | 0.006 | | | | T(x) | 36.878 | 52.211 | | | 1.180 | 346.356 | 0.0006 |

*Tabla 4. Pérdidas de calor en soportes de vaporductos típicos del CGCP.*

3.2 Pérdida de calor total en accesorios por tipo de separación

En la red de vaporductos del CGCP existe una amplia variedad de tamaños de ductos y una multiplicidad de condiciones de operación, motivo por el cual el cálculo de la pérdida de calor total en los accesorios de la red se convierte en una tarea sumamente compleja y tediosa.

Con la finalidad de simplificar el cálculo de la pérdida de calor total, se decidió agrupar los accesorios de la red con base en el tipo de separación (separación simple y doble separación) y asumir un conjunto de accesorios estándar para cada tipo de separación. Asimismo, para tener una mejor estimación del impacto de las condiciones de operación de la red en el cálculo de la pérdida de calor en accesorios de la red, estos se agruparon con base en el nivel de presión de operación de la red en vaporductos de Alta, Media y Baja presión. La categoría de media presión corresponde a los vaporductos de Cerro Prieto Uno (CPU). Finalmente, para el cálculo total de las pérdidas de calor se determinó el número de total accesorios por cada tipo de separación, mientras que el número total de vaporductos por tipo de separación y por nivel de presión fue determinado con base en el reporte mensual de producción de agua y vapor de la fecha de referencia del estudio.

El calor perdido hacia el medio ambiente a través de los accesorios desnudos de los vaporductos del CGCP, se traduce eventualmente en la condensación de vapor en el interior de los vaporductos y una consecuente reducción del vapor enviado a las plantas de generación, teniendo como resultado una disminución de la potencia generada por las unidades. La tasa de vapor que se condensa en los vaporductos de la red se puede calcular a partir de la ecuación (3):

$$\dot{m}_{cond} = \frac{3.6\, q}{h_{fg}} \qquad \cdots(3)$$

donde:

$m_{cond}$ = Tasa de vapor condensado;
q = Pérdida de calor hacia el medio ambiente;
$h_{fg}$ = Entalpía de condensación

Por lo tanto, a partir de los resultados obtenidos para la pérdida de calor total en los accesorios de la red y de las condiciones de operación (presión) de la red en la fecha de referencia, se calculó la tasa de vapor condensado debido a la pérdida de calor en los accesorios.

En la Tabla 5 se presenta un resumen de los resultados obtenidos para la tasa de condensación de vapor debido a las pérdidas de calor totales en los accesorios de CPU para un esquema de separación simple.

**Pérdida de Calor en Accesorios de Vaporductos CPU**

| | Punto de Medición | | Pierna Condensado | Entronque | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| No. Pozos | Brida 20-300 [Ton/hr] | Brida 4-300 [Ton/hr] | bridas + tuberías [Ton/hr] | brida + válvula [Ton/hr] | Total [Ton/hr] | Total CPU [Ton/hr] |
| 15 | 0.0077 | 0.0020 | 0.0077 | 0.0265 | 0.0440 | 0.6596 |

*Tabla 5. Pérdidas de calor totales en los accesorios de los vaporductos de CPU.*

En la Tabla 6 se muestran los cálculos de pérdidas de calor totales en accesorios (expresada en términos de la tasa de condensación de vapor) para vaporductos de alta y baja presión del CGCP, para cada tipo de separación (simple o doble). Las condiciones de operación de cada accesorio fueron obtenidas a partir de un promedio en presión y flujo másico de los vaporductos del mismo diámetro que corresponden a cada tipo de separación, con base en el reporte de operación de la fecha de referencia.

**Pérdida de Calor en Accesorios de Vaporductos Sencillos Alta Presión CPDTC**

| | Punto de Medición | | Pierna Condensado | Entronque | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| No. Pozos | Brida 20-300 [Ton/hr] | Brida 4-300 [Ton/hr] | bridas + tuberías [Ton/hr] | brida + válvula [Ton/hr] | Total [Ton/hr] | Total CPDTC [Ton/hr] |
| 82 | 0.0113 | 0.0026 | 0.0106 | 0.0394 | 0.0639 | 5.2417 |

**Pérdida de Calor en Accesorios de Vaporductos Dobles Alta Presión CPDTC**

| | Punto de Medición AP | | Pierna Condensado-AP | Entronque-AP | Punto de Medición BP | Pierna Condensado-BP | Entronque-BP | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| No. Pozos | Brida 20-300 [Ton/hr] | Brida 4-300 [Ton/hr] | bridas + tuberías [Ton/hr] | brida + válvula [Ton/hr] | Brida 10-150 [Ton/hr] | bridas + tuberías [Ton/hr] | brida + válvula [Ton/hr] | Total [Ton/hr] | Total CPDTC [Ton/hr] |
| 60 | 0.0111 | 0.0025 | 0.0105 | 0.0388 | 0.0031 | 0.0033 | 0.0078 | 0.0771 | 4.6253 |

**Pérdida de Calor en Accesorios de Vaporductos Sencillos BP CPDTC (Sitios)**

| | Punto de Medición | | Pierna Condensado | Entronque | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| No. Pozos | Brida 20-300 [Ton/hr] | Brida 4-300 [Ton/hr] | bridas + tuberías [Ton/hr] | brida + válvula [Ton/hr] | Total [Ton/hr] | Total CPDTC [Ton/hr] |
| 20 | 0.0065 | 0.0017 | 0.0065 | 0.0221 | 0.0368 | 0.7352 |

*Tabla 6. Pérdidas de calor totales en accesorios de los vaporductos de CPD, CPT y CPC.*

Tomando en cuenta el consumo específico de vapor de cada una de las centrales generadoras de energía para la fecha de referencia del estudio, se calculó la potencia eléctrica que se pierde debido a la transferencia de calor hacia el medio ambiente a través de los accesorios de los vaporductos de la red. Los resultados obtenidos se presentan en forma resumida en la Tabla 7 (expresada en MWt, MWe y en términos de la tasa de vapor condensado).

| | q [MWt] | m [Ton/hr] | q [MWe] |
|---|---|---|---|
| TOTAL CPU: | **0.375** | 0.660 | **0.066** |
| TOTAL CPDTC AP: | **4.911** | 9.020 | **1.187** |
| TOTAL CPDTC BP: | **0.925** | 1.583 | **0.208** |
| TOTAL CP: | **6.211** | 11.262 | **1.461** |

*Tabla 7. Pérdidas de calor totales en accesorios de los vaporductos del CGCP.*

En la Tabla 8 se muestra un resumen de los resultados obtenidos para la pérdida de calor total (expresada en MWt, MWe y en términos de la tasa de vapor condensado) en los soportes de los vaporductos para las redes de alta y baja presión.

| | q [MWt] | m [Ton/hr] | q [MWe] |
|---|---|---|---|
| TOTAL CPU: | 2.737 | 4.693 | 0.618 |
| TOTAL CPDTC AP: | 16.658 | 29.028 | 3.820 |
| TOTAL CPDTC BP: | 7.708 | 13.134 | 1.728 |
| TOTAL CP: | 27.103 | 46.855 | 6.165 |

*Tabla 8. Pérdidas de calor totales en soportes de los vaporductos del CGCP.*

Realizando una comparación de estos resultados con una estimación de las pérdidas totales de energía que ocurren en el transporte de vapor en la red de vaporductos del CGCP (García-Gutiérrez *et al.*, 2009), se puede apreciar que las pérdidas de calor hacia el medio ambiente debidas a los accesorios y soportes sin aislamiento de la red de alta presión del CGCP representan aproximadamente el 19.5% de la pérdida total de energía, mientras que la pérdida en los accesorios y soportes de la red de baja presión representa alrededor del 16.2%.

Estas pérdidas de calor y la condensación de vapor resultante se traducen en una pérdida de potencia equivalente a 7.63 MWe o al 1.1% de la potencia total instalada en el CGCP.

## 4. Validación contra mediciones en campo de temperatura superficial

Se efectuaron mediciones de temperatura de superficie en bridas de distinto diámetro de la red de vaporductos del CGCP, tomadas con una cámara termográfica. Se efectuaron mediciones de la temperatura de superficie y de la base de la brida, así como de la temperatura ambiente. Las condiciones de operación del vaporducto asociado corresponden con lo indicado en el reporte de producción de vapor y agua para la fecha de la realización de las mediciones.

A partir de los datos de las condiciones de operación de la red, se realizaron simulaciones con el programa de aplicación basado en MS Excel para determinar el coeficiente global de transferencia de calor de la superficie externa del vaporducto asociado. Finalmente, a partir de la ecuación para determinar la distribución de temperaturas en aletas circunferenciales, se determinó la temperatura de la superficie externa de la brida y se comparó contra los datos de medición en campo.

En la Tabla 9 se muestran los resultados de la evaluación de la pérdida de calor en bridas de 10 y 20” de diámetro nominal para un pozo de doble separación del CGCP. En esta tabla también se presentan los cálculos teóricos para las dimensiones típicas de las bridas y los parámetros necesarios para el cálculo de la pérdida de calor.

| Pérdida de calor en Bridas | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Diámetro | Clase | $r_1$ [m] | $r_2$ [m] | t [m] | $r_{2c}$ [m] | m | $C_2$ | p [barg] | Tsat [°C] | k [W/(m-°C)] | h [W/(m$^2$-°C)] | Ta [°C] | η [%] | $A_f$ [m$^2$] | $A_d$ [m$^2$] | $q_t$ [W] |
| 10 | 300 | 0.137 | 0.222 | 0.048 | 0.246 | 3.738 | 1.742 | 4.309 | 154.2 | 49.068 | 16.372 | 29.0 | 93.056 | 0.475 | 0.429 | 1785.305 |
| 10 | 900 | 0.137 | 0.273 | 0.070 | 0.308 | 3.232 | 1.108 | 3.935 | 151.4 | 49.603 | 18.101 | 23.8 | 86.839 | 0.901 | 0.429 | 2797.867 |
| 16 | 300 | 0.203 | 0.324 | 0.057 | 0.352 | 3.828 | 1.280 | 12.961 | 195.0 | 48.339 | 20.239 | 23.8 | 87.656 | 1.084 | 0.638 | 5501.815 |
| 20 | 300 | 0.254 | 0.387 | 0.064 | 0.419 | 3.349 | 1.365 | 11.721 | 190.7 | 48.741 | 17.360 | 29.0 | 88.588 | 1.280 | 0.798 | 5421.989 |
| 24 | 150 | 0.305 | 0.406 | 0.048 | 0.430 | 3.854 | 1.715 | 12.755 | 194.3 | 48.607 | 17.240 | 23.8 | 91.624 | 1.059 | 0.958 | 5666.051 |
| 40 | 300 | 0.508 | 0.619 | 0.114 | 0.676 | 2.538 | 2.008 | 11.348 | 189.3 | 48.395 | 17.821 | 23.8 | 93.507 | 128.581 | 1050.367 | 3452633.875 |

*Tabla 9. Pérdidas de calor totales en bridas del punto de medición (cálculo teórico).*

En la Tabla 10 se presenta una comparación de los resultados obtenidos en forma teórica para la temperatura superficial de estas bridas, así como los datos de la medición en campo para la temperatura de superficie del vaporducto y de la brida correspondiente. En esta tabla se indica también el error relativo (en %) de los resultados obtenidos para el cálculo teórico de la temperatura de superficie de cada brida, con relación a la medición en campo.

| | Pozos de CPDTC AP y BP | | | |
|---|---|---|---|---|
| | **138** | **138** | **138** | **138** |
| Diámetro Nom | 20 | 20 | 10 | 10 |
| Tprom (campo) [°C] | 188.7 | **162.3** | 157.2 | **137.2** |
| p (dato sumvapor) [barg] | 11.721 | 11.721 | 4.309 | 4.309 |
| Tsat (cálculo) [°C] | 190.7 | 190.7 | 154.2 | 154.2 |
| Tw (calculo) [°C] | 169.5 | **165.3** | 127.7 | **142.4** |
| Ta (campo) [°C] | 29.0 | 29.0 | 29.0 | 29.0 |
| h [W/(m$^2$-°C)] | 18.037 | 17.360 | 17.171 | 16.372 |
| Error Relativo (%) | | 1.818 | | 3.765 |
| | Tubería | Brida | Tubería | Brida |

*Tabla 10. Comparación de resultados para la temperatura de superficie en bridas del punto de medición (cálculo teórico vs medición en campo).*

## 5. Comparación de resultados mediante la modelación de accesorios usando software comercial para el cálculo de transferencia de calor

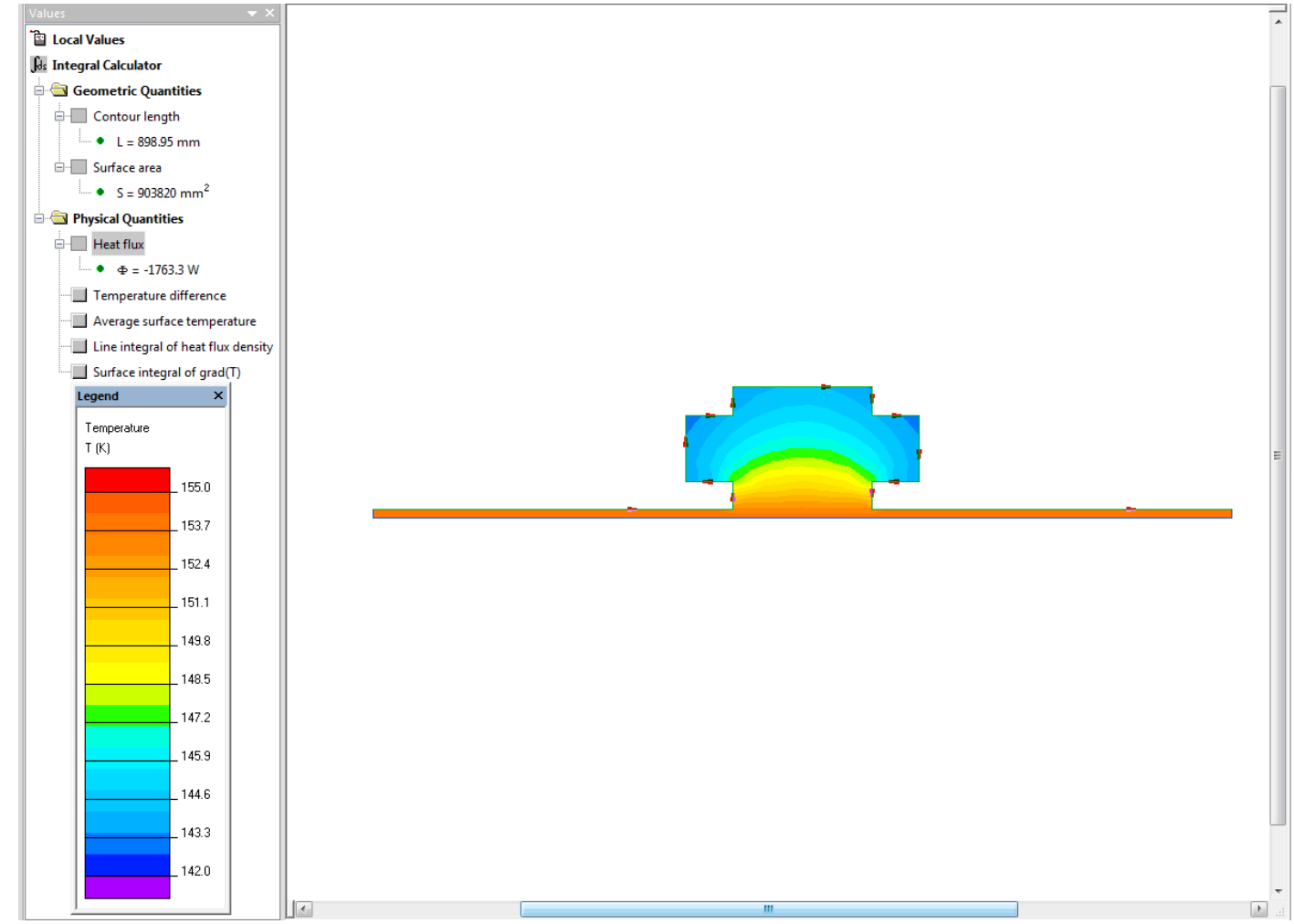
Se compararon los resultados de las pérdidas de calor en algunos accesorios de la red obtenidos al aplicar el método teórico descrito en este trabajo, contra los datos que se obtienen al realizar una modelación de estos accesorios utilizando un software comercial de libre distribución, el cual permite realizar cálculos de transferencia de calor en sólidos mediante la técnica de elemento finito.

El primer caso de comparación consistió en modelar una brida de 10” clase 300, localizada en el punto de medición de un vaporducto de baja presión. Las dimensiones de la brida y de los birlos de sujeción fueron reproducidos a escala en el software comercial, mediante una geometría axisimétrica, y se aplicaron las condiciones de frontera de temperatura de pared constante en la superficie interna de la brida ($T = T_{sat}$) y frontera convectiva para la superficie externa de la brida ($h = U_{me}$). Los resultados que se obtuvieron para la distribución de temperaturas en la brida y la pérdida de calor hacia el medio ambiente, se muestran en la Figura 1. En la parte baja de esta figura se anexa una tabla que muestra los resultados de los cálculos de las pérdidas de calor en la brida de 10” obtenidos al aplicar el método teórico descrito en la sección 3 de este trabajo. La diferencia relativa entre ambos cálculos es de 1.2%.

El segundo caso de comparación corresponde con una brida ciega de 40” clase 300 de un vaporducto de alta presión. En forma similar que el caso anterior, las dimensiones de la brida y de sus elementos de sujeción fueron utilizados para realizar un modelo axisimétrico de transferencia de calor en un software comercial. Los resultados obtenidos de las pérdidas de calor desde la superficie externa de la brida, así como su distribución de temperaturas se muestran en la Figura 2. También se anexa en la parte baja de esta figura una tabla con los resultados obtenidos de las pérdidas de calor hacia el medio ambiente utilizando el cálculo teórico. Rápidamente se puede apreciar que la diferencia relativa entre los resultados de ambos métodos de solución es de 10%.

## 5. Conclusiones

Se describieron las bases de un método para el cálculo de las pérdidas de calor en los accesorios y soportes de la red de vaporductos del CGCP. Con base en este método, se realizó la evaluación de las pérdidas de calor totales asociadas a los accesorios y soportes desnudos de la red de vaporductos del CGCP. El estudio se basó en un inventario de accesorios típicos, clasificados con base en el tipo de separación (sencilla y doble) y la presión de operación de la red (baja, media y alta presión). Se tomaron en cuenta las condiciones de operación de la red para una fecha dada.



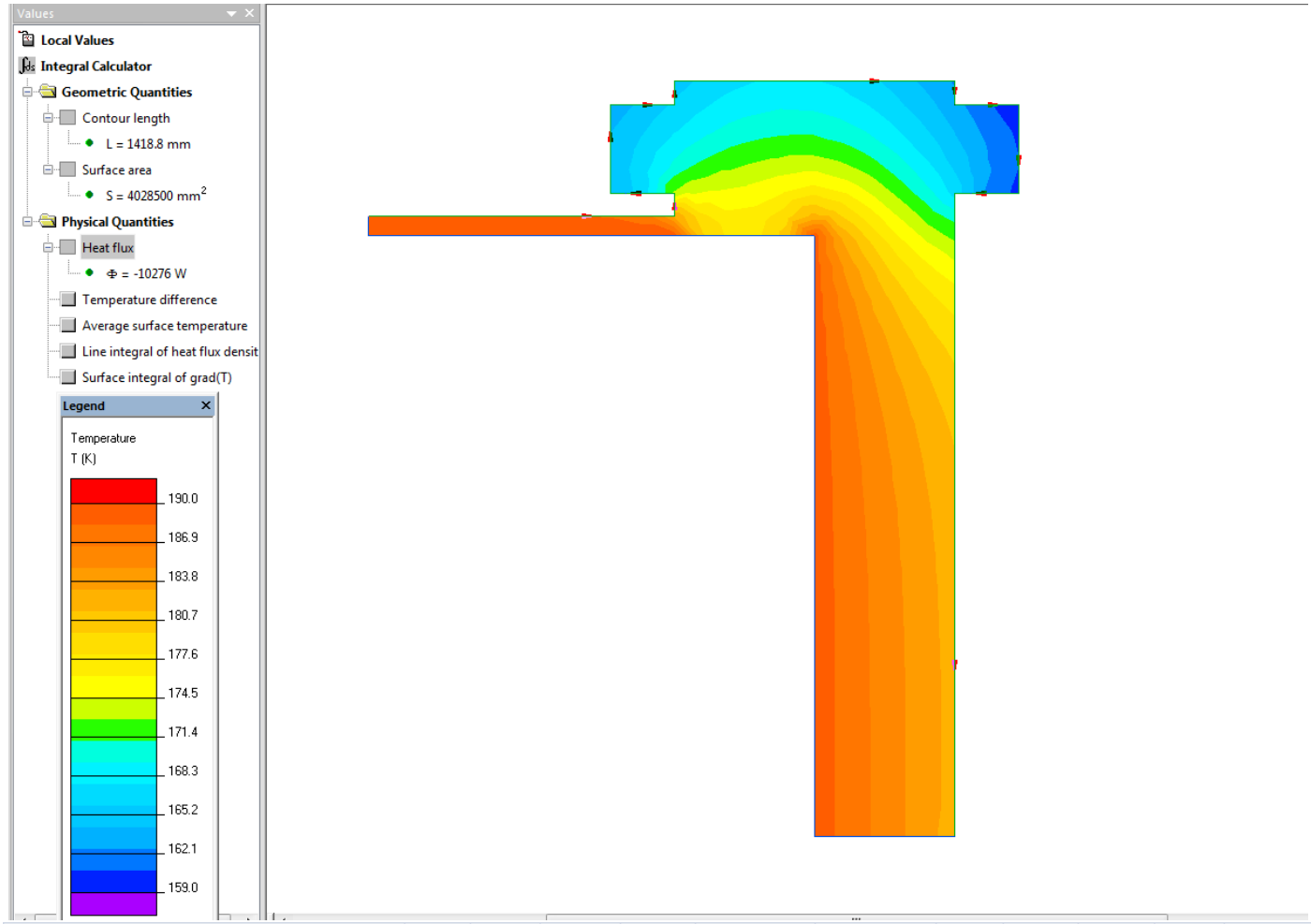

| Diámetro | Clase | $r_1$ [m] | $r_2$ [m] | t [m] | $r_{2c}$ [m] | m | $C_2$ | p [barg] | Tsat [°C] | k [W/(m-°C)] | h [W/(m²-°C)] | Ta [°C] | η [%] | $A_f$ [m²] | $A_d$ [m²] | $q_t$ [W] |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 10 | 300 | 0.137 | 0.222 | 0.048 | 0.246 | 3.738 | 1.742 | 4.309 | 154.2 | 49.068 | 16.372 | 29.0 | 93.056 | 0.475 | 0.429 | 1785.305 |

*Figura 1. Comparación de resultados del cálculo teórico para la pérdida de calor en una brida de 10" clase 300 y el valor reportado al modelar el accesorio mediante software comercial.*

Los resultados obtenidos indican que las pérdidas de calor totales en los accesorios y soportes desnudos que forman parte de la red de transporte de vapor ascienden a 33.3 MWt (MW térmicos), distribuidos en 3.1 MWt para CPU, 21.6 MWt para la red de alta presión (AP) de Cerro Prieto Dos, Tres y Cuatro, y 8.6 MWt para la red de baja presión (BP). Estas pérdidas dan lugar a la formación de 58.12 toneladas por hora (t/h) de condensado de las cuales 38.05 y 14.72 t/h son de las redes de AP y BP, respectivamente de los campos de Cerro Prieto Dos, Tres y Cuatro, y 5.35 t/h son de CPU.

Las pérdidas de calor y la condensación de vapor resultante se traducen en una pérdida de potencia equivalente a 7.63 MWe o al 1.1% de la potencia total instalada en el CGCP.

