

GEOTERMIA

REVISTA MEXICANA DE GEOENERGÍA

ISSN 0186-5897

Volumen 20, No. 1

Enero-Junio de 2007

CONTENIDO

Editorial	1
Modelo hidráulico de la red de vaporductos del campo geotérmico de Cerro Prieto, BC. E. Salaices, A. García, J.I. Martínez, R. Ovando, M. Ceceñas, A.F. Hernández, I. Canchola, O. Mora, C. Miranda, M. Hernández, S. López, e I. Murillo.	2
Fracturamiento térmico del pozo H-40 del campo geotérmico de Los Humeros, Pue. Magaly Flores Armenta y Rigoberto Tovar Aguado	11
Condensadores para medir la calidad del vapor a la entrada de las turbinas a contrapresión del campo geotérmico de Los Azufres, Mich. Fernando Sandoval Medina, Rubí González González, Lisette Reyes Delgado y Moisés Medina Martínez	20
Modificación del sistema de control de nivel de agua en la Unidad 12 del campo geotérmico de Los Azufres, Mich. Raúl Tello Hinojosa, S. Ramón Aburto Huerta y Héctor M. Mendoza Covarrubias	25
Control de incrustación en instalaciones superficiales del campo geotérmico de Las Tres Vírgenes, BCS Ruth Tapia Salazar	32
Bomba de calor para purificación de salmuera geotérmica S. Santoyo-Gutiérrez, R.M. Barragán-Reyes y F.A. Holland	41
Foro	53
Información y entropía Tom Stonier (Extracto y traducción de Luis C.A. Gutiérrez-Negrín)	54
Congreso anual 2006 y XIV Asamblea General de la Asociación Geotérmica Mexicana Luis C.A. Gutiérrez-Negrín	65
El Mundo de la Energía Información de Alfredo Mañón Mercado	68

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), 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. **GEOTERMIA – REVISTA MEXICANA DE GEOENERGÍA** es nombre registrado en la Dirección General de Derechos de Autor de la Secretaría de Educación Pública, con la Reserva 01.86. Reservados todos los derechos de reproducción del material publicado. Registro ISSN 0186-5897.

La Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos no asume ninguna responsabilidad con relación a la veracidad o exactitud de los datos o conclusiones presentados en los artículos. Tampoco avala ni sugiere el uso de productos comerciales, los cuales son eventualmente citados sólo con fines descriptivos.

La autorización para citar fuentes ajenas a la Comisión Federal de Electricidad 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 Comisión Federal de Electricidad.

EDITORES

Director: José Luis Quijano León

Editor: Luis C.A. Gutiérrez Negrín

Consejo Editorial:

Alejandro Becerril Zavala

Jesús de León Vivar

Magaly Flores Armenta

Raúl Sánchez Velasco

Jaime Vaca Serrano

Editores asociados:

Alejandro Abril Gaspar (GPG)

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)

César Suárez Arriaga (UMSNH)

Secretaría:

Enedelia Calderón Ochoa

Responsable de sitio en página de la UMSNH:

Lucina Arce Ávila

Oficinas:

Alejandro Volta 655, Col. Electricistas

Morelia, Mich., 58290

Tel. (443) 322-7072

Correo: luis.gutierrez03@cfe.gob.mx

Editorial

Este número incluye el último de los trabajos técnicos presentados en el Congreso Anual 2005 de la Asociación Geotérmica Mexicana (AGM) que aún no se habían publicado, así como el primero a publicar de los que se presentaron en el Congreso Anual 2006 de la misma asociación. Los trabajos se refieren al modelo hidráulico de la red de vaporductos de ese campo geotérmico, y a una bomba de calor geotérmico que desarrolló el Instituto de Investigaciones Eléctricas. El Congreso Anual 2006 de la AGM, por cierto, se llevó a cabo en septiembre de 2006 en las instalaciones del campo geotérmico de Cerro Prieto. En la sección del Foro de este mismo número se publica una nota sobre su desarrollo y principales características. Cabe destacar aquí, sin embargo, que en la asamblea de la asociación, celebrada inmediatamente después del congreso, tomó posesión un nuevo Consejo Directivo presidido ahora por el Director del Consejo Editorial de esta revista, José Luis Quijano.

Los demás artículos que aparecen en este número corresponden a trabajos técnicos que fueron presentados por personal de la Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos (GPG), de la Comisión Federal de Electricidad (CFE), en la I Reunión Interna de Mejora Continua (I RIMC). Como se comentó en el número pasado de **Geotermia**, este fue un evento interno realizado en febrero de 2006, en el que se presentaron 26 trabajos técnicos y administrativos con experiencias y propuestas que buscaban una mejora en las actividades y el funcionamiento cotidiano de esa gerencia. Se incluyen cuatro de tales trabajos en este número, que son los de Magaly Flores y colaboradores sobre una exitosa prueba de fracturamiento hidráulico efectuada en un pozo del campo de Los Humeros, el de Fernando Sandoval y otros especialistas de Los Azufres, que describen un condensador para medir calidad de vapor diseñado y desarrollado por ellos, el de Raúl Tello y otros dos ingenieros de la sede de la GPG, que explica los cambios que debieron hacer para resolver un grave problema de operación en la Unidad de 50 MW del campo de Los Azufres, y el de Ruth Tapia, que describe la manera en la que se atendió y resolvió el problema de incrustación de sílice en el campo de Las Tres Vírgenes. Estos trabajos son una muestra bastante representativa del ingenio y la capacidad de los especialistas geotérmicos de la GPG. Junto con los otros dos artículos presentados antes, abordan diferentes aspectos de los cuatro campos geotérmicos mexicanos en operación.

La sección del Foro incluye, además de la nota sobre el más reciente congreso de la AGM, un antiguo pero interesante artículo que aborda el siempre intrigante tema de la entropía desde una perspectiva muy original que no ha perdido actualidad a pesar del tiempo transcurrido desde su publicación original. La completa la columna permanente de *El Mundo de la Energía*. Anunciamos también la aparición de una nueva columna regular en el **Bulletin** del GRC, que estará a cargo de nuestra amiga y colaboradora Susan Hodgson, quien solicita colaboraciones de todo el mundo.

Aunque contamos con material de interés pendiente de publicar, no está demás reiterar el llamado permanente a nuestros lectores para enviarnos trabajos técnicos originales.

Luis C.A. Gutiérrez-Negrín

Modelo hidráulico de la red de vaporductos del campo geotérmico de Cerro Prieto, B.C.

E. Salaices¹, A. García¹, J.I. Martínez¹, R. Ovando¹, M. Ceceñas¹, A.F. Hernández¹, I. Canchola², O. Mora², C. Miranda², M. Hernández², S. López², e I. Murillo²

¹Instituto de Investigaciones Eléctricas, Gerencia de Geotermia, Av. Reforma 113, Palmira, Cuernavaca, Mor. 62490 México. ²Comisión Federal de Electricidad, Carretera Pascualitos-Pescaderos km 26.5, B.C. México. Correo: salaices@iie.org.mx

Resumen

La red de vaporductos del campo geotérmico de Cerro Prieto está compuesta por un conjunto de 184 pozos, de los cuales 162 son pozos integrados, interconectados entre sí a través de una red de tuberías. Por medio de esta red se alimentan 13 unidades generadoras de electricidad con una capacidad total instalada de 720 MWe. La red tiene una longitud aproximada de 120 kilómetros y está compuesta por tuberías de diferentes diámetros, ramales, interconexiones, etc. La complejidad y extensión del sistema de vaporductos hace muy difícil el análisis del transporte y suministro de vapor a las plantas generadoras. Lo anterior creó la necesidad de contar con una herramienta que ayudara en el análisis del sistema con el fin de determinar el comportamiento global de la red y verificar la dirección y cantidades de flujo en cada uno de las interconexiones, colectores, ramales y sub-ramales. En este trabajo se presenta un modelo hidráulico de la red de vaporductos del campo geotérmico de Cerro Prieto, el cual permite determinar el comportamiento global de la red mediante la cuantificación de las caídas de presión, flujos y pérdidas de calor a través de los componentes del sistema. Además, el modelo permite el análisis del impacto de cambios en las condiciones de operación, variaciones en la producción de vapor, actividades de mantenimiento y cambios en el diseño, como es la integración de nuevos pozos. El modelo se desarrolló utilizando PIPEPHASE 9.0, el cual es un simulador numérico de flujo multifásico en estado estacionario con transferencia de calor, que permite modelar sistemas de tuberías y redes para el transporte de vapor y condensado.

Palabras clave: Cerro Prieto, vaporductos, modelado matemático, red de vaporductos, suministro de vapor.

Hydraulic model of the steam-lines network of the Cerro Prieto, B.C., geothermal field

Abstract

The steam-line network of the Cerro Prieto geothermal field is composed of 184 wells, and 162 of the wells are integrated and connected by pipes. Thirteen power units, with an installed electrical capacity of 720 MW, are fed by that network. The network length is 120 km, including pipes of several diameters with branches and interconnections. The extension and complexity of the steam-line system make it difficult to analyze the transport and supply of steam to the power plants. For that it was necessary to have a tool capable of analyzing the system and the performance of the network as a whole, as well as the direction and flow volumes in each part of the system. In this paper, a hydraulic model of the Cerro Prieto steam-line network is presented. The model can determine the performance of the whole network by quantifying the pressure

drops, flows and heat losses of the components. The model analyses the consequences of changes in operating conditions, steam production, maintenance activities and design (such as the integration of new wells). The model was developed using PIPEPHASE 9.0, a numeric simulator of multi-phase flow in steady state with heat transfer. It is used to model systems and pipe networks for steam- and condensate-transport.

Keywords: Cerro Prieto, steam-pipes, mathematic model, network of steam-pipes, steam supply.

1. Introducción

El modelado de flujo en redes y líneas de vapor ha sido poco estudiado en general. En el caso del campo geotérmico de Cerro Prieto, los trabajos previos al presente estudio se limitan a: (a) el desarrollo de un modelo efectuado por la UNAM (Cruickshank *et al.*, 1990), en el cual se resuelve la ecuación de cantidad de movimiento considerando flujo adiabático, pero no permite estimar perfiles de temperatura y no considera flujo de condensado en purgas; y (b) los trabajos de Peña (1986) y Peña y Campbell (1988) quienes desarrollaron un modelo basado en la expansión politrópica del vapor a medida que fluye en una red horizontal de tuberías aisladas térmicamente. Los ejemplos mostrados incluyen tuberías de unos 1400 pies de longitud.

Otros trabajos relevantes incluyen el de Marconcini y Neri (1979) quienes describen un modelo para simular una red de 6 pozos que llevan vapor sobrecalentado a una turbina; Huang y Freeston (1992, 1993), quienes analizan una red de cuatro pozos y una turbina, estudiando además el efecto de la rugosidad de las tuberías sobre los resultados de la simulación; y Betaggli y Bidini (1996), quienes desarrollaron un código que simula el flujo del vapor desde el pozo hasta las turbinas, en una red de 32 pozos y tres turbinas, y que se puede considerar como el estudio más detallado reportado en la literatura abierta.

Di Maria (2000), por su parte, desarrolló un código (*PowerPipe*) y estudió la problemática del comportamiento de las redes de tuberías debido al difícil cálculo de las curvas características de los componentes y de la operación fuera del punto de diseño. El análisis se aplicó a un campo geotérmico pequeño que consta de cuatro pozos y una turbina, comparando datos experimentales con resultados de simulación, los cuales fueron satisfactorios.

En este trabajo se describe la red de vaporductos del campo geotérmico de Cerro Prieto y se presenta un modelo hidráulico del Ramal 1 de Cerro Prieto Tres (CPT) y de Cerro Prieto Cuatro (CPC) usando el simulador numérico *PIPEPHASE*. El modelo permite determinar el comportamiento de esta parte de la red mediante la cuantificación de las caídas de presión, flujos y pérdidas de calor a través de cada uno de los componentes del sistema. Además, el modelo permite el análisis del impacto de cambios en las condiciones de operación, variaciones en la producción de vapor, actividades de mantenimiento y cambios en el diseño, como la integración de nuevos pozos. El modelo no toma ninguna decisión sobre cómo operar la red o sus componentes, pero sus resultados pueden ser analizados para determinar qué medidas se pueden tomar para mejorar su operación.

2. Descripción del campo geotérmico

Cerro Prieto se encuentra localizado a unos 35 kilómetros al sur de la ciudad de Mexicali, B.C., siendo el campo geotérmico de líquido dominante más grande del mundo. La primera planta empezó operaciones comerciales para producción de energía eléctrica en 1973 y, hoy en día, tiene una capacidad eléctrica instalada de 720 MW. Cerro Prieto está compuesto por cuatro sectores denominados progresivamente Cerro

Prieto Uno (CPU), Cerro Prieto Dos (CPD), Cerro Prieto Tres (CPT) y Cerro Prieto Cuatro (CPC). El campo tiene cuatro plantas generadoras de 110 MWe, cuatro de 37.5 MWe, cuatro de 25 MWe y una de 30 MWe. Todas las unidades instaladas son de tipo condensante (Gutiérrez-Negrín y Quijano-León, 2005).

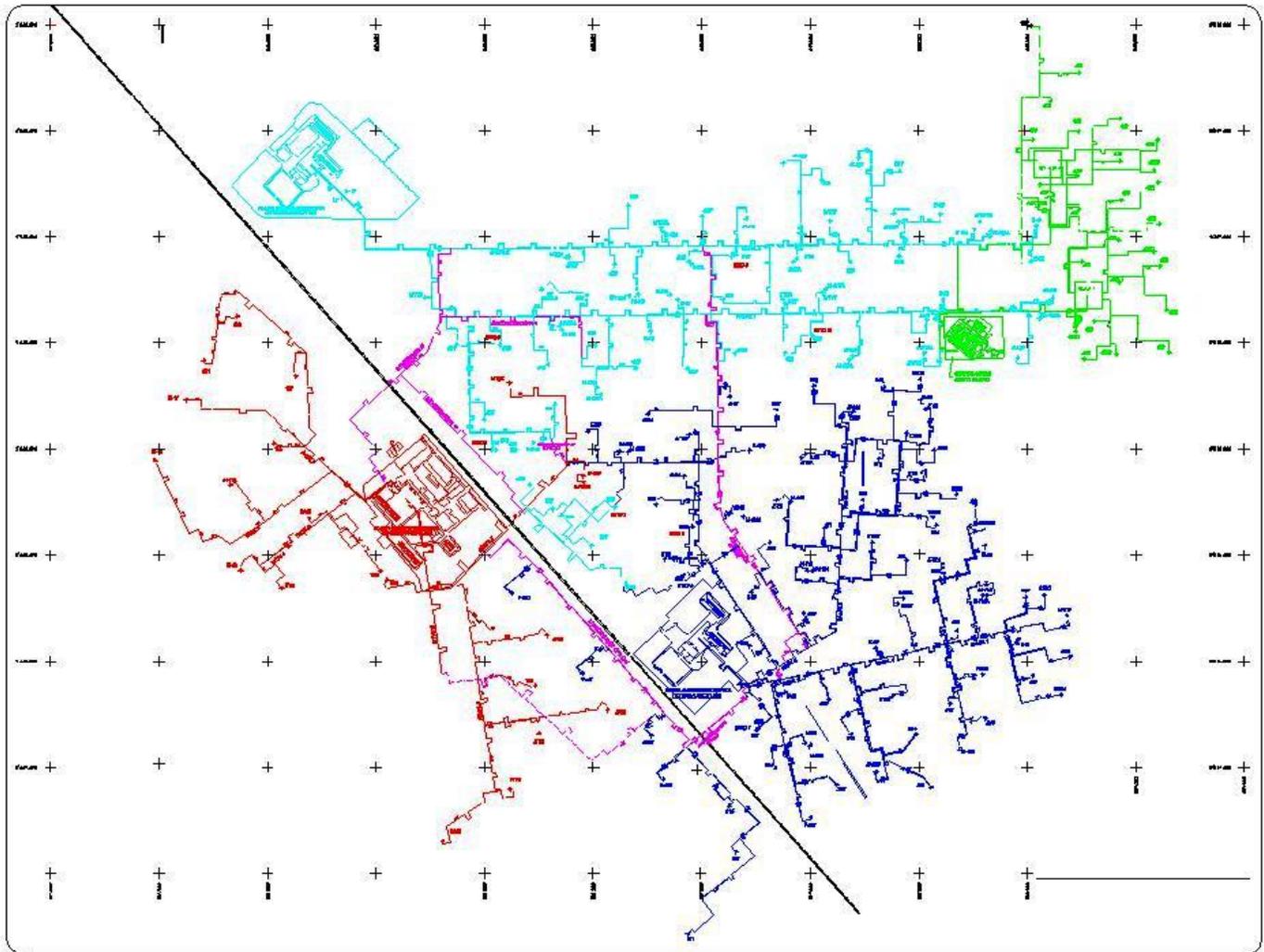


Figura 1. Red de vaporductos del campo geotérmico de Cerro Prieto

Las plantas generadoras son alimentadas con vapor proveniente de 162 pozos productores integrados, el cual es conducido por medio de una red de vaporductos de unos 120 kilómetros de longitud. Los vaporductos tienen diámetros de entre 8" y 46" y 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 galvanizado. La red de vaporductos posee diversas interconexiones entre las distintas áreas del campo con el fin de proporcionar un suministro adecuado a las plantas de generación. Los ductos colectores del vapor se denominan ramales. CPU cuenta con 8 ramales de alta presión, mientras que para CPD, CPT y CPC existen ramales paralelos de alta y baja presión (dos ramales por campo). Esta denominación proviene del tipo de separación: primaria o de alta presión, y separación secundaria o de baja presión. La Figura 1 muestra la red de vaporductos del campo geotérmico de Cerro Prieto.

A lo largo de los años, la gran cantidad de fluidos geotérmicos extraídos para el suministro de vapor a las plantas generadoras y la perforación e integración de nuevos pozos, ha resultado en una disminución de la presión, cambios en los procesos del yacimiento y aumento del flujo de enfriamiento subterráneo dentro del sistema geotérmico. Todo esto ha dado como resultado cambios en la producción de vapor de los pozos

inicialmente integrados. Así, la complejidad del sistema de vaporductos, el cambio de las condiciones de operación y el mantenimiento e integración de nuevos pozos, hacen del suministro de vapor un problema difícil incluso para los ingenieros más experimentados.

3. Descripción del modelo

El desarrollo del modelo se llevó a cabo utilizando información de diseño, tales como geometría, materiales, accesorios, conexiones, aislantes, etc. (ver Figura 1), recopilada de información existente en diversos medios, como información adquirida y verificada directamente en campo. La configuración y dimensiones de casos particulares se tomaron directamente en campo teniendo como evidencia una memoria fotográfica. La información de la red se documentó a detalle en formatos compatibles con los requeridos por el simulador *PIPEPHASE*. Para ello, se diseñó una nomenclatura especial para facilitar la identificación de cada tramo de tubería de la red. La Figura 2 muestra un ejemplo de la documentación. La figura superior izquierda muestra la conexión desde la placa de orificio del pozo M-116 con el Ramal 1 de Alta Presión de CPD. La figura superior derecha muestra el soporte fotográfico de este ducto, y la parte inferior muestra los diferentes accesorios conectados en serie y las características de los mismos. Este formato de documentación es el usado en el simulador *PIPEPHASE*.

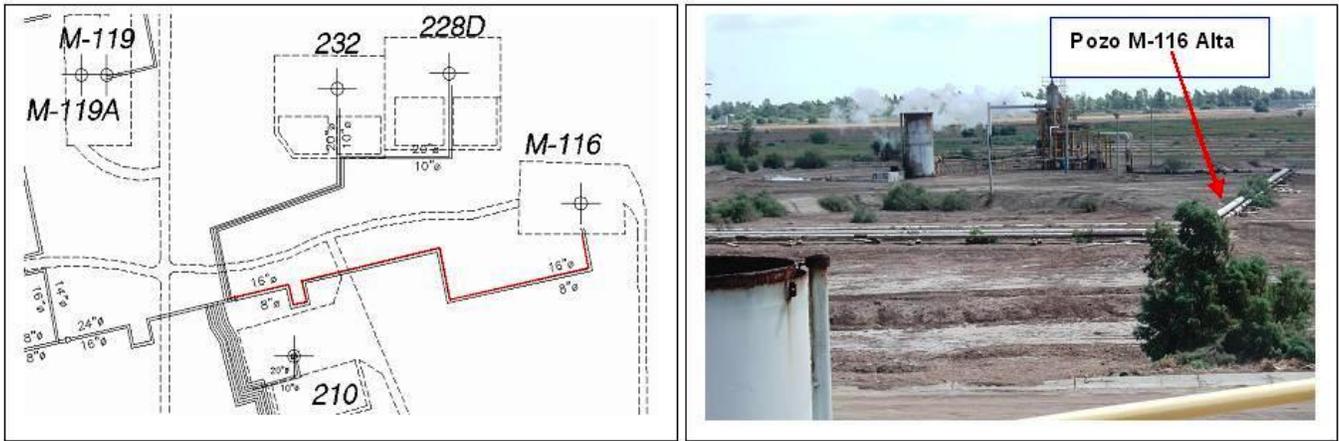
Para el coeficiente global de transferencia de calor se consideró la transferencia de calor a través de la pared del tubo y del aislamiento térmico. Se tomaron valores de las conductividades térmicas de los materiales involucrados en un rango promedio de temperaturas relacionadas con la operación de la red de vaporductos, estableciéndose un valor promedio para el coeficiente de transferencia de calor global de $1.5 \text{ W/m}^2\text{-K}$ para tubos completamente aislados térmicamente.

4. Descripción del simulador numérico *PIPEPHASE* y otros modelos

El simulador *PIPEPHASE* es un simulador de flujo multifásico en estado estacionario y permite simular pozos, tuberías y redes de tuberías, tanto para el transporte de hidrocarburos como de agua y vapor. Este simulador cuenta con una interfaz de usuario que facilita la construcción de modelos y el análisis de resultados, además de un módulo para optimización de flujo en redes de conducción de fluidos.

Otros simuladores aplicables a la modelación de flujo de vapor en redes de vaporductos geotérmicos incluyen:

- (a) RELAP, un modelo robusto para flujo de agua y vapor en plantas nucleares, el cual no ha sido probado para flujo en redes de tuberías ni cuenta con interfaz de usuario;
- (b) El modelo de la UNAM (Cruickshank *et al.*, 1990), limitado a flujo adiabático y poco probado;
- (c) SIR3S, un modelo para simulación de flujo en redes de agua, gas natural y vapor que posee una interfaz en idioma alemán;
- (d) SIM.SNET, una herramienta versátil para simular flujo de vapor y energía a través de una red de tuberías, accesorios, pozos y plantas de generación, que posee una interfaz gráfica para usuarios muy limitada y que ha sido probado en los campos geotérmicos de The Geysers, Kamojhang, y Japón (Hanano, 2005).



LINK NAME: M116S01R1DA										
PLANO: G 1-A, Rev. 0 "Plano General del Campo Geotérmico Heat Transfer: U-Value						From: Pozo M-116, Placa de Orificio To: Ramal 1 CPD (Alta Presión)				
Device Name	Data Entry	On ?	Length [m]	Cont. Angle	Bend Type	Nominal Size	Nom. Thick	DI, in	Schedule	Roughness
M-116	Source									
0001	Pipe		18.80			16	.375	15.25	30/STD	0.0018
0002	Bend				90 Elbow	16	.375	15.25	30/STD	0.0018
0003	Pipe		108.69			16	.375	15.25	30/STD	0.0018
0004	Bend				90 Elbow	16	.375	15.25	30/STD	0.0018
ACCESORIOS 0005 A 00015										
0015	Pipe		39.20			16	.375	15.25	30/STD	0.0018
0016	Valve			180	Gate Valve	16 - 300				
0018	Expansion		0.5			24				
0019	Pipe		3.7			24	.500	23.00	XS	0.0018
J001	Junction									

Fig. 2. Ejemplo de documentación de la información de la red de vaporductos de Cerro Prieto

5. Análisis y discusión de resultados

En esta sección se presentan resultados preliminares del modelo hidráulico de la red de vaporductos del campo geotérmico de CPT - Ramal 1 y CPC, usando el simulador numérico PIPEPHASE. La Figura 3 muestra esta parte de la red, así como la escala del Ramal 1 de Alta Presión de CPT, la cual tiene una longitud de 4073 m. Este ramal inicia del lado derecho de la figura y corre hacia la izquierda, hasta la planta generadora de CPT. Es alimentado por varios pozos en su inicio, y a una distancia de unos 400 m existe una interconexión compleja de tuberías con las tuberías de CPC. En esta interconexión, las Islas 1 y 2 de CPC alimentan vapor, de manera que de la interconexión se envía vapor hacia CPT y CPC. Después de esta interconexión, el Ramal 1 de Alta Presión de CPT continúa hasta que a unos 3200 m se encuentra con la Interconexión A que une a CPT con CPU. Mas adelante, el ramal continúa hasta alcanzar la entrada de la planta generadora de CPT.