La validación de cálculos de pérdida de calor en accesorios dio resultados satisfactorios; los resultados del cálculo teórico se mantuvieron dentro del 5% de error relativo, en relación con las mediciones de temperatura de superficie tomada en campo.




**Pérdida de calor en Bridas Ciegas Desnudas**

| Diámetro | Clase | $r_1$ [m] | $r_2$ [m] | t [m] | $r_{2c}$ [m] | m | $C_2$ | p [barg] | Tsat [°C] | k [W/(m²-°C)] | h [W/(m²-°C)] | Ta [°C] | η [%] | $A_f$ [m²] | $A_d$ [m²] | $q_f$ [W] |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 40 | 300 | 0.508 | 0.619 | 0.114 | 0.676 | 2.538 | 2.008 | 11.348 | 189.3 | 48.395 | 17.821 | 23.8 | 93.507 | 2.419 | 1.609 | 11417.540 |

*Figura 2. Comparación de resultados del cálculo teórico para la pérdida de calor en una brida ciega de 40" clase 300 y el valor reportado al modelar el accesorio mediante software comercial.*

Los resultados del cálculo teórico de la pérdida de calor en accesorios mostraron buena concordancia con los que se obtuvieron al modelar el accesorio con un software comercial de transferencia de calor, basado en el método de elemento finito. Los resultados del cálculo teórico se mantuvieron dentro del 10% de diferencia relativa en relación con los valores reportados por el software comercial.

## Agradecimientos

Se agradece a las autoridades de la Residencia General de Cerro Prieto de la Comisión Federal de Electricidad, y del Instituto de Investigaciones Eléctricas, por el apoyo y permiso para la realización de la presente publicación. Los resultados fueron obtenidos como parte del contrato CFE/I/SC/13391/2009 entre el Instituto de Investigaciones Eléctricas y la Comisión Federal de Electricidad.

## Nomenclatura

*Símbolos*

| | |
|---|---|
| A | Área de transferencia de calor ($m^2$) |
| h | Ancho de la aleta |
| k | Conductividad térmica de la aleta |
| L | Longitud de la aleta (m) |
| $L_c$ | Longitud característica de la aleta (m) |
| $q_{acc}$ | Pérdida de calor en accesorios (W) |
| t | Espesor de la aleta (m) |
| $T_{sat}$ | Temperatura de saturación del vapor (K) |
| $T_w$ | Temperatura de la superficie externa del aislante (K) |
| $T_\infty$ | Temperatura global del fluido (K) |
| $U_m$ | Coeficiente global [W/($m^2$-K)] |

*Símbolos griegos*

| | |
|---|---|
| $\eta_f$ | Eficiencia de la aleta (adimensional) |

*Subíndices*

| | |
|---|---|
| d | Área base |
| e | Superficie exterior del accesorio |
| f | Área secundaria (aleta) |

## Referencias

García Gutiérrez, A., J.I. Martínez Estrella, y R. Ovando Castelar, 2009. Evaluación y optimización de la eficiencia del ciclo geotérmico del Campo Geotérmico de Cerro Prieto: Parte 1 - Sistema de producción y transporte de fluidos geotérmicos, Informe Final, Clave IIE/11/13743/I 02/F/DC, Instituto de Investigaciones Eléctricas, Cuernavaca, Mor., Diciembre. Inédito.

Gutiérrez-Negrín, L.C.A., R. Maya-González and J.L. Quijano-León, 2010. Current Status of Geothermics in Mexico. *Proceedings World Geothermal Congress 2010*, Bali, Indonesia, 25-29 April.

Incropera, F.P., D.P. DeWitt, and T.L. Bergman, 2006. *Fundamentals of heat and mass transfer*, 6th Edition, Wiley, pp. 152-153.

Ovando Castelar, R., A. García Gutiérrez, M. Ceceñas Falcón, J.I. Martínez Estrella, A.F. Hernández Ochoa, I. Canchola Félix, O. Mora Pérez y C. Miranda Herrera, 2009. Efecto del estado del aislamiento sobre el coeficiente global de transferencia de calor en componentes de la red de vaporductos del campo geotérmico de Cerro Prieto. *VII Congreso Internacional en Innovación y Desarrollo Tecnológico*, Cuernavaca, Morelos, México, 7-9 Octubre.

Ovando Castelar, R., A. García Gutiérrez, J.I. Martínez Estrella, I. Canchola Félix, P. Jacobo Galván, C. Miranda Herrera y O. Mora Pérez, 2011. Determinación de pérdidas de calor en la red de transporte de vapor del campo geotérmico de Cerro Prieto, BC, con base en el estado físico del aislamiento térmico de vaporductos. *Geotermia*, Vol. 24, Número 2, pp. 11-24.

# Estimulación ácida del pozo Az-68D en el campo geotérmico de Los Azufres, México

***Magaly del Carmen Flores Armenta, Elvia Nohemí Medina Barajas, Miguel Ramírez Montes y Lilibeth Morales Alcalá***
Comisión Federal de Electricidad, Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos, Morelia, Mich., México.
Correos: magaly.flores@cfe.gob.mx, miguel.ramirez02@cfe.gob.mx.

**Resumen**
El pozo Az-68D se perforó en 2006 en la zona norte del campo geotérmico de Los Azufres, Mich., a una profundidad total de 1800 metros. Entre los 1244 y 1800 metros de profundidad se reportaron pérdidas de fluido de circulación con un volumen total de 8238 $m^3$. Después de concluido, una prueba de inyección dio como resultado evidencias de daño en la formación. Durante el desarrollo del pozo se midió una producción de 11 t/h de vapor por orificio de 50.8 mm (2”), a condiciones de separación de 10 bar(a) y una presión de cabezal de 10.9 bar(a), debido a lo cual no fue posible integrar al pozo al sistema de suministro de vapor. Por ello en 2008 el pozo fue sometido a un tratamiento ácido a base de HCl y HF, con lo que se logró incrementar su producción hasta 40 t/h de vapor y 118 t/h de agua a condiciones de separación de 10 bar(a), y una presión de cabezal de 18 bar(a), fluyendo por orificio de 4” de diámetro.

*Palabras clave*: Los Azufres, daño en la formación, estimulación ácida, producción de fluidos, pozos productores.

# Acid stimulation of well Az-68D at the Los Azufres geothermal field, México

**Abstract**
The well Az-68D was drilled in the northern zone of the Los Azufres geothermal field, Mich., in 2006 at total depth of 1800 m. Circulation losses amounting 8238 $m^3$ were recorded during drilling between 1244 and 1800 m deep. After completion, an injection test indicated skin-factor evidence in the well. The well production was measured at 11 tons per hour (t/h) of steam through a 50.8 mm (2”) hole-diameter, at a separation pressure of 10 bar(a) and wellhead pressure of 10.9 bar(a). It was not possible to integrate the well with the steam-supply system. In 2008, the well was subjected to an acid treatment with HCl and HF, resulting in increased production up to 40 t/h of steam and 118 t/h of brine at a separation pressure of 10 bar(a) and a wellhead pressure of 18 bar(a), flowing through 4” wellbore.

*Keywords*: Los Azufres, skin factor, acid stimulation, fluid production, production wells.

## Antecedentes

Los Azufres es el segundo mayor campo geotérmico de México, con una capacidad instalada de 188 MW y más de cuarenta pozos productores en operación continua. Se localiza en la parte central del país, a unos 2800 msnm.

El pozo Az-68D se perforó en la zona norte de ese campo geotérmico (Fig. 1), específicamente en el sector conocido como Nopalito, entre el 19 de abril y el 4 de julio de 2006 a una profundidad total de 1800 m. Es un

pozo desviado con rumbo S65°W con el objetivo estructural de interceptar el fracturamiento asociado a las fallas Nopalito y Marítaro, y con un desplazamiento horizontal total de casi 194 metros (Tabla 1).

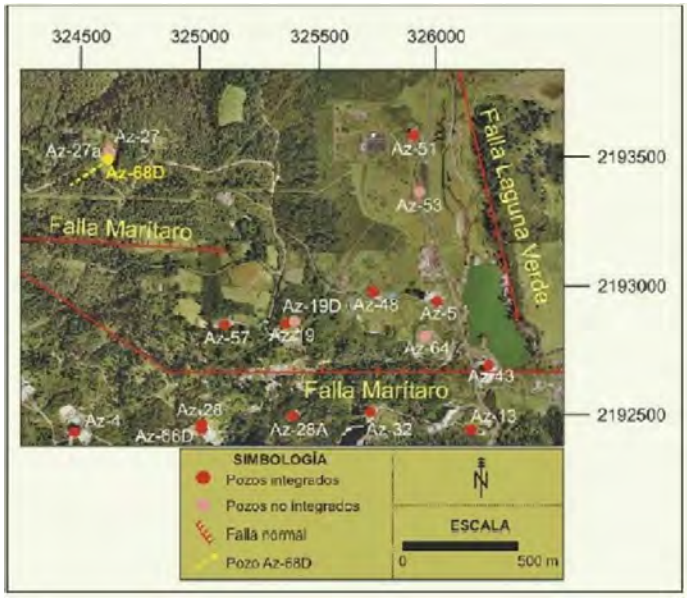



*Fig. 1. Ubicación del pozo Az-68D.*

Durante la perforación del agujero de 8 1/2" de diámetro (215.9 mm), a partir de los 1244 metros de profundidad empezaron a aparecer pérdidas parciales y totales del lodo de circulación, que se mantuvieron hasta alcanzar su profundidad total de 1800 metros. El volumen total de lodo perdido en ese intervalo se calculó en 8238 $m^3$ (51,811 barriles) (Pérez *et al.*, 2007).

Después de concluido el pozo, en el mismo mes de julio de 2006 se realizó una prueba de inyección para determinar algunos datos relevantes. El resultado de la prueba arrojó un índice de inyectividad de 1.8 toneladas por hora por bar (t/h-bar), un factor de daño ($\Delta P_{Skin}$) de 20 bar y una permeabilidad moderada de 0.9 D-m, además de obtenerse una temperatura estabilizada de 250°C. Todo ello indicó claramente la existencia de daño en la formación, lo que podría impedir el desempeño óptimo del pozo (CFE, 2006), lo cual se corroboró con la apertura y evaluación subsiguiente del mismo.

| | |
|---|---|
| Coordenadas del cabezal | X = 324 570 m, Y = 2 193 619 m |
| Elevación del cabezal | Z= 2790 msnm |
| Inicio de la desviación | 1100 m de profundidad |
| Zapata de la tubería de 9 5/8" de Φ | 1000 m de profundidad |
| Cima del Liner de 7" Φ (ranurado) | 1331.8 m de desarrollo |
| Fondo del Liner de 7" Φ (ranurado) | 1795 m de desarrollo |
| Desplazamiento horizontal total | 193.6 m |
| Rumbo final de la desviación | S65°W |
| Desarrollo Máximo | 1800 m |
| Objetivo estructural | Fracturamiento NE-SW (Nopalito) y E-W (Falla Marítaro) |

*Tabla 1. Principales características del pozo Az-68D (Datos de Pérez* et al.*, 2007).*

Posteriormente el pozo fue abierto para evaluar su producción descargando hacia el silenciador, y en los meses de octubre-noviembre de 2006 se realizó su primer desarrollo. La producción medida por orificio de 2" (50.8 mm) fue de 11 toneladas por hora (t/h) de vapor y 8 t/h de agua, calculadas a condiciones de separación de 10 bar (absolutos), y una presión de cabezal 10.9 bar(a). Esta baja producción impidió que el pozo pudiera ser integrado al sistema de suministro de vapor a las unidades en operación (CFE, 2006).

Por ello, el pozo Az-68D fue programado para ser sometido a un tratamiento ácido en la matriz, con el objetivo de remover los minerales (principalmente sílice y calcita) que se pudieran encontrar en los alrededores del agujero y en las zonas de aporte, y dentro del pozo en las zonas de *flasheo* o ebullición, lo cual debería resultar en una mejor permeabilidad y capacidad de producción (Tello, 2007).

**Operaciones de acidificación**

La primera operación durante un proceso de acidificación (O'Sullivan and McKibbin, 1989) es el reconocimiento del pozo, bajando una tubería flexible. En el caso del pozo Az-68D la tubería bajó inicialmente hasta 1025 m de profundidad, desde donde se inyectó salmuera geotérmica a razón de 6, 8, 9.1 y 9.2 barriles por minuto (bpm, equivalentes a unas 57.2, 76.3, 86.8 y 87.8 t/h, respectivamente). La presión máxima registrada durante la inyección a un ritmo de 87.8 t/h fue de 9420 psig (Schlumberger, 2008).

La estimulación ácida propiamente dicha empezó con la inyección de ácido clorhídrico diluido al 10% (HCl 10%) para lo que se conoce como el prelavado, con el objetivo de disolver productos ferrosos y material carbonatado que pudiera precipitar minerales insolubles, por ejemplo $CaF_2$, al reaccionar posteriormente con el HF. Este prelavado funciona además como un espaciador entre el lavado principal y la salmuera geotérmica (Perry, 1994). Se empleó una relación de 50 galones de ácido por pie de desarrollo (unos 620 litros de HCl al 10% por metro de desarrollo del pozo), inyectándose a un gasto 85.9 t/h (9.0 bpm) (Schlumberger, 2008).

Inmediatamente después de la etapa de prelavado, se inyectó una mezcla de ácidos para el lavado principal del pozo. Para este caso se empleó una mezcla de ácidos de HCl diluido al 10% y de ácido fluorhídrico (HF) diluido al 5% (HCl 10%–HF 5%). La mayor concentración de HCl con respecto al HF tiene como finalidad disolver la calcita depositada durante la etapa de producción del pozo en las inmediaciones del agujero (zona de *flasheo*), eliminando la resistencia en las paredes de la formación y el daño en sus inmediaciones. Se utilizó para el lavado la misma relación del prelavado y prácticamente el mismo gasto de inyección (84.9 t/h u 8.9 bpm) (Schlumberger, 2008).

Después de concluir el lavado, se procedió al llamado post-lavado, para lo cual volvió a utilizarse HCl al 10%. El objetivo del post-lavado es actuar como una transición o separación entre la mezcla de ácidos del lavado principal y la salmuera que después fluirá desde la formación, y reducir así la futura precipitación de minerales indeseables (Perry, 1994). El gasto de inyección del post-lavado fue también similar al del prelavado y al del lavado (84.9 t/h u 8.9 bpm) (Schlumberger, 2008).

| Profundidad (m) | Etapa | Fluido inyectado | Gasto ($m^3$/h) | Presión (bar) |
|---|---|---|---|---|
| 1025 | Prelavado | HCl 10% | 85.8 | 641.2 |
| | Lavado principal | HCl 10%-HF 5% | 83.9 | 647.7 |
| | Post-lavado | HCl 10% | 85.8 | 635.7 |
| 1225 | Prelavado | HCl 10% | 86.8 | 647.4 |
| | Lavado principal | HCl 10%-HF 5% | 83.9 | 639.8 |
| | Post-lavado | HCl 10% | 84.9 | 621.8 |
| 1300 | Prelavado | HCl 10% | 85.8 | 628.8 |
| | Lavado principal | HCl 10%-HF 5% | 84.9 | 642.0 |
| | Post-lavado | HCl 10% | 84.9 | 612.9 |
| 1350 | Prelavado | HCl 10% | 86.8 | 636.9 |
| | Lavado principal | HCl 10%-HF 5% | 84.9 | 646.0 |
| | Post-lavado | HCl 10% | 84.9 | 628.1 |
| 1525 | Prelavado | HCl 10% | 85.8 | 635.7 |
| | Lavado principal | HCl 10%-HF 5% | 84.9 | 634.6 |
| | Post-lavado | HCl 10% | 62.0 | 296.5 |

*Tabla 2. Resumen de operaciones durante la estimulación ácida.*

Estas operaciones de prelavado, lavado y lavado, con las mismas concentraciones de ácidos y gastos similares, se repitieron después a las profundidades de 1225, 1300, 1350 y 1525 metros, como se resume en la Tabla 2.

Finalmente se desplazó agua geotérmica para remover residuos ácidos de las tuberías. El volumen inyectado fue equivalente a 1.65 veces el volumen del lavado principal. Durante las etapas tercera y cuarta se observó una disminución de aproximadamente 10 bar(a) en la presión del pozo, pero la presión se estabilizó y se mantuvo con el mismo valor hasta el final. El material divergente se colocó después del segundo y tercer intervalo.

La estimulación concluyó con el retiro de la tubería flexible del pozo y el cierre de la válvula maestra del pozo. Toda la operación de estimulación, desde la colocación de la tubería flexible hasta su retiro, se realizó en un solo día, abarcando casi once horas (645 minutos).

## Resultados

Después de concluir la acidificación, el pozo se mantuvo cerrado durante aproximadamente cuatro días, y al quinto comenzaron los trabajos de apertura por una línea de 2” de diámetro descargando al silenciador. Se dejó que el pozo fluyera por esta línea durante tres días midiéndose su producción después y obteniéndose 27 t/h de vapor y 48 t/h de agua con una presión de cabezal de 14 bar(a). El pozo estaba regulado con la válvula de 254 mm (10”) de diámetro, con 5 vueltas de apertura.

El pozo se mantuvo en estas mismas condiciones hasta el 4 de diciembre de 2008, cuando fue purgado por una línea de 12.7 mm (½”). Esto se hizo debido a que el agua que producía el Az-68D se enviaba al pozo inyector Az-52, pero éste también fue sometido a una estimulación ácida.

Después de que el pozo Az-52 volvió a estar en condiciones de operación, el pozo Az-68D fue reabierto y evaluado para determinar su capacidad máxima de producción y de esta manera conocer los resultados de su estimulación ácida. Los datos de producción de vapor se obtuvieron por el método de presión de labio; los de producción de agua se midieron a condiciones atmosféricas de separación de 0.93 bar(a) y después se calcularon a condiciones de separación de 10 bar(a). Los resultados se resumen en la Tabla 3.

| Fecha | Presión de cabezal (bar(a)) | Diámetro de orificio | Q vapor (t/h) | Q agua (t/h) | Q vapor (t/h) | Q agua (t/h) | Entalpía (kJ/kg) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | Separación atmosférica | | Separación a 10 bar(a) | | |
| 11-12-2008 | 21.09 | 2” | 19.57 | 34.94 | 11.81 | 42.70 | 1199.56 |
| 15-12-2008 | 22.49 | 3” | 42.91 | 74.98 | 26.20 | 91.69 | 1210.88 |
| 17-12-2008 | 18.28 | 4” | 62.37 | 96.29 | **40.49** | **118.17** | **1277.28** |

*Tabla 3. Valores medidos y calculados a condiciones de separación de 10 bar(a).*

En la Figura 2 se presenta la curva característica de producción obtenida después de la estimulación ácida del pozo Az-68D y su capacidad máxima de producción.

## Conclusiones

- La operación de estimulación ácida del pozo Az-68D se llevó a cabo sin ningún problema, en un lapso de 645 minutos.

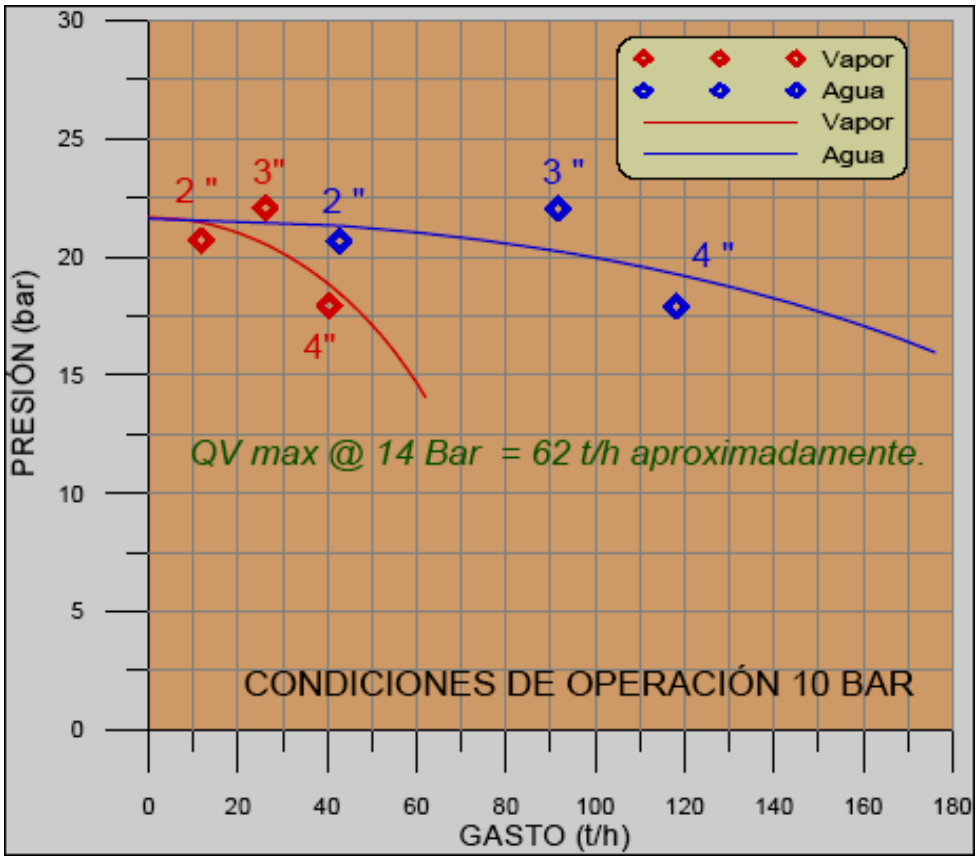



*Fig. 2. Curva característica de producción del pozo Az-68D después de su estimulación ácida.*

- La producción del pozo antes de su estimulación, medida por orificio de 2" de diámetro y calculada a 10 bar(a) de separación, fue de 11 t/h de vapor y 8 t/h de agua, con una presión de cabezal de 10.9 bar(a), condiciones insuficientes para su explotación comercial. Después de su estimulación, se midió una producción de 40 t/h de vapor y 118 t/h de agua y una presión de cabezal de 18 bar(a), con el pozo fluyendo por orificio de 4" de diámetro.

- La capacidad máxima de producción del pozo después de su estimulación ácida alcanza las 62 t/h de vapor a 14 bar(a) de presión de cabezal, lo cual indica que el pozo obtuvo una ganancia máxima en su producción de 51 t/h de vapor, lo que refleja una mejoría del 463%.

- Tomando en cuenta esos resultados, se concluye que la estimulación ácida del pozo Az-68D fue exitosa y es altamente recomendable para pozos perforados con lodo y que presentaron fuertes pérdidas de circulación.

**Referencias**

CFE, 2006. Base de datos GDManager del campo geotérmico de Los Azufres, Mich. Base de datos de la Subgerencia de Estudios, CFE. Inédito.

Schlumberger, 2008. Reporte final del pozo AZ-68D. Informe preparado para la CFE. Inédito.

O'Sullivan, M. and R. McKibbin, 1989. *Geothermal Reservoir Engineering*. Draft edition #1.

Pérez, H., C. Ordaz, L. Reyes, E. Medina y A. Sandoval, 2007. Informe final de los resultados de la perforación del pozo Az-68D. Informe interno No. 0-2159-019-R-01. Residencia de Los Azufres-Residencia de Estudios, CFE. Inédito.

Perry, R., 1994. *Chemical Engineer's Handbook*. International Edition, 3rd. Printing.

Tello, M., 2007. Proyecto de acidificación de los pozos Az-25, Az-36 y Az-68D del campo geotérmico de Los Azufres. Informe Interno No. DINYAC-013-2007, Departamento de Ingeniería de Yacimientos, CFE. Inédito.

# Afectación térmica entre pozos interpretada mediante modelado de canales de flujo a partir de pruebas con trazadores

***Abraham III Molina Martínez, Magaly del Carmen Flores Armenta y Miguel Ramírez Montes***
Comisión Federal de Electricidad, Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos, Morelia, Mich., México.
Correo: abraham.molina@cfe.gob.mx

**Resumen**
Se decidió aplicar dos modelos para interpretar los datos de pruebas con trazadores y evaluar los posibles cambios de temperatura en pozos de producción debido a la inyección de salmueras en pozos inyectores cercanos. El primero es un modelo simple unidimensional de canal de flujo del transporte de un trazador, que ha resultado ser muy poderoso en la simulación de datos de retorno de pruebas con trazadores en sistemas geotérmicos, y que está basado en la teoría básica del transporte de solutos. Las ecuaciones diferenciales del modelo son resultas con el método no-lineal de mínimos cuadrados y está codificado en el software TRINV. A través de esta simulación se pueden obtener las principales propiedades de todos los canales de flujo, es decir, el volumen del o los canales de flujo *AxØ*, la velocidad media del fluido *u* y la dispersividad $\alpha_L$. El segundo modelo indica el probable enfriamiento de los fluidos de un pozo productor ocasionado por la inyección, y toma en cuenta la superficie de contacto entre la roca y el agua, la capacidad calorífica de la roca, la capacidad de calor del fluido y la conductividad térmica de la roca para predecir finalmente la temperatura de los fluidos del pozo productor. Cabe mencionar que la solución analítica a las ecuaciones que gobiernan el cálculo de flujo de calor convectivo y conductivo está codificada en el software TRCOOL. El propósito principal de utilizar esos modelos es obtener información adicional a la que regularmente se obtiene con una prueba de trazadores que es básicamente la conexión hidráulica de los pozos productores con el pozo inyector, el porcentaje de trazador recuperado y la velocidad del fluido. Con estos modelos se puede, además, estimar el volumen de los canales de flujo, la velocidad del trazador en ellos y evaluar los efectos de la inyección sobre la temperatura de producción. Ambos modelos se aplicaron al caso del pozo inyector Az-64 y al productor Az-5, del campo de Los Azufres, en los cuales se había realizó anteriormente una prueba con trazadores.

*Palabras clave:* Los Azufres, trazadores, modelado, inyección, enfriamiento debido a la inyección, canales de flujo.

# Thermal effects in wells interpreted by flow-channel modeling on results from tracer tests

**Abstract**
It was decided to apply two models to interpret tracer test data and evaluate possible temperature changes in production wells due to the injection of brine into nearby injection wells. The first model is a simple, one-dimensional model of the flow channel for the transport of a tracer, which has proven very useful in simulating feedback data of tracer tests in geothermal systems and is based on the basic theory of solute transport. The differential equations in the model are solved by the nonlinear method of least squares, which are encoded in the software TRINV. Through this simulation it is possible to get the main properties of all the flow channels, *i.e.* flow channel volumes *AxØ*, the mean fluid velocity *u,* and dispersivity $\alpha_L$. The second model indicates the probable cooling of geothermal fluids produced by a well due to injection and takes into account the contact surface between rock and water, the heat capacity of the rock, the heat capacity of fluid

and the thermal conductivity of the rock—to finally predict the temperature of the production well fluids. The analytical solution to equations for calculating convective and conductive heat flow is encoded by the software TRCOOL. The main purpose of using these models is to get additional information—more than what regularly is obtained with a tracer test. This is basically the hydraulic connection of production wells with the injector, the percentage of tracer recovered and the fluid velocity. These models also may estimate the volume of the flow channels through which the tracer travels and predict the effects of injection on the production temperature. Both models were applied to the case of the injection well, Az-64, and the production well, Az-5, in the Los Azufres geothermal field. The wells had been part of a previous tracer test.

*Keywords:* Los Azufres, tracers, modeling, injection, cooling due to injection, flow channels.

## Antecedentes

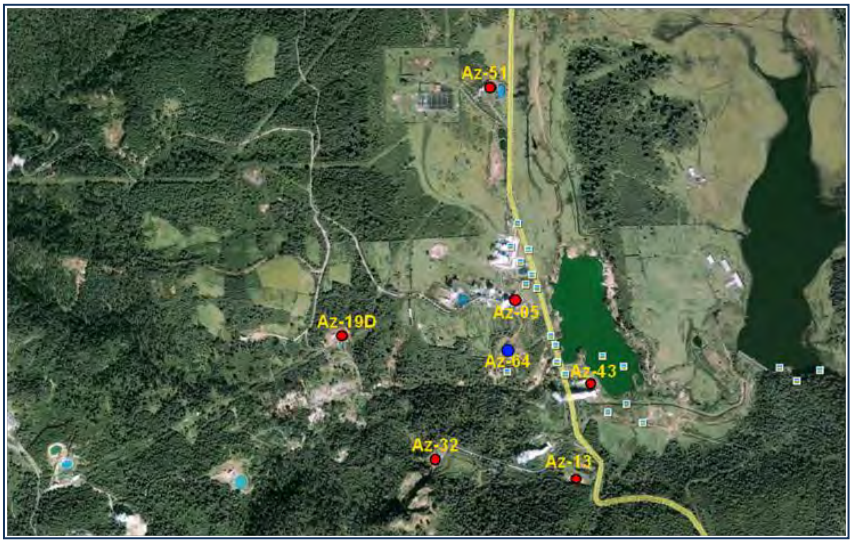



*Fig. 1. Ubicación de los pozos involucrados en la prueba de trazadores en la zona norte de Los Azufres.*

A finales de 2006 la Comisión Federal de Electricidad (CFE) realizó una prueba de trazadores en el campo geotérmico de Los Azufres, Mich., utilizando como pozo inyector el Az-64, ubicado en la porción centro-oriental de la zona norte del campo. Se empleó como trazador hexafluoruro de azufre ($SF_6$), que ya se había empleado antes exitosamente en este campo, y se monitorearon seis pozos productores en la periferia del inyector, que fueron Az-5, Az-43, Az-32, Az-19, Az-13 y Az-51 (Iglesias *et al.*, 2009) cuya ubicación se presenta en la Figura 1. En este trabajo sólo se analiza el posible efecto térmico de la inyección entre el pozo Az-64 y el pozo Az-5, que es el más cercano de los pozos productores monitoreados encontrándose a 195 metros de distancia horizontal. El pozo Az-5 produce un promedio de 75.6 toneladas por hora (t/h) de vapor sin producir agua. Las principales zonas permeables identificadas en el pozo Az-64 se ubican en los intervalos de profundidad 950-1050 y 1200-1250 m, y en el pozo Az-5 en los intervalos 1000-1200 y 1450-1490 m. Ambos pozos están prácticamente a la misma altitud (Hernández, 1996; CFE, 2010).

La prueba empezó el 24 de octubre de 2006 con la inyección de 96.4 kg de $SF_6$ en el pozo Az-64 a una tasa de 5.58 litros por segundo y a una temperatura de 30°C. El $SF_6$ se seleccionó como trazador porque es un gas no tóxico, no inflamable y no corrosivo, con una solubilidad en agua similar a la del nitrógeno. Además es estable térmicamente hasta 340°C y se analiza por cromatografía de gases, con detector de captura de electrones. A partir de la fecha de inyección del trazador se estuvieron tomando muestras en los fluidos producidos por los pozos monitoreados hasta un total de 156 días. Para el caso del pozo Az-5 se logró recuperar un 48.5% del volumen total inyectado en el pozo Az-64 después de un tiempo de residencia de 156 días (Iglesias *et al.*, 2009).

## Teoría básica del transporte de soluto

A continuación se repasan brevemente las ecuaciones que rigen el transporte de solutos en los sistemas hidrológicos porosos y fracturados. El término ‗soluto‘ indica que es una sustancia química disuelta en el líquido y sus ecuaciones de transporte se tratan en diversas publicaciones (Javandel *et al.*, 1984, Bear *et al.*, 1993), siguiendo las leyes básicas de conservación de la masa de un soluto. Las ecuaciones se derivan de tales leyes básicas de conservación y asumen que el flujo del soluto puede ocurrir por difusión, dispersión y advección. A fin de no repetir las ecuaciones incluidas en las publicaciones mencionadas, sólo se reproducirán las ecuaciones finales derivadas y la manera en que se utilizan para este trabajo.

Las ecuaciones básicas que describen el flujo del soluto son las siguientes:

$$F_x = F_{x,advection} + F_{x,dispersion} \qquad (1)$$

donde $F_x$ denota la tasa de flujo de masa del soluto $(kg/m^2s)$ en la dirección-*x*, y

$$F_{x,advection} = u_x \phi C \qquad (2)$$

$$F_{x,dispersion} = -\phi D_x \partial C/\partial x \qquad (3)$$

La ecuación (3) es la llamada ley de Fick. Además, $u_x$ denota la velocidad de la partícula del fluido $(m/s)$, $\phi$ la porosidad del material, *C* la concentración de soluto $(kg/m^3)$ y $D_x$ el coeficiente de dispersión $(m^2/s)$ que se define como:

$$D_x = \alpha_x u_x + D^* \qquad (4)$$

donde $\alpha_x$ es la dispersividad del material $(m)$ y $D^*$ es el coeficiente de difusión molecular $(m^2/s)$. Ecuaciones iguales aplican para las direcciones en *y* y *z*.

Los supuestos utilizados en la derivación son que el acuífero es homogéneo, isotrópico y saturado, y bajo condiciones tales que la ley de Darcy es válida. Bajo estos supuestos, mediante la combinación de las anteriores ecuaciones de flujo y la conservación de la masa del soluto asociado con los límites apropiados y las condiciones iniciales, se obtiene la siguiente ecuación diferencial para el transporte de solutos en tres dimensiones.

$$\frac{\partial}{\partial x}\left[D_x \frac{\partial C}{\partial x}\right] + \frac{\partial}{\partial y}\left[D_y \frac{\partial C}{\partial y}\right] + \frac{\partial}{\partial z}\left[D_z \frac{\partial C}{\partial z}\right] - \frac{\partial}{\partial x}[u_x C] - \frac{\partial}{\partial y}[u_y C] - \frac{\partial}{\partial z}[u_z C] = \frac{\partial C}{\partial t} \qquad (5)$$

En el caso de flujo unidimensional, la ecuación (5) se simplifica de la manera siguiente:

$$D\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} = u\frac{\partial C}{\partial x} + \frac{\partial C}{\partial t} \qquad (6)$$

Un modelo simple unidimensional de canal de flujo del transporte de un trazador ha resultado ser muy poderoso en la simulación de los datos de retorno de las pruebas del trazador en los sistemas geotérmicos. Se supone que el flujo entre el pozo de inyección y el productor se puede aproximar por el flujo unidimensional de canales de flujo, como se esquematiza en la Figura 2. Se simula una trayectoria del flujo a lo largo de una zona de fractura, una capa permeable o una intercalación. En la figura $b$ indica ya sea el ancho de la zona de fractura o el espesor de la intercalación o de la capa, mientras que $h$ indica la altura de la trayectoria del flujo dentro de la zona de fractura, la intercalación o la capa permeable.

En 1994, Arason y Björnsson desarrollaron un código de computadora llamado TRINV para el modelado de los perfiles de recuperación del trazador, que fue utilizado con éxito en varios campos geotérmicos de Islandia (Axelsson *et al.*, 1994). Este es el modelo que se utilizará para simular el perfil de recuperación del trazador en el pozo Az-5 del campo de Los Azufres, mismo que se discute a continuación.

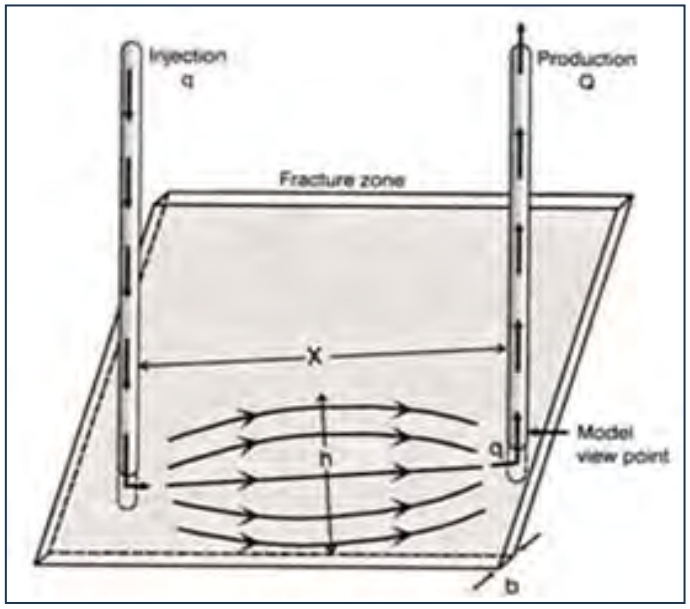



*Fig. 2. Esquema de un canal de flujo con flujo unidimensional que conecta un pozo inyector y un pozo productor (Axelsson* et al.*, 1994).*

Si se omite la difusión molecular y se asume la inyección instantánea de una masa M (kg) del trazador en el tiempo t = 0 y una parte del trazador $Mr$ transportado a lo largo del canal de flujo hacia el pozo productor, la solución a la ecuación (6) se da como:

$$C(t,x) = \frac{M_r}{2A\emptyset\sqrt{\pi Dt}} exp\left(\frac{-(x-ut)^2}{4Dt}\right) \qquad (7)$$

donde $C$ es la concentración del trazador en el canal flujo, $D$ es el coeficiente de dispersión, definido como: $\boldsymbol{D_j} = \boldsymbol{\alpha_{Lj}}\boldsymbol{u_j}$, $u$ es la velocidad media del fluido en el canal $(m/s)$ dado por $\boldsymbol{u_j} = q_j/\rho A_j \emptyset_j$, con $q$ la tasa de inyección $\boldsymbol{q_j} = q_{in}M_j/M$, $\rho$ la densidad del agua, $A$ el área promedio de la sección transversal del flujo del canal y $\emptyset$ la porosidad del canal de flujo. Teniendo en cuenta la conservación de masa en el pozo de producción, con una tasa de producción Q, se obtiene: $C(t)q = c(t)Q$. Si existen $n$ canales de flujo que conecten los dos pozos, la concentración del trazador en el pozo productor estará dada por:

$$c(t) = \sum_{j=1}^{n} \frac{\boldsymbol{\rho M_j u_j}}{2Q\sqrt{\pi \boldsymbol{D_j} t}} exp\left(\frac{-(\boldsymbol{x_j} - \boldsymbol{u_j} t)^2}{4\boldsymbol{D_j} t}\right) \qquad (8)$$

El código de computadora TRINV que interpreta el trazador está incluido en el paquete de software llamado ICEBOX (Aranson y Björnsson, 1994). Este programa resuelve las ecuaciones en la expresión (8) inversamente por el método no-lineal de mínimos cuadrados. A través de la simulación se pueden obtener las principales propiedades de todos los canales de flujo, es decir, los volúmenes de canal de flujo $Ax\emptyset$ y las dispersividades $\boldsymbol{\alpha_L}$. Debido al método inverso, la solución no es única para soluciones de múltiples canales de flujo. Por lo tanto, para utilizar el código, puede ser necesario obtener un número de soluciones diferentes y seleccionar la más adecuada, pero para ello debe tenerse un buen conocimiento del campo geotérmico. Para esa selección, puede ser útil tener información adicional de otros estudios (Gaoxuan, 2008).

## Resultados para el pozo Az-5

El primer paso en el análisis de la prueba del trazador consiste en la estimación de la masa (actividad) del trazador recuperado y esto se hace sobre la base de la siguiente ecuación:

$$m_j(t) = \int_0^t C_j(t) Q_j(t) dt \qquad (9)$$

donde $m_j(t)$ es la masa acumulativa recuperada en el j-ésimo pozo productor (kg), $C_j$ la concentración del trazador (kg/l o kg/kg) y $Q_j$ la producción del pozo (l/s o kg/s). Para resolver esta ecuación se emplea el programa TRMASS, incluido en el paquete ICEBOX. Si los resultados del análisis de las muestras de agua se combinan en un solo archivo, el programa calculará la recuperación acumulada del trazador desde el inicio de la prueba hasta el final de los datos, basado en el modelo descrito anteriormente. Cabe hacer mención que se omite en el cálculo la variabilidad de la tasa de flujo de producción y del caudal de inyección (Axelsson *et al*., 2005).

A continuación se presenta la simulación del caso del pozo Az-5 con los programas TRMASS y TRINV, que da como resultado los parámetros que mejor se ajustan a los datos reales obtenidos en la prueba del trazador. Como se mencionó, en el pozo Az-5 se recuperó un 48.5% del volumen del trazador inyectado en el pozo Az-64 en un tiempo de 156 días.

El resultado de la simulación indica que se habría recuperado el 46% del volumen inyectado a los 30 días y el 48.5% a los 165 días, según se muestra con la curva azul claro de la Figura 3. En esta figura sólo se presentan los resultados de la simulación hasta el día 100 (eje X), a fin de que se alcanzaran a notar los pulsos de los primeros días. Esto no afecta el resultado ya que a partir de los 30 días la recuperación del trazador es mínima y se observa casi como si fuese constante. El alto porcentaje de recuperación se debe a la alta permeabilidad de los canales por las que viajó el trazador y la rapidez con la que éste se detectó se debe a la proximidad entre el pozo inyector y el pozo Az-5.

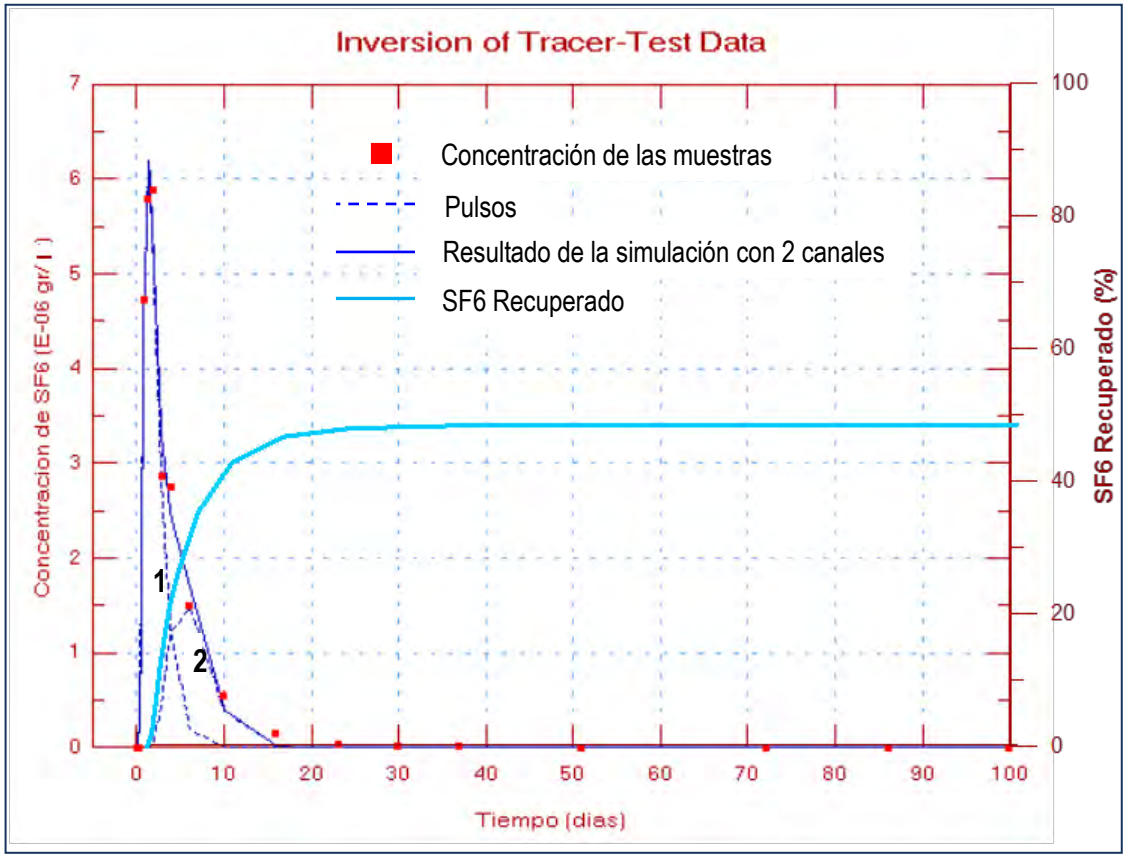



*Fig. 3. Simulación de los datos reales de la prueba del trazador para el caso del pozo Az-5.*

Además, en la simulación se observa la existencia de al menos dos posibles canales entre otros tantos que estuvieran conectados con el pozo, demostrando así que existe recarga hacia la zona de alimentación del pozo Az-5 lo que ayuda al mantenimiento de la presión en la zona aledaña del yacimiento. Cabe hacer mención

que aunque este factor es positivo faltaría por evaluar la interferencia térmica que pudiera presentarse en corto tiempo debido a este factor, lo que se discute más adelante.

En la Tabla 1 se muestran los resultados del modelo. Comparando la recuperación de la masa calculada del trazador en un tiempo infinito, se observa que el 30.23% del trazador recuperado ocurre a través del primer canal (1) mientras que el 18.27% es a través del segundo canal (2). Otros resultados de la simulación indican que la velocidad media del fluido es u = $1.43 \times 10^{-3}$ m/s para el primer canal y $7.38 \times 10^{-4}$ m/s para el segundo, lo cual equivale a 123.5 m/día y 63.8 m/día respectivamente.

| Número de canal | 1 | 2 |
|---|---|---|
| Distancia del canal de flujo entre pozos *x*(m) | 195 | 357 |
| Velocidad media del flujo *u*(m/s) | 0.143E-02 | 0.738E-03 |
| Coeficiente de dispersión D($m^2$/s) | 0.5350E-01 | 0.2075E-01 |
| Sección transversal del canal [Area x Porosidad AØ($m^2$)] | 0.1046E-02 | 0.1219E-02 |
| Dispersividad longitudinal $\alpha_L$(m) | 37.41 | 28.11 |
| Volumen estimado del canal *x* AØ($m^3$) | 0.204 | 0.4364 |
| Trazador recuperado $M_i$/M(%) | 30.23 | 18.27 |
| Coeficiente de determinación | 99% | |

*Tabla 1. Parámetros que mejor se ajustan a la recuperación real del trazador en el pozo Az-5.*

**Modelo de predicción de enfriamiento**

Para describir el modelo deben considerarse ciertos parámetros que se verán involucrados al inyectar salmuera de menor temperatura que la que se encuentra en el interior del pozo productor. Estos parámetros son la superficie de contacto entre la roca y el agua, la capacidad calorífica de la roca y del fluido y la conductividad térmica de la roca, bajo la premisa de que la matriz de la roca actúa como un intercambiador de calor, que va calentando gradualmente la salmuera conforme se mueve en el yacimiento (Gaoxuan, 2008).

Para predecir el enfriamiento que pudiese ocasionar la inyección sobre un pozo productor, se toma como ejemplo el modelo anterior que se utilizó para interpretar el comportamiento del trazador en el pozo Az-5. De él se desprende que la zona de fractura o los canales de flujo tendrán una anchura denotada por ~~b~~", una altura ~~h~~", una longitud ~~x~~" y una porosidad ~~Ø~~" (ver Fig. 2).

La solución analítica a las ecuaciones que describen la temperatura del fluido del pozo productor está dada por la ecuación (10). Para mayor detalle existen soluciones a problemas semejantes que expresan el desarrollo de la misma (Carslaw and Jaeger, 1959; Bodvarsson, 1972).

$$T(t) = T_0 - \frac{q}{Q}(T_0 - T_i)\left[1 - erf\left\{\frac{kxh}{c_w q\sqrt{\kappa(t - x/\beta)}}\right\}\right] \qquad (10)$$

Donde $T(t)$ es la temperatura del fluido producido, $T_0$ es la temperatura del yacimiento inalterada, $T_i$ la temperatura de inyección, $q$ y $Q$ la tasa de inyección y producción respectivamente, $erf$ la función de error, $k$ la conductividad térmica de la roca, $\kappa$ su difusión térmica, $x$ la distancia entre el pozo inyector y el productor y

$$\beta = qc_w/\langle\rho c\rangle_f hb \qquad (11)$$

siendo

$$\langle\rho c\rangle_f = \rho_w c_w \emptyset + \rho_r c_r(1-\emptyset) \qquad (12)$$

la capacidad calorífica volumétrica del material en el canal de flujo, donde $\rho$ es la densidad y $c$ es el calor especifico y los subíndices $w$ y $r$ indican agua y roca respectivamente (Axelsson *et al.*, 2005). Cabe hacer mención que el programa TRCOOL, que está incluido en el paquete de software ICEBOX, ha sido desarrollado utilizando este método por Axelsson *et al.* (1994).