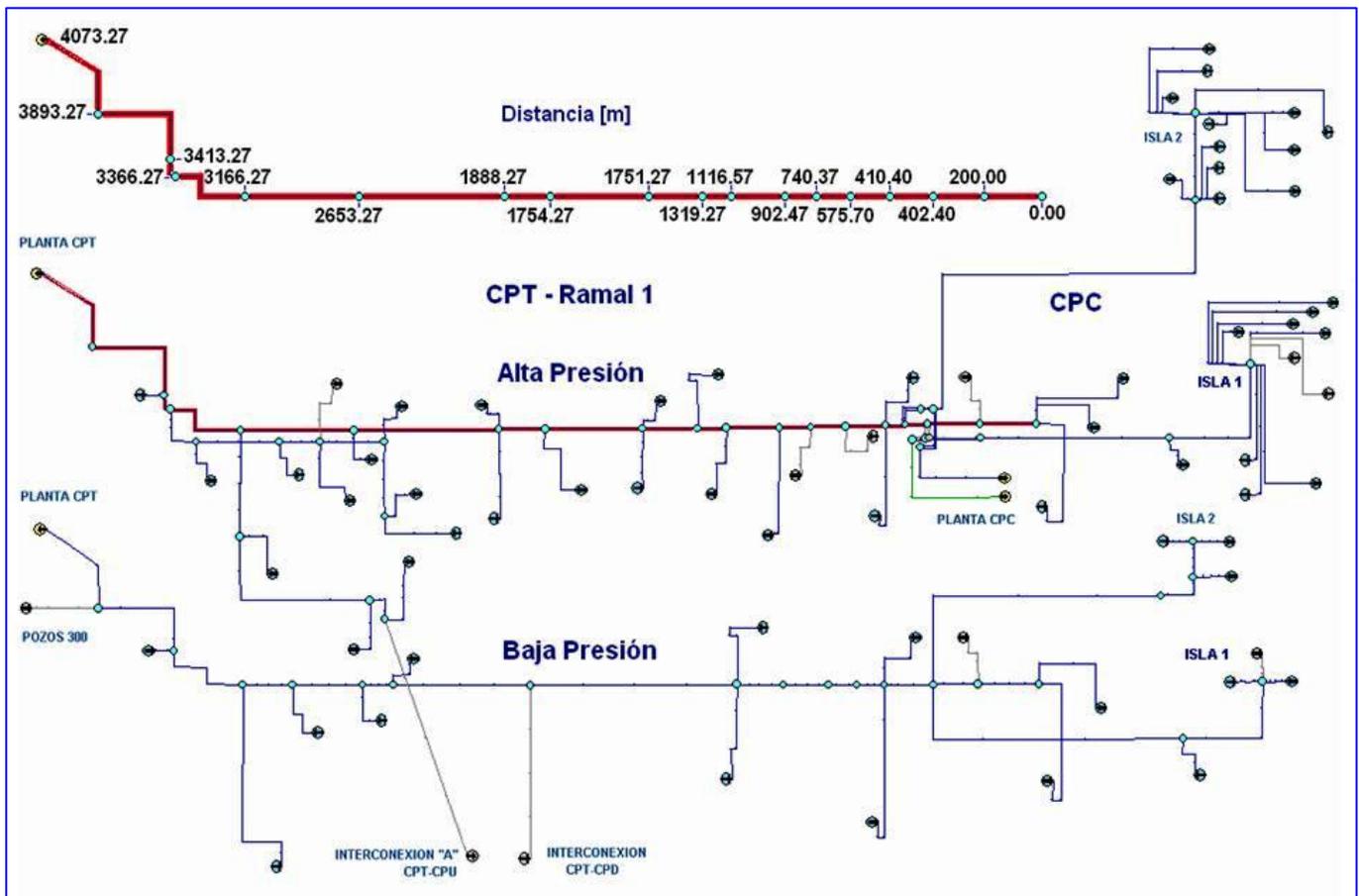


Fig. 3. Modelo hidráulico en PIPEPHASE de CPT Ramal 1 y CPC, Alta y Baja Presión

La Figura 4 muestra la caída de presión y temperatura del Ramal 1 de Alta Presión de CPT. Al inicio del ramal, la presión alcanza unas 195 psig y empieza a decrecer al aumentar la distancia. Sin embargo, la presión decrece muy rápidamente a una distancia de unos 400 m, y cerca de los 1000 m alcanza unas 186 psig. Después la presión empieza a recuperarse y aumenta hasta 190 psig y de allí en adelante, decrece en forma más o menos lineal.

La fuerte disminución de presión cerca de la interconexión con los ductos de CPC (400 m aproximadamente) parece estar asociada con la interacción del flujo de vapor proveniente de las Islas 1 y 2 de CPC. Esto contrasta con la leve disminución de presión en la interconexión de CPT con CPU (3200 m aproximadamente). Estos cambios de presión en las interconexiones parecen indicar que en la interconexión

de CPT con CPC, el flujo de vapor es alto y fluye predominantemente hacia CPC, mientras que en la interconexión con CPU, el flujo de vapor hacia CPU es bajo.

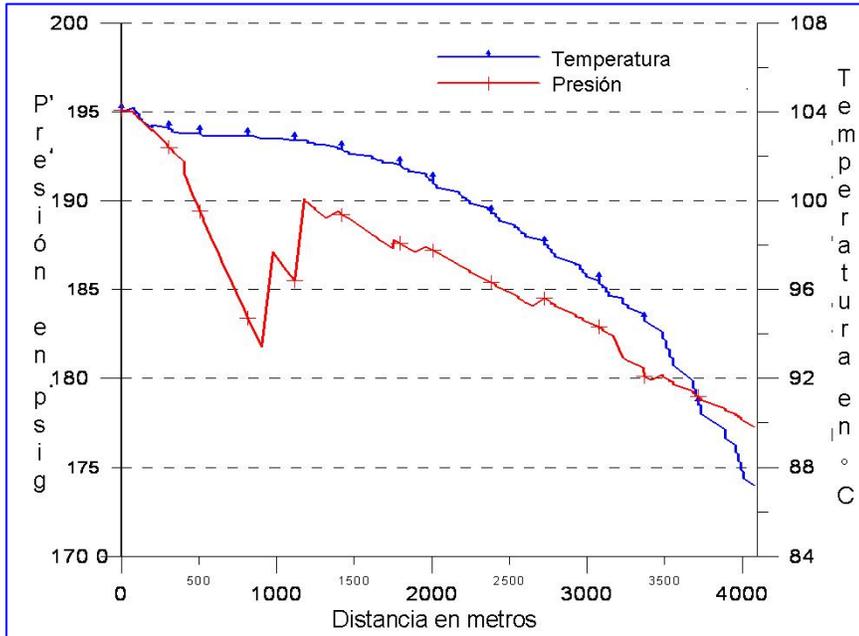


Fig. 4. Variación de la temperatura y la presión en el Ramal 1 de CPT

El perfil de temperaturas mostrado en la Figura 4 es un perfil bien comportado, asociado con una tubería relativamente bien aislada térmicamente, indicando una pérdida de calor normal, asociada al flujo del vapor a lo largo del ramal. La caída de temperatura alcanza 21°C en este ramal.

La figura 5 muestra la variación del flujo de vapor y condensado a lo largo del Ramal 1 de CPT. Se observa que los primeros tres pozos alimentan a este ramal con un flujo ligeramente superior a 100 toneladas por hora (t/h). De igual forma se observa un pequeño flujo de condensado a lo largo del ramal. El flujo de vapor se mantiene constante hasta que llega a un punto o nodo

donde se conecta otro pozo que alimenta vapor al ramal. Nótese que no todos los pozos mostrados aportan vapor y por ello el flujo de vapor aparece constante en diversos tramos. Los pozos mostrados que no aportan vapor son pozos incluidos en el modelo porque en un futuro cercano dichos pozos serán integrados a la red.

El flujo de vapor que entra al inicio del ramal se mantiene prácticamente constante hasta unos 400 m, y allí el flujo cae bruscamente debido a que este vapor es arrastrado hacia CPC a través de la interconexión mostrada en la Figura 3. De allí en adelante, el flujo de vapor sigue aumentando, hasta llegar a la planta generadora de CPT a los 4073 m, a donde llega con un gasto de más de 500 t/h. Es conveniente hacer notar dos partes donde la curva de flujo de vapor es horizontal, entre 500 y 1000 m, y entre 1500 y 2000 m, debido a que a los pozos conectados en esos tramos no aportan vapor.

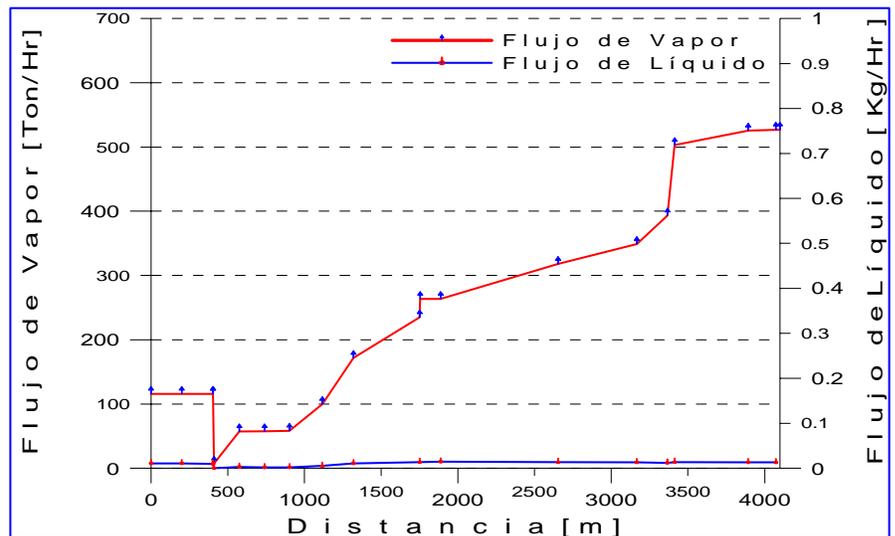


Fig. 5. Variación del flujo de vapor y condensado a lo largo del Ramal 1 de CPT

Finalmente, es de notarse que el flujo de condensado se mantiene relativamente constante a lo largo del ramal.

6. Conclusiones

Se ha presentado el desarrollo y documentación de un modelo hidráulico de la red de vaporductos del campo geotérmico de Cerro Prieto. También se presentaron resultados preliminares de simulación de flujo en el Ramal 1 de Alta Presión de CPT interactuando con el Ramal 1 de Baja Presión de CPT y con CPC, usando el simulador *PIPEPHASE*.

Posteriormente, la red completa será simulada usando el mismo simulador. El modelo de la red permitirá determinar el comportamiento global de la red mediante la cuantificación de las caídas de presión, flujos y sus direcciones, y las pérdidas de calor a través de cada uno de los componentes del sistema. Además, el modelo podrá ser usado para analizar el impacto de cambios en las condiciones de operación, variaciones locales y temporales en la producción de vapor, actividades de mantenimiento y cambios en el diseño como lo es la integración de nuevos pozos.

Los resultados obtenidos a la fecha son preliminares pero son indicativos de la alta complejidad del flujo en la red por la cantidad de pozos conectados, las características de la misma y las diversas interconexiones entre las diversas áreas del campo. Los resultados de simulación que se obtengan de la red, serán soportados con datos experimentales, con el fin de calibrar el modelo numérico y validar sus resultados.

Agradecimientos

Se agradece a las autoridades de la Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos, Residencia General de Cerro Prieto, y del Instituto de Investigaciones Eléctricas las facilidades brindadas para la publicación del presente trabajo.

Referencias

- Bettagli, N., and G. Bidini (1996). Larderello-Farinello-Valle Secolo geothermal area: Exergy analysis of the transportation network and of the electric power plants. *Geothermics*, Vol, 25, No. 1, pp. 3-16.
- Cruickshank, C., E. Ordóñez, y G. Castillo (1990). Modelo matemático de la red de vaporductos de la planta geotermoeléctrica de Cerro Prieto, UNAM, Informe del proyecto 9361. Inédito.
- Di Maria, F. (2000) Design and off design pipe network geothermal power plant analysis with power pipe simulator. *Energy Conversion and Management*, Vol. 41, pp. 1223-1235.
- Gutiérrez-Negrín, L.C.A., and J.L. Quijano-León (2005). Update on Geothermics in México. *Proceedings of the World Geothermal Congress 2005*, Antalya, Turkey. 10 pp.
- Hanano, M. (2005). Comunicación Personal.
- Huang, Y., and D.H. Freeston (1992). Non-linear modeling of a geothermal steam pipe network. *Proceedings of the 14th New Zealand Workshop*, pp. 105-110.
- Huang, Y., and D.H. Freeston (1993). Geothermal pipe network simulation sensitivity to pipe roughness. *Proceedings of the 15th New Zealand Geothermal Workshop*, pp. 253-258.
- Marconcini, R., and G. Neri (1979). Numerical simulation of a steam pipeline network, *Geothermics*, Vol. 7, pp. 17-27.

- Peña, J.M. (1986) Energy losses in horizontal steam lines. *Geothermal Resources Council Transactions*, Vol. 10, pp. 347-252.
- Peña, J.M. y H. Campbell (1988). Evaluación de las pérdidas de calor en líneas de vapor geotérmico, *Memorias, 3er. Congreso Latinoamericano de Transferencia de Calor y Materia*, Guanajuato, México, pp. 53-64.

Fracturamiento térmico del pozo H-40 del campo geotérmico de Los Humeros, Pue.

Magaly Flores Armenta¹ y Rigoberto Tovar Aguado²

Comisión Federal de Electricidad, Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos. ¹Departamento de Ingeniería de Yacimientos. ²Residencia de Los Humeros. Correo: magaly.flores@cfe.gob.mx

Resumen

El pozo H-40 se perforó con objetivos de producción en 1997. Sin embargo, el pozo resultó incapaz de mantenerse fluyendo. Después de un periodo de monitoreo se evaluó su capacidad de aceptación para tratar de utilizarlo como pozo inyector, observándose que no aceptaba más de 5 toneladas por hora (t/h) de fluido. Por lo tanto, se decidió estimularlo mediante fracturamiento térmico con tres pruebas que se realizaron en octubre de 2005, lográndose que el pozo llegara a aceptar hasta 110 t/h, lo que permitirá que el pozo pueda ser usado como inyector.

Palabras clave: Los Humeros, fracturamiento térmico, pruebas de inyección, estimulación de pozos.

Thermal fracturing of the well H-40, Los Humeros, Pue., geothermal field

Abstract

Well H-40 was drilled for production in 1997, but the well was not able to sustain flow. After it was monitored to assess its injection capacity, the well was changed to an injection well, but the well did not accept more than 5 tons of fluid per hour (t/h). The well was stimulated by thermal fracturing in three tests made in October 2005. As a result, the well can accept up to 110t/h and can be used as an injection well.

Keywords: Los Humeros, thermal fracturing, injection tests, well stimulation.

1. Introducción

El pozo H-40 está localizado en la parte central del campo geotérmico de Los Humeros, Pue., a una altitud de 2795 msnm. Se perforó en 1997 con objetivos de producción.

Es un pozo direccional cuya profundidad programada originalmente era de 2250 m. Sin embargo, se presentaron problemas de atrapamiento de la sarta de perforación a los 2226 m, quedándose un pescado cuya boca se encuentra a los 2128 m. Por lo tanto, se decidió terminar el pozo a esa profundidad, colgándose el liner ranurado entre los 1600 y los 2127 m de profundidad. Su croquis de terminación, diámetros de agujero y tuberías de revestimiento se presentan en la Figura 1.

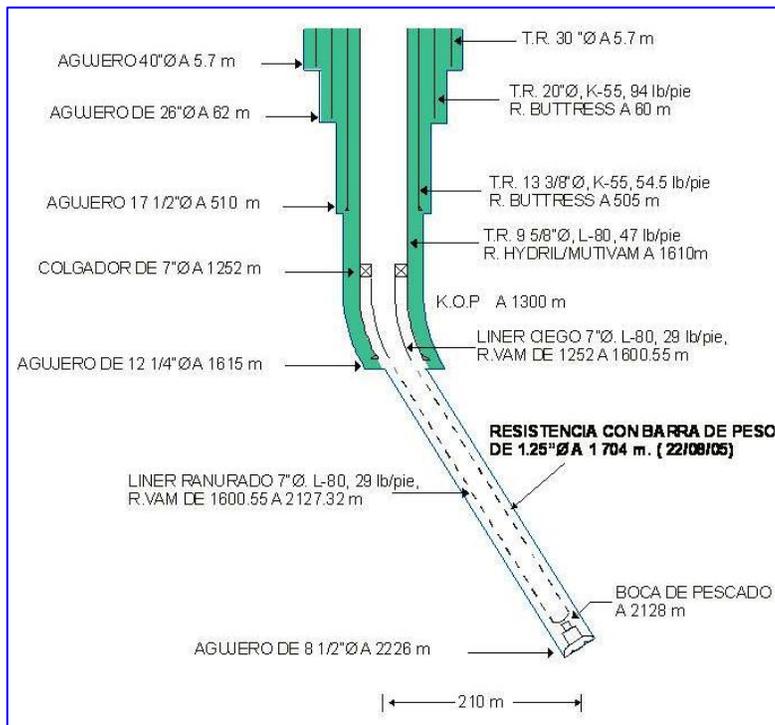


Fig. 1. Croquis de terminación del pozo H-40

orificios, pero sólo por periodos cortos, dejando de fluir después.

Debido a que no se presentaron condiciones favorables de producción, en enero de 1999 se instaló una cámara para monitorear la presión del yacimiento, la cual quedó a 1700 m de profundidad. La cámara se mantuvo hasta febrero de 2001, encontrándose la presión del yacimiento entre 1300 y 1260 psia, mientras que la presión de cabezal estuvo entre 5 y 6 psig durante ese periodo.

Una vez que se retiró la cámara de monitoreo, el pozo quedó abierto por línea de 1/2", fluyendo a través de ella una muy pequeña columna de vapor. Se decidió entonces intentar el fracturamiento térmico.

2. Fracturamiento térmico

El programa de fracturamiento térmico se elaboró de acuerdo a los procedimientos utilizados en el campo geotérmico de Krafla, Islandia (Palsson, 2004) y en el de Bouillante, Francia (Sanjuán *et al.*, 2000). En términos generales, el procedimiento consiste en inyectar durante tres horas el gasto que acepte el pozo, de preferencia mediante bombeo con presiones de cabezal de entre 10 y 20 bar. Al término de ese tiempo se suspende la inyección, se cierra el pozo y se espera 8 horas con el pozo en reposo. Se repite la secuencia anterior durante tres días, monitoreando continuamente la inyectividad en el pozo (Flores, 2004).

Siguiendo un procedimiento similar al mencionado, el 13 de julio de 2005 se inició la inyección de fluido geotérmico por gravedad con un gasto inicial de 5 t/h, el cual se fue incrementando poco a poco observando derrames en cada incremento de gasto. El 17 de julio se realizó la primera etapa de recuperación del pozo, suspendiéndose la inyección durante 72 horas y monitoreando la presión a 1700 m de profundidad. Del 20 al 25 de julio se reinició la etapa de inyección con un máximo de 35 t/h y se suspendió para recuperación térmica el 27 de julio. Se realizaron pruebas similares del 7 al 10 de octubre, del 12 al 13 y del 17 al 18 de octubre de 2005. Al finalizar el tratamiento de estimulación térmica, el pozo alcanzó una aceptación de hasta

La columna litológica atravesada por el pozo se presenta en la Figura 3, donde también se pueden ver los registros de temperatura corridos durante la perforación. Mediante ellos se identificaron tres zonas con probable aporte de fluidos: la primera de 1610 a 1720 m, la segunda de 1770 a 1870 m y la tercera de 1960 a 2120 m. Además se identificaron pérdidas de circulación desde 10 hasta 26 m³/h a partir de los 1639 m de profundidad (Fig. 2).

Los resultados que se obtuvieron durante la perforación sugerían que el pozo sería un buen productor. Sin embargo, durante la etapa de calentamiento el pozo no manifestó presión en el cabezal y, de acuerdo a los registros de presión y temperatura, el fluido se encontraba lejos de las condiciones de saturación. Por ello se intentó inducir la producción mediante la inyección de aire con aproximadamente 800 psig de presión; eso permitía el flujo del pozo por diferentes

110 t/h, que fue la cantidad máxima con la que pudo probarse debido a la capacidad de la línea usada durante la prueba.

Durante los trabajos de fracturamiento térmico se realizaron tres pruebas transitorias de presión a fin de evaluar el producto de la permeabilidad por el espesor (kh) y el factor de daño del pozo, a medida que se iban desarrollando esos trabajos. En todas las pruebas la profundidad de monitoreo fue 1700 m.

3. Pruebas transitorias de presión

La primera prueba se efectuó del 7 al 10 de octubre de 2005. En esta prueba el pozo aceptaba un flujo máximo de 60 t/h y se mantuvo este ritmo de inyección durante 50 minutos, aproximadamente, para monitorear el comportamiento de la presión al suspender la inyección (prueba de recuperación) durante 72 horas.

La Figura 3 muestra el comportamiento de la presión de fondo durante la prueba. Se observa que al inyectar 60 t/h de fluido geotérmico la presión se incrementa a 130 bar y al liberarla se tiene una caída de presión de 40 bar. Los datos obtenidos fueron analizados con técnicas estándar para pruebas de presión utilizando el software comercial Pansystem™.

La etapa de diagnóstico de la prueba utilizó la técnica de la derivada para la identificación de la zona de flujo radial. La zona de flujo radial se analizó con la técnica semilogarítmica (Fig. 4) y posteriormente se confirmaron los resultados obtenidos mediante la técnica de ajuste de curvas tipo (Fig. 5) y mediante la simulación numérica de la prueba (Fig. 6). El producto kh obtenido resulta ser de 1.2 Dm y el factor de daño de 1.23.

La segunda prueba se efectuó del 12 al 13 de octubre de 2005. Ya para esta prueba el pozo incrementó su aceptación a 83.4 t/h de fluido geotérmico. Se mantuvo este ritmo de inyección durante 6 horas antes de suspender el gasto y se continuó el monitoreo de la recuperación de la presión durante 25 horas adicionales. La Figura 7 muestra el comportamiento de la presión de fondo durante la prueba.

En esta segunda prueba la presión durante la etapa de inyección llegó a un máximo de 130 bar que fue disminuyendo a 120 bar hacia el final de la inyección sin modificación del gasto. Al suspender la inyección se observó una caída de presión de 40 bar. Para esta prueba el producto kh resultó de 3.5 Dm y el factor de daño de 6.8.

Finalmente, se llevó a cabo una tercera prueba entre el 17 y 18 de octubre de 2005. En esta ocasión el pozo aceptó un flujo promedio máximo de 108 t/h de fluido geotérmico. Se mantuvo este ritmo de inyección

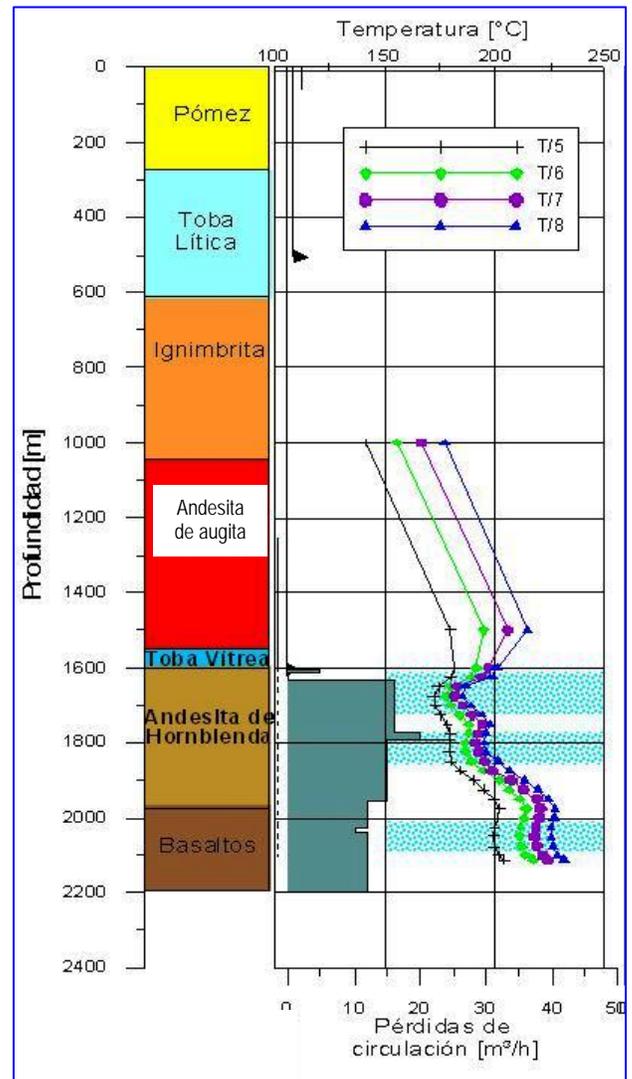


Fig. 2. Columna litológica, registros de temperatura y pérdidas de circulación durante la perforación del pozo H-40

durante 4 horas antes de suspender el gasto y se continuó el monitoreo de la recuperación de la presión durante 24 horas adicionales. La Figura 8 muestra el comportamiento de la presión de fondo durante la prueba.