Los parámetros utilizados para predecir el enfriamiento a mediano o largo plazo debido a los efectos de la inyección son los estimados a partir de la simulación del trazador recuperado, incluyendo el porcentaje de trazador recuperado en cada canal de flujo, según se indicó en la Tabla 1. Hay diferentes supuestos para predecir el enfriamiento, y a continuación se definen tres escenarios. El escenario 1, que podría considerarse como el optimista, asume una alta porosidad y un canal de flujo con una superficie grande lo que permite predecir un enfriamiento lento. El escenario 3 sería el pesimista, asumiendo una alta porosidad y una pequeña superficie de área con canales de flujo del tipo de tubos capilares, que resultaría en una predicción de enfriamiento rápido. Finalmente, el escenario 2 sería el intermedio entre el optimista y el pesimista y asume una baja porosidad y un canal de flujo de volumen grande (Axelsson *et al.*, 2005). En la práctica es mejor optar por un escenario conservador para no arriesgar un efecto térmico negativo.

El posible enfriamiento depende de la superficie y de la transferencia de calor de la roca a los canales de flujo. Los resultados de la prueba con trazador permiten inferir los volúmenes de los canales de flujo entre el pozo inyector y productor, pero hay que presuponer la geometría de esos canales. En este caso se conoce aproximadamente la porosidad pero los parámetros ~~h~~" y ~~b~~" del área son por escasamente conocidos. Por lo tanto, se asumirá que existe más de un canal de flujo conectando al pozo inyector con el productor y que b es el doble de h (b = 2h) para el caso optimista, b = h para el caso intermedio, y que b es la mitad de h (b = h/2) para el caso pesimista (Tabla 2).

| Escenario | Canal | x (m) | b (m) | h (m) | Ø (%) |
|---|---|---|---|---|---|
| 1. Optimista | 1 | 195 | 0.167 | 0.0835 | 15 |
| | 2 | 357 | 0.1802 | 0.0901 | 15 |
| 2. Intermedio | 1 | 195 | 0.10227 | 0.10227 | 10 |
| | 2 | 357 | 0.1104 | 0.1104 | 10 |
| 3. Pesimista | 1 | 195 | 0.04175 | 0.0835 | 15 |
| | 2 | 357 | 0.045 | 0.0901 | 15 |

*Tabla 2. Parámetros del modelo utilizados para predecir el probable enfriamiento.*

Para predecir el enfriamiento o declinación de temperatura en un periodo de 30 años se propusieron dos escenarios de inyección. El primero asume una inyección baja, de un promedio de 3.61 l/s (13 t/h) que equivale a la producción real de salmuera de los pozos Az-13, Az-19 y Az-43. El segundo escenario parte de una inyección superior, de 7.5 l/s (27 t/h) en promedio, equivalente a la producción real de salmuera de los pozos anteriores más la del pozo Az-51. La Figura 4 presenta los resultados obtenidos al simular ambos escenarios de inyección en los escenarios de enfriamiento optimista, intermedio y pesimista.

La parte superior de la Figura 4 presenta el resultado de la simulación para el escenario de inyección bajo, de 13 t/h. Como se ve, el modelo pronostica que el pozo sufriría un enfriamiento muy drástico, de cerca de 40°C en la primera media hora de inyección (~2000 segundos) en cualquierda de los escenarios (optimista, intermedio o pesimista), pero que con el paso del tiempo la reducción de temperatura se haría cada vez más pequeña hasta volverse imperceptible a partir de la cuarta hora. Al simular la temperatura en el año 30 de inyección, esta rondaría los 238°C como se indica con la línea negra superior.

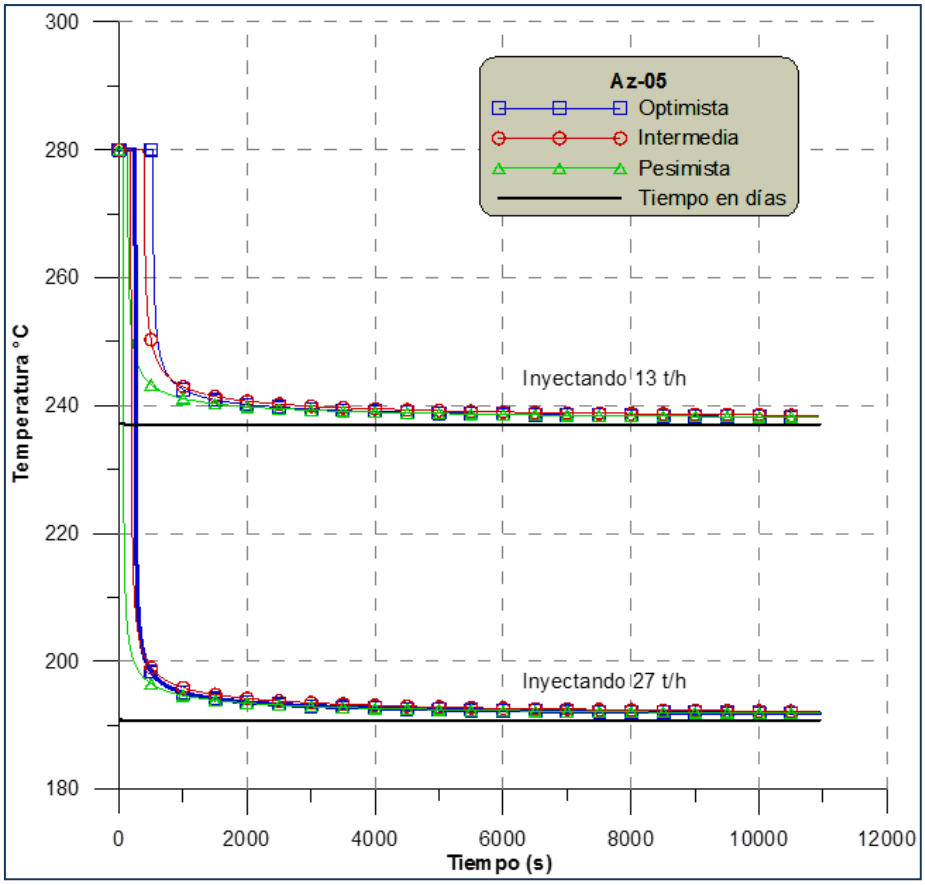



*Fig. 4. Pronóstico de enfriamiento en el pozo Az-5 con dos gastos de inyección y los tres escenarios considerados.*

Consecuentemente, al modelar un escenario de inyecctión superior, de 27 t/h (parte inferior de la Fig. 4), el enfriamiento de los fluidos producidos por el pozo Az-5 sería aun mayor, pues su temperatura se reduciría en más de 85°C en la primera media hora en todos los escenarios. Sin embargo, este súbito enfriamiento se estabilizaría muy rápidamente sin bajar de 191°C después de 30 años de inyección, como lo indica la línea negra inferior.

De acuerdo con los resultados de esta simulación, la inyección de salmuera a 30°C de temperatura en el pozo Az-64 provocaría un enfriamiento casi inmediato en el vapor producido en el pozo Az-5, el cual vería reducida su temperatura en 40°C si el volumen a inyectar fuera de 13 t/h y en 85°C si el volumen fuera de 27 t/h. Sin embargo, una vez alcanzada la máxima afectación, la disminución de temperatura a largo plazo es mínima.

## Conclusiones y recomendaciones

La aplicación del programa TRINV permitió reproducir el porcentaje real de trazador recuperado en el pozo Az-5 durante la prueba realizada en octubre de 2006, que fue del 48.5% en 156 días de monitoreo.

Los resultados del modelado permitieron idenficar al menos dos canales de flujo que conectan al pozo Az-64 con el Az-5, que pueden ser zonas de fractura o capas permeables, a través de los cuales la velocidad promedio del fluido fue de $1.43 \times 10^{-3}$ m/s para el primer canal y de $7.38 \times 10^{-4}$ m/s para el segundo, lo que equivale a 123.5 m/día y 63.8 m/día, respectivamente.

Otros parámetros estimados con el modelado son el coeficiente de dispersión, la sección transversal del canal y su volumen, mismos que se indican en la Tabla 1 para cada uno de los dos canales de flujo identificados.

La aplicación del programa TRCOOL, incluido en el paquete de software ICEBOX, permitió modelar la afectación térmica que podría ocurrir en los fluidos producidos por el pozo Az-5 bajo diversas condiciones de inyección en el pozo Az-64. De acuerdo con los resultados del modelado, el vapor producido en el pozo Az-5 sufriría una casi inmediata pérdida de temperatura debido a la inyección en el pozo Az-64, que sería de unos 40°C bajo un régimen de inyección de 13 t/h y de unos 85°C inyectando 27 t/h.

Partiendo de que la temperatura media actual del vapor producido por el pozo Az-5 es de 280°C, el enfriamiento debido a la inyección provocaría que temperatura del fluido bajara a unos 238°C inyectando 13 t/h y a unos 191°C si se inyectaran 27 t/h.

Por lo tanto, no es recomendable inyectar en el pozo Az-64. Si esto resultara indispensable, la recomendación sería inyectar en caliente (a presión de separación) y en cualquier caso no rebasar las 13 t/h.

**Referencias**

Arason, Th., and G. Björnsson, 1994. *ICEBOX*. 2nd edition, Orkustofnun, Reykjavík, 38 pp.

Axelsson, G., G. Björnsson, and P. Arason, 1994. *The program TRCOOL*. Orkustofnun, Reykjavík.

Axelsson, G., G. Björnsson, and F. Montalvo, 2005. Quantitative interpretation of tracer test data. *Proceedings World Geothermal Congress*, Antalya, Turkey, April 2005.

Bear, J., C.F. Tsang and G. de Marsily (editors), 1993. *Flow and contaminant transport in fractured rock.* Academic Press Inc., San Diego, 560 pp.

Bodvarsson, G., 1972. Thermal problems in the siting of reinjection wells. *Geothermics*, Vol. 1, No. 2, pp. 63-66.

Carslaw, H.W. and J.C. Jaeger, 1959. *Conduction of heat in solids*. Second edition, Clarendon Press, Oxford, 403 pp.

CFE, 2010. Base de datos Vulcan Geodata Manager del Campo Geotérmico Los Azufres, Mich. Inédito.

Gaoxuan, G., 2008. Assessment of the Hofsstadir geothermal field, W-Iceland, by lumped parameter modelling, Montecarlo simulation and tracer test analysis. *Geothermal Training in Iceland*, Report 18, UNU– GTP, Iceland, pp. 247-279.

Hernández, P.L., 1996. Evaluación de los pozos Az-05 y Az-48 del campo geotérmico Los Azufres. Reporte REAZ-EY-18/96, Residencia de Estudios Los Azufres, CFE. Inédito.

Iglesias, E.R., M. Flores Armenta, J.L. Quijano León, M.A. Torres Rodríguez, R.J. Torres, N. Reyes Picasso y F. Sandoval Medina, 2009. Estudio con un trazador de vapor en la zona aledaña al pozo Az-64, en el campo geotérmico de Los Azufres, Mich. *Geotermia*, Vol. 22, No. 1, pp. 28-39.

Javandel, I., C. Doughty and C.F. Tsang, 1984. Groundwater transport. Handbook of mathematical models. *Water Resources Monograph Series*, 10, Am. Geophys. Union, 228 pp.

# Termodinámica del fluido geotérmico en condiciones supercríticas

***Mario César Suárez Arriaga***
Facultad de Ciencias Físico Matemáticas, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, Mich., México. Correo: mcsa50@gmail.com

**Resumen**
La circulación hidrotermal submarina es la principal fuente de transferencia de masa y energía de la corteza terrestre hacia los mares y es uno de los modos de interacción primarios entre continentes, océanos y atmósfera. La energía geotérmica profunda está relacionada con la existencia de fuentes hidrotermales emergentes en muchos lugares a lo largo de los centros de dispersión oceánica entre las placas tectónicas. Estos sistemas tienen una longitud aproximada de 65,000 km en la corteza oceánica y contienen enormes cantidades de energía. La energía geotérmica submarina abarca un amplio abanico de profundidades, desde sistemas superficiales entre 1 y 50 m, hasta reservorios a más de 2000 m bajo el nivel del mar. Los fluidos submarinos encontrados en este último tipo de sistemas, están en condiciones termodinámicas supercríticas, a más de 400°C y a presiones mayores a 20 MPa. Estos sistemas podrían brindar hasta diez veces más energía por unidad de volumen que el fluido geotérmico utilizado con la tecnología que existe actualmente. La energía geotérmica empleada a condiciones supercríticas permitiría la generación de electricidad en forma más eficiente y económica a través de turbinas llamadas supercríticas avanzadas, acopladas a generadores especiales situados en el lecho oceánico. En este documento se describen las características fundamentales y se presenta una evaluación preliminar de esta enorme fuente geotérmica, hasta ahora nunca usada en el mundo.

*Palabras clave:* Sistemas geotérmicos submarinos, condiciones supercríticas, potencial energético.

# Thermodynamic of geothermal fluids at supercritical conditions

**Abstract**
Submarine-hydrothermal circulation, the main source of mass and energy transfer from the earth‘s crust to the sea, is one of the primary interaction modes between continents, oceans and the atmosphere. Deep-geothermal energy is related to the hydrothermal vents emerging in many places along the oceanic spreading centers between tectonic plates. The systems have an approximate length of 65,000 km in the oceanic crust and contain huge amounts of energy. Submarine geothermal energy covers a wide range of depths, from surface systems between 1 and 50 m to reservoirs more than 2000 m below sea level. Submarine fluids found in the latter type of systems are at supercritical thermodynamic conditions, more than 400°C, and at pressures above 20 MPa. These systems could provide up to ten times more energy per volume unit than the geothermal fluids used with current technology. Geothermal energy at supercritical conditions would generate electricity more efficiently and economically by using an advanced supercritical turbine coupled with special generators located on the ocean floor. This document describes the basic characteristics of such a system and presents a preliminary assessment of this huge geothermal source, never before used.

*Keywords:* Submarine geothermal systems, supercritical conditions, energy potential.

## Introducción

La humanidad que habita este planeta (siete mil millones de personas) consume 86 millones de barriles de petróleo aproximadamente cada día. Este consumo equivale al descubrimiento de una provincia petrolera como Azerbaiján cada año. En julio de 2011 el precio del barril de petróleo tipo Brent alcanzó los 118

dólares americanos por barril (USDb). Pero en mayo de 2011 llegó a costar 121 USDb, en noviembre de 2010 valía 88 USDb y en julio de 2008 alcanzó los 145 USDb (http://www.oil-price.net/, 2011). Ya no existe un margen de seguridad en la producción y consumo de hidrocarburos que permita la estabilidad de precios, los cuales son muy volátiles y afectan negativamente la economía mundial. Los costos de producción de petróleo son cada vez más altos y la demanda continúa creciendo incontrolable en Latinoamérica, Africa y Asia. China es ya el principal consumidor de petróleo y el mayor agente contaminante. Los hidrocarburos se acercan a su fin. Nadie sabe exactamente cuándo ocurrirá, pero podemos estar seguros de que ese día llegará pronto. La perspectiva es esta: en un futuro muy próximo tendremos limitado suministro de combustibles fósiles, una creciente demanda, encarecimiento del petróleo y contaminación en aumento con graves repercusiones en el medio ambiente y el clima. La búsqueda y desarrollo de alternativas energéticas es, por consiguiente, prioritaria.

Existe una necesidad urgente de sustituir los hidrocarburos con fuentes diversificadas de energía limpia. La geotermia profunda es una de esas fuentes capaces de sustituir ventajosamente al carbón, al petróleo, al gas y a la energía nuclear. Pero la tecnología y los conocimientos para explotarla son aun incipientes. La geotermia profunda representa, en el lapso de la vida humana, un potencial energético esencialmente infinito. Los reservorios hidrotermales se encuentran a lo largo de cordilleras y centros de dispersión en las fronteras entre las placas tectónicas de litósfera (Fig. 1). En esos lugares las divergencias de las placas producen grietas que permiten el transporte vertical de calor desde el manto hasta el piso oceánico. El agua fría del mar, al entrar en esas fisuras, se calienta y cambia químicamente al entrar en contacto con la roca de la corteza oceánica. Esa agua caliente, enriquecida con gases como el $H_2S$, es expulsada a través de esos respiraderos hidrotermales. La química de estos fluidos indica que la interacción agua-roca ocurre a alta presión y temperatura.

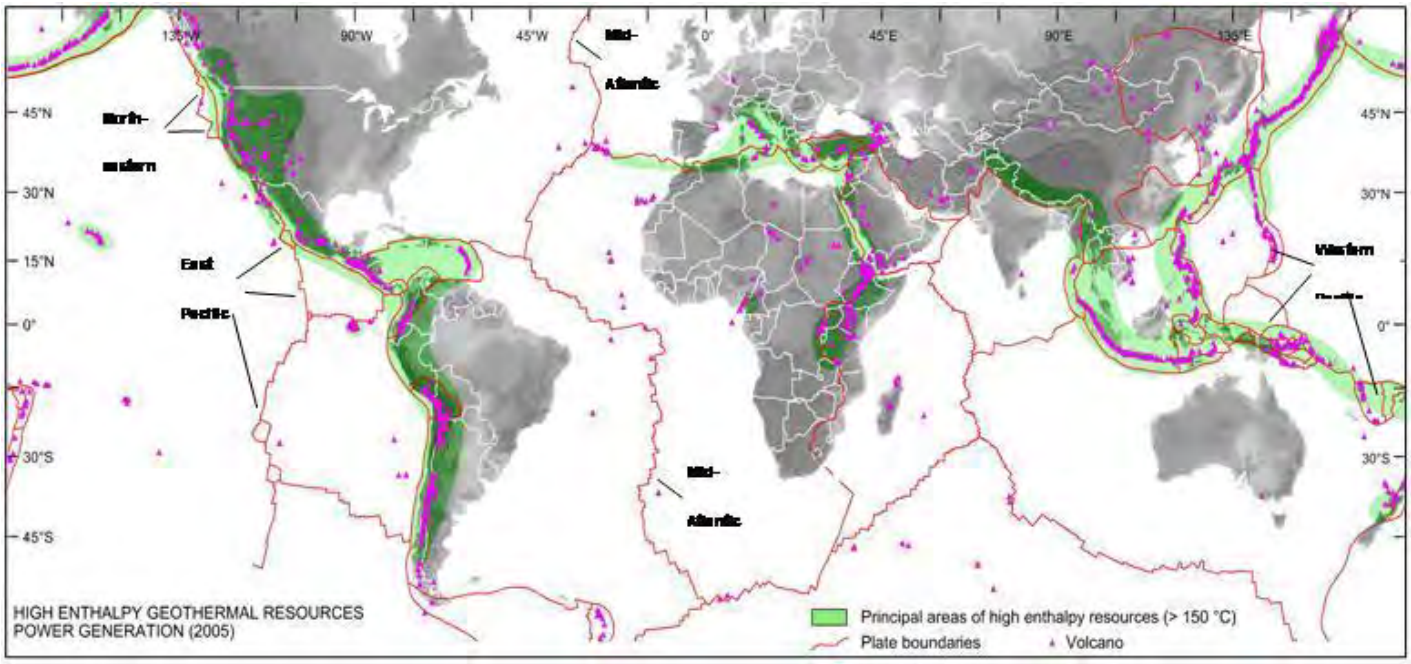



*Fig. 1. Distribución planetaria simplificada de las placas tectónicas y cordilleras oceánicas indicativas de sitios geotérmicos submarinos. Se muestran las áreas continentales de alta temperatura.*

## Geotermia submarina en México

En México los sistemas geotérmicos submarinos se localizan entre dos profundidades extremas: los recursos poco profundos cerca de la plataforma continental, entre uno y cincuenta m de profundidad, y los recursos

profundos a más de 2000 m debajo del nivel del mar (Grijalva, 1986; Mercado, 1990, 1993; Suárez-Arriaga, 1998). De ambos tipos de sistemas se ha detectado su existencia en la costa norte mexicana del Océano Pacífico (Fig. 1). En particular, varias manifestaciones hidrotermales submarinas se encuentran a lo largo de ambas costas en la península de Baja California, tanto en el lado del Pacífico como en el Mar de Cortés del mismo Golfo. En estas regiones se descubrió un potencial geotérmico considerable entre 1980 y 1990 (Grijalva, 1986; Mercado, 1990), que podría explotarse en un futuro cercano. En la Depresión de Wagner, al norte del Golfo de California, los reservorios hidrotermales submarinos se localizan a menos de 30 m de profundidad. Otras áreas termales submarinas accesibles con la tecnología actual, se localizan frente a la costa de Punta Banda, cerca del puerto de Ensenada, BC, donde se han medido temperaturas hasta de 140°C a 30 m de profundidad a menos de 500 m de la costa (Bustos-Serrano, 1983).

El flujo de calor conductivo submarino promedio medido en el Golfo de California es del orden de 0.34 W/m$^2$, valor obtenido cerca de fuentes termales del fondo marino que se encuentran a una temperatura promedio de 330°C (Mercado, 1990). En esas zonas el flujo de agua caliente expelido por chimeneas naturales tiene una velocidad aproximada de 2.5 m/s fluyendo por agujeros con diámetros aproximadamente de 10 cm a 20 cm. Estos datos proporcionan un flujo continuo promedio de agua caliente, de unos 195 kg/s expelidos por cada una de las chimeneas existentes. La falla de San Andrés, localizada a lo largo del límite transformante entre las placas del Pacífico y Norteamérica (Fig. 2), fue formada por movimientos divergentes entre ambas placas tectónicas. El movimiento tectónico relativo entre placas causó rupturas en la corteza oceánica, llamadas cuencas *pull-apart*. Ellas permiten el transporte vertical del magma profundo a una temperatura de 1000°C aproximadamente (Grijalva, 1986). Tal proceso formó un gigantesco reservorio geotérmico submarino bajo toda la zona del Golfo de California. El potencial geotérmico de esta fuente se estima, con una aproximación volumétrica burda, en miles de veces más grande que la energía contenida en los reservorios de Cerro Prieto, BC (Vidal *et al.*, 1978, 1981; García, 2000).

## Termodinámica del agua en condiciones geotérmicas supercríticas

Las propiedades termodinámicas del agua pura, bajo las condiciones típicas de reservorios geotérmicos y acuíferos, se calculan con gran precisión utilizando ecuaciones de estado y correlaciones descritas en varias publicaciones (Schmidt and Grigull, 1979; Watanabe, 1996; Holzbecher, 1998; Wagner, 2000; Wagner and Pruss, 2002; Harvey *et al.*, 2004; Bundschuh and Suárez-Arraiga, 2010). Desde 1989 la *International Association for the Properties of Steam* (IAPWS), es la asociación internacional para las propiedades del agua en estado líquido y vapor (http://www.iapws.org/). En 1995 la IAPWS aprobó, para uso científico, la IAPWS *Formulation for the Thermodynamic Properties of Ordinary Water Substance for General and Scientific Use*. La IAPWS-95 (Wagner, 2000) constituye la norma internacional para estas propiedades y es la representación más exacta de ambas fases del agua, incluyendo el rango supercrítico. Usa las siguientes variables: presión $p$ [bar, MPa], densidad $\rho_w$ [kg/m$^3$], temperatura $T$ [°C, K], entalpía específica $h_w$ [kJ/kg], energía interna $e_w$ [kJ/kg], entropía específica $s_w$ [kJ/kg/°C], energía libre de Helmholtz $f_w$ [kJ/kg], entalpía libre de Gibbs $g_w$ [kJ/kg], viscosidad $\mu_w$ [Pa·s], compresibilidad $C_w$ [1/bar], conductividad térmica $k_T$ [W/m/°C], expansión térmica $\gamma_w$ [°C$^{-1}$], difusividad $\delta_w$ [m$^2$/s], calor específico isobárico $c_p$ [J/kg/°C] y tensión superficial $\sigma_w$ [N/m]. En una sola fase todas estas propiedades son función de la presión y la temperatura del agua. En sistemas bifásicos $p$ y $T$ están relacionadas en la curva de saturación y, por tanto, debe utilizarse otra variable como la calidad del vapor, la saturación del líquido o la entalpía del fluido. En las referencias (Schmidt and Grigull, 1979; Holzbecher, 1998; Bundschuh and Suárez-Arraiga, 2010) se ilustran gráficamente todas las propiedades termodinámicas del agua en la región geotérmica completa de interés práctico, de 0.01 bar hasta 1000 bar y de 0°C a 800°C.