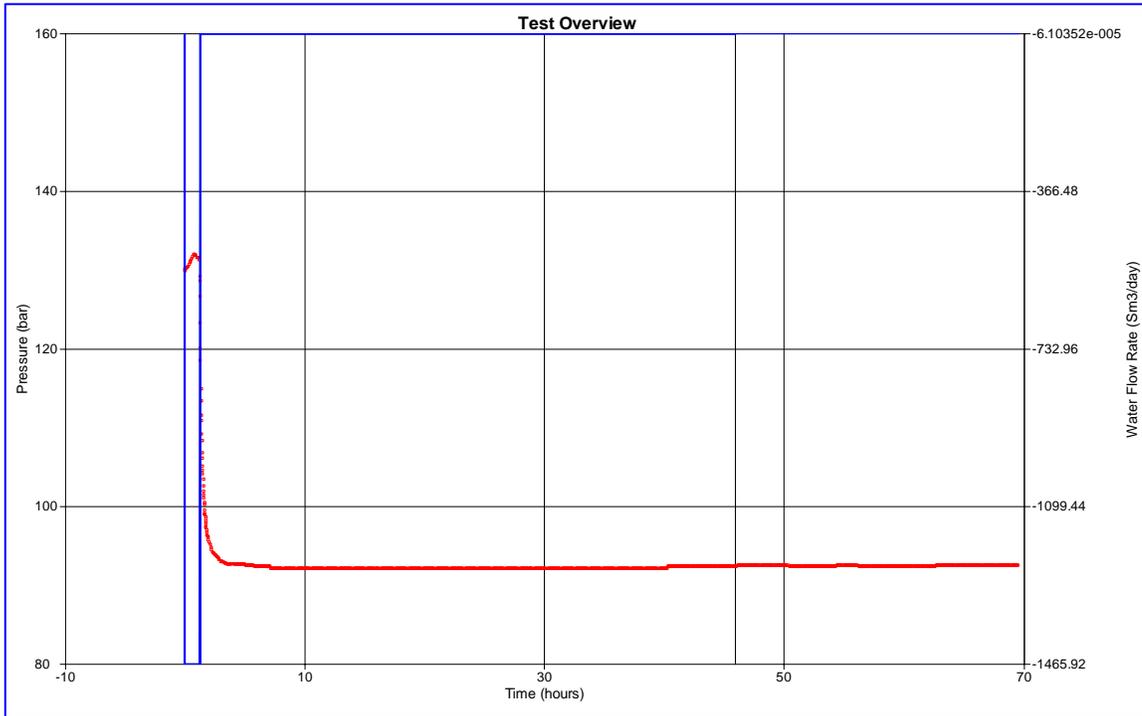


Fig. 3. Primera prueba transitoria de presión

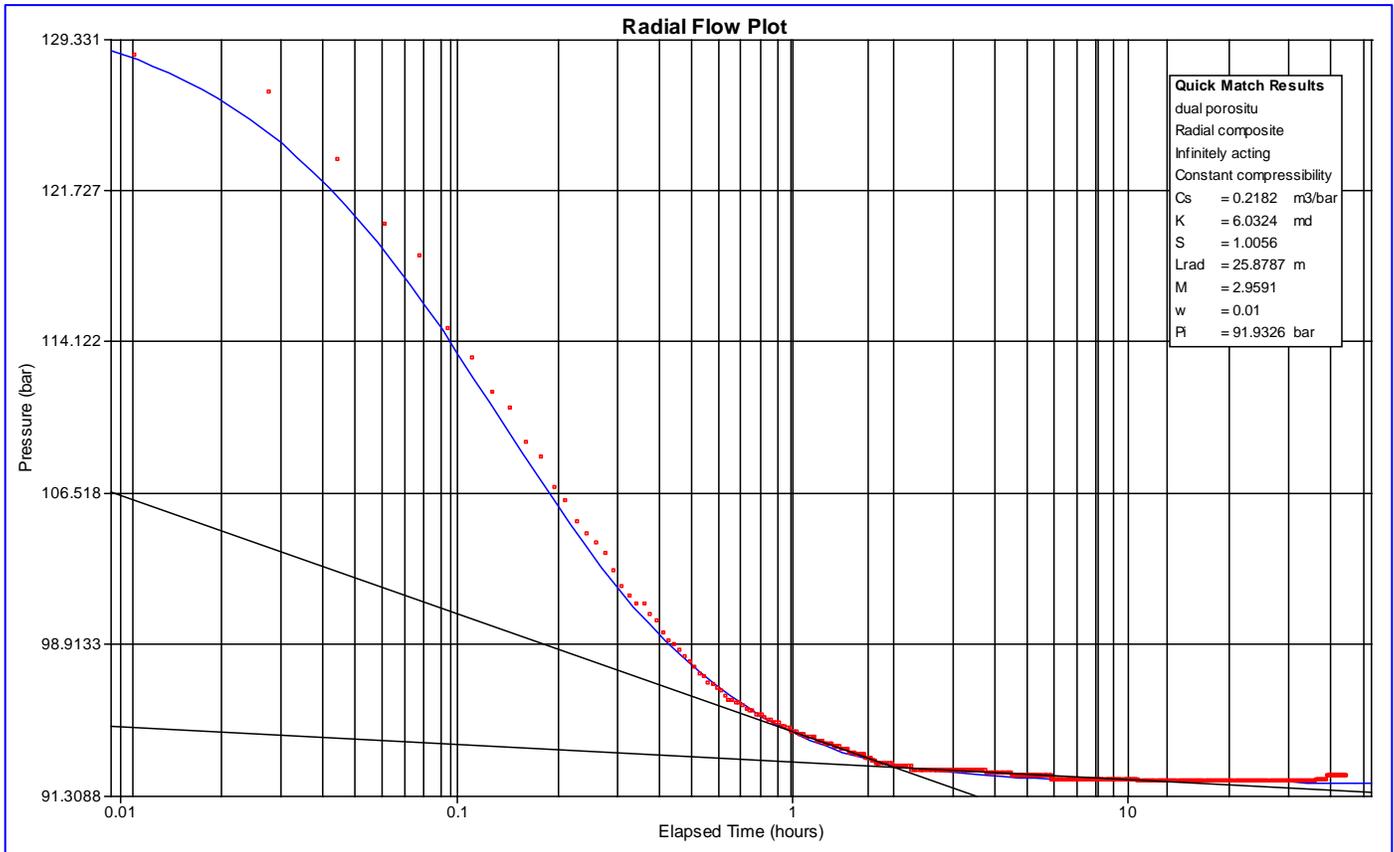


Fig. 4. Análisis del flujo radial en la primera prueba transitoria de presión

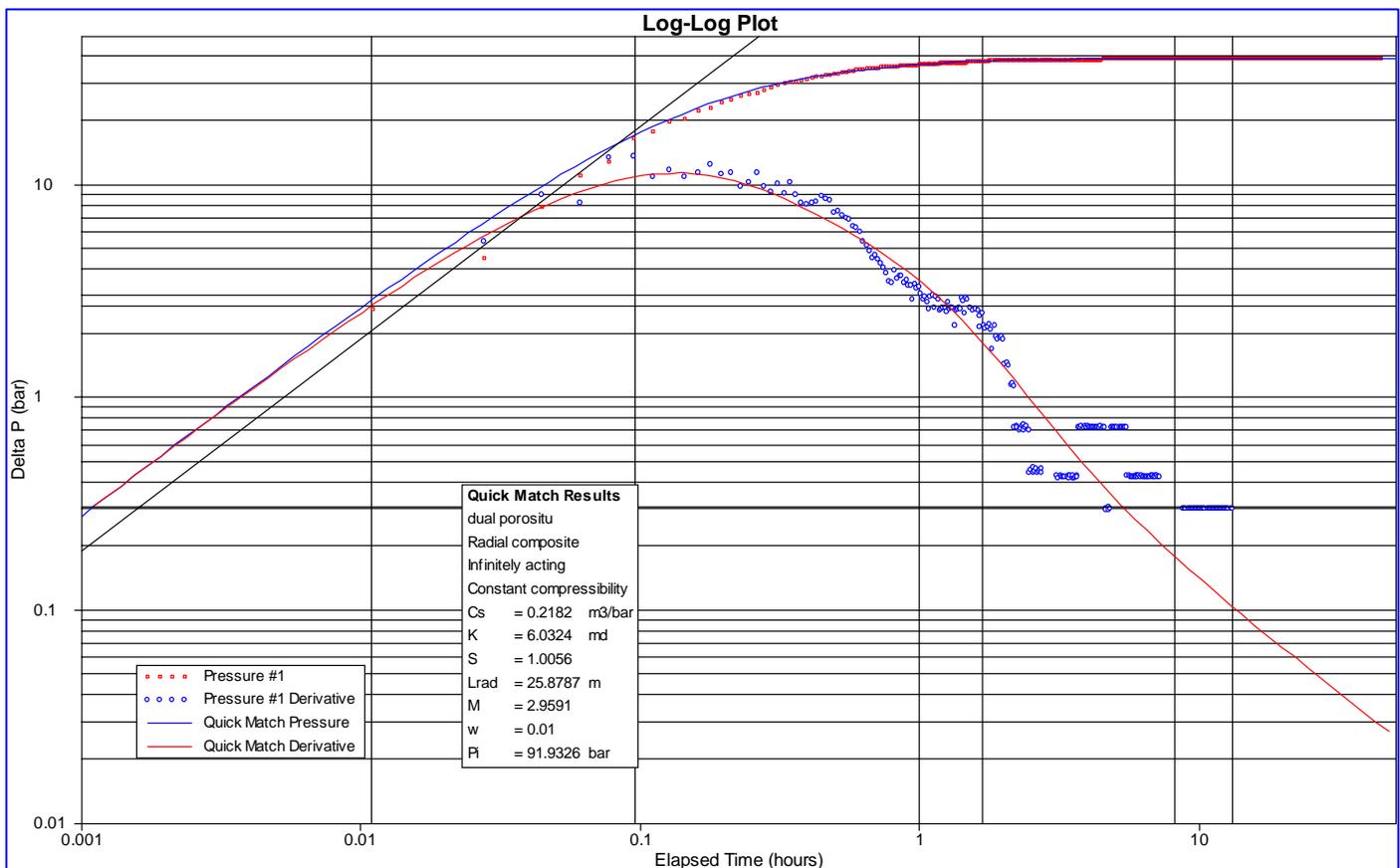
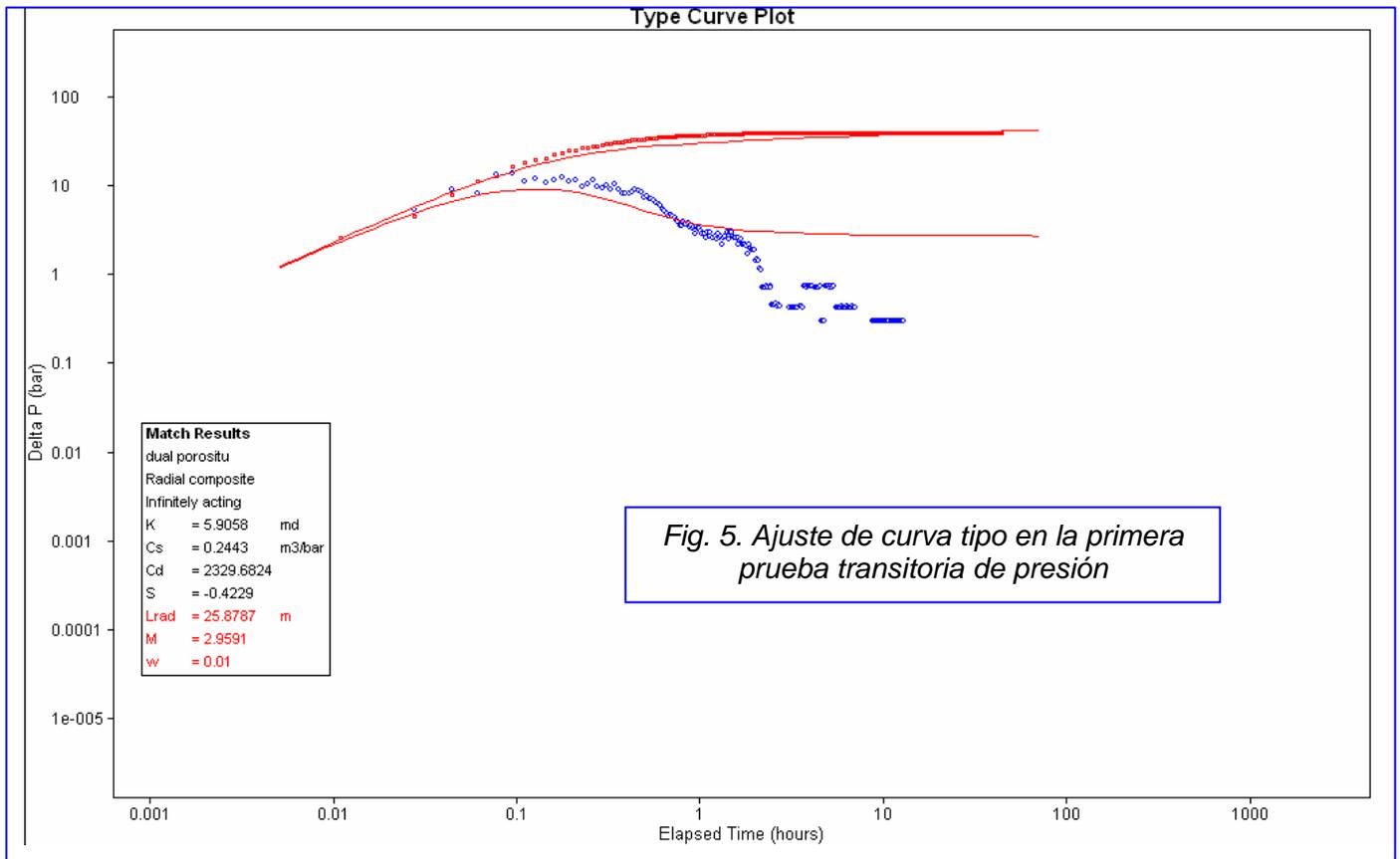


Fig. 6. Simulación numérica de la primera prueba

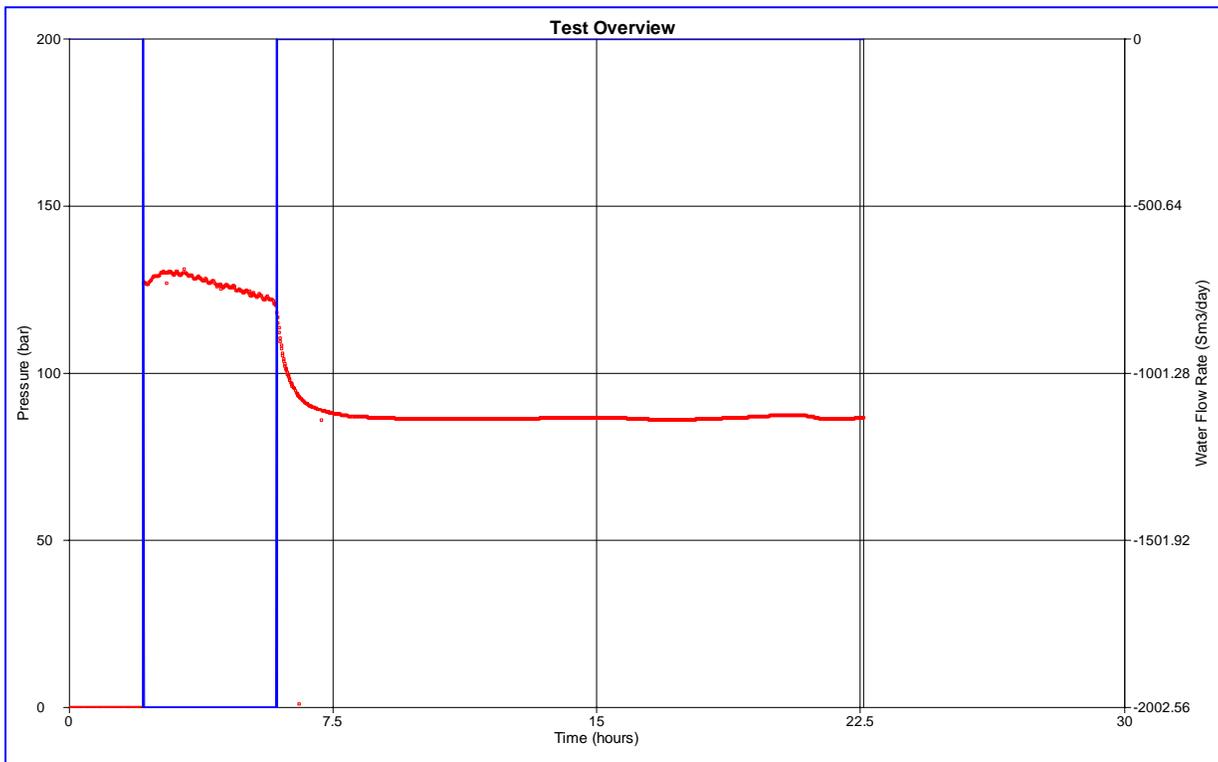


Fig. 7. Segunda prueba transitoria de presión

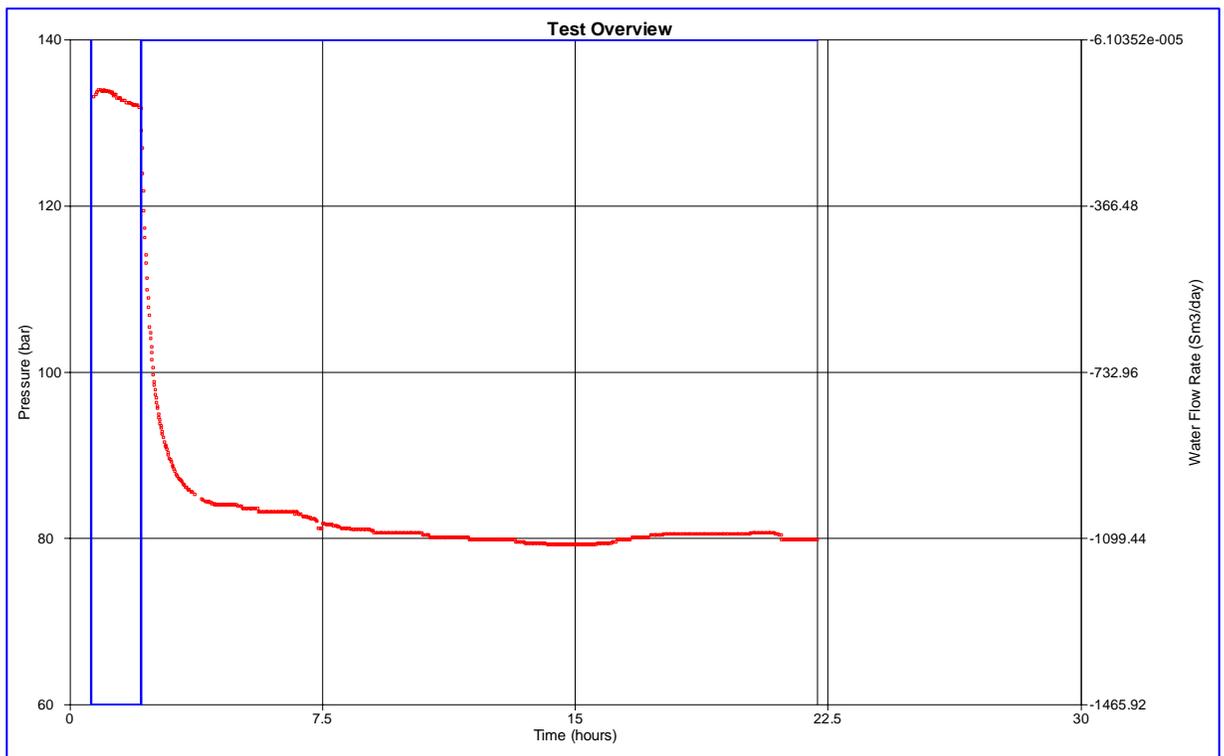


Fig. 8. Tercera prueba transitoria de presión

En esta tercera prueba la presión durante la etapa de inyección llegó a un máximo de 132 bar. Al suspender la inyección se observó una caída de presión de 55 bar. El producto kh resultó de 7.6 y la derivada muestra la “firma” característica de un yacimiento fracturado o de doble porosidad, que no se había manifestado en las primeras etapas de la prueba (Fig. 9).

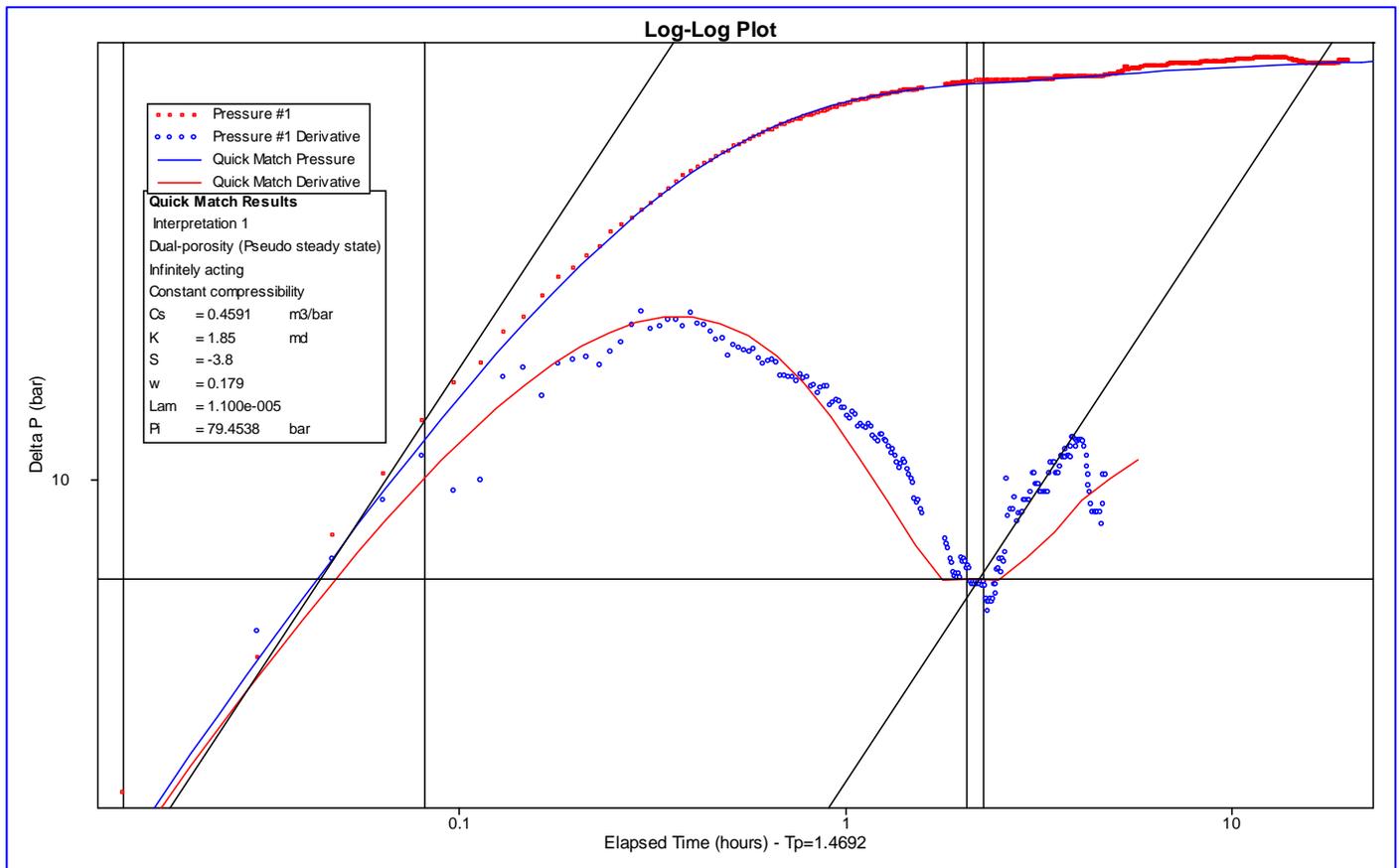


Fig. 9. Simulación numérica de la tercera prueba transitoria de presión

4. Discusión de resultados

El comportamiento típico de una prueba de inyectividad es que mientras mayor sea el gasto inyectado mayor es la presión que se registra a la profundidad de la prueba, y al suspender la inyección en todos los casos se alcanza la misma presión después de un tiempo de reposo que permita que se equilibre la presión del yacimiento con la presión del pozo. Cuando se provoca un fracturamiento en las rocas de la formación ese comportamiento es diferente. A medida que se fractura la roca se van obteniendo presiones diferentes, si las nuevas fracturas se comunican hacia una fractura mayor conectada con el yacimiento principal, hasta alcanzar la presión típica del yacimiento.

Cuando se inició el tratamiento de fracturamiento térmico, el pozo H-40 no aceptaba más de 5 t/h de fluido geotérmico y comenzaba a derramarse en superficie. Al continuar con el tratamiento, la capacidad de aceptación del pozo se incrementó gradualmente hasta alcanzar las 110 t/h de fluido geotérmico. Al inicio del tratamiento, el pozo no manifestaba temperatura en el cabezal. Al finalizar, el cabezal mostraba cierto calentamiento.

La Figura 10 muestra el comportamiento de la presión de yacimiento medida a 1700 m de profundidad en el pozo H-40 durante las tres pruebas efectuadas. En ella se observa con relativa facilidad cómo fue disminuyendo la presión estática del pozo a medida que este comenzó a aceptar más flujo. Esto es un indicio de que con el tratamiento fueron abriéndose conductos que comunicaron a los fluidos inyectados con el yacimiento originalmente “menos conectado”.

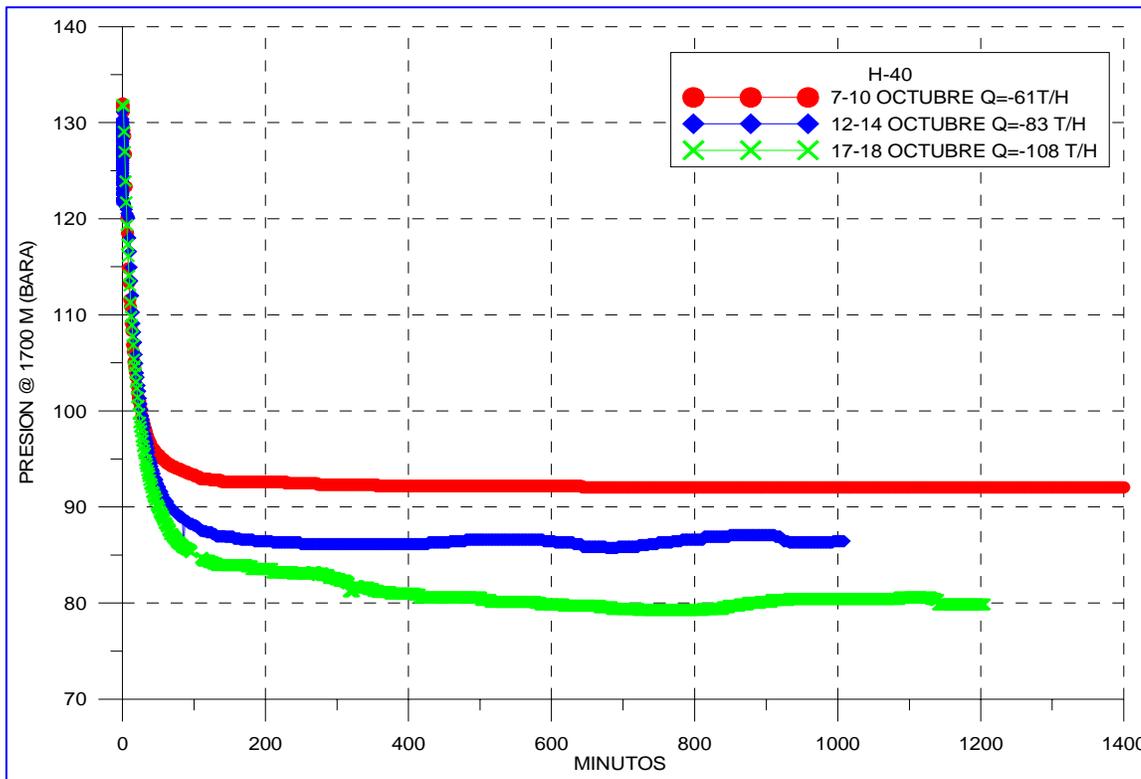


Fig. 10.
Comportamiento
de la presión de
yacimiento en
las tres pruebas
transitorias

Los principales datos y resultados de las tres pruebas de mencionadas anteriormente se presentan en la Tabla 1.

Fecha	Gasto inyectado (t/h)	Nivel Estático (m)	kh (mD-m)	Factor de Daño	Radio de Inv. (m)	Modelo
7-10/X/05	61	780	1224	1.23	433	Radial Compuesto
12-14/X/05	83	837	3545	6.8	450	Radial Homogéneo
17-18/X/05	108	902	396	-3.41	165	Doble Porosidad

Tabla 1. Datos y resultados de las tres pruebas transitorias de presión realizadas en el pozo H-40

Como se observa, el nivel estático del pozo fue variando de 780 m, a 837 m y a 902 m de profundidad. Es decir, a consecuencia del tratamiento de estimulación el nivel estático del pozo disminuyó 122 metros. Es importante mencionar que el nivel estático en los pozos productores de Los Humeros es muy variable y se localiza entre 200 y 600 m de profundidad, dependiendo de la zona. En el caso del pozo H-40, el último registro de presión indica que el nivel estático antes de estas pruebas se localizaba a 400 m de profundidad (P/17 del 21 de enero 2001). Las presiones registradas durante las etapas de recuperación de las pruebas de fracturamiento térmico, que son mucho menores que la presión estática registrada antes de las mismas, indican que el pozo se comunicó con otro sector del yacimiento o bien que el pozo se estimuló durante estas pruebas.

Es conveniente resaltar que el valor de kh obtenido en la tercera prueba es menor que en las dos primeras pruebas (Tabla 1). Esto se debe a que en un modelo de doble porosidad se obtienen dos valores de permeabilidad: uno para la fractura y otro para la matriz y se obtienen además los parámetros que correlacionan el flujo entre ambos (w y l). El valor aquí obtenido corresponde a la permeabilidad de la fractura y no es válido compararlo con el kh obtenido en las pruebas previas.

Posteriormente a las pruebas de fracturamiento térmico, el pozo se puso en etapa de calentamiento, sin que a la fecha se manifieste presión de cabezal. Sin embargo, si el pozo no logra inducirse para utilizarse como pozo productor, se empleará como pozo inyector para aprovechar el incremento logrado en su capacidad de aceptación de fluido.

5. Conclusiones

El tratamiento de estimulación por medio de fracturamiento térmico realizado entre los meses de julio y octubre de 2005 en el pozo H-40 muestra resultados positivos. Al incrementarse el gasto inyectado pudo observarse la disminución de la presión estática en el pozo. Esto sugiere que con el tratamiento fueron “abriéndose” conductos que comunicaron los fluidos inyectados con el yacimiento originalmente “menos conectado”. Lo anterior se corroboró mediante el análisis de las pruebas transitorias de presión, que muestran una mejoría en términos generales en la transmisibilidad de la formación y en el factor de daño del pozo.

Aunque por el momento el pozo no ha alcanzado condiciones de cabezal que permitan evaluarlo como pozo productor, en lo inmediato el tratamiento permitió aumentar la capacidad de inyección de 5 a cuando menos 110 t/h.

Referencias

Flores Armenta, M. (2004) Stimulation of Geothermal Wells. Tesis de maestría en Ingeniería Petrolera. Heriot Watt University, Scotland. Inédito.

Palsson, B. (2004) Comunicación personal.

Sanjuán, B., E. Lasne, and M. Branco (2000). Bouillante Geothermal Field (Guadalupe West Indies): Geochemical Monitoring During Thermal Stimulation Operation. *Proceedings of the 25th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*, Stanford University.

Condensadores para medir la calidad del vapor a la entrada de las turbinas a contrapresión del campo geotérmico de Los Azufres, Mich.

Fernando Sandoval Medina, Rubí González González, Lisette Reyes Delgado y Moisés Medina Martínez

Comisión Federal de Electricidad, Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos, Residencia de Los Azufres.
Correo: fernando.sandoval@cfe.gob.mx

Resumen

La conductividad eléctrica es una medida indirecta de la calidad del vapor que se suministra a las unidades turbogeneradoras. En el campo geotérmico de Los Azufres, Mich., la conductividad eléctrica se medía en forma puntual y periódica, condensando muestras de vapor por medio de un serpentín enfriado con agua. Después, ante la necesidad de medirla en forma continua, se instalaron conductivímetros en las descargas de las unidades, pero los valores resultaron muy inestables y poco representativos. Considerando, además, que la calidad del vapor debe medirse en el punto de entrega-recepción, se diseñaron y probaron equipos para condensar vapor de manera continua, lográndose construir un condensador enfriado por aire que logra condensar un flujo de 500 mililitros por minuto, cantidad suficiente para tener un flujo representativo del vapor que alimenta a las turbinas y medirle su conductividad eléctrica. Se instalaron estos equipos en las siete unidades turbogeneradoras a contrapresión que funcionan en el campo, y a la fecha operan en óptimas condiciones.

Palabras clave: Condensadores de vapor, conductividad eléctrica, calidad de vapor, Los Azufres.

Condensers for measuring steam quality at the inlet of back-pressure units of the Los Azufres, Mich., geothermal field

Abstract

Electrical conductivity is an indirect measurement of the quality of the steam supplied to power units. In the Los Azufres, Mich., geothermal field, the electrical conductivity once was measured in a discrete and periodic way by condensing steam samples through a water-cooled condenser. In an attempt to continuously measure conductivity, conductivity meters were installed where the units discharged, but the values proved unstable and unrepresentative. Thereafter, taking into account that steam quality should be measured at the steam delivery-reception point, equipment was designed and tested for continuously condensing steam. Finally it was possible to get an air-cooled condenser able to condense 500 mililiters per minute, enough to collect a representative flow of the steam and to measure its electrical conductivity. The equipment was installed in all seven back-pressure units operating in the field and to date has been operating in an optimal manner.

Keywords: Steam condensers, electric conductivity, steam quality, Los Azufres.

1. Introducción

La conductividad eléctrica (CE) de un fluido mide su capacidad para conducir una corriente eléctrica, y depende básicamente de su contenido de sales inorgánicas en solución (electrolitos). Los iones cargados positiva y negativamente son los que conducen la corriente, y la cantidad conducida depende del número y movilidad de los iones presentes. Es decir, en términos generales a mayor cantidad de sales disueltas, mayor será la conductividad. En el Sistema Internacional de Unidades de Medida la CE se expresa en microSiemens por centímetro ($\mu\text{S}/\text{cm}$).

En el proceso de suministro de vapor, la CE es un parámetro indicativo de la humedad o cantidad de agua que contiene el vapor que se entrega a las unidades turbogeneradores. Las unidades no pueden seguir operando si la humedad del vapor rebasa cierto límite máximo definido desde el diseño de la misma. Por lo tanto, medir esta humedad antes de la entrada a la turbina es una actividad muy importante para asegurar la calidad del vapor y la continuidad de la operación de los turbogeneradores.

La separación de las fases de agua y vapor del fluido geotérmico que se obtiene de los pozos se realiza por medios mecánicos en los separadores, lográndose generalmente una buena calidad de vapor. Si embargo, eventualmente puede haber arrastre de agua o condensación, lo cual aumenta la humedad y reduce así la calidad del vapor. Sabiendo que la CE típica de la salmuera geotérmica producida en el campo de Los Azufres es del orden de 10 mil $\mu\text{S}/\text{cm}$ en promedio, tales variaciones de humedad en el vapor pueden ser fácilmente detectadas midiendo la CE.



*Fig. 1. Equipo de medición de conductividad eléctrica
A la izquierda, analizador y registrador, y a la derecha
celda de conductividad fabricada en grafito.*

Por lo tanto, de tiempo atrás en el campo de Los Azufres se habían instalado medidores de la CE en los sitios donde existía un flujo continuo de vapor condensado. La CE se medía de forma puntual y periódica, condensando vapor por medio de un serpentín enfriado con agua antes de la entrada a la turbina. Después, ante la necesidad de medir la CE en forma continua, se instalaron equipos que constaban de un analizador de conductividad eléctrica, un registrador y una celda de grafito (Fig. 1). Estos equipos se instalaron en las descargas de las turbinas ya que era la única fuente existente de vapor condensado continuo, y la medición se hacía a condiciones atmosféricas.

Una vez en operación estos equipos, se observó que la celda de grafito se incrustaba continuamente, registrando valores de conductividad eléctrica erróneos. Además, su mantenimiento era ineficiente debido a que no se conseguía rehabilitarlas al 100 %, y se utilizaban soluciones ácidas para lavarlas por lo que las celdas de grafito eran prácticamente desechables.

Por ello, se decidió reemplazar los equipos por unos sensores cuyo uso resultara más idóneo al proceso de suministro de vapor. Estos fueron sensores de tipo toroide, fabricados en teflón, que resultaron mucho más eficientes ya que su limpieza es relativamente sencilla por requerirse sólo agua y jabón (Fig. 2).

Sin embargo, era necesario revisar diariamente los valores registrados en campo, ya que con frecuencia el registro se salía de la escala de la gráfica debido a que el sensor se iba incrustando con sólidos suspendidos que llevaba el vapor condensado. Estos sólidos eran principalmente material del silenciador (acero al carbón)

arrancado por la velocidad del vapor a la entrada, pero además productos del lavado de turbina en las unidades a contrapresión. Por lo tanto, se requería un mantenimiento continuo a los sensores, además de que el vapor debía condensarse en un serpentín enfriado con agua antes de entrar a la turbina, y no había suficiente disponibilidad de agua.

Así, se decidió escoger un equipo que resolviera de manera definitiva la problemática y que se pudiera instalar en el punto de entrega-recepción de vapor.

2. Selección de equipo

Se realizó una investigación de equipos existentes en el mercado capaces de condensar vapor con un flujo superior a los 450 ml/min. Se investigaron equipos enfriados con agua, equipos con refrigeración y equipos enfriados con aire.

Los equipos enfriados con agua se descartaron rápidamente debido a que el agua no es un recurso disponible en los sitios de medición. Los de refrigeración también se descartaron por su alto consumo de energía eléctrica y sus dimensiones no apropiadas a los lugares donde deberían instalarse.

Así, los equipos enfriados con aire son los presentaron características más adecuadas a las condiciones del lugar y resultaron ser la opción más factible. Además, las condiciones climáticas de Los Azufres son favorables para estos equipos, ya la temperatura ambiente media es de 11° C. Por lo tanto, lo único que se requería era encontrar la relación de intercambio entre el flujo de aire con respecto al área de la tubería necesaria para condensar el vapor requerido.

Se contactó a una compañía especializada en el diseño de condensadores enfriados con aire y se mandó diseñar un equipo bajo las especificaciones requeridas. Una vez fabricado el prototipo se pasó a la etapa de pruebas de campo.

3. Pruebas de campo

Se seleccionó a la Unidad 10, de 5 MW, para realizar las pruebas con el prototipo del equipo adquirido, ya que en esta unidad resultó más fácil adecuar las instalaciones. Sin embargo, al realizar diversas pruebas para encontrar las condiciones de presión y entrada de vapor para obtener el flujo requerido, se encontró que no se lograba el flujo si se operaba el equipo a las condiciones de diseño. Se modificaron las condiciones de presión y entrada de vapor, pero no se alcanzó el flujo necesario, por lo que se resolvió revisar el diseño.

Por otra parte, se contactó a otra empresa que realizó pruebas en campo para mejorar el diseño anterior en cuanto a dimensiones, material de la carcasa que cubre al serpentín, motor del ventilador y su eficiencia.

Después de afinar los detalles de diseño e instalación, se logró condensar vapor en forma continua y con un flujo superior a los 500 mililitros por minuto, cantidad suficiente para resultar representativa del vapor que



Fig. 2. Sensor de conductividad eléctrica tipo toroide, fabricado en teflón

alimenta a la turbina y para llevar un control continuo de su calidad o contenido de humedad mediante la medición de su CE.

El equipo (Fig. 3) está compuesto de un serpentín de tubería de acero inoxidable aletado (para evitar contaminación del vapor que se condensa), enfriado por medio de un ventilador-motor, un recipiente de acero inoxidable posterior al condensador, para homogenizar el flujo de vapor condensado, un manómetro para llevar un control del flujo de vapor que se está condensando, y la tubería de acero inoxidable que conduce el vapor hasta el lugar donde se ubica el sensor de CE (Fig. 4).



Fig. 3. Condensador de vapor enfriado por aire.

Actualmente se tienen instalados condensadores de este tipo en los puntos de entrega-recepción de las siete unidades turbogeneradoras a contrapresión y todos operan en óptimas condiciones. A más de un año de su operación continua no han requerido mantenimiento, y los registros de CE obtenidos son muy confiables para determinar la calidad del vapor que se entrega.

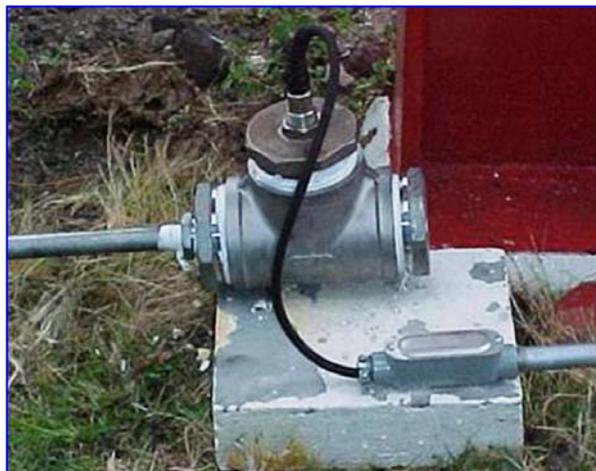


Fig. 4. Sensor de conductividad eléctrica

4. Conclusiones

- Los condensadores de vapor enfriados con aire resultaron ser los más eficientes.
 - Con ellos se logró obtener un flujo de vapor condensado en forma continua superior al mínimo requerido de 450 ml/min.
 - Las mediciones de conductividad eléctrica son más confiables y representativas de la calidad del vapor que se entrega a las unidades.
 - Se disminuye el tiempo destinado al monitoreo de esta variable.
- Se obtiene un registro continuo y constante de la conductividad eléctrica.
 - Al momento de escribir este artículo, el equipo finalmente fabricado llevaba operando un año continuo sin necesidad de mantenimiento.

- De esta manera se garantiza el cumplimiento de uno de los más importantes requisitos de calidad del vapor establecidos por el cliente.

Bibliografía consultada

ASTM (1996). *Standard Practice for Sampling Steam*. D:1066.

Sandoval Medina, F. (2000) Reportes bimestrales de conductividad eléctrica del vapor. Reportes internos de la Residencia de Los Azufres, CFE, varias fechas. Inédito.

Modificación del sistema de control de nivel de agua en la Unidad 12 del campo geotérmico de Los Azufres, Mich.

Raúl Tello Hinojosa, S. Ramón Aburto Huerta y Héctor M. Mendoza Covarrubias

Comisión Federal de Electricidad, Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos. E-mail: raul.tello@cfe.gob.mx

Resumen

La Unidad 12 del campo geotérmico de Los Azufres, Mich., es una unidad de ciclo binario de 1.45 MW, instalada en la plataforma del pozo productor Az-22. En esta plataforma hay dos separadores, uno de los cuales separa la mezcla extraída del pozo Az-22 y el otro la de varios pozos aledaños. El agua separada de ambos se concentra en un tanque horizontal y de éste pasa a la Unidad 12, mientras que el vapor se envía a la Unidad 7, de 50 MW. Por el tipo de arreglo original de flujo y control de nivel de agua en los equipos, ocurrían interferencias que provocaban que cuando la Unidad 12 se disparaba se afectara la generación en la Unidad 7. Para evitar esta interferencia se diseñó e instaló un sistema de control de agua en los separadores, independiente de la operación de la Unidad 12; mediante tanques en cada separador interconectados por medio de una tubería. La regulación del nivel de agua se logra por medio de tres válvulas motorizadas y sensores de nivel. Para asegurar la alimentación de energía eléctrica permanente a las válvulas, se instaló un sistema automático que permite el suministro con las líneas de transmisión de 23 ó 115 kV, y en caso de falla de ambas líneas se tiene una unidad ininterrumpible de energía (UPS). A principios de 2005 se puso en operación de nuevo la Unidad 12 con el sistema de control de nivel de agua modificado, y a la fecha ha venido operando satisfactoriamente, sin que los disparos en ella afecten a la Unidad 7.

Palabras clave: Control de nivel, ciclo binario, arreglo de flujo, válvulas, Los Azufres.

Modification of the water-level control system at the Unit 12 of the Los Azufres, Mich., geothermal field

Abstract

Unit 12 of the Los Azufres, Mich., geothermal field is a binary cycle unit of 1.45 MW, installed at the pad of production well Az-22. There are two separators on this pad. One separates the mix extracted from well Az-22 and the other from adjacent wells. The separated brine from both separators is gathered in a horizontal tank and sent to Unit 12. The steam is sent to Unit 7, which generates 50 MW. Once some interference occurred affecting the power generation of Unit 7 when Unit 12 was off line. This was caused by the original flow arrangement and water-level control system. To avoid interference, a water-level control system was designed and installed in the separators. The system operates independently of Unit 12, with tanks in each separator connected by a pipe. Regulation of the water level is accomplished by three motor valves and a level sensor. To ensure permanent feeding of electrical power to the valves, an automatic system was installed from transmission lines of 23 and 115 kV. In case both lines fail, there is an uninterrupted power supply (UPS) unit. At the beginning of 2005, Unit 12 was again online with a modified water-level control system that has operated satisfactorily since then. Its short periods offline have not affected Unit 7.

Keywords: Water-level control, binary cycle, flow-arrangement, valves, Los Azufres.

1. Introducción

La Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos de la CFE adquirió en 1992 dos unidades de ciclo binario de 1.45 MW cada una, enfriadas por aire, con el objeto de experimentar esta tecnología, y aprovechar la energía residual contenida en la salmuera geotérmica que se extrae del yacimiento.

Ambas unidades se instalaron en el campo geotérmico de Los Azufres, Mich., y una de ellas, identificada como Unidad 12, se ubicó en la plataforma del pozo productor Az-22. La unidad empezó a operar en febrero de 1994 y a la fecha ha generado más de 100 mil MWh. Para separar el agua del vapor se instalaron dos separadores en la misma plataforma del pozo Az-22. A uno de ellos llega la mezcla de este pozo y al otro la de diferentes pozos aledaños. El agua de ambos separadores se concentra en un tanque horizontal y de éste pasa a la Unidad 12, mientras que el vapor se envía a la Unidad 7, que es una unidad a condensación de 50 MW de capacidad, y la más grande instalada en ese campo hasta la fecha.

Sin embargo, por el tipo de arreglo de flujo y del sistema de control del nivel de agua en los equipos originales, ocurrían interferencias que provocaban que cuando la Unidad 12 se disparaba se afectara la generación en la Unidad 7, por la pérdida de vapor en las tuberías de descarga de agua al silenciador o por arrastre de agua en el vaporducto que va esa unidad. Por lo tanto, cuando eso ocurría la Unidad 7 debía ser enviada fuera de operación hasta resolver el problema en la Unidad 12, lo que hacía que un problema en una pequeña unidad dejara fuera de servicio a una unidad 35 veces mayor.

En enero de 2002 la Superintendencia de la Central Geotermoeléctrica de Los Azufres decidió sacar de operación a la Unidad 12, indicando que su funcionamiento “influye en la carga de la Unidad 7, al estar interconectados sus ramales de vapor y agua separada. La carga máxima que puede obtenerse de la Unidad 12 es de 0.9 MW (...) provocando en la Unidad 7 una caída de presión de vapor, que a su vez causa caída de potencia activa en esta unidad de hasta 1.5 MWh (...) adicionalmente es importante tomar en cuenta el riesgo que involucra para la Unidad 7 el atoramiento de válvulas de control de agua en la Unidad 12 durante algún disparo de unidad por cualquier motivo, lo cual puede provocar severos daños en la turbina de la U-7 por arrastre de agua...” La Superintendencia terminaba solicitando que se analizara “la posibilidad de reubicación de esta unidad generadora.” (Superintendencia, 2002).

Para evitar esa interferencia se diseñó un nuevo sistema de control de agua en los separadores, independiente de la operación de la planta. El objetivo de este trabajo es presentar la solución a esa interferencia y describir el sistema instalado, el cual puede aplicarse a unidades con un arreglo similar de tuberías y equipos para el manejo de vapor y agua.

2. Instalaciones originales

Siendo la Unidad 12 de ciclo binario, requiere agua o salmuera caliente para su funcionamiento. Para controlar y regular el suministro de agua a la Unidad 12, el arreglo original de equipos, tuberías y válvulas manuales y automáticas operaba de la manera siguiente.

En la plataforma del pozo Az-22 se tienen dos separadores centrífugos. A uno de ellos llega la mezcla obtenida de ese pozo y al otro la mezcla de los pozos aledaños Az-25, Az-35 y Az-62.

Una vez separado, el vapor de ambos separadores se concentra en una tubería común que se interconecta con el colector principal de suministro de vapor a la Unidad 7. Ambos separadores se encuentran comunicados en la parte superior por una tubería de 50 mm (2”) de diámetro.

Por su parte, el agua separada de ambos separadores se enviaba por tuberías independientes a un tanque horizontal común. Entre el tanque y los separadores se tenían válvulas manuales de corte.

Del tanque horizontal salía una tubería que se conectaba al evaporador de pentano. A su vez de esta tubería salían dos líneas que descargaban a un silenciador. Antes de la descarga al silenciador una de ellas tenía una válvula de control de 203 mm (8") de diámetro y la otra tubería una válvula de control de 152 mm (6") de diámetro, y antes de esta válvula de control había una derivación al silenciador, el cual contaba con una válvula de control de 101 mm (4") de diámetro. Estas válvulas eran controladas por la Unidad 12 y en caso de disparo la de 203 mm (8") de diámetro operaba como excedencia y las otras dos dependían del control de nivel de agua. Estas válvulas operaban totalmente abiertas o cerradas (Fig. 1).