La primera ley de la termodinámica asegura que en cualquier proceso la suma del trabajo mecánico y el calor intercambiado es igual al cambio que experimenta la energía interna del fluido. Sin embargo, en geotermia se

emplea comúnmente la entalpía específica como potencial para representar esa variación. La razón por la cual la entalpía es la función usada en reservorios geotérmicos se debe a que en un proceso termostático a presión constante el cambio en la entalpía incluye el cambio en la energía interna más el trabajo hecho, lo cual es exactamente igual a la transferencia neta de calor realizada durante el proceso. Esta relación, en términos de ecuaciones, es como sigue:

$$\Delta h_w(p, s_w) = \Delta e_w + p\,\Delta \upsilon_w = \Delta Q_p \qquad (1)$$

El símbolo $\Delta$ significa cambio diferencial y $\upsilon_w = 1/\rho_w$ es el volumen específico. El subíndice $w$ representa al agua y $\Delta Q_p$ es el calor isobárico intercambiado. Otro potencial usual es la energía libre de Helmoltz $f_w$, que mide el trabajo útil obtenible de un fluido dentro de un sistema cerrado a temperatura y volumen constantes. La IAPWS-95 utiliza $f_w$ en su formulación termodinámica (Wagner and Pruss, 2002):

$$f_w(\rho_w, T) = e_w - T s_w \qquad (2)$$

La función $f_w$ se puede hacer adimensional con un cambio de variable y entonces se le llama energía libre de Helmoltz reducida:

$$\frac{f_w(\rho_w, T)}{R\,T} = \Phi\left(\frac{\rho_w}{\rho_C}, \frac{T_C}{T}\right) = \Phi^{gas-ideal} + \Phi^{residual} \qquad (3)$$

Donde: $\rho_C = 322\ \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}, T_C = 647.096\ \text{K}, R = 0.46151805\ \left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg K}}\right]$

La función auxiliar general $\Phi$ está compuesta por dos partes, la primera es gas ideal y la segunda es residual. Al combinarse ambas partes queda completamente definida una superficie de Helmoltz (Watanabe, 1996). Todas las demás propiedades termodinámicas se obtienen por diferenciación parcial sobre esta superficie:

$$p = \rho_w^2\left(\frac{\partial f_w}{\partial \rho_w}\right)_T, \quad e_w = f_w - T\left(\frac{\partial f_w}{\partial T}\right)_{\rho_w}, \quad h_w = f_w - T\left(\frac{\partial f_w}{\partial T}\right)_{\rho_w} + \rho_w\left(\frac{\partial f_w}{\partial \rho_w}\right)_T,$$
$$c_V = \left(\frac{\partial e_w}{\partial T}\right)_V, \quad c_p = \left(\frac{\partial h_w}{\partial T}\right)_p, \quad s_w = -\left(\frac{\partial f_w}{\partial T}\right)_{\rho_w} \qquad (4)$$

Esta formulación es válida en toda la región estable del agua, desde 0°C hasta 1000°C y entre 0.01 bar hasta 10,000 bar. Los límites de validez absolutos de la IAPWS-95, más allá de los cuales ya no pueden hacerse cálculos. son $T \sim 190$K y 5000K y $p \sim 1.0 \times 10^5$ MPa. Las gráficas siguientes para el agua se obtuvieron utilizando el software desarrollado y descrito en Wagner and Pruss (2002) y Harver *et al.* (2004). Las ilustraciones aquí presentadas se restringen a la densidad y la entalpía antes y alrededor del punto crítico del agua y en los rangos supercríticos.

**Densidad del agua geotérmica submarina**

El fluido en reservorios submarinos profundos puede encontrarse a distintas condiciones termodinámicas que dependen de la profundidad y, por consiguiente, de la presión. Las siguientes gráficas muestran la densidad del agua en un amplio rango de temperaturas a las diferentes presiones de 100, 221.2 y 400 bar.

En la Figura 2 se observa que existe una discontinuidad que corresponde a una variación brusca de la densidad del agua que va de 688.4 kg/m$^3$ a la temperatura crítica de 311°C, hasta los 55 kg/m$^3$ a 311.1°C. Este salto brusco se debe al cambio de la fase líquida a la fase vapor a 100 bar de presión. Un aspecto práctico importante que hay que observar es que arriba de los 312°C la densidad, o sea la masa volumétrica del agua, es muy baja, variando desde 55 a 17 kg/m$^3$ a los 1000°C.

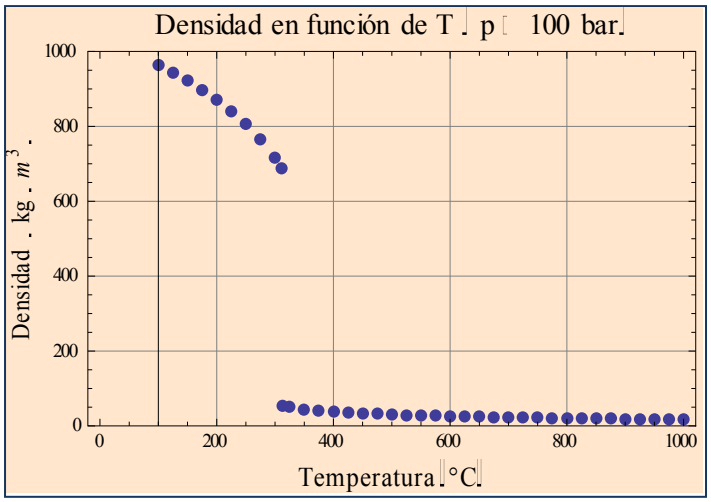



*Fig. 2. Comportamiento de la densidad del agua entre la fase líquida y el vapor. Se observa una discontinuidad de $\rho_w$ entre 311°C y 312°C.*

La Figura 3 ilustra el comportamiento exacto del agua entre 373°C y 375°C, observándose la discontinuidad que corresponde al punto crítico (221.2 bar, 374.15°C). En este pequeño rango de temperatura la densidad del agua desciende de 428.7 kg/m$^3$ a 216.8 kg/m$^3$. Este valor inferior de $\rho_w$ a 375°C es, sin embargo, casi trece veces mayor que el que alcanza $\rho_w$ a los 1000°C a la presión de 100 bar.

La Figura 4 muestra la densidad del agua antes y después del punto crítico a 400 bar de presión. Se observan dos variaciones abruptas, una a los 400°C donde $\rho_w$ = 523 kg/m$^3$ (a los 425°C, $\rho_w$ = 394 kg/m$^3$). La segunda ocurre a los 450°C donde la densidad vale 271 kg/m$^3$. A temperaturas mayores la densidad continúa su descenso, aunque más suavemente que en los casos anteriores, hasta alcanzar un valor mínimo de 70 kg/m$^3$ a los 1000°C, a la misma presión de 400 bar.

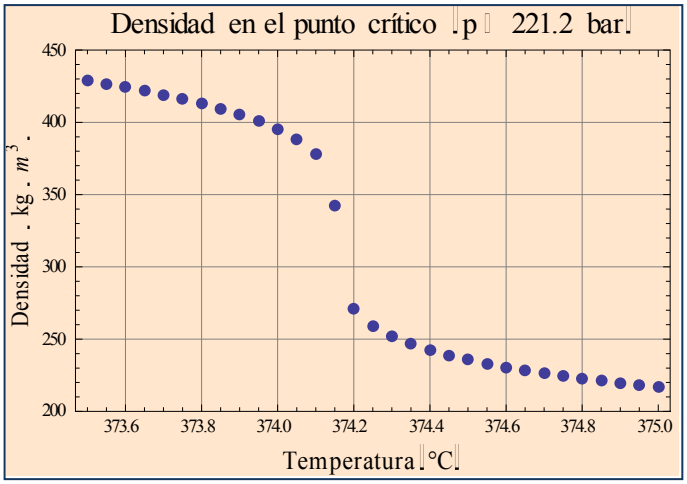



*Fig. 3. Densidad crítica del agua mostrando la discontinuidad de $\rho_w$ en T = 374.15°C.*

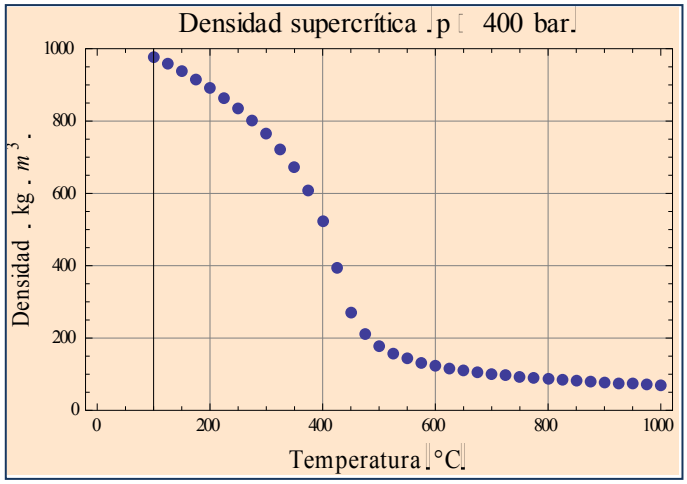



*Fig. 4. Densidad supercrítica del agua en función de T.*

## Entalpía del agua geotérmica submarina

La entalpía específica del fluido en reservorios submarinos profundos se muestra en las figuras 5, 6 y 7 a presiones de 100, 221.2 y 400 bar respectivamente. En los tres casos ilustrados la entalpía se incrementa al aumentar la temperatura en forma casi lineal. En la Figura 5 se observa la misma discontinuidad anterior y que corresponde a un salto brusco de entalpía que va de 1408 kJ/kg a 311°C, a 2726 kJ/kg a los 311.1°C. El primer valor es del líquido y el segundo es el del vapor.

En la Figura 6 se aprecia el incremento de la entalpía del agua entre 373°C y 375°C. Se observa claramente la discontinuidad en el punto crítico al aumentar la entalpía de 2003 kJ/kg a 2183 kJ/kg. Este salto es inferior al del caso anterior con la presión igual a 100 bar. Por último, la Figura 7 muestra el incremento continuo de la entalpía entre 100°C y 1000°C.

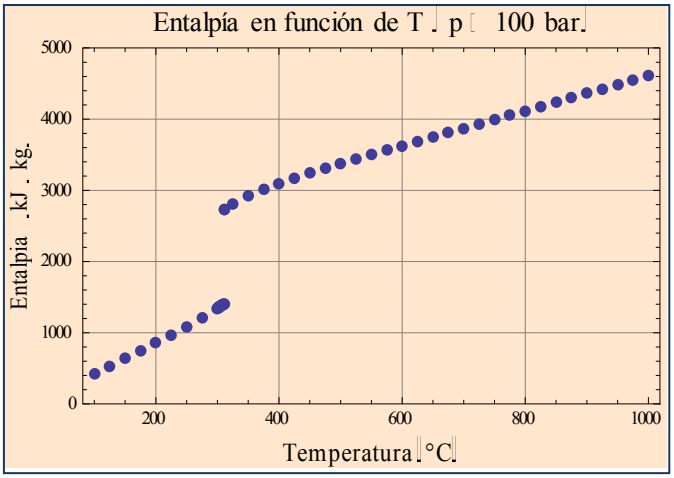



*Fig. 5. Entalpía del agua antes del punto crítico. Se observa la discontinuidad de $h_w$ en T = 311.1°C.*

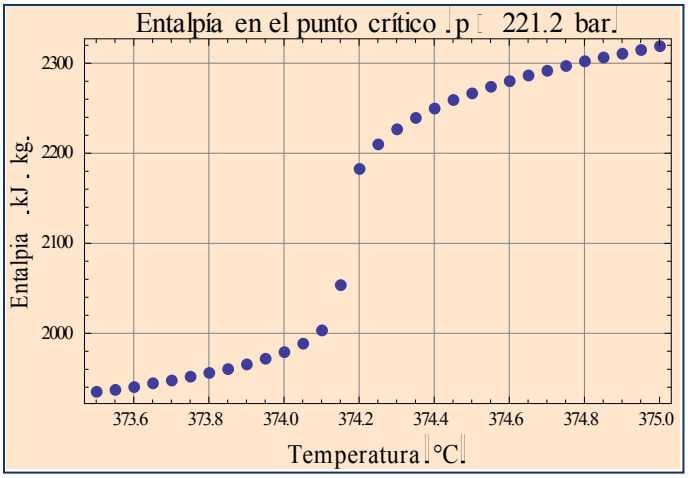



*Fig. 6. Gráfica de la entalpía crítica del agua mostrando la discontinuidad de $h_w$ en T = 374.15°C.*

## Energía del agua en condiciones supercríticas

Los ejemplos ilustrados demuestran que la masa disponible del fluido geotérmico en sistemas profundos es mucho mayor cuando aumentan la presión y la temperatura arriba del punto crítico del agua. El rango termodinámico que va de 375°C a 1000°C, a más de 221 bar, se llama rango de condiciones supercríticas. El agua en este rango contiene más energía por unidad de volumen que el fluido geotérmico usual. Por ejemplo, a 50 bar y 270°C el agua contiene 24.67 kg por cada $m^3$, su entalpía es de 2818.9 kJ/kg; esto equivale a 69,542 $kJ/m^3$. En el punto crítico, la densidad es 216.82 $kg/m^3$ y la entalpía 2319 kJ/kg, lo cual representa 502,806 $kJ/m^3$. A 400 bar y 400°C la densidad es 523.3 $kg/m^3$ y la entalpía 1931 kJ/kg, su producto representa más de un millón de $kJ/m^3$, o sea, una energía volumétrica 14.5 veces mayor que la del agua a 50 bar y 270°C.

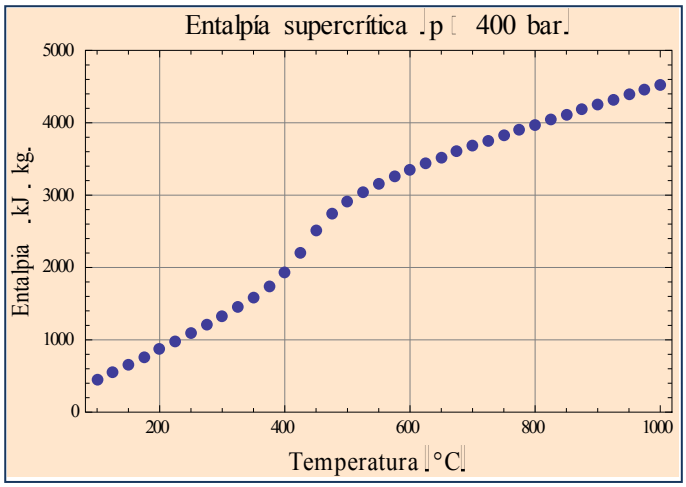



*Fig. 7. Entalpía supercrítica del agua en función de T.*

## Aspectos prácticos de la geotermia submarina

Se estima que las descargas hidrotermales submarinas representan aproximadamente el 30% del total del flujo de calor que emerge continuamente del lecho oceánico (Alt, 1995). Las mediciones hechas en varios sistemas submarinos con chimeneas (Benett *et al.*, 2008) permiten establecer un flujo de calor que oscila entre 100 y 1000 $MW_T$ (megawatts térmicos), aunque puede haber flujos menores. El valor más alto de 1000 $MW_T$ corresponde a flujos de megaplumas detectadas en algunos lugares del océano Pacífico (Alt, 1995).

Hiriart et al. (2010) estimaron, con una técnica de evaluación burda preliminar, la energía eléctrica que se podría obtener teóricamente en las ventilas hidrotermales, sin perforación de pozos. El método de extracción de energía que los autores citados proponen consiste en la instalación de un intercambiador de calor en forma de bobina en espiral situado directamente sobre la estructura de la ventila. Esta proporcionaría el calor necesario para evaporar el fluido circulante dentro de la bobina. Utilizando el criterio clásico de la eficiencia del motor térmico de Carnot, los autores estiman una eficiencia total del ciclo termodinámico del 4.4% para ese sistema submarino. Bajo ciertas suposiciones de flujo, diámetro y temperatura de la ventila, los autores deducen la posibilidad teórica de generar hasta 20 MW eléctricos por cada ventila. Considerando el aspecto real de que las grietas se cierran y el fluido hidrotermal deja de fluir, la opción más conveniente y segura es perforar directamente el lecho oceánico, en la cercanía de las zonas de ventilación hidrotermal donde se encuentran las temperaturas y condiciones adecuadas. En ambos casos se tendrá que desarrollar la tecnología necesaria para instalar una turbina y un generador acoplado, encastrados en el fondo del océano.

Los recursos energéticos de la geotermia submarina pueden llegar a satisfacer una buena parte de las necesidades de nuestra civilización. Este importante aspecto está siendo reconocido poco a poco en sectores especializados. Sin embargo, aun hay muchos retos tecnológicos sin resolver. Uno de ellos es la perforación eficiente y económica en rocas ígneas a gran profundidad. Otro es el desarrollo de turbogeneradores avanzados que funcionen a flujo total con el fluido submarino a alta presión y temperatura supercrítica. Una vez resueltos estos problemas, los pozos perforados y las plantas geotermoeléctricas dispondrán de un suministro ilimitado de agua marina y calor magmático para generar electricidad eficientemente.

## Conclusiones

La energía volumétrica contenida en el fluido hidrotermal submarino, una fracción de la cual puede transformarse en electricidad, depende directamente del producto de la porosidad de la roca, de la entalpía del agua y de su densidad supercrítica. Debido a su mayor densidad, el agua geotérmica situada en el rango de condiciones supercríticas contiene mucha más energía térmica por unidad de volumen que el fluido empleado en plantas geotérmicas con la tecnología actualmente en uso. La geotermia submarina profunda representa entonces un enorme potencial energético jamás usado. Esta energía podrá utilizarse en un futuro, mediante estaciones generadoras especiales colocadas en el lecho marino, conectadas a turbinas avanzadas de flujo total.

## Referencias

Alt, J., 1995. Subseafloor Processes in Mid-Ocean Ridge Hydro-thermal Systems. *Geophysical Monograph,* American Geophysical Union, Vol. **91**, pp. 85-114.

Bennett, S.A., E.P. Achterberg, D.P. Connelly, P.J. Statham, G.R. Fones, and C.R. German, 2008. The distribution and stabilisation of dissolved Fe in deep-sea hydrothermal plumes. *Earth and Planetary Science Letters*, Vol. **270** (3-4), pp. 157-167.

Bundschuh, J. and M.C. Suárez Arriaga, 2010. *Introduction to the Numerical Modeling of Groundwater and Geothermal Systems - Fundamentals of Mass, Energy and Solute Transport in Poroelastic Rocks*. CRC Press, Taylor & Francis Group, Leiden, Hollland; London, England, 525 pp.

Bustos-Serrano, H., 1983. Caracterización Física, Química y Morfológica de la Zona Hidrotermal Marina de La Jolla, Punta Banda, B.C., México. Tesis de licenciatura, pp. 114. Esc. Sup. de Ciencias Marinas, UABC, 114 p. Inédito.

García, G.H., 2000. Modelo del Estado Térmico Inicial del Campo Geotérmico de Los Azufres, Michoacán, México". Tesis de Doctorado, Instituto de Geofísica, UNAM, 184 pp. Inédito.

Grijalva, N., 1986. *Investigación de la Energía Geotérmica en la Depresión de Wagner en el Golfo de California. Latitud 31° 00' al 31° 15' y Longitud 113° 50' al 114° 10'"*. Reportes preparados para la Comisión Federal de Electricidad bajo contrato No. CCP-CLS-002/86. Fecha del primer reporte: 10/1/86, 22 pp. Fecha del segundo reporte: 11/22/86, 38 pp. Inéditos.

Harvey, A.H, A.P. Peskin, and S.A. Klein, 2004. *NIST/ASME steam properties, Version 2.21, Users' Guide*. Physical and Chemical Properties Division, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD, March 2004.

Hiriart G., S. Alcocer, R.M. Prol, and S. Espíndola, 2010. Submarine geothermics: Hydrothermal vents and electricity generation. *Proceedings of the World Geothermal Congress 2010*, Bali, Indonesia, 25-29 April, 2010.

Holzbecher, E., 1998. *Modeling density-driven flow in porous media: Principles, Numerics, Software*. Springer, Berlin, New York.

Mercado, S., 1990. Manifestaciones Hidrotermales Marinas de Alta Temperatura (350°C) Localizadas a 21°N, a 2600 m de Profundidad en la Elevación Este del Pacífico. *Geotermia, Revista Mexicana de Geoenergía,* Vol. **6**/3, pp. 225-263.

Mercado, S., 1993. Geotermoquímica de Manifestaciones Hidrotermales Marinas de Alta Temperatura, *Geotermia, Revista Mexicana de Geoenergía,* Vol. **9**/2, pp. 155-164.

Schmidt, E. and U. Grigull, 1979. *Properties of water and steam in SI-units, 0–800°C and 0–1000 bar*. 2nd ed., Springer, Berlin, Germany.

Suárez, M.C., 1998. Deep Geothermal Systems in Mexico: An Integral Diversified Resource for the Energy of the Future. *Geothermal Resources Council Transactions*, **22**, pp. 327-331.

Vidal, V.M., F.V. Vidal, J.D. Isaacs, and D.R. Young, 1978. Coastal Submarine Hydrothermal Activity off Northern Baja California 1". *Journal of Geophysical Research*, Vol. **83** /B4, pp. 1757-1774.

Vidal, V.M., F.V. Vidal, and J.D. Isaacs, 1981. Coastal Submarine Hydrothermal Activity off Northern Baja California 2. Evolutionary History and Isotope Geochemistry. *Journal of Geophysical Research*, Vol. **86**/B10, pp. 9451-9468.

Wagner, W., 2000. The IAPWS Industrial Formulation 1997 for the thermodynamic properties of water and steam". *ASME J. Eng. Gas Turbines and Power*, Vol. **122**, pp. 150–182.

Wagner, W. and A. Pruss, 2002. The IAPWS Formulation 1995 for the thermodynamic properties of ordinary water substance for general and scientific use. *J. Phys. Chem. Ref. Data*, Vol. **31**, pp. 387–535.

Watanabe, K., 1996. *Release on the IAPWS Formulation 1995 for the thermodynamic properties of ordinary water substance for general and scientific use.* Fredericia, Denmark, 1996.

NOTA TÉCNICA

# Cation Exchange Geothermometry: A critique

***Mahendra P. Verma***
Instituto de Investigaciones Eléctricas, Reforma 113, Col. Palmira, Cuernavaca, Morelos, 62490, México.
Correo: mahendra@iie.org.mx

The geochemical studies of geothermal systems provide insight into the physiochemical processes responsible for their origin and evolution on the basis of the chemical composition of fluids (separated vapor and water) collected from fumaroles, hot springs and drilled wells. Using chemical geothermometers and the conservation of mass, energy and alkalinity, the chemical concentrations are converted to the reservoir conditions to predict the state of water-rock interaction and reservoir processes like boiling, condensation, mixing with other fluids, mineral dissolution-precipitation, etc. (Verma, 2002).