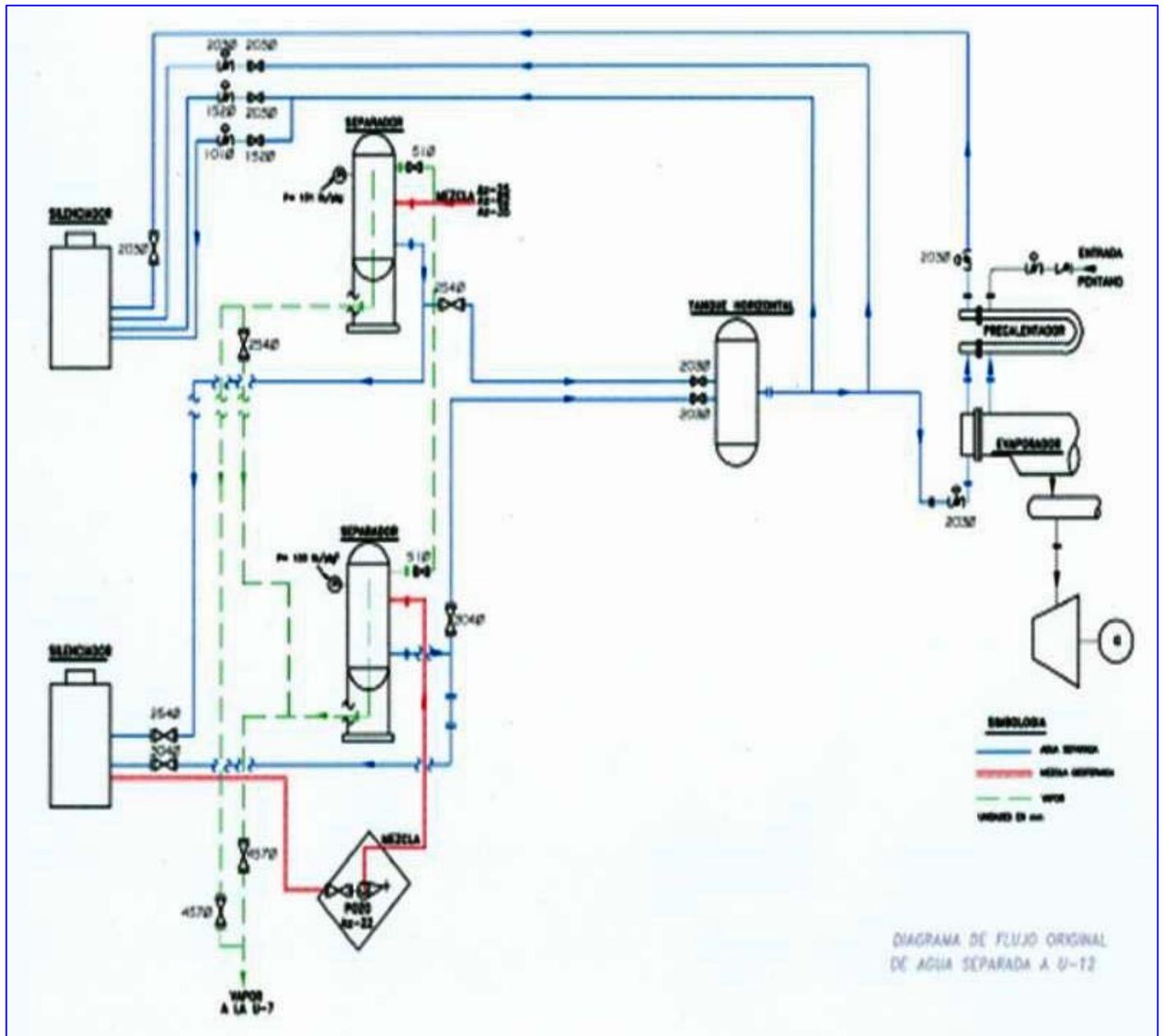


Fig. 1. Diagrama de flujo original en la plataforma del pozo Az-22

En la tubería que conecta el tanque horizontal con el evaporador había una válvula de control de 203 mm (8"), que permitía la entrada de agua al evaporador. Después del evaporador el agua pasaba al precalentador

y de este, por medio de una tubería, se enviaba a un silenciador. En esta tubería estaba instalada una válvula de control de 203 mm (8") de diámetro, que regulaba la entrada de agua a la planta. Ambas válvulas eran igualmente controladas con la Unidad 12.

El tanque horizontal tenía el control del nivel de agua por medio de sensores y transmisores que enviaban la señal de apertura o cierre a las válvulas automáticas que descargaban el agua al silenciador.

3. Modificación de las instalaciones

Para disminuir la posibilidad de arrastre de agua y evitar la interferencia en la generación de la U-7 se diseñó un sistema de control de agua en los separadores, independiente de la operación de la planta, que consistió en lo siguiente.

En la descarga de agua de cada separador se instaló un tanque vertical, comunicándose entre si en las partes inferior y superior por medio de tubería.

En uno de los dos tanques verticales se instalaron los sensores de nivel que envían la señal de apertura o cierre de las válvulas de control (Fig. 2).

Para la operación del sistema de control de nivel de agua, las válvulas podían ser del tipo electro-neumático o motorizado. Las de tipo electro-neumático requieren suministro de aire y de energía eléctrica, mientras que la motorizada sólo requiere suministro de energía eléctrica, de corriente directa y/o alterna.

Se decidió instalar válvulas motorizadas ya que la operación de una válvula electro-neumática depende del suministro de aire y el compresor disponible en el sitio opera con la Unidad 12. Por lo tanto, cuando esta está fuera de servicio, el compresor no opera, y las válvulas habrían quedado sin aire y sin control de nivel de agua. Nada de esto último ocurre con las válvulas motorizadas.

La válvula motorizada seleccionada fue del tipo *on-off*, con control automático, operador mecánico manual y un selector manual para arranque y paro del motor, de tal manera que el personal operativo puede abrir o cerrar la válvula y verificar las condiciones operativas de la misma. Durante la operación normal estas válvulas están controladas con los interruptores de nivel.

La fuente de energía eléctrica se tomó del interruptor de transferencia que tiene como fuente normal la línea de transmisión de 115 kV y como fuente de respaldo la línea de 23 kV, por lo que aunque se dispare la Unidad 12 sigue habiendo suministro de energía a las válvulas de control, sea que provenga de la línea de 23 o de 115 kV. De esta manera se asegura la confiabilidad del suministro de energía eléctrica a las válvulas de control y se minimiza la posibilidad de fallo.

Además, cada válvula tiene un sistema ininterrumpible de energía (UPS) con la finalidad de que a falta de energía eléctrica de 23 o 115 kV, estas puedan abrirse por completo y mantenerse en esa posición hasta el restablecimiento del suministro de energía eléctrica. Sin embargo, para evitar la apertura completa de las válvulas, por fallas no reales debidas a transitorios de la línea de 23 o 115 kV, se instalaron temporizadores escalonados para que la apertura de la válvula se realice tiempo después de que sucedió el transitorio.

En caso de que trascorra mucho tiempo antes de restablecer el suministro de energía eléctrica, para evitar la pérdida de vapor a través de la línea de agua, el personal operativo puede ajustar el nivel regulando las válvulas motorizadas en forma manual.

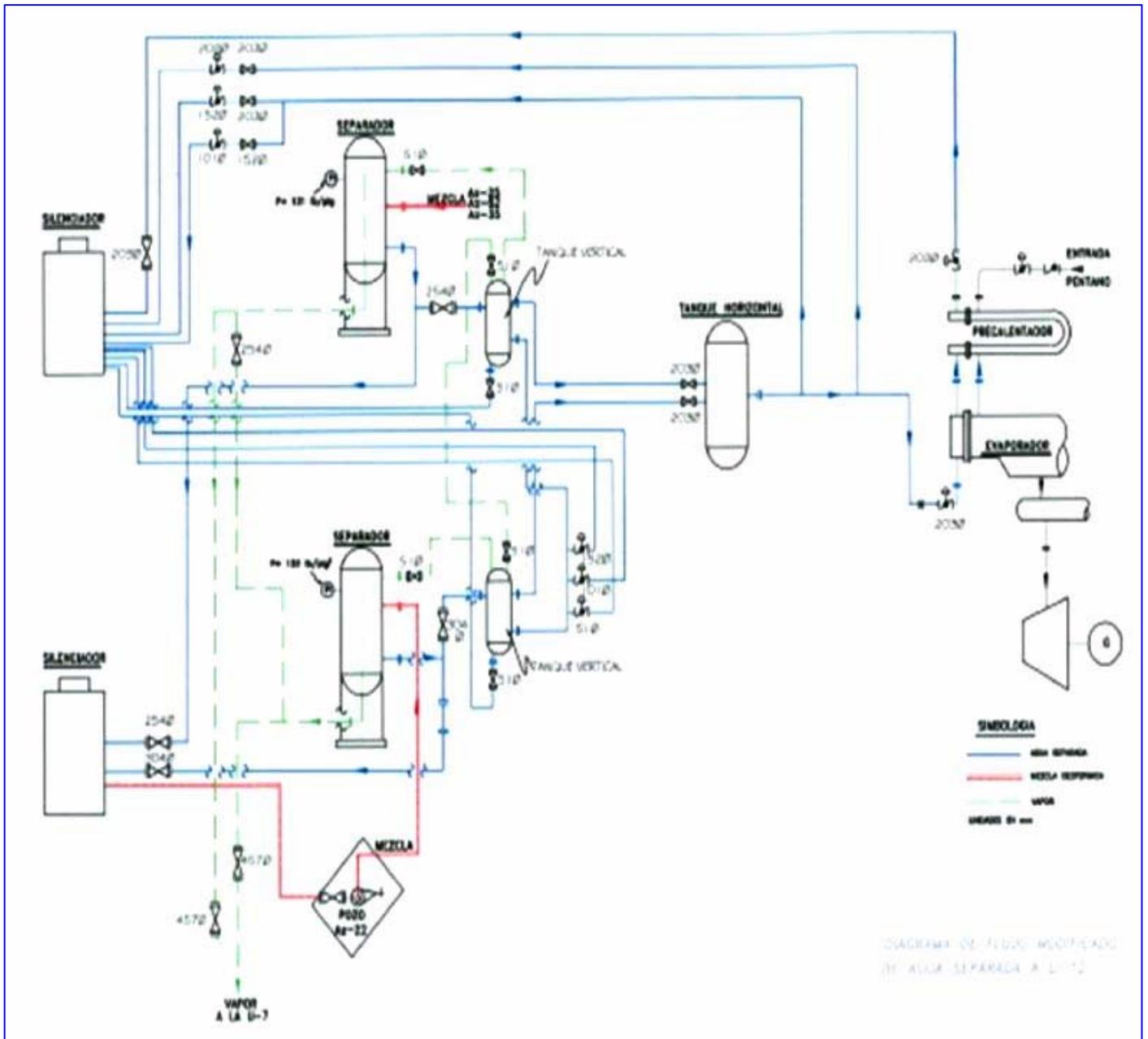


Fig. 2. Diagrama de flujo modificado en la plataforma del pozo Az-22

En la tubería inferior que comunica a los dos tanques verticales se instalaron válvulas de control motorizadas de 50 (2"), 101 (4") y 152 (6") mm de diámetro con suministro de energía de 115 kV.

4. Resultados

La modificación a las instalaciones de la Unidad 12 concluyó en septiembre de 2004, y en octubre de ese mismo año se iniciaron las pruebas de comportamiento del control de nivel, y la unidad volvió a entrar a operación. Hasta diciembre de 2005 la Unidad 12 ha acumulado unas 7500 horas en operación, habiendo salido de servicio por disparos, sin que se haya registrado arrastre de agua o interferencia con la Unidad 7 (Superintendencia, 2005).

En la Figura 3 se presentan las horas anuales y las horas en operación de la Unidad 12 desde su entrada en operación comercial hasta 2005, pudiendo notarse que en este último año ha logrado su mayor tiempo de operación anual.

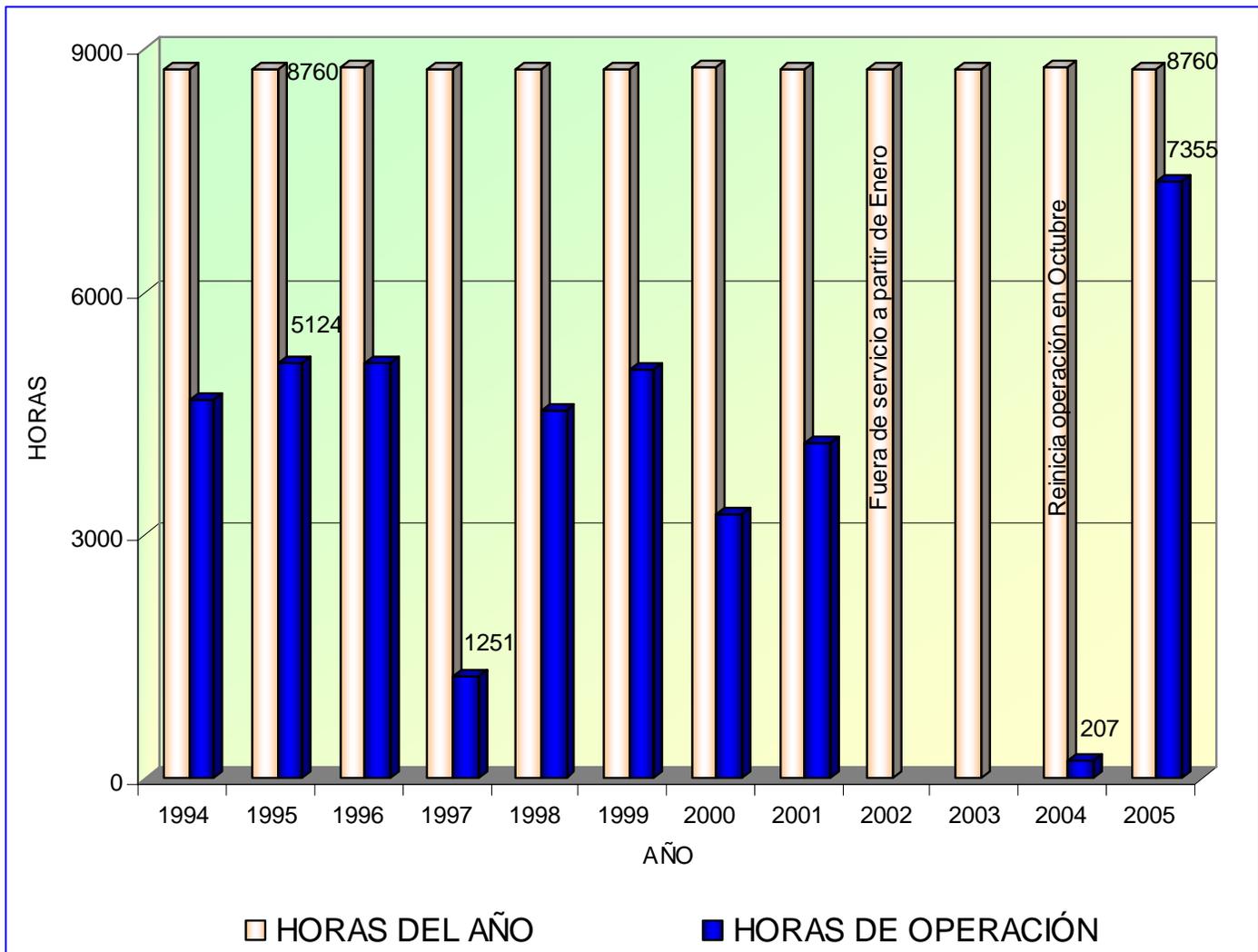


Fig. 3. Horas anuales en operación de la Unidad 12 a lo largo del tiempo

5. Conclusiones y recomendaciones

La modificación realizada en el sistema de control de nivel de la Unidad 12 ha logrado una mayor confiabilidad en su operación, reduciendo los periodos fuera de servicio y propiciand así un mejor aprovechamiento del recurso geotérmico.

La modificación también eliminó el problema principal de la interferencia con la operación de la Unidad 7.

Es recomendable realizar los mantenimientos necesarios a todo el equipo e instrumentación del sistema de control de nivel, para asegurar la confiabilidad de su operación.

Referencias

Superintendencia de la CG Los Azufres (2002). Historial operativo de las unidades Ormat de Los Azufres. Reportes internos de la CFE. Inédito.

Superintendencia de la CG Los Azufres (2005). Historial operativo de las unidades Ormat de Los Azufres. Reportes internos de la CFE. Inédito.

Control de incrustación en instalaciones superficiales del campo geotérmico de Las Tres Vírgenes, BCS

Ruth Tapia Salazar

Comisión Federal de Electricidad, Residencia de Las Tres Vírgenes

E-mail: ruth.tapia@cfe.gob.mx

Resumen

Uno de los problemas más importantes en el campo geotérmico de Las Tres Vírgenes es la incrustación por sílice, la cual afecta no sólo a instalaciones superficiales como líneas de inyección de salmuera, sino también a los pozos inyectoros al reducir su capacidad de aceptación. El agua producida por los pozos productores se conduce hasta los pozos inyectoros por medio de tuberías de acero al carbón de 10 y 14 pulgadas de diámetro, que se ven afectadas por la incrustación de sílice. La incrustación ocurre debido a que cuando el fluido en dos fases es descargado a presión atmosférica, la salmuera separada, enfriada y concentrada, está usualmente sobresaturada con respecto a la solubilidad de la sílice amorfa. Aunque las tuberías se limpiaban mecánicamente, fue necesario seleccionar una técnica para prevenir la incrustación, para lo cual se estudiaron dos de los métodos que podían ofrecer mejores resultados, tomando en cuenta las condiciones del campo. Se adoptó finalmente la técnica de modificación del pH de la salmuera, dando como resultado que, a un año de su puesta en operación en el sistema general de inyección, no haya habido necesidad de realizar ninguna limpieza mecánica a las tuberías, lo que anteriormente se realizaba cada tercer día como mínimo. Esto constituye una importante mejora al sistema de suministro de vapor.

Palabras clave: Las Tres Vírgenes, incrustación, sílice, modificación de pH, salmuera.

Scaling control in superficial installations at the Las Tres Vírgenes, geothermal field, BCS

Abstract

Silica scaling is one of the most important problems in the Las Tres Vírgenes geothermal field. It affects not only the superficial installations, like brine injection pipelines, but also the injection wells where it reduces injection capacity. Separated brine passes from production wells to injection wells by means of steel pipelines 10 and 14 inches in diameter. The pipelines are affected by silica scaling that occurs when the two-phase fluid is discharged at atmospheric pressure and the separated brine is cooled and concentrated and then oversaturated with amorphous silica. Even when the pipelines were cleaned periodically, it was necessary to implement a technique for prevent scaling. Two methods considered appropriate to the specific field conditions were studied, and finally the technique of modifying the brine pH was adopted. After over a year of using this technique in the general injection system, no mechanical cleaning of the pipelines has been necessary—and once cleaning was needed at least every third day. This represents an important improvement in the steam supply system.

Keywords: Las Tres Vírgenes, scaling, silica, modification of pH, brine.

1. Introducción

El campo geotérmico de Las Tres Vírgenes se localiza en la Península de Baja California Sur, 32 km al NW de la ciudad de Santa Rosalía. El campo está en un complejo volcánico cuaternario, compuesto de tres volcanes alineados de norte a sur (Gutiérrez-Negrín, 1990), con un yacimiento geotérmico dominado por líquido.

Se han perforado 9 pozos, 6 productores y 3 inyectores, con profundidades entre 1290 y 2500 m. La composición del agua producida por los pozos es de tipo clorurado sódica, característica de una salmuera de origen geotérmico completamente equilibrada a temperaturas de 280° C. Las bajas concentraciones de magnesio indican que la interacción agua-roca tiene lugar a altas temperaturas y circulación profunda.

En la actualidad se presenta un problema muy importante en ese campo, que es la incrustación por sílice. Esto afecta no sólo a las instalaciones superficiales, como son las líneas de inyección de salmuera, sino que también reduce la capacidad de aceptación de los pozos inyectores.

Ese tipo de incrustación es característica de yacimientos de alta temperatura (generalmente temperaturas mayores de 200° C). El depósito ocurre debido a la reducción de solubilidad, ocasionada por la disminución de temperatura del fluido geotérmico, además del efecto de concentración debido al flasheo del fluido. Esta incrustación ocurre en zonas de baja temperatura del equipo en superficie, y en particular en la descarga de los pozos productores y en el sistema de inyección.

El agua producida por los pozos productores se conduce hasta los pozos inyectores por medio de tuberías de acero al carbón de 10 y 14 pulgadas de diámetro, las cuales se ven afectadas considerablemente por la incrustación de sílice, debido a que cuando el fluido en dos fases es descargado a presión atmosférica, el agua geotérmica separada, enfriada y concentrada está usualmente sobresaturada con respecto a la sílice amorfa y, por ello, se deposita sílice en las instalaciones superficiales (Hirowatari, 1987).

Los depósitos de sílice en líneas de inyección incrementan la frecuencia y costos de mantenimiento y, en el peor de los casos, los pozos inyectores llegan a incrustarse, con el consiguiente costo de limpieza.

El objetivo de este trabajo es describir un sistema para prevenir incrustación de sílice en instalaciones superficiales y pozos inyectores que garantice la disponibilidad del diámetro original de la tubería de inyección, que reduzca la limpieza mecánica de las mismas y haga eficiente el sistema de inyección del campo geotérmico. El método seleccionado fue el de modificación del pH del agua separada que se conduce por el sistema general de inyección.

2. Antecedentes

El término incrustación se refiere en general al depósito de minerales provenientes del agua geotérmica o salmuera que contiene moléculas en suspensión, que no pueden ser disueltas en el agua por estar sobresaturada con respecto a ese mineral. Cada sistema geotérmico tiene diferentes problemas de incrustación, debido a la distinta composición, cantidad y carácter físico del agua geotérmica.

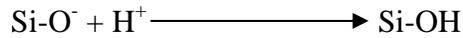
La ocurrencia de la incrustación de sílice depende de varias condiciones, como son la concentración del ácido silícico, la temperatura y el pH de la solución. El ácido silícico monomérico (H_4SiO_4) es un ácido débil que, sin embargo, puede ser ionizado parcialmente como H_3SiO_4^- en una solución alcalina, como se muestra en la reacción:



Por otra parte, el ácido silícico puede considerarse como un grupo de cuatro radicales OH⁻, ligados a un átomo de Silicio (Si(OH)₄). Este grupo, conocido como “silinol”, tiene la propiedad de formar polímeros, que son agregados desordenados e irregulares de moléculas construidos mediante enlaces del tipo Si-O-Si, que se forman por colisión de moléculas con radicales -OH y -O⁻, conforme a la reacción:



Ahora bien, se ha observado experimentalmente que cuando el pH disminuye se inhibe la formación de los enlaces Si-O-Si y, por ende, la formación de polímeros, conforme a lo siguiente:



Por consiguiente, la polimerización del ácido silícico se detiene cuando el pH de la salmuera se ajusta del lado ácido. De esta forma la tasa de incrustación puede reducirse.

3. Estudios preliminares

Se realizó un estudio de medición del tamaño de partículas de sílice, con apoyo del Dr. Kevin Brown del *Geothermal Institute* de la Universidad de Auckland en Nueva Zelanda.

El estudio consistió en determinar el tamaño de la partícula de sílice en la presa de los pozos LV-3 y LV-4, para lo cual se tomaron muestras de agua a la entrada y a la salida de la misma. Las botellas utilizadas para el muestreo contenían un dispersante proporcionado por el *Geothermal Institute*, el cual permitió conservar la distribución original del tamaño de partícula y realizar, así, un análisis exacto.

De los resultados de las muestras analizadas se determinó que en la entrada de la presa las partículas tenían un diámetro de 4.9 a 7 nanómetros (nm). Se trata de partículas muy pequeñas, por lo que se asumió que el fluido probablemente no experimentaría depósito de sílice (Fig. 1).

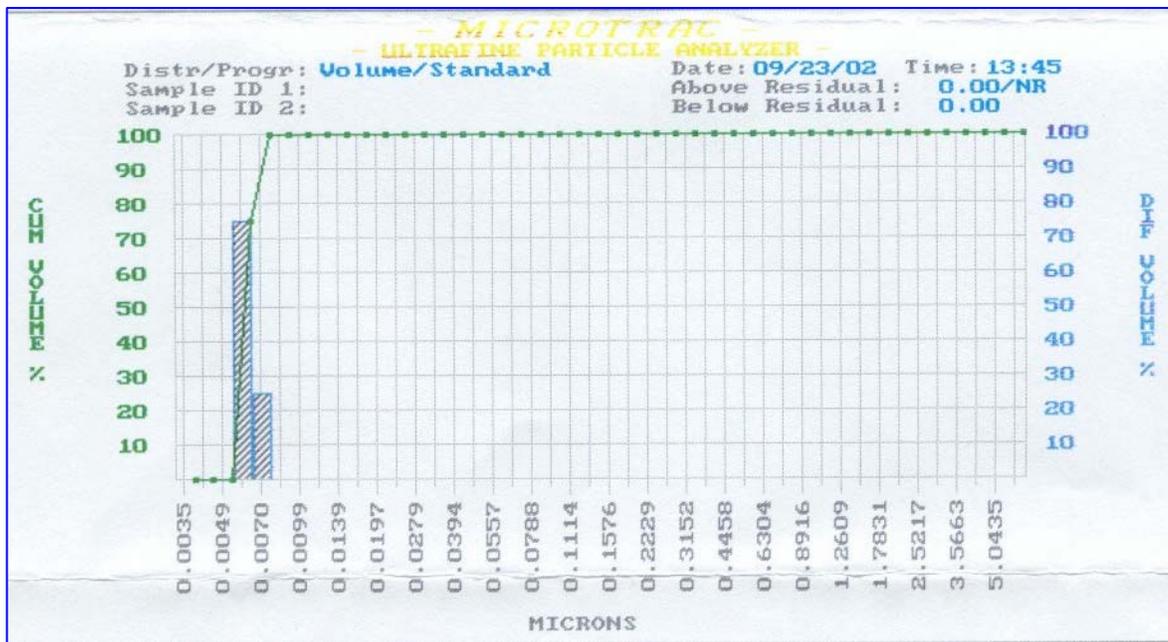


Fig. 1. Medición del tamaño de la partícula de sílice a la entrada del cárcamo

Por otro lado, en la salida de la presa las partículas presentaron un tamaño de 220 a 315 nm. Estos son coloides de sílice que han crecido en la presa y que sin duda dan lugar a depósitos de sílice voluminosos y difíciles de remover (Fig. 2).

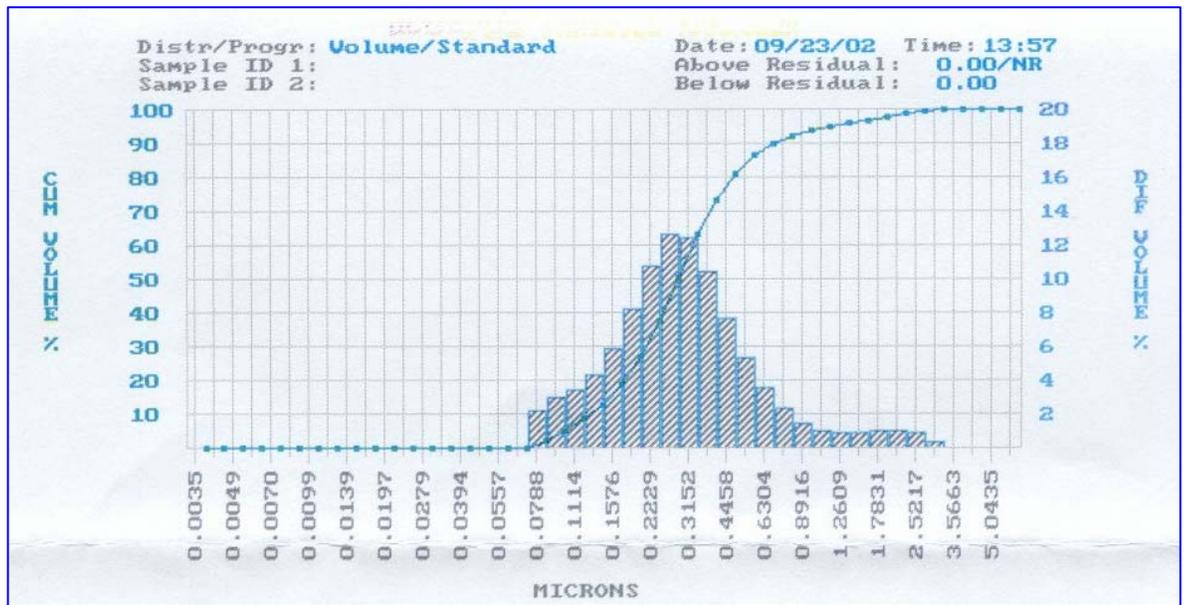


Fig. 2.
Medición del tamaño de la partícula de sílice a la salida del cárcamo.

La producción máxima de salmuera de los pozos es de 350 toneladas por hora (t/h), la cual es necesario transportar por medio de tuberías de acero hasta los pozos inyectoros. En condiciones normales de operación, después de tres días sin limpiar las tuberías el gasto a través de ellas disminuye hasta en 20 t/h, y en 50 t/h al cuarto día.

Los resultados obtenidos en un experimento de depósito de sílice (Tapia y Arvizu, 2004a), indicaron que la velocidad de depósito en las líneas de inyección en el campo de Las Tres Vírgenes es de 550 mg/dm² diarios. En el experimento se estudiaron dos alternativas de prevención de incrustación, concluyéndose que el método de tanque de retención disminuye hasta un 60% la incrustación y el método de modificación de pH la reduce hasta en un 90%, siendo por tanto este último la mejor alternativa.

4. Metodología

El método de modificación del pH es considerado como una alternativa en la prevención de incrustación. El método consiste en modificar el pH de la salmuera hasta el punto en el cual se evita la polimerización de la sílice, lo que depende de las características químicas de la salmuera.

Para confirmar el efecto preventivo de la modificación del pH, se rastreó la polimerización del ácido silícico en un rango de pH entre 3.5 y 7.3. Como conclusión se determinó que la polimerización de la sílice se evita a pH menores a 5.5 (Fig. 3), por lo que se tomó determinación de usar H₂SO₄ (al 98%) para el ajuste del pH de la salmuera.

Por otro lado, siendo la corrosión una de los posibles efectos secundarios del ajuste del pH, se determinó la corrosividad en la tubería de inyección, que es de acero al carbón. En la Figura 4 se puede apreciar que la velocidad de corrosión a la temperatura de inyección (entre 65 y 85° C) y al pH original (7.4) es de aproximadamente 0.07 mm/año, y que a la misma temperatura pero a un pH de 5 la velocidad de corrosión es

aproximadamente la misma. De ahí se concluyó que prácticamente no había riesgo de corrosión en las tuberías de inyección.

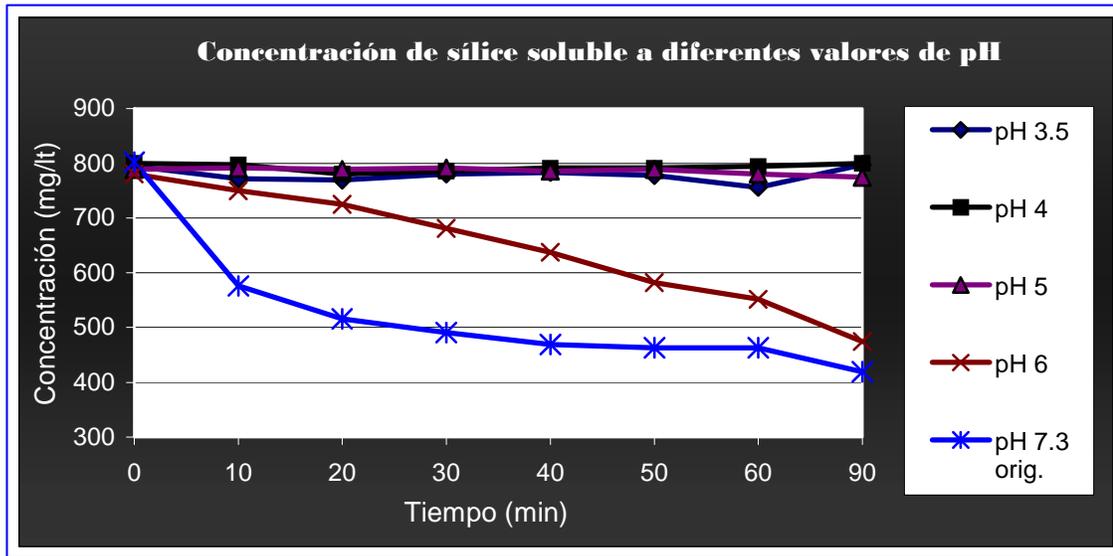


Fig. 3. Polimerización a diferentes tiempos y valores de pH

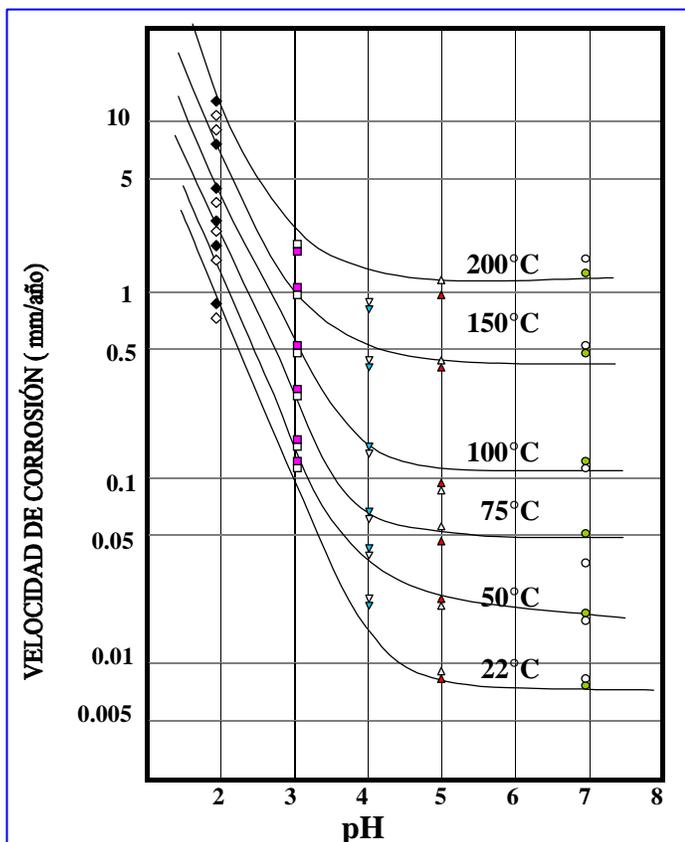


Fig. 4. Relación entre velocidad de corrosión y el pH en solución.

5. Desarrollo

Para llevar a cabo la modificación del pH en el sistema general de inyección, se tomó en cuenta la información de los estudios realizados anteriormente (Tapia y Arvizu, 2004b). Se llegó a la conclusión de que la dosificación del H₂SO₄ (98%) se realizara en el vertedor a la descarga del silenciador, ya que además de aprovechar para la mezcla la turbulencia que se genera en esa descarga, se evitaría cualquier pérdida de temperatura que pudiera provocar un aumento en la tasa de polimerización de sílice antes de que fuera posible inhibirla.

Los puntos de muestreo para la determinación y control de pH son las obras de toma de los cárcamos en la plataforma de los pozos LV-11 y LV-3/4 y la llegada al pozo LV-8, ya que es en estos puntos donde se esperaba que la mezcla fuera más homogénea y por lo tanto la lectura más representativa.

Los carretes de tubería que sirvieron como testigos de la tasa de incrustación se colocaron en las líneas de inyección de acero al carbón de 10 y 14 pulgadas de diámetro, después de la obra de toma de los cárcamos de los pozos LV-11 y LV-3/4, en aquellas zonas en donde se presentaba la mayor cantidad de incrustación.

Finalmente se tomó la decisión de medir también el gasto de agua conducido por las líneas de inyección hasta el pozo inyector LV-8 durante la prueba.

Se realizaron las siguientes actividades previas y durante la prueba:

- Acondicionamiento de las instalaciones (carretes, válvulas, bombas, etc.) y ubicación de puntos de dosificación y muestreo (Fig. 5), para tener un parámetro de referencia o comparativo del avance o mejora que se observase conforme se realizaba la prueba.

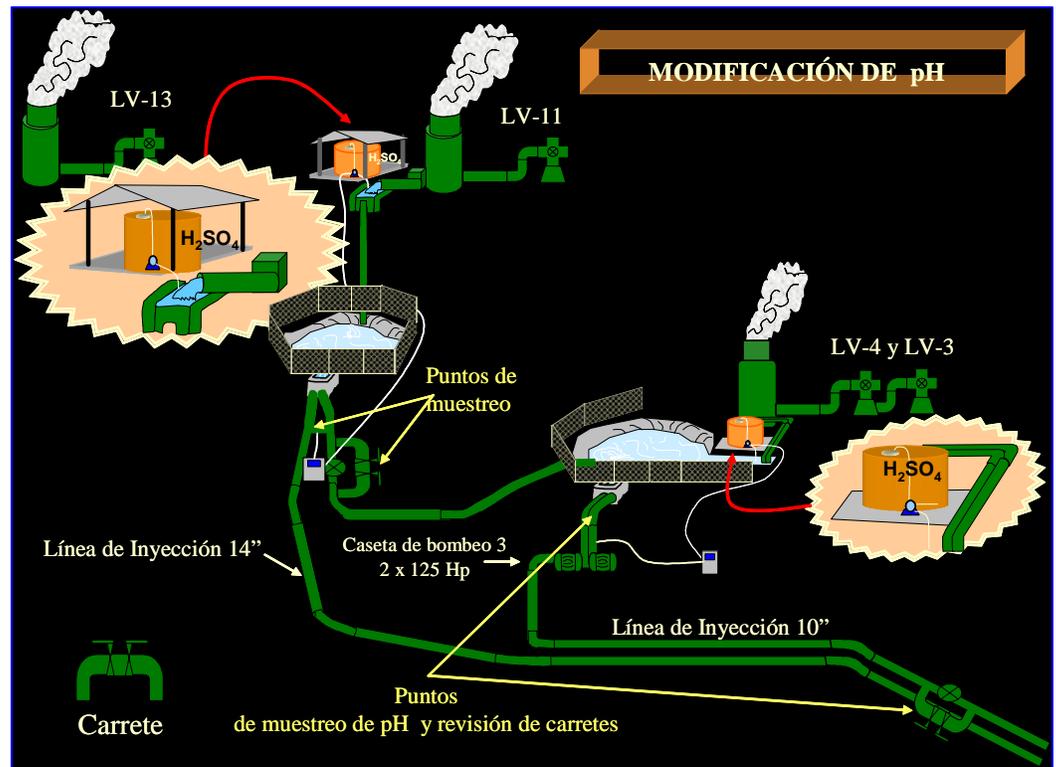


Fig. 5. Puntos de dosificación y muestreo.

- Limpieza total de los carretes testigo colocados después de la obra de toma de los cárcamos de los pozos LV-11 y LV-3/4 que sirvieron como indicadores físicos del avance de la incrustación.
- Acondicionamiento del sistema de dosificación por gravedad de H_2SO_4 (95 a 98%) (contenedores, válvulas, conexiones, mangueras, etc.).
- Instalación de un sistema de regadera de emergencia y sacos de cal como seguridad para posibles fugas o derrames.
- Entrega al personal implicado en la prueba del equipo de seguridad necesario, como trajes desechables, lentes, mascarillas con filtros para gases ácidos y guantes de neopreno resistentes a alta temperatura.
- Llenado de contenedores de $5m^3$ con H_2SO_4 (95 a 98%), ubicados en las plataformas de los pozos LV-11 y LV-3/4.
- Dosificación y medición continuas del gasto de H_2SO_4 (95 a 98%) inyectado en la descarga de los silenciadores al vertedor, hasta alcanzar el pH de 5 ± 0.5 , aprovechando la turbulencia que genera la descarga para el mezclado.

- Monitoreo continuo del pH en el sistema de inyección, recolectando muestras en la obra de toma de los cárcamos de los pozos LV-11 y LV-3/4 y en la caja de rompimiento del pozo LV-8.
- Monitoreo continuo del gasto de agua conducida hasta el pozo LV-8
- Revisión periódica de los carretes instalados en la línea, que servirían como testigos de la prueba.

6. Resultados

Durante el tiempo que duró la prueba se realizó un monitoreo continuo de pH en el sistema de inyección, tomando lecturas de este parámetro tres veces por turno y registrándolas en una bitácora. De acuerdo con el monitoreo se puede apreciar que aproximadamente el 90% del tiempo el pH permaneció dentro del rango establecido de 5 ± 0.5 (Fig. 6).

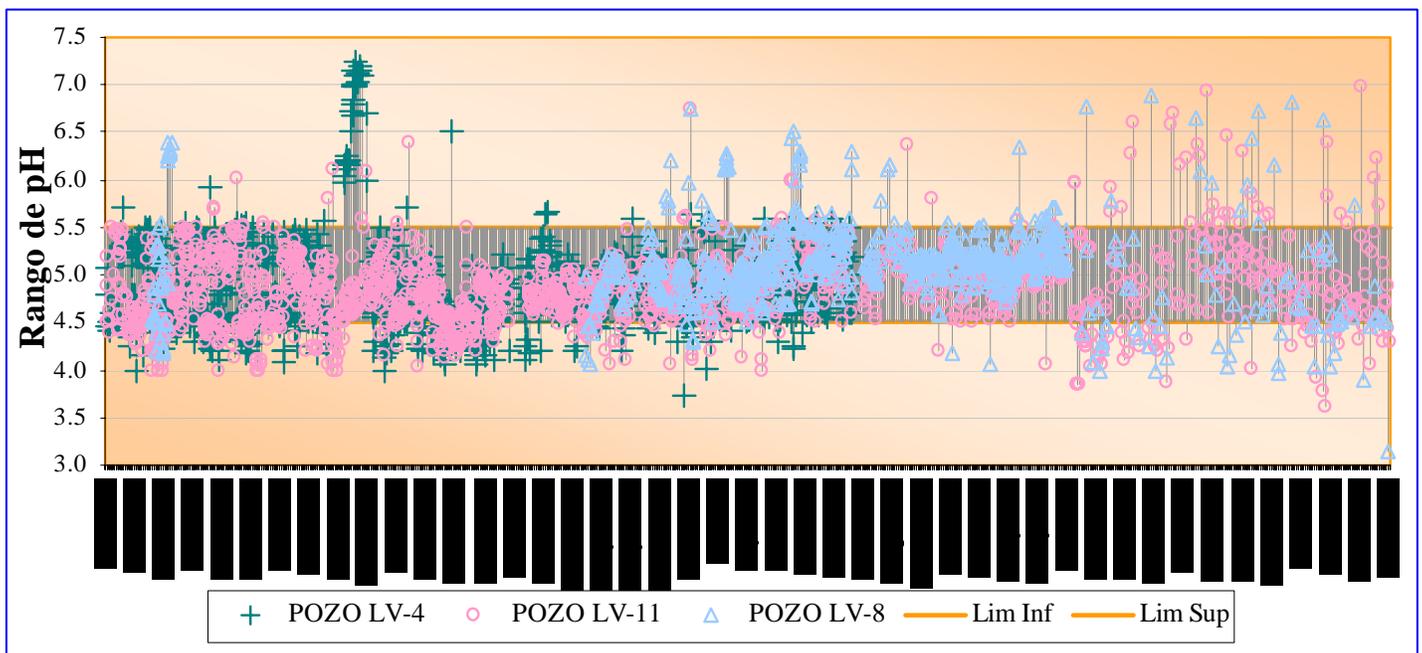


Fig. 6. Variación del pH en el sistema general de inyección en el año 2005.

Cuando se regula el pH hasta el punto en el que se evita la polimerización de la sílice se puede apreciar un cambio de coloración considerable en el agua.

Durante la prueba se midió diariamente el gasto de agua manejado por bombeo hacia el pozo LV-8 a condiciones máximas (válvulas totalmente abiertas), durante una hora aproximadamente, para evaluar de manera directa su evolución. En la Figura 7 se puede apreciar que el gasto de inyección fue muy estable, ya que sólo se aprecia una mínima reducción en el gasto de aproximadamente 10 ton/h a lo largo de 80 días.

Los carretes testigo colocados en la línea de inyección fueron desconectados y revisados periódicamente. Después de un año, sólo se percibió una mínima capa de incrustación de un máximo de 19 mm de espesor en las zonas más críticas de la línea, siendo mucho menor en los puntos más cercanos al pozo inyector, y sin que se apreciara ningún indicio de corrosión provocado por el manejo del agua a pH bajo.

Debido a los buenos resultados alcanzados, al concluirse la prueba el sistema de modificación del pH fue puesto en servicio de manera permanente.

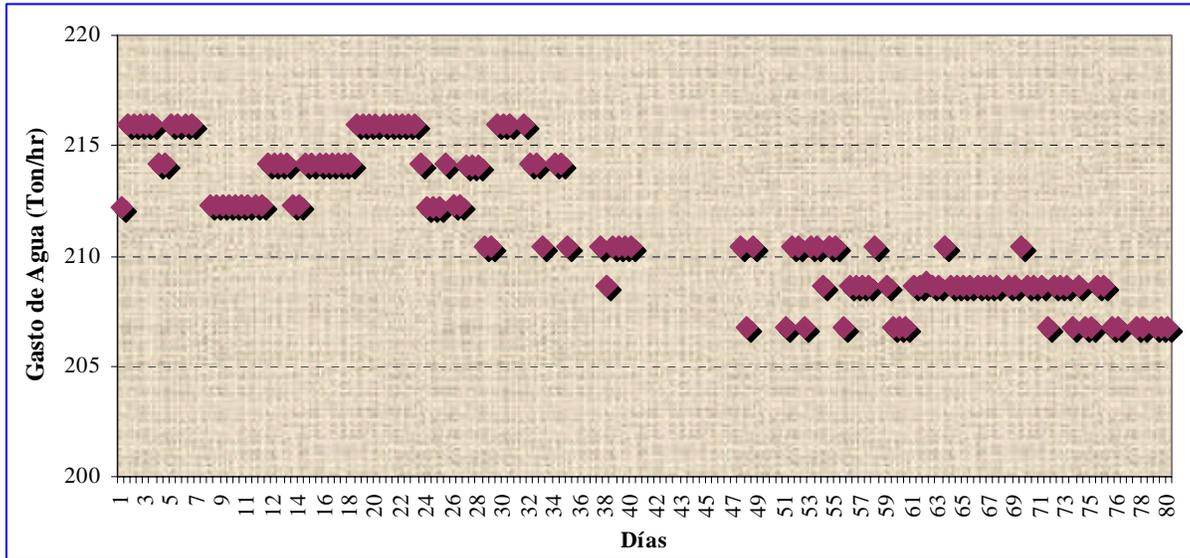


Fig. 7.
Variación en el gasto de salmuera inyectada en el pozo LV-8.

7. Costos

Para estimar el consumo de ácido necesario para ajustar el pH original a 5.0, se realizaron pruebas de titulación en un litro de salmuera de los pozos productores, determinándose así la cantidad necesaria de H_2SO_4 por tonelada de salmuera, que resultó ser de 30.8 mililitros.

Así, y considerando que el costo de un litro de H_2SO_4 (95 a 98%) es de aproximadamente 7 pesos, el costo del ácido por tonelada de salmuera tratada resulta ser de 12 centavos.

Tomando en cuenta la cantidad de salmuera producida por los pozos productores durante un año completo, estimando el tiempo que permanecen abiertos a producción, puede calcularse que el costo anual del tratamiento de la salmuera para todo el campo de Las Tres Vírgenes es del orden de los 350 mil pesos, o de unos 32 mil dólares americanos.

8. Conclusiones y recomendaciones

- El método de modificación del pH de la salmuera se considera como una excelente alternativa para prevenir la incrustación de sílice en las líneas de inyección y en los pozos inyectoros del campo de Las Tres Vírgenes, ya que ha logrado reducir hasta en un 90% la velocidad de incrustación.
- Antes del tratamiento de la salmuera, a condiciones normales de operación se observaba una reducción en el gasto de inyección hasta de 20 t/h después de tres días sin limpiar tuberías, la cual llegaba hasta 50 t/h al cuarto día. Aplicando el método de modificación de pH, la reducción en el gasto de inyección fue de tan sólo 10 t/h en tres meses sin efectuar actividades de limpieza.
- La corrosión en las tuberías a la temperatura de inyección (65 a 85° C) es aproximadamente la misma para la salmuera con pH original (7.4) que para la salmuera con pH modificado (5.0), de unos 0.07 mm por año, por lo que el método de modificación de pH no aumenta el riesgo de corrosión.

- En la prueba se observó que en los carretes testigo, después un año, sólo se percibía una capa de incrustación de un máximo de 19 mm de espesor en la zona más crítica de la línea.
- La puesta en práctica el método de modificación del pH de la salmuera, además de reducir la incrustación en las instalaciones superficiales se evita en gran escala el azolve e incrustación de los pozos inyectoros, lo que equivale a alargar su vida útil.

Referencias

- Gutiérrez Negrín, L.C.A. (1990) Litología, mineralogía y geotermometría del pozo LV-2, Las Tres Vírgenes, B.C.S. *Geotermia, Revista Mexicana de Geoenergía*, Vol. 6 (2), pp. 185-211.
- Hirowatari, K. (1987) Investigation of Reinjection of Low Temperature Brine, *Chinetsu Gijitsu*, Ser. 31, Vol.12.
- Tapia S., Ruth y Noé Arvizu M. (2004a) Estudio sobre Velocidad de Deposición de Sílice y Métodos de Prevención en el Campo Geotérmico Las Tres Vírgenes, BCS. CFE, Informe interno de la Residencia de Las Tres Vírgenes, número GQLV-02/04. Inédito.
- Tapia S., Ruth y Noé Arvizu M. (2004b). Modificación de pH como Método de Prevención de Deposición de Sílice en Instalaciones Superficiales del Campo Geotérmico de Las Tres Vírgenes, BCS. CFE, Informe interno de la Residencia de Las Tres Vírgenes, número GQLV-03/04. Inédito.

Bomba de calor para purificación de salmuera geotérmica

S. Santoyo-Gutiérrez, R.M. Barragán-Reyes y F.A. Holland

Instituto de Investigaciones Eléctricas, Reforma 113, Col. Palmira, CP 62490 Temixco, Mor., México.

E-mail: rmb@iie.org.mx

Resumen

El aprovechamiento integral de los recursos geotérmicos en todas sus formas es una de las metas importantes a lograr en los próximos años. Hoy en día, el uso de las bombas de calor en la geotermia ofrece un doble beneficio: aprovechan el calor de los fluidos de desecho y tienen la capacidad de transformar la salmuera geotérmica en agua de alta pureza. Se presenta el diseño y descripción de un sistema experimental para purificación de salmuera geotérmica integrado a una bomba de calor por absorción, el cual fue construido y probado en el Instituto de Investigaciones Eléctricas. En toda la etapa de experimentación se obtuvo agua pura. La capacidad máxima alcanzada de producción de agua pura de este sistema fue de 4.3 kg h^{-1} , mostrando un rendimiento en términos del Coeficiente Real de Rendimiento (COP)_A de 1.4. Estos resultados se consideran alentadores para la proyección de unidades a escala industrial que puedan ser operadas con calor geotérmico y/o solar.