The cation exchange geothermometers (e.g. $Na^+/K^+$ ratio) are empirical relations, used to estimate deep geothermal reservoir temperature (Fournier and Truesdell, 1973; Giggenbach, 1981, 1988). Various cation exchange geothermometers have been developed with varying coefficient values in regression equations and/or involving different types of cations.

The word ‗empirical' has a meaning in natural sciences. It implies that the reason of certain behavior (e.g. $Na^+/K^+$ ratio is a function of temperature in hydrothermal systems) is unknown; however, the empirical relation is not violating any existing theory or law of natural sciences. A chemical reaction in any system is governed by the laws of chemical thermodynamics. Thus there is a need to justify that the fact that the observed empirical relations of cation exchange geothermometers are not against the laws of chemical thermodynamics.

The development of $Na^+/K^+$ cation exchange geothermometer is based on the following type of cation exchange reaction

$$zNa^+ + Na_{1-z}K_zX = zK^+ + Na_zK_{1-z}X \tag{1}$$

where the capital X represents an anion and z denotes the stoichiometric coefficient. The equilibrium constant of this reaction is given by

$$K_{eq} = exp\left(-\frac{\Delta G_F^{T,P}}{RT}\right) = \frac{(a_{K^+})^z(a_{Na_zK_{1-z}X})}{(a_{Na^+})^z(a_{Na_{1-z}K_zX})} \tag{2}$$

where $\Delta G_F^{T,P}$ is the difference in the Gibbs' free energy of formation of the products and reactants at any temperature (T) and pressure (P), subscript ( F) stands for formation, (R) is the gas constant, ~~a~~" is the activity of respective species. The activity coefficient is considered to unity in case of dilute solutions. Similarly, the activity of solid phases is also considered as unity in developing geothermometers. The equilibrium constant (eq. 2) is reduced to

$$K_{eq} = \left(\frac{[K^+]}{[Na^+]}\right)^z \tag{3}$$

where the square brackets [ ] represent the molal concentration of the species.

Fournier (1989) simplified the equations for various cation exchange geothermometers to the $Na^+/K^+$ geothermometers. Then he plotted log ($Na^+/K^+$) versus 1000/T for the cation exchange between albite and

adularia, albite and microline and Na- and K-montorillonites together with the geothermometer equations (Figure 1). There is a wide range of values for log ($Na^+/K^+$) at a given temperature and vice versa. For example, at the temperature of 100ºC, the values of log ($Na^+/K^+$) vary in the range 0.95 to 2.25 for different equations. Similarly, for a value of $\log(Na^+/K^+) = 1.00$, the temperature range is 90 to 410ºC. Even if one only considers the geothermometer equations, the temperature range is 90 to 160°C for $\log(Na^+/K^+) = 1.50$. It means that one can get a wide range of temperature values using different geothermometer equations for a given ratio of $Na^+/K^+$.

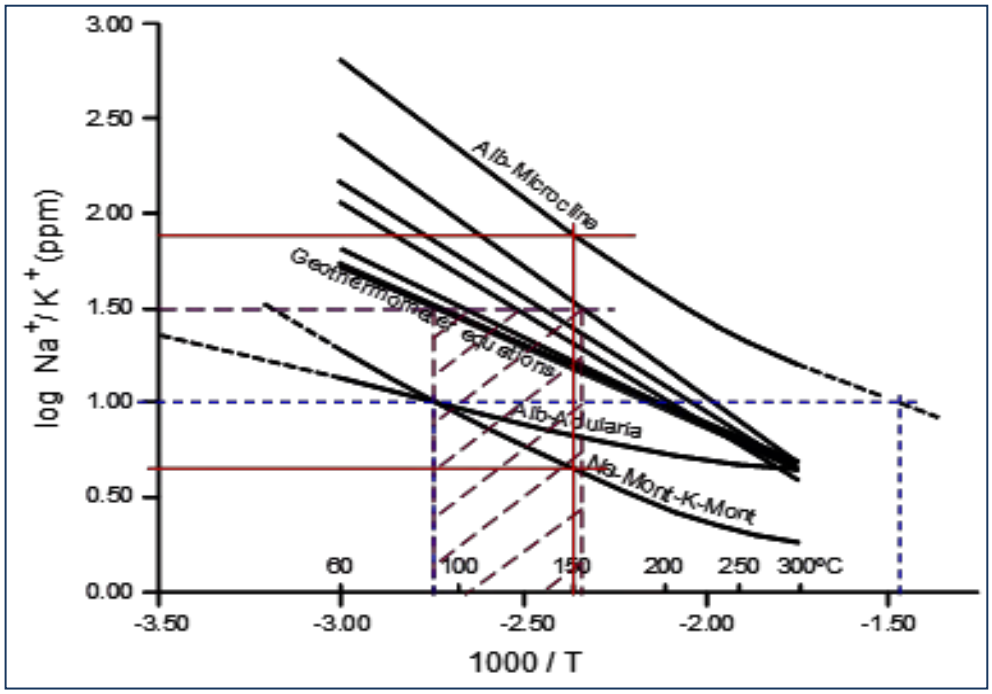



*Fig. 1. Variation of $log\ (Na^+/K^+)$ as a function of $1000/_T$ for the theoretical curves for low albite–microcline, low albite–adularia, and Na-montmorillonite–K-montmorillonite together with equations of various $Na^+/K^+$ geothermometers (modified after Fournier, 1989).*

Giggenbach (1981, 1988) extended the cation exchange geothermometry in the triangular plots to illustrate the estimate of reservoir temperature and the classification of geothermal fluids. The fundamental problems of A-B-C triangular plot is that the values (A=1, B=1, C=1) and (A=1000, B=1000, C=1000) fall at the same point. The first point may correspond to rain water whereas the second may be geothermal water.

Let us analyze the above treatment for the development of cation exchange geothermometers on the basis of the laws of chemistry and chemical thermodynamics:

1. There are some materials which have affinity to capture some cation (say $Na^+$) and liberate other (say $K^+$) under certain environmental conditions. These types of reactions are unidirectional for the given environment. Writing a chemical reaction like equation 1 with an ⇌" sign means that the reaction is in equilibrium (i.e. some reactants form products and an equal amount of products form reactants). Thus an equilibrium exists between reactants ($Na^+$, $Na_{1-z}K_zX$) and products ($K^+$ , $Na_zK_{1-z}X$). Clearly, the minerals $Na_{1-z}K_zX$ and $Na_zK_{1-z}X$ cannot be the same.

2. The mixed-minerals like $Na_{1-z}K_zX$ are not pure phase, so their activity cannot be considered as unity.

3. On substituting $z = 0.5$, the equation 1 reduces to

$$0.5\ Na^+ + Na_{0.5}K_{0.5}X = 0.5\ K^+ + Na_{0.5}K_{0.5}X \quad \Rightarrow \quad Na^+ = K^+ \qquad (4)$$

It is quite clear that it is not possible, even if $Na_{0.5}K_{0.5}X$ and $Na_{0.5}K_{0.5}X$ are different minerals.

4. It is well established in chemistry that a molecule cannot have a fraction of an atom. For example, we cannot write the water molecule as $HO_{0.5}$. It means that one atom of hydrogen reacts with half atom of oxygen to form water. An atom is the smallest entity in chemical reactions. So, a mineral molecule cannot be written as $Na_{1-z}K_zX$ unless ~~"z"~~ is an integer. The second thing is to know the structural formula of the molecule or specie. Thus ~~"z"~~ can be ~~"0"~~ or ~~"1"~~ in this case, and the equation 1 reduces to

$$Na^+ + KX = K^+ + NaX \tag{5}$$

5. According to equation 5, the reactants $(Na^+, KX)$ forms products $(K^+, NaX)$. We cannot have free ions. It means that equation 5 (or 1) is a partial chemical reaction. Thus there is need to understand, first, the full chemical reaction instead of developing a geothermometer on the basis of a partial chemical reaction.

6. Similarly $Na^+$and $K^+$ are in the solution according to equation 5 (or 1). A solution should be electrically neutral. It means that the concentrations of $Na^+$and $K^+$ are controlled by some anions in the solution. We have to know the effect of controlling anions on the equilibrium constant of the cation exchange reaction.

7. There is no physical unit balance in the equations of cation exchange geothermometers [e.g. $T(K) = {855.6}/{\left(\log\left({Na}/{K}\right) + 0.8573\right)}$]. The concentration unit of $Na^+$ and $K^+$ is ppm and their concentrations are not even individually a function of temperature. If anything, their concentrations are functions of temperature and the individual concentration of $Na^+$ or $K^+$ will be better geothermometers than those of $Na^+/K^+$ ratio. There are numbers on one side and a variable with a temperature unit (K) on other side of a cation exchange geothermometer. It is not feasible according to basic physics. Thus, the $Na^+/K^+$ ratio is a number; it cannot represent the temperature of any system (Verma, 2011).

In summary, the derivation of cation exchange geothermometers is against the basic laws of chemistry and chemical thermodynamics. Historically the foundation of sciences is based on the formulation of theories and laws using experimental evidences (observations). The theories and laws were modified, scrutinized, or abandoned with new evidence. Still some basic laws and theories (e.g. Newton‘s laws of motion, thermodynamics, electrodynamics, etc.) have to be validated with any new evidence. For example, Newton‘s laws of motion are not valid to describe the motion of small particles with high velocity. These events give birth to quantum mechanics. However quantum mechanics provides the same results as Newtonian mechanics when describing the motion of a large body with low velocity.

Thus we cannot use the ~~"~~laws of chemistry and chemical thermodynamics" together with the ~~"~~cation exchange geothermometry" since these are contradictory to each other. We have to abandon the cation exchange geothermometry until we develop a new theory (law) or demonstrate that the cation exchange geothermometry is within the framework of existing theories and laws.

## References

Fournier, R.O., 1989. *Lectures on geochemical interpretation of hydrothermal waters.* UNU Geothermal Training Programme, Iceland.

Fournier, R.O., and Truesdell, A.H., 1973. An empirical Na-K-Ca geothermometer for natural waters. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **37**, pp. 1255-1275.

Giggenbach, W.F., 1981. Geothermal mineral equilibria. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **45**., pp. 393-410.

Giggenbach, W.F., 1986. Geothermal solute equilibria. Derivation of Na-K-Ca-Mg geoindicators. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **52**, pp. 2749-2765.

Verma, M.P., 2002. Geochemical techniques in geothermal development. In D. Chandrasekharam and J. Bundschuh (eds.) *Geothermal Energy Resources for Developing Countries*. The Swets & Zeitlinger Publishers, Netherlands, pp. 225-251.

Verma, M.P., 2011. QrtzGeotherm: Estimate of Geothermal Reservoir Temperature and Vapor Fraction with Multivariate Analytical Uncertainty Propagation. *Acta INAGEQ*, in press.

# Foro

Sección con artículos y colaboraciones tipo ensayo que pueden no cumplir con alguno o algunos de los requisitos de los artículos técnicos usuales y que no han sido sometidos a arbitraje técnico.

# Congresos de la AGM y del GRC y reunión del Consejo Directivo de la IGA

***Luis C.A. Gutiérrez-Negrín***

Durante el segundo semestre de 2011 se llevaron a cabo el XIX Congreso Anual de la Asociación Geotérmica Mexicana (AGM), la XXXV Reunión Anual del *Geothermal Resources Council* (GRC) y la LIII Reunión del Consejo Directivo (*Board of Directors*) de la IGA (*International Geothermal Association*), a la cual tanto la AGM como el GRC están afiliados. A continuación se reportan los aspectos relevantes de esas reuniones.

La AGM realizó su XIX Congreso y su XIX Asamblea General en las instalaciones de la Residencia de Los Humeros de la Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos (GPG) de la Comisión Federal de Electricidad (CFE), ubicadas en el campo geotérmico del mismo nombre en el estado de Puebla, México. Ambas actividades ocurrieron el 22 y 23 de septiembre de 2011, contando con la participación de unos 45 asistentes provenientes de la propia GPG, del Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE), de algunas compañías relacionadas con la geotermia como Alstom Power México, Enel Green Power México, Energías Alternas, Estudios y Proyectos, y Sextans México, así como de estudiantes de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla y del Instituto Tecnológico Autónomo de México.

En el congreso, desarrollado el 22 de septiembre entre las 9 y las 18 horas, se presentaron oralmente los siguientes trabajos técnicos:

1. Situación actual y perspectivas de desarrollo en el campo geotérmico de Los Humeros, Pue. Abelardo Vázquez Sandoval (CFE)
2. Evaluación geológico-estructural del complejo volcánico Chichonal, Chis., como fuente alterna de energía. Uriel Arellano Contreras y Esteban Jiménez Salgado (CFE),
3. Proceso de oxidación para eliminación de H2S en emisiones atmosféricas de gases de plantas geotérmicas. Enrique Portugal Marín y Luisa Álvarez Benítez (IIE), presentado por Georgina Izquierdo.
4. Estudio geológico estructural en la franja sur del Lago de Cuitzeo, Mich. J. Guadalupe Gómez López, Víctor Santiago Rocha López, Uriel Arellano Contreras, Christian Ordaz Méndez y Esteban Jiménez Salgado (CFE).
5. Evolución del yacimiento geotérmico de Cerro Prieto, BC, entre 2000 y 2010. Marco Helio Rodríguez Rodríguez y Alfredo Pérez Hernández (CFE).
6. Control system concepts to improve geothermal plant availability. Saúl Rodríguez, Hans Gysel and Donald Speirs (Alstom Power México).
7. Propuesta para definir el potencial geotérmico de la nueva zona termal Cucapah ubicada al oeste del valle de Mexicali, BC, México. Julio Álvarez Rosales, Juan Manuel Camacho Hernández, Víctor Ilitch Gallardo Federico, Griselda Macías Valdez y Diego Herrera Carrillo (CFE).
8. Evidencia de la ocurrencia de fluidos ácidos en la zona centro del campo geotérmico de Los Humeros, Pue., México. Georgina Izquierdo Montalvo y Alfonso Aragón Aguilar (IIE).
9. Evaluación volumétrica del potencial geotérmico del Volcán Chichonal, Chis. Abraham III Molina Martínez (CFE).
10. Estudio con trazadores en la zona centro-sur del campo geotérmico de Los Humeros, Pue. Eduardo Iglesias Rodríguez, Miguel Ramírez M., Irma Cruz Grajales, Rodolfo J. Torres R. y Neftalí Reyes P. (IIE).

11. Proyecto de neutralización de fluidos ácidos en pozos de Los Humeros, Pue. César Rosales López (CFE).
12. Variación isotópica ($\delta^{18}$ O, $\delta$D) de fluidos del campo geotérmico de Los Azufres, Mich. (1987-2010): Identificación de procesos de yacimiento. Rosa María Barragán Reyes, Víctor Manuel Arellano G., Alfonso Aragón A., J. Ignacio Martínez E., Alfredo Mendoza y Lisette Reyes (IIE).
13. Geothermal turning up the heat at the Los Humeros geothermal field, Puebla, Mexico. Luis Jaime Martínez Toledo (Alstom Power Mexico).
14. Estado actual de desarrollo de las Bombas de Calor Geotérmicas. Alfonso García Gutiérrez e Ignacio Martínez Estrella (IIE).
15. Situación actual y perspectivas del campo geotérmico de Las Tres Vírgenes, BCS. Magaly Flores Armenta (CFE).

La XIX Asamblea Anual se realizó el 23 de septiembre entre las 9 y las 10:30 horas. Además del informe de actividades del Consejo Directivo actual, presidido por Magaly Flores Armenta, y del tesorero, cargo que desempeña José Luis Quijano, se entregó el Premio Pathé 2011 al Ing. Antonio Razo Montiel. Este premio, instituido por la AGM en 2005, se entrega anualmente a personas que de manera destacada se han desempeñado un mínimo de 15 años en el ámbito de la geotermia mexicana y cuya trayectoria, merecimientos o aportes se consideren relevantes.

Antonio Razo es ingeniero geólogo egresado de la Facultad de Ingeniería de la UNAM en 1959, con una maestría en Geofísica de Exploración obtenida en 1972. Trabajó en la CFE durante más de treinta años en las áreas de geotecnia y geotermia, programando y supervisando el reconocimiento y evaluación de focos termales en todo el país, la ejecución de estudios exploratorios de detalle en 42 zonas geotérmicas, y diversos estudios en todos los campos geotérmicos de México. Se jubiló de la CFE en 1990, siendo designado Jefe del Programa de Geotermia de la Organización Latinoamericana de Energía (OLADE), con sede en Quito, Ecuador. Posteriormente ha sido consultor del Banco Interamericano de Desarrollo (BID), de West Japan Engineering Consultants, de GeothermEx, de ELC Electroconsult, y de otras compañías relacionadas con la geotermia. Ha sido coordinador y coautor de las siete guías para la exploración y explotación geotérmica editadas por el BID y la OLADE, y ha coordinado también seminarios internacionales sobre geotermia en El Salvador, Costa Rica y Ecuador, así como el seminario sobre Emergencias Energéticas realizado en Cuba en 1990. Ha sido conferencista sobre geotermia en diversas universidades y escuelas técnicas de México, en el Diplomado de Recursos Renovables de la Universidad Panamericana, y en reuniones técnicas y congresos en Estados Unidos, Venezuela, Chile, Costa Rica, Ecuador y El Salvador. Actualmente se desempeña como consultor independiente en geología, geotecnia, geotermia y riesgos naturales. El Premio Pathé 2011 fue entregado por el Ing. Ramón Reyes Suárez, recipiendario del premio el año anterior.

Después de la asamblea, se realizó una visita al campo de Los Humeros, conducida por Abelardo Vázquez Sandoval, Residente del mismo. Se visitó el sistema de inhibición de acidez que se ha venido probando exitosamente en ese campo geotérmico, así como las dos unidades a condensación de 25 MW netos cada una que está construyendo la compañía Alstom Power México en Los Humeros. La primera de ellas estaba prácticamente concluida, y la segunda deberá entrar en operación en 2012. Con ello la capacidad instalada en el campo llegará a 90 MW, aunque la capacidad operativa será de 75 MW ya que la idea es que tres de las

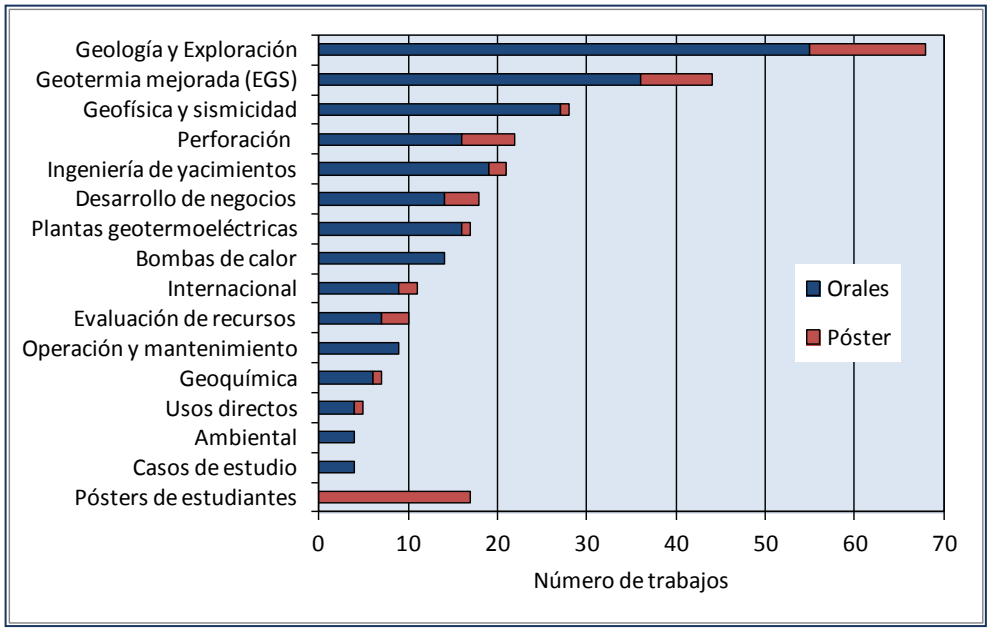
unidades a contrapresión de 5 MW que actualmente operan se mantengan fuera de servicio, operando sólo en los periodos de mantenimiento de las unidades a condensación.

Por su parte, el GRC llevó a cabo su trigésimo quinta reunión anual en San Diego, California, del 23 al 26 de octubre de 2011. Aquí se dieron cita alrededor de mil asistentes de 33 estados de la unión americana y de 13 diferentes países, que escucharon o presenciaron 299 ponencias técnicas presentadas en una sesión plenaria, seis sesiones orales simultáneas y una sesión póster.

En la sesión plenaria uno de los oradores invitados fue el Dr. Sergio Alcocer, Subsecretario de Planeación y Desarrollo Tecnológico de la Secretaría de Energía de México. En su intervención, Alcocer se refirió al desarrollo actual de la geotermia en México, comentando que el país ocupa el cuarto lugar mundial después de Estados Unidos, Filipinas e Indonesia, de acuerdo a su capacidad geotermoeléctrica instalada que actualmente alcanza los 958 megawatts. Indicó también que, siendo la geotermia una fuente de energía renovable y ecológicamente limpia, impulsar su desarrollo es uno de los objetivos estratégicos de la Secretaría de Energía a fin de contribuir a alcanzar la meta de que el 35% de la capacidad eléctrica instalada en México en 2025 provenga de tecnologías limpias. Anunció que como parte de ese impulso, la Secretaría de Energía y el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (Conacyt) convocará próximamente a la creación de uno de los Centros Mexicanos de Innovación en Energía (CMIE) dedicado justamente a la energía geotérmica. Los CMIE serán centros multidisciplinarios de carácter virtual concebidos como vehículos para la integración, coordinación, gestión, y desarrollo de investigación científica y que serán estructuras ágiles que respondan a oportunidades científicas y tecnológicas emergentes financiadas a través del Fondo Sectorial Conacyt-Sener de Sustentabilidad Energética.

El Centro Mexicano de Innovación en Energía Geotérmica será un consorcio de instituciones de educación superior, centros de investigación, empresas y asociaciones para desarrollar actividades de investigación, formación, innovación, vinculación y difusión en este tipo de energía, cuyo objetivo será integrar, coordinar, gestionar, desarrollar y transferir nuevos conocimientos y tecnologías, expandir las capacidades científicas y tecnológicas del país, formar recursos humanos especializados, crear empresas de base tecnológica, vincular la academia con la industria y difundir los avances entre la población, particularmente entre la población infantil.

Los trabajos técnicos presentados en la reunión del GRC se agruparon en 15 temas, además de una serie de trabajos tipo póster que presentaron estudiantes de la Academia Nacional de Geotermia y del Laboratorio Nacional de Energía Renovable (NREL: National Renewable Energy Laboratory). En total hubo 240 trabajos presentados oralmente en la sesión plenaria y seis sesiones simultáneas, y otros 59 trabajos que sólo se presentaron en póster, aunque varios trabajos se presentaron tanto oralmente como en póster. La cantidad de trabajos, tanto en sesiones orales como en póster en cada uno de los temas se desglosa en la gráfica que se incluye a continuación.




Puede verse en ella que dos temas, Geología y Exploración y Sistemas Geotérmicos Mejorados (EGS), acapararon el 37% del total de trabajos presentados con 68 trabajos en el primer caso y 44 en el segundo, lo que de alguna manera refleja cuáles son los principales aspectos que ocupan y preocupan actualmente a la comunidad geotérmica, al menos en Estados Unidos: refinar la búsqueda de yacimientos y desarrollar los sistemas de roca seca caliente que no presentan las limitaciones geográficas de los yacimientos hidrotermales.

Paralelamente a la reunión del GRC se llevó a cabo la exposición comercial e industrial que organiza la *Geothermal Energy Association* (GEA). En esta ocasión se montaron alrededor de 160 stands de otras tantas compañías y organismos relacionados con la geotermia, y que fue visitada por más de 2500 personas durante los tres días que permaneció abierta.