Palabras clave: Bombas de calor, usos directos de la geotermia, purificación de salmuera.

Heat pump for purification of geothermal brines

Abstract

Integrated use of geothermal resources is one of the most important goals for the future. Presently geothermal heat pumps offer two benefits: using heat from residual brines and converting these brines into very pure water. Designs and descriptions are presented of an experimental system to purify geothermal brines integrated to an adsorption heat-pump. The system was constructed and tested in the IIE (Institute for Electrical Research) facilities. During the experimental stage, pure water was obtained. Maximum capacity for pure water was 4.3 kg per hour , presenting an Actual Coefficient of Performance (COP)_A of 1.4. The results are encouraging to project units at an industrial level for operating with geothermal and/or solar heat.

Keywords: Heat-pumps, geothermal direct use, brine purification.

1. Introducción

El aprovechamiento integral de los recursos geotérmicos en todas sus formas es una de las metas globales importantes que se deben lograr en los siguientes años. Ello ha motivado la investigación y desarrollo de nuevos sistemas, entre los que destaca la purificación de la salmuera geotérmica a través de una tecnología que emplee eficientemente los recursos energéticos naturales sin que afecte las condiciones del medio ambiente. Hoy en día el uso de las bombas de calor en la geotermia ofrece un atractivo comercial interesante dado que no sólo aprovechan el calor de los fluidos que se desechan en los pozos geotérmicos, sino que además tienen la capacidad de transformar la salmuera geotérmica en agua de alta pureza, permitiendo con ello su empleo ya sea de tipo agrícola, industrial o para descanso. Adicionalmente, es importante enfatizar que las bombas de calor por absorción utilizan energía de baja calidad gratuita y ambientalmente limpia.

La operación de esos sistemas basados en bombas de calor tiene como característica especial su bajo consumo de energía de alta calidad, contribuyendo de esta manera a no emitir contaminantes a la atmósfera, tales como el CO_2 y CH_4 , SO_2 y NO_2 principales generadores del efecto invernadero y del fenómeno de lluvia ácida, respectivamente. Se presentan los resultados experimentales derivados del diseño, desarrollo, operación y aplicación de una nueva tecnología de purificación de salmueras geotérmicas y/o efluentes industriales basada en bombas de calor por absorción.

2. Destilación mediante bombas de calor

El principio físico (energético) sobre el cual se basa el proceso de desalación y/o purificación de efluentes mediante un sistema de destilación asistido por una bomba de calor es el siguiente (Figura 1):

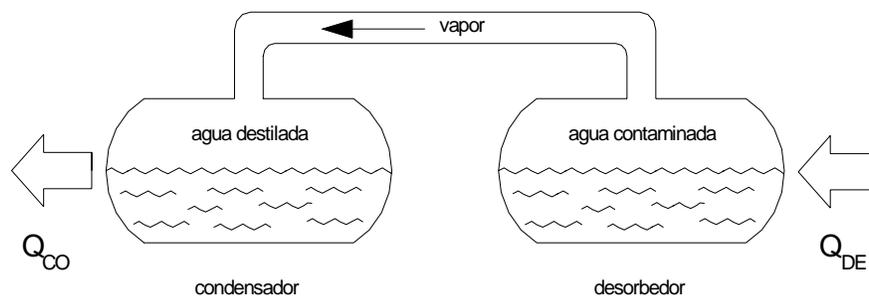


Fig. 1. Diagrama esquemático de un sistema de purificación de efluentes asistido por energía térmica.

En la Figura 1, el recipiente 1 contiene agua pura mientras que el recipiente 2 contiene agua con sólidos disueltos (agua impura). Si ambos recipientes están a una misma temperatura, el agua pura contenida en el recipiente 1 tendrá una presión de vapor más alta que el agua impura del recipiente 2. Por lo tanto, si ambos recipientes son calentados a la misma temperatura, el vapor de agua pura fluirá del recipiente 1 al recipiente 2. Sin embargo, si el agua impura del recipiente 2 es calentada a una temperatura T_2 , lo suficiente como para elevar su presión de vapor a un nivel más alto que la presión que corresponde a una temperatura (T_1) del agua pura del recipiente 1, entonces el vapor de agua producido fluirá del recipiente 2 hacia el recipiente 1. De esta forma, esta diferencia de temperaturas ($T_2 - T_1$) representará un parámetro muy importante en la operación eficiente y económica del proceso de purificación de efluentes.

Es bien conocido que la destilación es un proceso unitario de uso intensivo de energía que requiere desechar grandes cantidades de energía al medio ambiente. No obstante, varios autores han demostrado que estos consumos de energía pueden ser reducidos significativamente mediante el uso de las bombas de calor (Eisa *et al.*, 1987; Best *et al.*, 1988; Hodget, 1990). Por ejemplo, Mercado *et al.* (1979), Maloney (1992), y Mohanty y Thavalingham (1993), han propuesto el uso de bombas de calor por compresión mecánica de vapor para la recuperación de productos químicos a partir del tratamiento de los efluentes de desecho. En general, este tipo de bombas de calor han sido utilizadas para muchos fines entre ellos el acondicionamiento de espacios, secado de madera o ladrillos refractarios, calentamiento de albercas, calefacción y enfriamiento de agua simultáneamente en la destilación de bebidas alcohólicas (Reay y Macmichael, 1988).

Kuroda (1993) experimentó con una pequeña bomba de calor por compresión mecánica de vapor para concentrar y reciclar efluentes de laboratorios fotográficos, reduciendo a una décima parte el volumen inicial del efluente y empleando para ello una tercera parte de la energía que usaría un evaporador convencional.

Asimismo, otros trabajos experimentales previos sobre la purificación de salmuera geotérmica usando bombas de calor por compresión mecánica de vapor han demostrado también la factibilidad técnica de este proceso (Frías, 1991; Frías *et al.*, 1991; Siqueiros *et al.*, 1992; Siqueiros *et al.*, 1995). Un diseño experimental mejorado basado en una bomba de calor por absorción para purificación de agua fue desarrollado y construido por Santoyo-Gutiérrez (1995, 1997) y por Santoyo-Gutiérrez y otros (1999, 2000), de donde se genera este trabajo de investigación.

3. Aplicaciones potenciales

Los sistemas de purificación asistidos por una bomba de calor por absorción comparados con los sistemas convencionales de purificación presentan las siguientes ventajas:

- Son más eficientes energéticamente en términos de consumo de energía primaria [kJ/kg de producto].
- Son capaces de producir productos de muy alta pureza.
- No necesitan de adición continua de productos químicos en el proceso de absorción.
- Pueden adaptarse para recuperar y/o concentrar componentes químicos de interés comercial.
- Casi no requieren de mantenimiento ni de ajuste de condiciones.
- Son simples y pueden ser portátiles como para ser transportados por un camión o una camioneta.

Adicionalmente, el sistema de purificación de agua asistido por una bomba de calor por absorción puede emplearse potencialmente en donde existen recursos geotérmicos de baja entalpía, con una doble ventaja que ofrece el recurso geotérmico: puede emplearse como fuente de calor y como fuente de abastecimiento de agua pura una vez purificada la salmuera geotérmica, lo cual es especialmente útil en regiones donde el agua es escasa (Holland *et al.*, 1992).

Otra aplicación prometedora es la producción de agua libre de sales, a partir de agua de mar en las plataformas petroleras marinas (Santoyo-Gutiérrez, 1997). El agua obtenida puede ser empleada en la mayoría de los procesos de las plataformas, evitando con ello la corrosión de materiales. Por ello, la aplicación del sistema de purificación de agua asistido por una bomba de calor por absorción en plataformas petroleras presenta una enorme ventaja, que se refleja en los bajos costos de operación por consumo de energía, los cuales se consideran despreciables dado que utilizaría una pequeña fracción del gas que se quema continuamente a la atmósfera y cuyo costo real es cero.

4. Bombas de calor por absorción

Una bomba de calor por absorción es un dispositivo que eleva la temperatura aplicada en él mediante una fuente de energía a un nivel más alto para ser utilizado en alguna aplicación (Fig. 2).

Sus principales componentes son: desorbedor, absorbedor, evaporador, condensador, economizador, válvulas de expansión y dos fluidos de trabajo denominados comúnmente par de trabajo (Fig. 3).

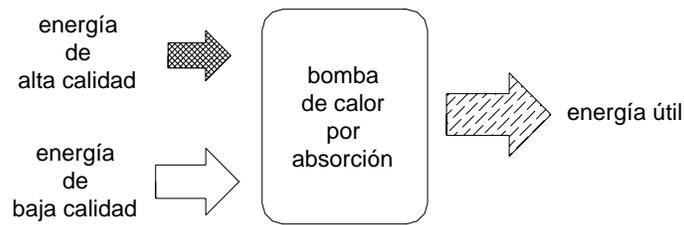


Fig. 2. Diagrama esquemático simplificado de una bomba de calor por absorción.

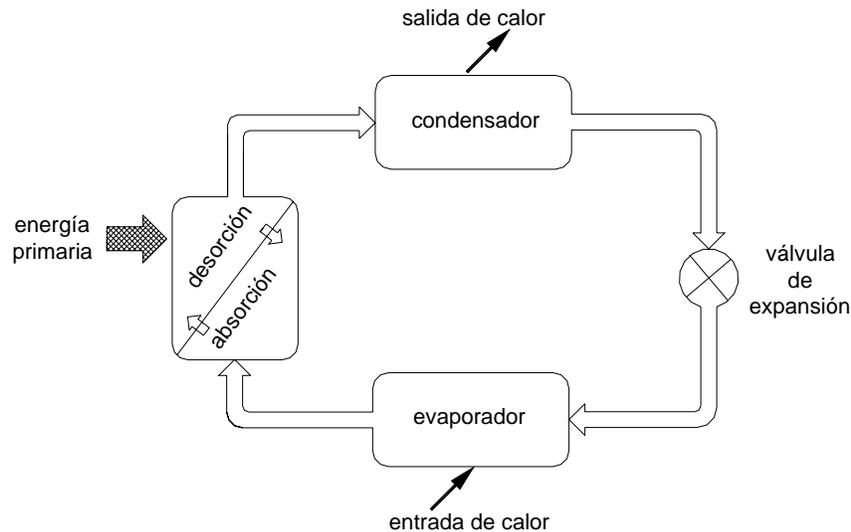


Fig. 3. Diagrama de bloques de una bomba de calor por absorción con sus principales componentes.

Las bombas de calor por absorción utilizan un par de trabajo consistente en un fluido de trabajo y un fluido absorbente. El funcionamiento básico de una bomba de calor por absorción está representado esquemáticamente por el diagrama termodinámico de la Figura 4.

El coeficiente de rendimiento (COP) es un parámetro muy importante usado para evaluar el comportamiento de las bombas de calor, cuyo valor indica el número de veces que la energía de alta calidad que se suministra a la bomba de calor es amplificada. El coeficiente ideal de operación Carnot $(COP)_C$ para una bomba de calor puede ser calculado con base en las temperaturas predominantes del ciclo, esto es, se basa en la consideración de una evaporación y condensación isotérmica reversible acompañada de una expansión y compresión de vapor húmedo.

Así la eficiencia de una máquina térmica (recibiendo calor a una temperatura T_{DE} y rechazándolo a una temperatura T_{AB}) y de una bomba de calor (recibiendo calor a una temperatura T_{EV} y rechazándolo a una temperatura T_{CO}) son combinadas para obtener el COP del sistema bomba de calor mediante la siguiente ecuación:

$$(COP)_C = \left[\frac{T_{EV}(T_{DE} - T_{AB})}{T_{DE}(T_{CO} - T_{EV})} \right] + 1 \quad (1)$$

A partir de la ecuación (1), se puede inferir que el $(COP)_C$ presentará valores altos cuando la diferencia de temperaturas $(T_{CO}-T_{EV})$ tienda a ser mínima. Este requerimiento es altamente deseable por sistemas de destilación simple debido a las diferencias de temperatura entre la temperatura correspondiente a la presión de vapor del agua cruda (efluente a tratar) y la correspondiente al agua destilada que se obtendrá. Por lo tanto, es de esperarse que las temperaturas de evaporación del agua cruda y la de condensación del agua destilada sean muy parecidas, de tal forma que estas características termodinámicas permitan la obtención de $(COP)_C$ teóricos altos.

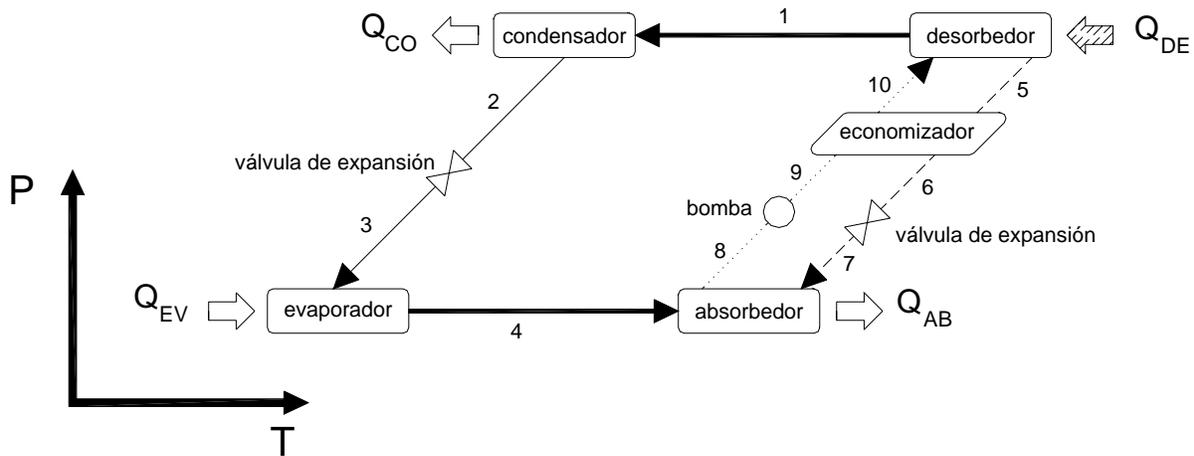


Fig. 4. Diagrama esquemático del ciclo de una bomba de calor por absorción en una gráfica de presión P contra temperatura T .

Por otro lado, asumiendo que todos los procesos de absorción y generación alcanzan el equilibrio termodinámico a las condiciones de temperatura y presión indicadas en la Figura 4, el coeficiente de rendimiento máximo obtenible de un sistema como función de sus entalpías $(COP)_{EH}$ es calculado mediante la ecuación:

$$(COP)_{EH} = \frac{H_1 + (FR - 1)H_2 - (FR)H_3 + H_4 - H_5}{H_4 + (FR - 1)H_2 - (FR)H_3} \quad (2)$$

De esta manera, la efectividad del comportamiento global de la bomba de calor (HPE) está dado por la relación entre el $(COP)_{EH}$ y el $(COP)_A$, expresado en la siguiente ecuación:

$$(HPE) = \frac{(COP)_A}{(COP)_{EH}} \quad (3)$$

Holland (1990) y Holland *et al.* (1999) señalan que las bombas de calor por absorción representan una tecnología más eficiente y económica que puede superar a las bombas de calor por compresión mecánica ya que ofrecen las siguientes ventajas:

- (i) Consumo reducido de energía mecánica comparado con la cantidad de energía eléctrica requerida por el motor de un compresor.
- (ii) Fluidos de trabajo que no afectan al medio ambiente, contrariamente a lo que ocurre con los clorofluorocarbonos que se usan con frecuencia en las bombas de calor por compresión.

- (iii) Diseño más sencillo a partir de datos termofísicos y termodinámicos apropiados.
- (iv) Costo reducido debido al uso minimizado de dispositivos de tecnología compleja, en contraste con las bombas de calor por compresión mecánica que utilizan compresores de alta tecnología y disponibilidad muy limitada debido a sus requerimientos de diseño.

En la desalación de agua de mar, los sistemas de absorción reducen los problemas de corrosión e incrustación debido a que la obtención de agua se realiza a bajas temperaturas, no requieren de un tratamiento previo del agua, además de que son sistemas sencillos y de poco mantenimiento (Nguyen *et al.*, 1996). Otros factores adicionales como la escasez de electricidad, la gran cantidad de recursos de baja entalpía sin emplear y las nuevas reglamentaciones sobre el uso de productos químicos y su impacto al medio ambiente, favorecen la selección de bombas de calor por absorción para reemplazar a las bombas de calor por compresión mecánica de vapor en los sistemas de purificación asistidos (Best *et al.*, 1988; Holtkamp, 1994; Jiménez, 1995). La operación de estos sistemas es muy económica, sobre todo si se utiliza una fuente de calor (a una temperatura adecuada) que provenga del calor de desecho de un proceso industrial o bien de una fuente renovable como la energía geotérmica o la solar (Tay *et al.*, 1996).

5. Descripción del sistema experimental

El sistema experimental de purificación de efluentes asistido por una bomba de calor por absorción fue diseñado y construido en las instalaciones del Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE). Detalles de la metodología de diseño, construcción y operación son reportados por Santoyo-Gutiérrez (1995, 1997).

Los principales componentes de intercambio de calor en este sistema son un desorbedor, un absorbedor, un condensador, un evaporador, un economizador y un condensador auxiliar. Este sistema emplea agua/bromuro de litio como par de trabajo, siendo agua el fluido de trabajo y bromuro de litio el fluido absorbente. Básicamente, en este sistema se tienen tres circuitos de flujo principales: (i) fluido de trabajo; (ii) fluido absorbente y (iii) efluente a tratar (Fig. 5).

También se dispone de un circuito de agua de enfriamiento que alimenta al intercambiador de calor auxiliar, cuya función principal es equilibrar térmicamente a todo el sistema. Como fuente de calor externa se utiliza vapor proveniente de una caldera eléctrica de 30 kW. La disponibilidad de este vapor permite tener un buen control de la temperatura y de la carga térmica en el sistema.

El fluido de trabajo empleado en la bomba de calor consistió, como se dijo, de una mezcla de bromuro de litio y agua, siendo esta última de tipo destilada. Dada la naturaleza corrosiva de este par de trabajo y a fin de prevenir cualquier incidencia de corrosión en los circuitos donde circula, se le adicionó dicromato de sodio como inhibidor de corrosión.

6. Resultados

Todas las pruebas experimentales con el sistema de purificación de efluentes integrado a la bomba de calor por absorción se efectuaron en estado estable. Dado que el objetivo principal del estudio se enfocó a evaluar el funcionamiento de la bomba de calor y del propio sistema de purificación integrado a la misma, se optó por el empleo de agua cruda como fluido a purificar. La elección del agua se hizo por facilidad de obtención y por el conocimiento de sus propiedades termofísicas menos complejas, si se comparan con las de un efluente de naturaleza química incierta y variable. La calidad química del agua se evaluó con análisis químicos a muestras de agua cruda, agua purificada y agua concentrada (Santoyo *et al.*, 1990).

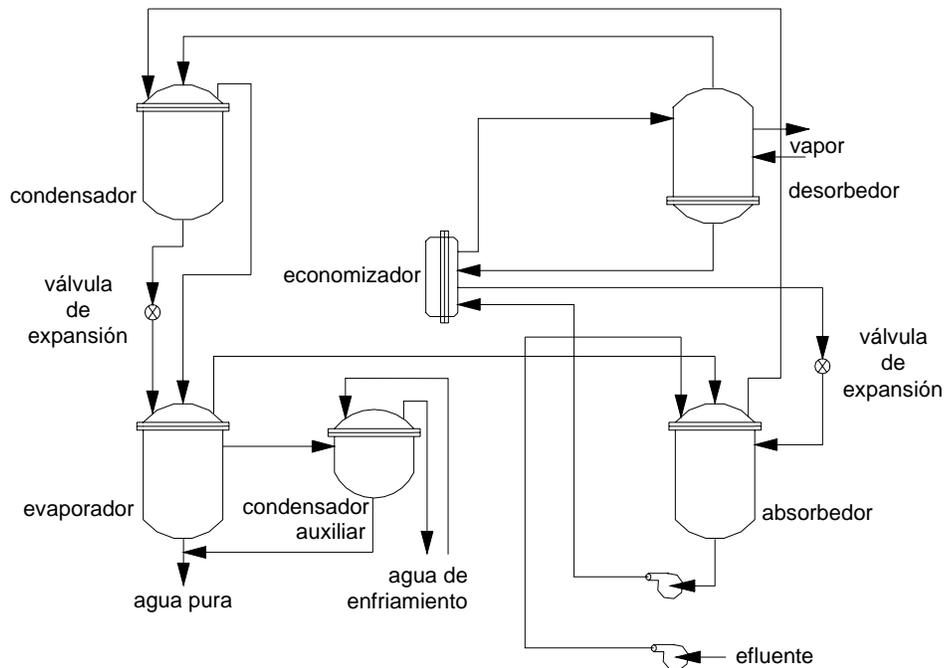


Fig. 5. Diagrama esquemático del sistema experimental de purificación de efluentes asistido por una bomba de calor por absorción.

Como resultado inicial se tiene el primer diseño, construcción y operación exitosa de una bomba de calor por absorción a nivel de planta piloto en México, enfatizando que la mayor parte de los componentes son de manufactura nacional. Con esto se demuestra una madurez en la asimilación de la tecnología de bombas de calor y un avance apreciable para desarrollar comercialmente y a corto plazo este tipo de equipos en México, mediante un mecanismo de transferencia de tecnología entre el centro de investigación y la industria.

La integración de la bomba de calor por absorción a un sistema de purificación es otro resultado importante de puntualizar dada la factibilidad de purificar efluentes contaminados con un proceso de destilación simple. En este proceso se utilizó una pequeña cantidad de energía de alta calidad, es decir, se realizó bajo un esquema de ahorro sustancial de energía, si se compara con el proceso que típicamente se emplea en la industria mediante suministro directo de vapor, el cual demanda un intenso consumo de energía de alta calidad.

Un análisis individual de la bomba de calor por absorción se tiene al observar los resultados obtenidos en términos de dos parámetros importantes como lo son el coeficiente de rendimiento real $(COP)_A$ y la efectividad como bomba de calor (HPE). En la Figura 6 se presenta el comportamiento del coeficiente de rendimiento real $(COP)_A$ contra la producción de agua pura, observándose que el $(COP)_A$ fluctúa entre valores de 1.1 y 1.4. Estos valores, si bien son modestos al compararlos con valores típicos de bombas de calor por compresión mecánica de vapor, son muy buenos para bombas de calor por absorción.

La Figura 7 muestra la variación del HPE contra la producción de agua pura, donde el HPE proporciona una indicación directa de la efectividad del equipo como bomba de calor. Claramente se puede observar que los valores del HPE oscilan entre 0.58 a 0.72, considerándose estos valores apropiados para un equipo de tipo experimental. En equipos industriales se tienen valores de HPE por arriba de 0.8 debido al diseño optimizado del equipo de transferencia de masa y de calor y a las bajas pérdidas de calor en el mismo.

La eficiencia como sistema de purificación puede ser evaluada a partir de los datos incluidos en la Tabla 1, observándose que el grado de efectividad de purificación del sistema fue muy bueno, ya que se logró obtener

niveles de remoción de sales del orden de 99.9% . Cabe mencionar que este resultado es similar al reportado por Frías *et al.* (1991) quienes purificaron salmuera geotérmica mediante un sistema integrado a una bomba de calor por compresión mecánica.

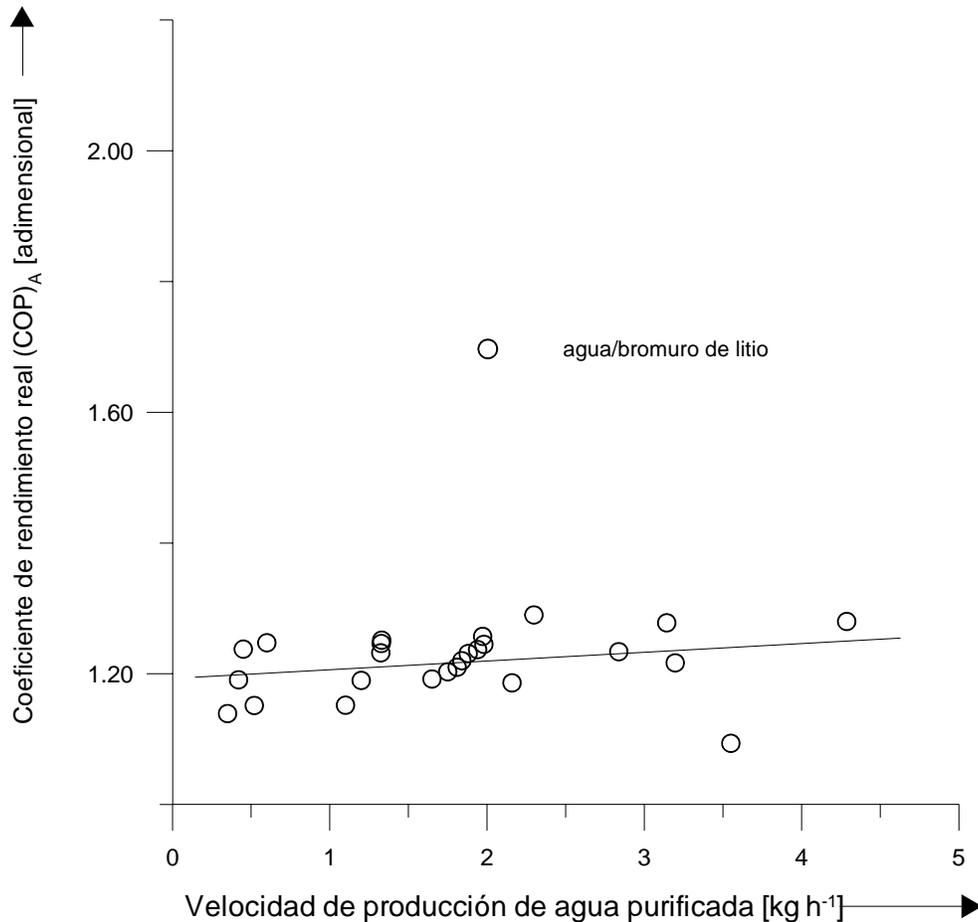


Fig. 6. Comportamiento del coeficiente de rendimiento real $(COP)_A$ contra la velocidad de producción de agua purificada obtenida con el sistema experimental de purificación de efluentes asistido por una bomba de calor por absorción.