La reunión anual del GRC incluyó también una visita al relativamente cercano campo geotérmico de Coso al final, y un curso corto previo a la reunión.

Finalmente, el 18 y 19 de noviembre el Consejo Directivo (BoD: *Board of Directors*) de la Asociación Geotérmica Internacional (IGA: *International Geothermal Association*) llevó a cabo su quincuagésima tercera reunión en Melbourne, Australia, invitado por el Grupo Australiano de Energía Geotérmica (AGEG: *Australian Geothermal Energy Group*), que es una organización afiliada a la IGA. El AGEG organizó de manera paralela su Conferencia Australiana de Energía Geotérmica (*Australian Geothermal Energy Conference*) del 16 al 18 de noviembre, en conjunto con la Asociación Australiana de Energía Geotérmica (AGEA: *Australian Geothermal Energy Association*), que es el organismo que agrupa a las compañías geotérmicas australianas.

La reunión del BoD se realizó en una sala de juntas del Departamento de Industrias Primarias del Estado de Victoria, Australia, y en una sala de conferencias del hotel Sebel Albert Park Melbourne, donde también se llevó a cabo la conferencia geotérmica australiana. La agenda abarcó un total de 17 puntos, que fueron desde la verificación de quórum (de acuerdo con los estatutos, el quórum legal es de diez miembros presentes) hasta los asuntos generales, pasando por la aprobación formal de la propia orden del día y de las minutas de la reunión anterior, la presentación, discusión y aprobación de los informes del Secretariado (integrado por el Presidente, el Vicepresidente, el Secretario, el Tesorero y la Directora Ejecutiva), y de los informes de cada uno de los comités permanentes y ad hoc del BoD. A la fecha los comités permanentes son diez: Auditoría, Estatutos, Educación, Finanzas, Información, Membresías, Nominaciones, Programación y Planeación, Rama Regional Europea y Rama Regional del Pacífico Occidental. Funcionan también dos comités ad hoc, que son los de Reservas y Recursos e Investigación, y se había propuesto la creación de un tercer comité de este tipo denominado preliminarmente como Comité de Industria, mismo que finalmente el BoD decidió no aprobar.

Asistentes a la reunión del BoD de la IGA.

La orden del día también incluyó un informe sobre los preparativos del próximo Congreso Geotérmico Mundial (WGC: World Geothermal Congress) 2015, que como se sabe se realizará en Melbourne con visitas a los campos geotérmicos de Nueva Zelanda, y de la más reciente reunión sobre el tema que tuvieron el Comité de Supervisión de la IGA y el Comité Organizador de este congreso. Se presentó un presupuesto preliminar con los ingresos y egresos que se esperan y se llevó a cabo una visita a las instalaciones del Centro de Convenciones y Exposiciones de Melbourne que será la sede del congreso mundial. Otros puntos de la agenda fueron un informe sobre las actividades recientes de la REN Alliance de la cual la IGA forma parte, sobre la pérdida del estatus de la IGA como organismo consultor de las Naciones Unidas, y sobre la situación actual de la Compañía de Servicios de la IGA. Esta compañía se fundó en 2009 con el objetivo de desarrollar servicios profesionales en el campo de la geotermia que la IGA no puede hacer debido a su carácter de asociación no lucrativa, pero hasta la fecha sólo ha obtenido un pequeño contrato de servicios. El BoD decidió solicitar un plan de negocios a los responsables de la compañía, y sobre esta base decidir si todavía resulta necesaria su existencia. Finalmente el BoD aprobó la creación de una nueva rama regional de la IGA, que agrupará asociaciones de África Oriental, así como el presupuesto preliminar de la IGA para 2012 y se decidió el sitio para llevar a cabo las dos reuniones del BoD a realizar el año próximo.

Durante el sábado 19 se celebró también la asamblea general anual de la IGA que ordena los estatutos. Tanto esta asamblea como la reunión del BoD fueron conducidas por el Presidente de la IGA, Roland Horne, y contaron con la asistencia de 17 de los 30 miembros actuales del BoD, además de la Directora Ejecutiva, Marietta Sander, y de un miembro externo al BoD.

# Maneral operador de válvulas en el campo geotérmico de Cerro Prieto

***David Angulo Soberanes[1] y Carlos A. Miranda Herrera[2]***
[1]Residencia de Suministro de Vapor, [2]Residencia de Ingeniería y Diseño, Comisión Federal de Electricidad, Residencia General Cerro Prieto, Mexicali, BC. Correos: david.angulo@cfe.gob.mx y carlos.miranda02@cfe.gob.mx

La operación de las instalaciones superficiales en el campo geotérmico de Cerro Prieto, BC, se ha llevado a cabo utilizando métodos manuales, debido a que no se ha podido automatizar por diversas causas, siendo la más crítica la incrustación. La incrustación se agudiza en puntos donde se maneja salmuera, ya que la sílice contenida en ella se va depositando, ocasionando que las tuberías y sus accesorios se obstruyan y las partes móviles se peguen.

La operación de válvulas es una de las maniobras más frecuentes para controlar los fluidos geotérmicos (mezcla, vapor y agua). Las válvulas más comunes son las de tipo compuerta, cuyos diámetros varían desde ½" hasta 36" y sus series van de la 150 hasta la 1500. Todas estas válvulas están diseñadas para manejarse (abrirse o cerrarse) únicamente de la manera manual o en su defecto por actuadores que pueden ser neumáticos, hidráulicos o eléctricos, ya que si se recurre a otro tipo de herramientas se corre el riesgo de dañar alguno de sus elementos como la tuerca elevadora, el volante, etc. Debido a la frecuencia de incrustaciones, las partes móviles de la válvula se pegan de tal manera que resulta imposible operarla sólo con la fuerza de las manos.

*Fig. 1. Tubo y llave* steelson*, ambos de aluminio.*

El personal de campo encargado de las maniobras solucionó en su momento ese problema aplicando más fuerza al volante, valiéndose de la llave tipo *steelson* y de un tubo que probablemente al principio fue de acero al carbón. Debido a su peso, en algún momento posterior se cambió el material del tubo, sustituyendo el acero al carbón por aluminio (Fig. 1).

La llave *steelson* es una herramienta especial para trabajos donde se manejan tubos con sus respectivos accesorios, (coples, niples, válvulas etc.) y se encuentran en el mercado con diferentes medidas, dependiendo del tamaño de los tubos con los que se esté trabajando.

Las válvulas del campo se han venido operando utilizando esta llave, pero debido a que no está diseñada para utilizarse en este tipo de trabajos se han presentado varios inconvenientes. Algunos de ellos son:

- Las llaves se quiebran o se doblan según el material del que estén hechas.
- Los volantes son dañados por la acción de las quijadas de la llave sobre ellos.
- El personal ha sufrido accidentes por no haber un buen apoyo de la llave sobre el volante.
- Cuando se requiere operar una válvula urgentemente se pierde tiempo ya que se tiene que ajustar la llave a la medida del volante.

Para tratar de resolver esos problemas se pensó en una herramienta para sustituirla. Fue así como se diseñó y fabricó el maneral operador de válvulas que se presenta en las figuras 2 y 3, y que no es más que un tubo de acero al carbón al que se ha soldado en uno de sus extremos un cabezal con tres pernos que funcionan como puntos de apoyo para sujetarlo al volante de la válvula.

*Fig. 2. Maneral operador de válvulas.*

*Fig. 3. Cabezal del maneral.*

Las principales ventajas de utilizar el maneral son las siguientes:

- Se requiere menos esfuerzo físico para su manejo ya que es menos pesado que la llave *steelson*.
- Al contar con tres puntos de apoyo, se tiene más área de contacto con el volante lo que evita que la herramienta se desvíe de la dirección de la fuerza que se aplica, evitándose que el personal sufra lesiones.
- Debido a las características de los pernos que transmiten la fuerza, el volante de la válvula no sufre daños.
- Su diseño es relativamente sencillo y, por lo tanto, se puede fabricar fácilmente.

En la Figura 4 se observa la manera de usar la herramienta en cuestión.

*Fig. 4. Utilización del maneral para cerrar una válvula maestra del pozo (izquierda) y para abrir una válvula de agua separada (derecha).*

Esta herramienta es resistente y económica, diseñada especialmente para el despegue de lentejas en válvulas de compuerta de 203 mm (8”) y 254 mm (10)” de diámetro, clase 300, y se ha probado en campo demostrándose que es funcional.

Siempre será difícil sustituir los métodos y herramientas de trabajo tradicionales, pero si se demuestra que los cambios son para mejorar, los trabajadores terminan por adaptarse a la nueva situación.

Los planes a futuro incluyen la automatización del campo geotérmico, pero mientras eso no suceda las maniobras se seguirán realizando manualmente, y esta herramienta constituye una mejora con relación a las utilizadas antes.

# El hombre detrás del ascenso y la debacle de Solyndra

***Dana Hull***
(Traducción de Luis C.A. Gutiérrez a la nota publicada en el *San Jose Mercury News*, California)

Cuando en mayo de 2010 el presidente Barack Obama visitó Solyndra, el entonces CEO Chris Gronet le ofreció un tour personal en lo que fue el cenit del meteórico despegue y ascenso de este ejecutivo. Pero tras bambalinas Solyndra ya estaba en problemas. Gronet, un veterano tecnólogo de Silicon Valley quien había fundado la compañía, ya había sido eximido discretamente de muchas de sus funciones ejecutivas y el consejo de administración de Solyndra ya había empezado a buscar un sustituto.

Poco más de un año después de la visita presidencial, Solyndra se acogió a la bancarrota, despidió a más de mil empleados y desató un fiero debate sobre el rol del gobierno en su apoyo a compañías de energías limpias.

Dos ejecutivos de Solyndra fueron llamados a testificar ante el Comité de Energía y Comercio de la Cámara de Representantes, y aunque invocaron el derecho que les otorga la Quinta Enmienda a no incriminarse a sí mismos, Gronet había permanecido lejos de los reflectores. Pero documentos dados a conocer por investigadores del congreso y entrevistas con antiguos empleados indican que él, más que ningún otro, es el responsable del súbito ascenso de la compañía y de su espectacular caída.

Gronet fundó Solyndra en 2005 y presionó personalmente en busca de la garantía de crédito por 535 millones de dólares de parte del Departamento de Energía, crédito utilizado para construir nuevas instalaciones de manufactura de más de 3 mil metros cuadrados en la carretera interestatal 880. Envió urgentes correos electrónicos a funcionarios del Departamento de Energía cuando la solicitud de su compañía sufría retrasos o tropiezos. Asistió a una reunión en la Casa Blanca ofrecida por el Secretario de Energía Steven Chu y el Secretario del Tesoro Tim Greithner, presionó a Chu para que visitara Solyndra e incluso le sugirió los temas sobre los que podría hablar.

Pero mientras Solyndra se apresuraba para construir su nueva fábrica, la demanda de sus paneles solares cilíndricos se iba reduciendo en medio de una fiera competencia y de una recesión global.

**Ilusiones**

Ex empleados de Solyndra dicen que Gronet, descrito a menudo como inspirador y agresivamente ambicioso, puso el corazón, el alma y su reputación profesional en la compañía pero se enamoró perdidamente de una tecnología que resultaba costosa y que tenía un interés comercial limitado.

–Chris es básicamente un tipo decente, pero es como muchos grandes emprendedores de Silicon Valley", dijo un ex empleado que trabajó cerca de Gronet y que aceptó hablar bajo la condición de permanecer anónimo. –Había una exuberancia irracional sobre el diseño cilíndrico. Uno de los mayores peligros para un hombre negocios es enamorarse de su producto. Se crearon muchas ilusiones de que este producto era mejor que cualquier otro."

Gronet, quien vive en Portola Valley y ha mantenido un bajo perfil desde el colapso de Solyndra, no respondió a varias solicitudes de entrevista. Su abogado, Miles Ehrlich, declinó hacer comentarios para este reportaje debido a las investigaciones en curso por parte de representantes republicanos sobre la garantía de crédito, quienes están buscando señales de favoritismo político, y por parte del Departamento de Justicia

sobre un posible fraude contable. Gronet aparentemente está preparando una nueva empresa de tecnologías limpias.

Gronet no ha sido acusado de ningún delito ni se le ha solicitado testificar ante el Congreso. Sin embargo, mensajes electrónicos hechos públicos como parte de la investigación demuestran el intenso y directo rol que jugó presionando para la garantía de crédito para Solyndra bajo las dos administraciones (de Bush y de Obama).

**Mensajes agresivos**

La primera solicitud de garantía de crédito ante el Departamento de Energía de Solyndra ocurrió a fines de 2006. Una garantía de crédito no es un crédito directo, sino una obligación contractual de que el gobierno federal cubriría la deuda en caso de que el recipiendario fallara en hacerlo. Conforme la aprobación de la solicitud se retrasaba porque el Departamento de Estado recopilaba más información sobre el cambiante mercado solar, Gronet se iba frustrando y enfadando.

—Me siento consternado al saber que el viernes nuestra solicitud ha sido retrasada una vez más", escribió Gronet en un mensaje electrónico enviado el 12 de enero de 2009 a Steve Isakowitz, en ese entonces director de finanzas del Departamento de Energía. —Mucha gente ha trabajado los días feriados para asegurarnos de que habíamos cumplido con nuestra parte en este proyecto."

Ese mismo día, más tarde, en otro intercambio con Isakowitz, Gronet volvió a presionar indicando que estaba hablando con David Frantz, hombre cercano a George W. Bush quien era director del Programa de Garantías de Crédito del Departamento de Energía.

—Tengo en la línea a David Frantz, y encuentro la respuesta simplemente inaceptable", escribió Gronet. —La disculpa de David no es suficiente."

Un mes después Gronet escribió otro mensaje electrónico delineando diez condiciones que le gustaría que el Departamento de Energía cumpliera mientras Solyndra trataba de conseguir fondos de inversionistas privados. Presionó a Chu para que hiciera una visita a la planta, e incluso le sugirió temas sobre creación de empleos y ecología que el Secretario de Energía podría utilizar.

—Otro ejemplo de cómo el país resuelve problemas con la maquinaria de la innovación (el diseño del nuevo panel solar que surgió en Silicon Valley)," escribió Gronet en su mensaje electrónico del 20 de febrero de 2009. —Espero que Solyndra pueda ser el primer gran proyecto con resultados rápidos del Programa de Garantía de Créditos." (Los documentos conocidos hasta la fecha no incluyen una respuesta directa a la lista de diez condiciones de Gronet.)

**Experiencia en Silicon Valley**

Gronet, de 49 años, tiene un sólido currículo en Silicon Valley incluyendo un grado de bachiller en ciencia de materiales y un doctorado en procesamiento de semiconductores en Stanford. Uno de sus maestros fue James Gibbons, el legendario decano de la Escuela de Ingeniería de Stanford.

A mediados de los 80, Gibbons y un pequeño grupo de estudiantes de doctorado, entre ellos Gronet, trabajaron en un —procesamiento térmico rápido" (*rapid thermal processing*, o RTP), que es un proceso de manufactura de semiconductores que involucra el calentamiento rápido de obleas de silicio a temperaturas extraordinariamente elevadas.

Gronet y Gibbons registraron juntos varias patentes y fundaron una empresa inicial llamada G-Squared Semiconductor, con el objetivo de manufacturar equipo de RTP. La firma Applied Materials adquirió G-Squared en 1991 por una cifra no informada, y Gronet se volvió el director general del Grupo de Productos RTP de Applied. Permaneció con Applied durante 11 años, hasta 2002.

Después de unos años fuera de escena se unió a U.S. Venture Partners en Menlo Park como empresario en ciernes, una estrategia frecuente de ejecutivos talentosos que desean lanzar sus propias empresas tecnológicas. En 2005 Gronet empezó a visitar las oficinas del National Renewable Energy Laboratory (NREL) en Colorado, que es el mejor laboratorio gubernamental en investigación y desarrollo de energías renovables. La gran mayoría de paneles solares fabricados en el mundo están hechos de silicio, pero investigadores del NREL y de otros lados estaban experimentando con materiales como cobre, indio, galio y selenio, conocidos por sus siglas como CIGS.

"Él quería empezar y nos dijo "¿Podrían decirme qué es eso de los CIGS?'", comenta Rommel Noufi, un investigador solar del NREL que conoció a Gronet en 2005. "Estuvimos un año mostrándole la tecnología. Él es un muy buen científico y una persona con la que es fácil trabajar, muy conciliador y adaptable."

Uno de los principales problemas con la tecnología CIGS es que es muy sensible a la humedad. Gronet y su equipo finalmente diseñaron un nuevo "factor de forma": en lugar de fabricar un panel solar plano, ellos grababan el material CIGS en un tubo de vidrio y lo insertaban en un segundo tubo herméticamente sellado.

"Desde mi punto de vista, era una idea ingeniosa", comentó Noufi. "Pensamos que ahí había algo nuevo."

En mayo de 2005 se fundó Gronet Technologies, la cual fue rebautizada como Solyndra en enero de 2006. Ese mismo año la compañía respondió a una convocatoria del Departamento de Energía para estimular la inversión en tecnologías limpias. Respondieron 143 compañías, y Solyndra fue una de las 16 a las que se invitó a continuar y a enviar su solicitud completa. El proceso fue arduo: ejércitos de consultores revisaron las solicitudes y finalmente la de Solyndra fue aprobada, ya bajo la administración de Obama.

El entonces gobernador Arnold Schwarzenegger y el secretario Chu asistieron a una ceremonia formal de alto nivel de colocación de la primera piedra de la fábrica original en Fremont en septiembre de 2009, y Solyndra rápidamente se convirtió en el emblema tanto del programa de estímulos a la inversión como de la promesa de empleos verdes.

**Fuera de escena**

Sin embargo, el mercado solar estaba cambiando rápidamente. El costo del silicio cayó en picada y la competencia china se expandió, inundando el mercado.

Después de la visita de Obama en mayo de 2010, Gronet desapareció de escena un buen tiempo. Brian Harrison fue designado nuevo CEO en julio de ese año; los inversionistas que estaban en el consejo de administración de Solyndra declinaron comentar por qué Gronet había sido hecho a un lado. Gronet continuó en el consejo, pero renunció a su cargo de director el 19 de agosto, unos días antes de la caída de Solyndra, la cual solicitó la bancarrota en septiembre.

"Él continuará buscando nuevas oportunidades y retos en tecnologías limpias," informó Solyndra en las últimas noticias conocidas después de su cierre. "Le agradecermos a Chris por sus innovaciones y esfuerzos para fundar Solyndra y por su visionario liderazgo durante los primeros cinco años. Le deseamos éxito en sus nuevos proyectos."

# El Mundo de la Energía

*Información recopilada por Alfredo Mañón Mercado*

## La energía solar fotovoltaica genera más electricidad que la hidro en Alemania

La Asociación de Industrias de Energía y Agua (BDEW por sus siglas en alemán) reporta que el suministro de energías renovables representó casi el 21% del total del país durante la primera mitad de 2011. Las centrales de viento, biomasa, solar e hidroeléctricas generaron 57 TWh durante los primeros seis meses de 2011, equivalentes al 20.8% del total de energía eléctrica generada en el país. Los sistemas de energía solar fotovoltaica en techos de casas, granjas y fábricas, generaron el 3.5% del total nacional, excediendo por primera vez a la electricidad producida por plantas hidroeléctricas convencionales que aportaron el 3.3%. El viento aportó el 7.5% y la biomasa el 5.6%.

Fuente:
http://www.renewableenergyworld.com/rea/news/article/2011/09/germany-sets-new-renewable-energy-record-in-2011?cmpid=WNL-Tuesday-September6-2011

## Novedades en la energía eólica en México

A fines de 2010 México producía cerca de 510 MW de electricidad de origen eólico y se espera llegar a 1000 MW en 2011. Asimismo, se estima que hacia el 2014 se generarán alrededor de 2600 MW, para representar alrededor del 5% del total eléctrico del país en esa fecha. Así lo estimó el presidente de la Asociación Mexicana de Energía Eólica (AMDEE), quien destacó que existen ciertos obstáculos que dificultan un mejor desempeño, tales como una pobre seguridad jurídica para el desarrollo de esta tecnología en el país. Actualmente el desarrollo eoloeléctrico de México se ha hecho con manufactura foránea, por lo que la AMDEE considera necesario dar mayor certidumbre para impulsar a la industria eólica nacional. El Istmo de Tehuantepec es una de las regiones más importantes para el desarrollo de la energía eólica, pero la AMDEE menciona que hay también un pequeño proyecto en Mexicali y planes para la construcción en Chiapas, Jalisco, Veracruz, Zacatecas, Nuevo León, Baja California, San Luis Potosí y Tamaulipas.

Por su parte, la firma Renovalia Energy firmó un crédito por 2 mil 115 millones de pesos, para la construcción de la primera fase del parque eólico de Piedra Larga, en Unión Hidalgo, Oaxaca, cuya construcción debió empezar a finales de 2011 y que tendrá 45 aerogeneradores de Gamesa Eólica, con una potencia de 2 MW cada uno. Renovalia venderá la energía producida en este parque eólico a 14 sociedades del Grupo Bimbo mediante un acuerdo de suministro de autoabastecimiento durante 18 años. De esta forma, Piedra Larga, que producirá un total de 333 GWh por año, se convertirá en el mayor parque eólico para la industria alimenticia a nivel mundial.

Finalmente, a mediados de 2011 se anunció la inversión de 2 mil 500 millones de dólares de la firma Cannon Power Group, para la construcción de tres parques eólicos en Baja California, Zacatecas y Quintana Roo, con una capacidad conjunta de 322 MW.

Fuentes:
http://www.cnnexpansion.com/negocios/2011/10/21/energia-eolica-avanza-pese-dificultades,

http://www.cnnexpansion.com/manufactura/2011/06/15/eolica-promesa-en-fase-incipiente, http://www.cnnexpansion.com/manufactura/2011/07/14/regulaciones-atraen-inversion-verde

## ❑ Almacenamiento de energía

El almacenamiento de energía está ganando impulso. Las baterías, los volantes y los sistemas de aire comprimido están demostrando que pueden regular los servicios auxiliares y la frecuencia de las centrales eléctricas. Pero a medida que las energías renovables llegan a la red, los productores independientes están buscando nuevos sistemas de almacenamiento para proporcionar continuidad de al suministro de electricidad.

Duke Energy opera más de 1000 MW de parques eólicos en Estados Unidos y actualmente tiene el sistema de almacenamiento con baterías más grande del país: una unidad de 36 MW ubicada cerca de un parque eólico de 153 MW. El sistema regula la frecuencia y almacena la energía excedente para su uso durante la demanda pico en Texas, donde hay cerca de 11,000 MW en parques eólicos. Los principales sistemas de baterías se basan en iones de litio o de sodio-azufre (Na-S). AES Energy Storage, por ejemplo, opera un sistema de almacenamiento de iones de litio de 32 MW en un parque eólico al Oeste de Virginia. La empresa Liquid Metal utiliza celdas de energía hechas con metal líquido y sales fundidas. Pero el almacenamiento con baterías tiene aún un largo camino por recorrer antes de poder almacenar cantidades significativas de energía, además de que los costos siguen siendo elevados, del orden de 500 dólares por kWh. Por su parte, el potencial de almacenamiento por bombeo representa 20 GW en Estados Unidos, y ofrece almacenamiento a un costo de 100 dólares por kWh, de acuerdo con *The New York Times*, aunque requiere construir depósitos masivos que cuestan más de mil millones de dólares y cuya construcción toma varios años.

Fuentes:
http://www.electricitystorage.org/about/welcome, http://www.aesenergystorage.com/

## ❑ Actualización del proyecto de roca seca caliente de Paralana, Australia

El pasado noviembre de 2011 directivos de la empresa conjunta del proyecto geotérmico Paralana, Australia, presentaron un informe sobre la situación que guarda la estimación del recurso de este proyecto, cuyos datos principales se resumen.

Los inversionistas actuales en la empresa conjunta son las firmas Petratherm, con el 79% de las acciones, y Beach Energy con el 21%. En caso de conseguirse inversiones de riesgo adicionales, Beach Energy podría llegar hasta el 36% de las acciones y TRUenergy hasta el 30%, dejando a Petratherm con el 34%.

Paralana Geothermal Resources
(Estimated Recoverable Thermal Energy expressed in Petajoules ($PJ_{th}$))

| Depth Interval (metres) | Inferred ($PJ_{th}$) | Indicated ($PJ_{th}$) | Measured ($PJ_{th}$) | Total ($PJ_{th}$) |
|---|---|---|---|---|
| <3,500 | 2,400 | 1,100 | | 3,500 |
| 3,500 - 4,000 | 4,900 | 4,400 | 41 | 9,300 |
| 4,000 - 4,500 | 5,900 | 5,700 | | 12,000 |
| 4,500 - 5,000 | 6,900 | 6,700 | | 14,000 |
| Total ($PJ_{th}$) | 20,000 | 18,000 | 41 | 38,000 |

Entre los 3500 m y los 4000 m de profundidad, las reservas estimadas totales (inferidas, indicadas y medidas) son de 9300 $PJ_t$ (peta Joules térmicos) como se ve en la tabla, suficientes para generar 520 $MW_e$. El Informe de Recursos fue preparado por consultores independientes del gobierno, expertos en roca seca caliente, y se elaboró conforme a lo establecido en la segunda edición del *Geothermal Reporting Code* de Australia, en el que se define un recurso geotérmico como la porción del calor almacenado que puede ser recuperado en la superficie. El código australiano incluye tres tipos de recursos geotérmicos (inferidos, indicados y medidos), basados en niveles cada vez mayores de conocimientos geológicos y de confianza. Los recursos con más certidumbre son los medidos. El pozo Paralana 2 fue sometido a estimulación mediante fracturamiento del yacimiento y generó un volumen estimulado de 1.17 $km^3$ los que junto con las pruebas de flujo permitieron calcular un recurso geotérmico medido de 41 $PJ_t$ entre los 3500 y 4000 metros de profundidad como se indica en la tabla. Estos recursos son suficientes

para sostener una potencia de 5.4 $MW_e$ por 30 años.

Así, la evaluación independiente del recurso ha determinado que existe en Paralana un recurso geotérmico significativo. La siguiente fase crítica es lograr sostener la circulación del fluido en el sistema mediante la perforación del pozo Paralana 3 durante 2012.

Fuente: http://www.petratherm.com.au/

- **Remoción de cesio de suelos contaminados, con ácidos poco concentrados en Japón**

El Instituto de Ciencia y Tecnología Industrial Avanzada (AIST) de Japón anunció que ha desarrollado una tecnología para extraer cesio de suelos contaminados en una solución líquida ligeramente ácida. El accidente de la planta nuclear de Fukushima Daiichi que siguió al sismo y tsunami del 11 de marzo de 2011, dejó una extendida contaminación del suelo, que debe ser tratada. Existe una bien conocida tecnología para extraer cesio empleando ácidos concentrados, pero conlleva varios problemas tales como la dificultada para manejarlos y sus altos costos. La nueva tecnología desarrollada por el AIST utiliza una menor cantidad de solución ácida por volumen unitario de suelo y maneja el proceso a elevada temperatura (200°C) para ionizar la mayor parte del cesio en una solución líquida con baja concentración de ácido. La tecnología también incluye la separación de los iones de cesio removidos utilizando un absorbente de nanopartículas que usa azul de Prusia, un pigmento sintético. Se espera que la combinación de la remoción y separación del cesio del suelo habrá de contribuir a una reducción sustancial en la cantidad total de desechos radiactivos.

Actualmente el AIST está tratando de mejorar la tecnología optimizando las temperaturas del proceso y las concentraciones de ácido así como reduciendo la cantidad de azul de Prusia que requiere. Está en contacto con otras instituciones para realizar pruebas de verificación y para investigar futuros usos de la tecnología para descontaminar otros materiales.

Fuente:
http://www.japanfs.org/en/pages/031486.html

- **Oferta de energía geotermoeléctrica a 4.3 centavos de dólar por kilowatt-hora**

La compañía eléctrica islandesa Landsvirkjun anunció a fines del año pasado que está ofreciendo a sus clientes industriales firmar acuerdos de compra de energía de hasta 12 años de duración a un precio unitario de 4.3 centavos de dólar americano por kilowatt-hora. Magnus Bjarnason, responsable de mercadeo y negocios de la firma, que produce energía eléctrica a partir de plantas hidroeléctricas y geotermoeléctricas, dijo que "Estas son las tarifas más competitivas de Europa en términos de precio, duración del contrato y del hecho de que ofrecemos energía 100 porciento verde y renovable". La mayor parte de los clientes de Ladnsvirkjun son fundidoras de aluminio, pero también nuevas industrias como centros de datos, productores de metanol y de silicio metálico. La firma está desarrollando actualmente una nueva área geotérmica en la porción noreste del país, planeando empezar a generar a principios de 2015, y actualmente negocia acuerdos de compra de energía con varias industrias para esta nueva planta.

Fuente:
http://www.ifandp.com/article/0014789.html

- **Juicio contra sismólogos italianos acusados de homicidio imprudencial**

El juicio por homicidio imprudencial que se sigue contra seis sismólogos y un funcionario

gubernamental en la ciudad italiana de L'Aquila, derivado de lo que las autoridades consideran como una falla para alertar a la población antes del mortal terremoto de 2009, ha aumentado la preocupación de muchos científicos. Miles de ellos han firmado manifiestos de protesta contra el juicio al que consideran como anticientífico. Los sismos difieren de otros desastres naturales. Los meteorólogos pueden monitorear un huracán con precisión, pero los sismólogos no pueden predecir exactamente cuándo ni dónde ocurrirá un terremoto. Es por ello que la comunidad científica ha condenado el juicio italiano, alegando que los acusados son juzgados por fallar en hacer algo que no se puede hacer.

Lo que los sismólogos sí son cada vez más capaces de hacer es predecir la probabilidad de que un sismo ocurra en un área determinada en un tiempo determinado. El análisis estadístico muestra, por ejemplo, que cierta actividad sísmica, como un sismo menor o un enjambre de varios sismos muy pequeños, aumentan la probabilidad de un sismo mayor y destructivo en la misma área. Pero aun así la probabilidad sigue siendo muy pequeña. Dada una predicción de baja probabilidad para un evento que podría tener grandes consecuencias, el problema se vuelve cómo difundir esta información hacia el público. Este fue el problema que los acusados italianos enfrentaron.

En los meses previos al terremoto de magnitud 6.3 que sacudió L'Aquila el 6 de abril de 2009 dejando más de 300 muertos, el área había sufrido un enjambre de sismos. Esto aumentó la probabilidad de un terremoto mayor en un futuro próximo por un factor de 100 a 1000, pero incluso así la probabilidad seguía siendo muy baja, de tal vez 1 en 1000. Pero hubo un factor adicional en L'Aquila que complicó la situación. Conforme el enjambre de sismos continuaba a lo largo de varios meses, una persona de la localidad, que no es científico, hizo varias predicciones sobre un gran terremoto, especificando fecha y ubicación, con base en mediciones de radón, que es un gas radiactivo liberado a la atmósfera conforme las rocas se fracturan.

Esas predicciones, ninguna de las cuales resultó cierta, aumentaron la ansiedad del público en la ciudad, tanto que el gobierno italiano organizó en L'Aquila una reunión de una comisión nacional sobre predicción de riesgos, la cual se realizó el 30 de marzo con la participación de los seis sismólogos y el funcionario gubernamental acusados. En esa reunión los sismólogos indicaron que era posible, pero improbable, que la actividad sísmica pudiera ser un síntoma de la inminencia de un sismo mayor. También dijeron que siempre había cierto riesgo en la ciudad, debido a su historia sísmica. Pero en la conferencia de prensa posterior, el mensaje se tergiversó cuando el funcionario gubernamental aseguró al público que no había peligro.

La declaración del funcionario, quien no es sismólogo, violó una regla cardinal de la comunicación de riesgos, que es la de que los involucrados deben hablar sólo sobre su especialidad, indica Dannis Mileti, profesor emérito de ciencias de comportamiento en la Universidad de Colorado de Boulder. En general, opina Michael Lindell, profesor de la Universidad A&M de Texas, los científicos deben advertir a los funcionarios de emergencias sobre la probabilidad de los eventos, pero son estos los que deben tomar la decisión de ordenar o no una evacuación o de comunicar al público adoptar otros preparativos.

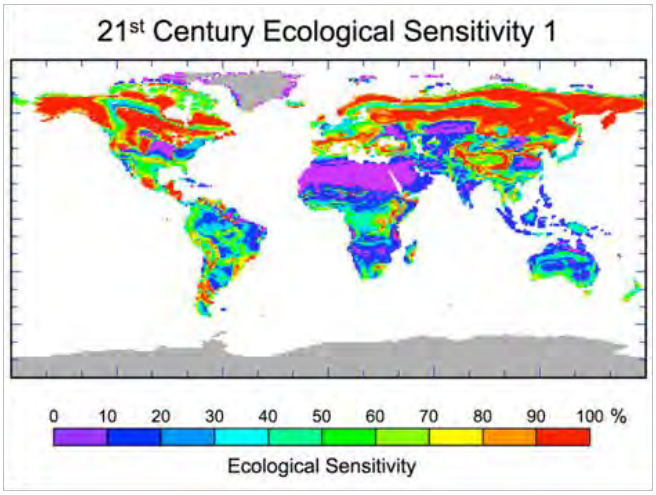
Incluso si la información de la conferencia de prensa en L'Aquila hubiese sido la correcta y el público hubiese sido advertido de que había un riesgo ligeramente mayor, dice el Dr. Mileti, la diferencia habría sido pequeña. –Los seres humanos son propensos a negar los eventos de baja probabilidad y alto impacto".

Fuente:
http://www.nytimes.com/2011/10/04/science/04quake.html?_r=2&ref=science

- **El cambio climático puede ocasionar grandes cambios en ecosistemas, según la NASA**

Hacia 2100 el cambio climático global modificará las comunidades de plantas que cubren casi la mitad de la superficie terrestre y ocasionará la conversión de casi el 40% de los ecosistemas terrestres de uno a otro tipo de comunidad

ecológica mayor (bosques, pastizales o tundra), de acuerdo con un modelo de computadora realizado por la NASA y otras universidades.




Investigadores del Laboratorio de Propulsión a Chorro de la NASA y del Instituto de Tecnología de California estudiaron de qué manera reaccionaría la vida vegetal del planeta en los próximos tres siglos conforme cambie el clima terrestre debido al aumento en los gases de efecto invernadero de origen humano. Las proyecciones del modelo indican un creciente cambio y estrés ecológico en la biósfera terrestre con muchas especies de plantas y animales enfrentando una competencia creciente por sobrevivir, así como una significativa reorganización de las especies conforme algunas invaden áreas ocupadas por otras. La mayor parte de la superficie terrestre no cubierta por hielo o desiertos sufrirá al menos un 30% de cambios en su cubierta vegetal, lo que requerirá una readaptación y a menudo una reubicación de grupos humanos y animales.

Además de los cambios en las comunidades de plantas, el estudio predice que el cambio climático perturbará el balance ecológico entre especies de plantas y animales interdependientes y en riesgo de extinción, reducirá la biodiversidad y afectará adversamente los ciclos globales del agua, de la energía y del carbón, entre otros.

Las plantas y animales terrestres han evolucionado para migrar en respuesta a cambios ambientales estacionales e incluso a cambios mayores como el final de la última era de hielo, pero normalmente no están preparados para hacerlo con la rapidez con que el cambio climático moderno está ocurriendo. Para estudiar la sensibilidad de los sistemas ecológicos de la tierra al cambio climático, los científicos utilizaron un modelo de computadora que predice el tipo de comunidad vegetal adaptada de manera única a cualquier tipo de clima en la tierra. Este modelo se empleó para simular la situación futura de la vegetación natural terrestre de acuerdo con las proyecciones climáticas de diez diferentes simulaciones del clima global, todas basadas en el escenario intermedio de emisiones de gases de efecto invernadero descrito en el Cuarto Reporte de Evaluación del IPCC de la ONU. Este indica que la emisión de estos gases se duplicará hacia 2100 y después tenderá a estabilizarse, lo que provocará un planeta más caliente y húmedo con un aumento de 2 a 4°C de la temperatura media anual, que es más o menos el mismo calentamiento que ocurrió después del último máximo glacial hace casi 20 mil años, pero unas cien veces más rápido. Bajo tal escenario, algunas regiones se volverán más húmedas debido a una mayor evaporación, mientras otras se volverán más secas por los cambios en la circulación atmosférica.

El estudio encontró los mayores cambios en los tipos de comunidades ecológicas hacia los polos, particularmente en pastizales templados y bosques boreales, y hacia las altas elevaciones. Los puntos más ecológicamente sensibles incluyen regionales del Himalaya y de la Meseta Tibetana, África oriental ecuatoriana, Madagascar, la región mediterránea, el sur de Sudamérica, y las regiones de los Grandes Lagos y las grandes mesetas de EUA (ver Figura).

Fuente:
http://www.nasa.gov/topics/earth/features/climate20111214.html

- **Entra en operación la mayor planta de biomasa en Alemania**

En diciembre pasado Danish Stirling DK, compañía especializada en sistemas de energía a base de máquinas Stirling que consumen biomasa, puso en operación la mayor planta del mundo en su tipo, con cuatro unidades Stirling, en las instalaciones turísticas y de spa de Tabbs, en

Tabarz, Alemania. La planta se abastece con aserrín producido localmente y puede generar anualmente unos 4 GWh térmicos de calor y alrededor de 1 GWh de electricidad, lo que la convierte en la mayor de su tipo en el mundo. Proporcionará el calor requerido por el centro turístico, propiedad del municipio, así como la mayor parte de la energía eléctrica que éste consume. El proyecto fue desarrollado conjuntamente por la oficina en Leipzig de la Siemens Building Technologies Division, por Stirling DK y por un socio local. La planta combina una alta eficiencia, combustibles de bajo impacto y emisiones de partículas extremadamente bajas, lo que no logra ninguna otra tecnología de combustión de biomasa. El uso de aserrín local y el tamaño de la planta implican que el combustible puede ser abastecido de manera local con un pre-tratamiento mínimo, lo que reduce el impacto total en carbono de la planta. Esta es la segunda planta Stirling de máquinas múltiples instaladas en Alemania. Otras dos plantas, cada una con cuatro máquinas, se construyen actualmente en el Reino Unido por un socio local, para generar calor, enfriamiento y electricidad para dos centros comerciales.

Fuente:
http://www.renewablesbiz.com/article/11/12/stirling-dk-worlds-largest-biomass-stirling-plant-commissioned-germany&utm_medium=eNL&utm_campaign=RB_DAILY2&utm_term=Original-Member

## Geothermal History

***Geothermal History*** es una columna regular del Boletín del GRC (*Geothermal Resources Council*), coordinada por nuestra colaboradora Susan Hodgson, quien también es la editora de ese Boletín. Susan solicita permanentemente colaboraciones de todo el mundo. Si tiene alguna historia, anécdota o foto, relativa a la geotermia, compártala con la comunidad y envíele un mensaje a la dirección: cosmos@dcn.org.

# INSTRUCCIONES DE PUBLICACIÓN EN LA REVISTA GEOTERMIA

*Geotermia* está abierta a la participación de investigadores de instituciones tanto nacionales como del extranjero quienes deben dirigir sus contribuciones a:

*GEOTERMIA*, REVISTA MEXICANA DE GEOENERGÍA
Alejandro Volta 655, Col. Electricistas.
Morelia, Mich., C.P. 58290, México
Atención: José Luis Quijano-León y/o Luis C.A. Gutiérrez-Negrín
l.g.negrin@gmail.com, luis.quijano@geotermia.org.mx, luis.gutierrez@geotermia.org.mx

Los trabajos deberán cumplir con las siguientes instrucciones de publicación.

1. El artículo debe ser inédito y relacionado con la geotermia, las fuentes alternas no convencionales de energía o con ramas afines.

2. Enviar una copia impresa a doble espacio, así como disquete con el archivo en formato MS-Word. También puede enviarse el archivo por correo electrónico a las direcciones indicadas arriba. Se aceptan trabajos en español con resumen en inglés, o en inglés con resumen en español.

3. Las tablas, cuadros y figuras deberán incluirse al final del texto. Las figuras y gráficas pueden ser en color o en blanco y negro, tener buena calidad y no rebasar el tamaño carta. Su cantidad deberá ser la suficiente para la comprensión o ilustración del trabajo expuesto. Deberán incluirse en las copias impresas, al final del texto, así como en el disquete en forma de archivos independientes en formato de imagen (*.gif, *tif, *.jpg) que puedan importarse como tales desde MS-Word.

4. *Geotermia* es una revista virtual que se publica en formato *.pdf en el portal interno de la Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos y en otros portales públicos. Por lo tanto, es importante que todas las figuras y gráficas tengan la resolución suficiente para poder apreciarse al convertirse a archivos de imagen.

5. Todo artículo será sometido a revisión y arbitraje de un mínimo de dos especialistas en la materia. Para facilitar la imparcialidad de la revisión se mantendrá el anonimato entre autores y árbitros. Se enviarán reconocimientos escritos a quienes colaboraron como árbitros.

6. Se ofrecerá apoyo especial a los autores sin hábitos de publicar resultados por no constituir la publicación una parte rutinaria de su trabajo, y que, en consecuencia, requieran de indicaciones adicionales. El Consejo Editorial se encargará de hacer las modificaciones o correcciones pequeñas que no justifiquen la aplicación de un nuevo arbitraje.

7. El contenido de los trabajos deberá abordar los temas que se indican a continuación. Se subrayan las partes consideradas como indispensables, aunque su contenido pueda aparecer bajo otra sección o con otro título. Las otras secciones son opcionales, aunque pudiera haber otras a juicio del autor: Título, Autor, Adscripción laboral, Dirección de correo electrónico, Resumen en español, Palabras Clave en español, Título en inglés, Resumen (Abstract) en inglés, Palabras Clave (Keywords) en inglés, Antecedentes o Introducción, Objetivo, Metodología, Datos, Procesamiento, Interpretación, *Interpretaciones alternativas*, Conclusiones, *Verificación, Agradecimientos*, Referencias, *Apéndices*.

8. Todas las referencias deberán estar citadas en el texto y todas las citas deberán estar incluidas en las referencias. En el texto se empleará el sistema Harvard (apellido y año): “Algunos autores (González, 1995)...”, o bien “González (1995) reporta que...”. En caso de dos autores la cita deberá incluirlos a ambos (González y Rodríguez, 1995) y en caso de más autores deberá utilizarse la convención *et al.* (González *et al.*, 1995). La lista de referencias irá en orden alfabético y deberá incluir a todos los autores con todos los detalles de la publicación; si se emplean abreviaturas de publicaciones científicas, deberán estar de

acuerdo con el *World List of Scientific Periodicals*. Solamente las iniciales del primer autor irán después del apellido. El título de la revista o libro referenciado deberá escribirse en cursivas. Ejemplos:

Cedillo-Rodríguez, F., 1999. Modelo hidrogeológico de los yacimientos geotérmicos de Los Humeros. *Geotermia,* Vol. 15, No. 3, 159-170.

Gutiérrez-Negrín, L., A. López-Martínez and M. Balcázar-García, 1984. Application of dating for searching geothermic sources. *Nuclear Tracks and Radiation Measurements*, Vol. 8, Nos. 1-4, 385-389.

Allen, J.R.L., 1970. *Physical Processes of Sedimentation*. London, Allen and Unwin, 248 pp.

9. Si lo desea, puede solicitar una copia de los formatos de arbitraje y utilizar como guía para el contenido de su contribución los artículos ya publicados en esta revista.

10. Eventualmente aparecerá como parte de la revista una sección intitulada FORO, la cual dará cabida a artículos y colaboraciones tipo ensayo que pueden no cumplir con alguno o algunos de los requisitos precedentes, pero que a juicio del Consejo Editorial pueden resultar de interés para los lectores de la misma. Estas colaboraciones no serán sometidas a arbitraje técnico. Si desea que su colaboración sea considerada para publicarse en FORO, por favor indíquelo así al remitirla.

## DIRECTIONS FOR CONTRIBUTORS

*Geotermia* is open to Mexican and foreign contributors, who should send all contributions to:

*GEOTERMIA,* REVISTA MEXICANA DE GEOENERGÍA
Alejandro Volta 655, Col. Electricistas.
Morelia, Mich., C.P. 58290, México
Atención: José Luis Quijano-León y/o Luis C.A. Gutiérrez-Negrín
l.g.negrin@gmail.com, luis.quijano@geotermia.org.mx, luis.gutierrez@geotermia.org.mx

Contributions must follow these guidelines:

1. A submitted paper must be unpublished and related to geothermics, nonconventional energy sources or similar subjects.

2. Submit a printed copy, double spaced, and a diskette with the file in MS-Word format. The file may be sent by e-mail to an e-address indicated above. Contributions in Spanish with abstracts in English, or in English with abstracts in Spanish, are acceptable.

3. Tables, figures and graphs must be placed at the end of the text. They must be of good quality, either in color or black and white, and not larger than letter-sized paper. Include all tables, figures and graphs needed by a reader to understand the paper. Place them on the diskette as independent files in image-format (*.gif, *.tif, *.jpg), which can be imported from MS-Word.

4. *Geotermia* is a digital magazine published in a *.pdf format at the internal website of the Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos and at other public websites. Therefore, all figures and graphs must have enough resolution to be clear when they are converted to image-files.

5. All contributions will undergo review and arbitration by at least two specialists in the field. To encourage fair evaluations, the authors will receive anonymous reviews. The reviewers will receive an acknowledgement letter from the editorial board.

6. *Geotermia* offers special support to first-time authors for whom publishing papers is not part of their jobs. The editorial board can make small modifications or corrections to such papers without a new peer-review process.

7. All papers must include the following sections. Those considered as indispensable are underlined, yet they can be included under other chapters or subtitles. The other parts are optional, plus authors can include additional sections: Title, Author(s), Company or institution, Address, Abstract in Spanish, Keywords in Spanish, Title in English, Abstract in English, Keywords in English, Introduction or background, Objective, Methodology, Data, Processing, Interpretation, Alternative interpretations, Conclusions, Verification, Acknowledgement, References, Appendix.

8. All references must be cited in the text, and all citations must be included in the References. In the text, the Harvard citation system (last name and year) must be used: "Some authors (González, 1995)...", or: "González (1995) indicates that..." In the case of two authors, the citation must include both (González and Rodríguez, 1995), and in the case of more than two authors the convention *et al.* (González *et al.*, 1995) must be used. The list of references must be arranged alphabetically and include all the authors and details of the cited publication. All abbreviations must be from the *World List of Scientific Periodicals*. Initials of the first author must follow the last name. The title of a magazine or book must be written in italics. Examples:

Cedillo-Rodríguez, F., 1999. Modelo hidrogeológico de los yacimientos geotérmicos de Los Humeros. *Geotermia,* Vol. 15, No. 3, 159-170.

Gutiérrez-Negrín, L., A. López-Martínez and M. Balcázar-García, 1984. Application of dating for searching geothermic sources. *Nuclear Tracks and Radiation Measurements*, Vol. 8, Nos. 1-4, 385-389.

Allen, J.R.L., 1970. *Physical Processes of Sedimentation*. London, Allen and Unwin, 248 pp.

9. You may ask for a copy of the review of any paper published in *Geotermia* and use it as a guide for your contribution.

10. Eventually, a section named FORO will constitute the last part of the magazine. The section will include contributions, notes and essays that may or may not meet any or all of the stipulations for papers, but that the editorial board considers of interest to the readers. Contributions included in FORO will not undergo peer review. If you want a contribution be placed in FORO, please indicate this upon submission.