El producto obtenido fue agua pura de calidad comparable con la del agua purificada comercialmente mediante los sistemas de purificación convencionales de ósmosis inversa (Sánchez *et al.*, 1999). El nivel de producción de agua pura osciló entre 0.5 y 4.3 kg h⁻¹, el cual es bastante aceptable dada las características experimentales de las unidades de intercambio de calor que constaron de coraza y serpentín. A este respecto es importante señalar que la producción de agua pura se puede incrementar sustancialmente si se instalan unidades de intercambio de calor de alto rendimiento, como pueden ser los intercambiadores compactos a base de placas que han sido exitosamente probados en transformadores térmicos (Currie *et al.*, 1996).

Los estudios de corrosión relacionados con los materiales y fluidos de trabajo empleados en este sistema piloto mostraron en general un buen comportamiento durante toda la etapa de experimentación, la cual fue de aproximadamente 120 días. Se realiza un estudio adicional, cuyos resultados finales serán tema de un trabajo posterior.

Finalmente, el análisis global del sistema de purificación de efluentes integrado a la bomba de calor por absorción demuestra la factibilidad de purificar efluentes industriales acuosos. La obtención de agua de alta calidad con velocidades de producción aceptables utilizando sólo fracciones de energía de alta calidad es

totalmente factible. Las características y ventajas del sistema son: (i) fácil operación, (ii) no hay consumo continuo de químicos para la operación del sistema, (iii) el mantenimiento del sistema es casi nulo, y (iv) el consumo de energía de alta calidad es bajo. De aquí que este sistema se considere competitivo si se le compara con la tecnología de purificación de agua mediante ósmosis inversa, que es una de las más populares hoy en día.

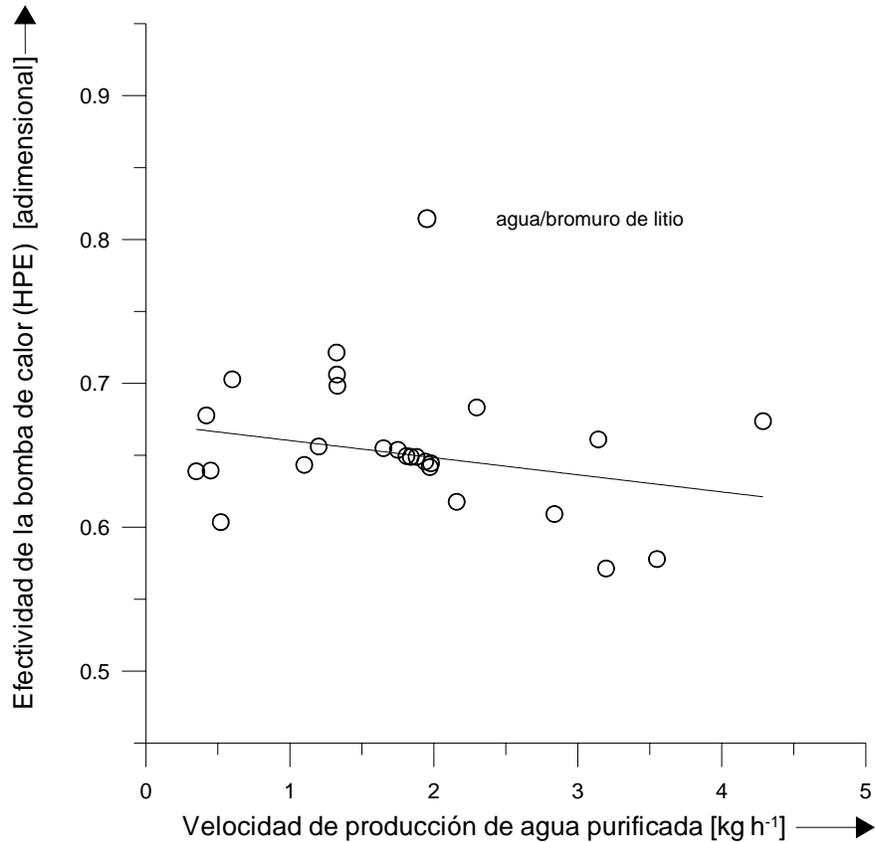


Fig. 7. Comportamiento de la efectividad como bomba de calor (HPE) contra la velocidad de producción de agua purificada obtenida con el sistema experimental de purificación de efluentes asistido por una bomba de calor por absorción.

El costo del sistema experimental para purificación de salmuera geotérmica integrado a la bomba de calor por absorción es de aproximadamente 30 mil dólares (Santoyo-Gutiérrez, 1997; Santoyo-Gutiérrez *et al.*, 1999). Este es un costo alto debido a la instrumentación utilizada, pero una unidad comercial con intercambiadores de calor de superficie mejorada y poca instrumentación deberá resultar con un costo bastante inferior.

La economía de las bombas de calor por absorción sólo depende del costo del capital debido a que utilizan una insignificante cantidad de energía mecánica para las bombas. Aproximadamente el 95% de la energía suministrada a la bomba de calor es energía de baja calidad, la cual en muchos de los casos puede ser proporcionada a un costo relativamente bajo, y en el caso del recurso geotérmico este costo es casi nulo pues existe en enormes cantidades en la salmuera que se está regresando al yacimiento geotérmico a través de pozos inyectores o que se envía a lagunas de evaporación solar.

7. Conclusiones

Se cuenta con un sistema experimental a nivel de planta piloto para purificación de salmueras geotérmicas y/o efluentes industriales acuosos asistido por una bomba de calor por absorción, diseñada y construida en las instalaciones del IIE de México.

Prueba No.	Agua Cruda (Concentración en mg/kg)			Agua Purificada (Remoción en %)		
	Cl ⁻	Ca ⁺⁺	SO ₄ ⁼	Cl ⁻	Ca ⁺⁺	SO ₄ ⁼
1	137.3	150.8	59.2	99.8	99.2	99.3
2	128.4	141.9	50.3	99.9	99.3	99.2
3	131.5	145.0	53.4	99.8	99.3	99.2
4	134.4	147.9	56.3	99.8	99.3	99.2
5	133.6	147.1	55.5	99.8	99.3	99.2
6	131.3	144.8	53.2	99.8	99.3	99.2
7	129.5	143.0	51.4	99.8	99.3	99.2
8	134.6	148.1	56.5	99.8	99.3	99.2
9	136.7	150.2	58.6	99.8	99.2	99.3
10	127.0	140.5	48.9	99.9	99.2	99.3
11	128.7	142.2	50.6	99.9	99.3	99.2
12	130.0	143.5	51.9	99.8	99.3	99.2
13	130.4	143.9	52.3	99.8	99.3	99.2
14	128.9	142.4	50.8	99.9	99.3	99.2
15	133.7	147.2	55.6	99.8	99.3	99.2

Tabla I. Análisis químico del agua cruda y porcentaje de remoción de Cl⁻, Ca⁺⁺, SO₄⁼ en el agua purificada durante las pruebas experimentales del sistema de purificación de efluentes integrado a la bomba de calor por absorción.

El producto final obtenido en las pruebas realizadas con este sistema fue agua pura de calidad comparable al agua destilada comercialmente por otros sistemas de purificación convencionales. El grado de efectividad de purificación del sistema fue muy bueno lográndose obtener niveles de remoción de sales del orden de 99.9%. La capacidad de producción de agua pura osciló entre 0.5 y 4.5 kg h⁻¹, considerándose bastante aceptable.

El rendimiento del sistema de purificación en términos del Coeficiente Real de Rendimiento (COP)_A osciló entre 1.35 y 1.55, mientras que su efectividad como bomba de calor (HPE) fluctuó entre 0.58 y 0.72. Estos resultados se consideran apropiados para sistemas experimentales piloto.

La purificación de efluentes industriales acuosos con el sistema propuesto ofrece importantes ventajas tales como una fácil operación y un bajo mantenimiento, y así como no requerir un consumo continuo de químicos para purificar los efluentes de desecho.

Se continúan estudios de diseño y operación para mejorar el sistema de purificación asistido por la bomba de calor por absorción, mediante el uso de una tecnología mejorada de materiales y de diseños térmicos tendientes al desarrollo de bombas de calor/transformadores (Barragán *et al.*, 1998), que de acuerdo con Ziegler (1993) ofrecen rendimientos cuatro veces mayores a los mostrados por las bombas de calor por absorción.

De este modo, la purificación de efluentes mediante bombas de calor por absorción se presenta como una tecnología alternativa con muy buen pronóstico de ser empleada tanto para el tratamiento de efluentes industriales acuosos como para abastecimiento de agua en industrias y en zonas con escasez.

Referencias

- Barragán, R.M., V.M. Arellano G., C.L. Heard, and R. Best (1998). Experimental performance of ternary solutions in an absorption heat transformer. *International Journal of Energy Research*, **22**, pp. 73-83.
- Best, R., C.L. Heard y F.A. Holland (1988). Developments of geothermal energy in Mexico-Part Sixteen: The potential for heat pump technology. *J. Heat Recovery Systems & CHP*, **8** (3), pp. 185-202.
- Currie, J.S., R.E. Low y C.L. Pritchard (1996). The performance of novel compact heat exchangers with highly extended surfaces. *Applied Thermal Engineering*, **16** (3), pp. 245-254.
- Eisa, M.A.R., R. Best y F.A. Holland (1987). Heat pump assisted water purification systems. *3rd International Symposium on the Large Scale Applications of Heat Pumps*, United Kingdom, pp. 35-43.
- Frías, J.L. (1991). An experimental study of a heat pump assisted purification system for geothermal brine. M.S. Thesis, University of Salford, United Kingdom. Inédito.
- Frías, J.L., J. Siqueiros, H. Fernández, A. García, and F.A. Holland (1991). Developments of geothermal energy in Mexico-Part Thirty Six: The commissioning of a heat pump assisted effluent purification system. *J. Heat Recovery Systems & CHP*, **11** (4), pp. 297-310.
- Hodgett, D.L. (1990) Manual sobre Tecnología de Bombas de Calor: Aplicaciones industriales de las bombas de calor por compresión mecánica de vapor. *Programa de Cooperación e Investigación entre el Instituto de Investigaciones Eléctricas, Cuernavaca, México, y la Universidad de Salford, Reino Unido*, pp. 55-78.
- Holland, F.A. (1990). Manual sobre Tecnología de Bombas de Calor: Fundamentos y aspectos económicos de las bombas de calor, México. *Programa de Cooperación e Investigación entre el Instituto de Investigaciones Eléctricas, Cuernavaca, México, y la Universidad de Salford, Reino Unido*, pp. 9-22.
- Holland, F.A., C.L. Heard, D. Nieva y R. Best (1992). Developments in geothermal energy in Mexico-Part 40: The future for geothermal energy in Mexico. *J. Heat Recovery Systems & CHP*, **12** (6), pp. 451-456.
- Holland, F.A., J. Siqueiros, S. Santoyo-Gutiérrez, C.L. Heard, y E. Santoyo (1999). Water purification using heat pumps. *E & FN SPON/Routledge*, United Kingdom, July 1999.
- Holtkamp, J.A. (1994) Environmental laws of Mexico. *Mining Engineering*, **46** (4), pp. 317-319.
- Jiménez, B. (1995) Water quality management in Mexico: actual and future policies. *Proceedings of the 22nd Annual Conference Integrated Water Resources Planning for the 21st Century*, Cambridge, Massachusetts, USA, May 1995, pp. 1141-1144.
- Kuroda, S. (1993). Photo/effluent treatment technology: Compact heat pump unit reduces energy consumption by two thirds. *IEA Heat Pump Centre Newsletter*, **11** (1).
- Maloney, N. (1992) Pre-feasibility study assessing the application of mechanical vapor recompression evaporation in the process of recovery of lithium from Mexican geothermal brines. *EA Technology, Contract No. 4.1014/91-018G*, Capenhurst, Chester CH1 6ES, United Kingdom.

- Mercado, S., J.A. López, R. Angulo, G.H. Barroso y M. Castañeda (1979). Extracción de KCl de las salmueras de desecho de la planta geotérmica de Cerro Prieto. Reporte Interno IIE/FE/G5-10, Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE). Inédito.
- Mohanty, B. y G. Thavalingham (1993). Techno-economic viability of upgrading thermal effluents in industries: application in developing countries. *J. Heat Recovery Systems & CHP*, **13** (3), pp. 189-200.
- Nguyen, M., S.B. Riffat y D. Whitman (1996). Solar/Gas-driven absorption heat pump systems. *Applied Thermal Engineering*, **16** (4), pp. 347-356.
- Reay, D.A. y D.B.A. Macmichael (1988). *Heat pump design and applications*, Pergamon Press, United Kingdom.
- Sánchez, L.M., F.C. Estrany y R.P. Oliver (1999). Planta potabilizadora de capacidad media. *Ingeniería Química*, No. 356, pp. 269-276.
- Santoyo, E., R.M. Barragán, D. Nieva, y S.P. Verma (1990). Application of ion chromatography to the chemical characterization of brines produced from wells of the Los Azufres geothermal field (Mexico). *Proc. Int. Ion Chromatography Symposium*, San Diego, CA, U.S.A., 10 p.
- Santoyo-Gutiérrez, S. (1995). An experimental study of a heat pump assisted effluent purification system, M. S. Thesis, University of Salford, United Kingdom. Inédito.
- Santoyo-Gutiérrez, S. (1997). Absorption heat pump assisted effluent purification. Ph.D. Thesis, University of Salford, United Kingdom. Inédito.
- Santoyo-Gutiérrez, S., J. Siqueiros, C.L. Heard, E. Santoyo and F.A. Holland (1999). An Experimental Integrated Absorption Heat Pump Effluent Purification System. Part I: operating on water/lithium bromide solutions. *Applied Thermal Engineering*, Vol. 19 (5), pp. 461-475.
- Santoyo-Gutiérrez, S., J. Siqueiros, C.L. Heard, E. Santoyo and F.A. Holland (2000). An Experimental Integrated Absorption Heat Pump Effluent Purification System. Part II: operating on water/carrol solutions. , *Applied Thermal Engineering*, Vol. 20 (3), pp. 269-284.
- Siqueiros, J., H. Fernández, C. Heard, y D. Barragán (1992). Desarrollo e implantación de tecnología de bombas de calor, Fase II, México. Informe Interno IIE/FE/11/2963/F, Instituto de Investigaciones Eléctricas. Inédito.
- Siqueiros, J., C. Heard, y F.A. Holland (1995). The commissioning of an integrated heat-pump assisted geothermal brine purification system. *J. Heat Recovery Systems & CHP*, **15** (7), pp. 655-664.
- Tay, J.H., S.C. Low, y S. Jeyaseelan (1996). Vacuum desalination for water purification using waste heat. *Desalination*, **106** (1-3), pp. 131-135.
- Ziegler, F. (1993). Absorption refrigeration, heat pump, and heat transformer cycles, *Seminario Recuperación de Calor Industrial por Medio de Bombas de Calor*, México, November 1993.

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.

Información y entropía

Tom Stonier

Escuela de Ciencia y Sociedad, Universidad de Bradford, Bradford, West Yorkshire

Extracto y traducción: Luis C.A. Gutiérrez-Negrín (CFE)

Se presenta a continuación un extracto del artículo original Towards a general theory of information II: information and entropy, aparecido en el número 2, Vol. 41, de la revista Aslib Proceedings de febrero de 1989.

El desarrollo futuro de los sistemas computacionales estará restringido no tanto por las limitaciones del hardware, sino por nuestra falta de comprensión de los procesos de razonamiento humano. El desarrollo de chips tridimensionales, superconductividad criogénica o sistemas ópticos –y en su momento de computadoras biológicas– presagia que surgirán generaciones de procesadores de super-información cuya potencia empuñecerá a la generación actual de computadoras como estas, a su vez, lo hicieron con las computadoras de la época previa a los transistores. El uso efectivo de esas poderosas computadoras del futuro estará limitado por la ausencia de una base teórica adecuada para el procesado de la información. Gordon Scarrott (1986) ha insistido en la necesidad de una ‘ciencia de la información’ que debería investigar las “propiedades naturales de la información, tales como su función, estructura, comportamiento dinámico y características estadísticas...” Tal esfuerzo debería “llevar hacia un marco conceptual que dirija el diseño de sistemas.”

En la actualidad no sólo no sabemos cómo trabaja el cerebro, sino que tampoco comprendemos la inteligencia como un fenómeno general. Peor aun, no sabemos qué incluye la información –la materia prima con que trabajan las computadoras. Debe ser obvio que el futuro diseño de sistemas de procesado de información aun más complejos, en ausencia de una teoría general de la información, será cada vez más difícil. El objetivo de este trabajo es examinar la ‘información’ como un fenómeno físico. Se considera que este es uno de los primeros pasos de una serie de estudios que lleven a una teoría general de la información, y de ahí a una teoría de la inteligencia –sin cuyo conocimiento la ingeniería no puede surgir como una ciencia verdadera.

Information and entropy

Future developments of computer systems will be handicapped not by the limitations of hardware, but by our lack of understanding of the human reasoning processes. The development of three-dimensional chips, cryogenic superconducting, or optical systems –and in due course, biological computers– presages the emergence of generations of super information processors whose power will dwarf the present generation of devices as they, in turn, have dwarfed the capacity of the computers of the pre-transistor age. The effective application of such powerful future computers will be limited by the lack of an adequate theoretical basis for the processing of information. Gordon Scarrott (1986) has championed the need for a ‘science of information’ which should investigate the “natural properties of information such as function, structure, dynamic behavior and statistical features...” Such an effort should “...lead to a conceptual framework to guide systems design.”

At the moment, we not only do not understand how the brain works, we do not understand intelligence as a general phenomenon. Worse, we do not even know what comprises information –the very raw material upon which computers work. It must be obvious that the future design of ever more complex information

processing systems in the absence of a general theory of information is increasingly bound to run into difficulties. It is the function of the present paper to examine 'information' as a physical phenomenon. It is intended that this is among the first steps in a series of explorations leading to a general theory of information, and from there to a theory of intelligence –without which knowledge engineering cannot emerge as a true science.

Perspectiva histórica

Nuestra percepción del mundo es producto de nuestra experiencia histórica. Por ejemplo, no fue sino hasta que tuvimos una experiencia significativa con las máquinas del tiempo –los relojes mecánicos– que se desarrolló nuestro concepto del tiempo. Como el profesor Whitrow (1975) ha señalado, la mayoría de las sociedades previas a la sociedad occidental de las postrimerías del Siglo XVII tendían a considerar al tiempo de una manera bastante difusa y más de carácter cíclico que lineal. Los relojes disociaron al tiempo de los acontecimientos humanos. El invento de Christian Huygens de un reloj pendular exitoso a mediados del Siglo XVII le dio al mundo un aparato que pudo definir el tiempo en términos de unidades pequeñas, aisladas y repetitivas. Además, para efectos prácticos el abuelo de los relojes podía funcionar para siempre. Así permeó en la cultura occidental el sentido del paso del tiempo, minuto a minuto, adquiriendo el tiempo propiedades de homogeneidad y continuidad, es decir una fuerza por derecho propio. Recientemente G. Szamosi (1986) ha argumentado persuasivamente que el concepto occidental del tiempo derivó de los músicos medievales quienes, para desarrollar la polifonía, requirieron escribir la estructura temporal de las diversas melodías.

De manera similar, no fue sino hasta que tuvimos suficiente experiencia con aparatos de energía, en particular la máquina de vapor, que apareció la ciencia de la termodinámica. Fue la experiencia con una máquina de energía la que forzó a una definición mucho más clara del concepto 'energía'. Hoy estamos en una situación histórica paralela. Hasta hace poco habíamos tenido muy poca experiencia con máquinas de información. Tenemos ahora una nueva experiencia: la computadora –es decir, una máquina electrónica capaz de procesar información de una manera en la cual antes sólo podía realizarse dentro de nuestras cabezas. No sólo los especialistas (diseñadores de sistemas, científicos de la computación, bibliotecarios, etc.) se han venido preocupando cada vez más por la tecnología de la información, sino que nuestra actitud como civilización está siendo afectada por el advenimiento de las máquinas procesadoras de información.

La organización de la materia

Uno de los grandes logros alcanzado en las ciencias biológicas en las últimas décadas fue la decodificación del ADN (ácido desoxirribonucleico). No sólo ha sido posible establecer más allá de toda duda razonable que el ADN puede llevar información que se transmite de una generación a la siguiente, sino que ha sido posible decodificar la manera en la cual se comunican estos mensajes. Entre otros hallazgos interesantes, la historia del ADN descubrió el hecho de que los mensajes transmitidos por este sistema de información aparentemente son comprendidos por todas las formas de vida de este planeta –bacterias y girasoles, ratones y hombres. La cantidad y naturaleza de la información contenida en el ADN puede variar de un organismo al siguiente, pero el método de codificarla en una molécula de ADN es el mismo.



Conforme se dilucidó que la estructura del ADN contiene información capaz de ser transmitida, también se hizo claro que otras macromoléculas y estructuras celulares como el ARN (ácido ribonucleico), las proteínas celulares y las membranas, también poseen información transmisible. Es decir, estas sustancias pueden ser replicadas en la célula (y por lo tanto transferir la información a la siguiente generación de estructuras) o bien ser relevantes para su propio crecimiento actuando como formatos que moldean la organización futura de átomos y moléculas. No sólo los sistemas orgánicos pueden transmitir información, sino también los inorgánicos. Por ejemplo, la industria de los chips se basa en el hecho de que es posible obtener una forma de sílice altamente purificada dejando que los cristales de sílice ‘crezcan’ en las soluciones adecuadas. La organización, es decir el arreglo espacial de los átomos de tal cristal, actúa como un molde para los otros átomos que se van agregando, dando como resultado un arreglo no fortuito –trayendo orden al caos (Prigogine y Stengers, 1985). Esto nos lleva a una generalización amplia: todas las estructuras organizadas contienen información. Las estructuras no organizadas pueden existir sin contener alguna forma de información. Lo que es más, la adición de información a un sistema se manifiesta a sí misma provocando que el sistema se vuelva más organizado, o reorganizado.

La información tiene tanta realidad física como la materia y la energía: la organización es a la información lo que la masa es a la materia, o el momento a la energía mecánica (Stonier, 1986). El propósito de este trabajo es examinar con más detalle la relación entre información y entropía.

La segunda ley de la termodinámica

La segunda ley de la termodinámica establece que para cualquier sistema existe un estado de equilibrio hacia el cual ese sistema puede cambiar espontáneamente; en consecuencia, si hay un cambio en el sistema que lo aleje del equilibrio, tal cambio puede ocurrir sólo a expensas del desplazamiento de otro sistema hacia el equilibrio. Si tal sistema se mueve en una dirección determinada mientras se le opone continuamente una fuerza que tiende a frenarlo, puede lograrse que el sistema realice un trabajo útil. Es posible determinar el máximo trabajo útil obtenible de tal sistema: esta cantidad se denomina cambio de energía libre, y se denota por los símbolos ΔF o ΔG . La magnitud ΔG da la máxima cantidad de trabajo que puede obtenerse de un sistema bajo un determinado conjunto de condiciones.

La segunda ley de la termodinámica se expresa frecuentemente como la ecuación: $\Delta G = \Delta H - T\Delta S$, donde ΔH es el cambio en el contenido de calor a presión constante, o ‘entalpía’, T es la temperatura absoluta, y ΔS es el cambio en ‘entropía’.

La entropía es uno de los conceptos peor definidos de la ingeniería y las ciencias físicas. Para un estudiante principiante de ingeniería o ciencias, no hay mayor dificultad en comprender los conceptos asociados a ΔG , ΔH o T : el *cambio de energía libre* es representativo del máximo trabajo útil obtenible, el *cambio en el contenido de calor* del sistema es resultado de la energía agregada (o sustraída), y la *temperatura absoluta* es una medida del contenido absoluto de calor del sistema. Todo tiene sentido.

No para la entropía. Esta aparece como una cantidad matemática mística cuya realidad física se vuelve imposible de visualizar. El hecho de que los cambios de entropía puedan medirse con precisión no elimina el velo de misterio. A diferencia del calor, que también puede medirse precisamente, la entropía no es perceptible por nuestros sentidos físicos. La entropía está tan fuera del rango de la experiencia común como lo está la realidad de las abstracciones matemáticas para todos aquellos que no pueden o no quieren creer en ellas.

De hecho, la entropía es una expresión matemática que describe el desorden. *No* es una expresión directa del contenido de calor o de su medida –la temperatura–, aunque está relacionada con ambos.

Entropía e información

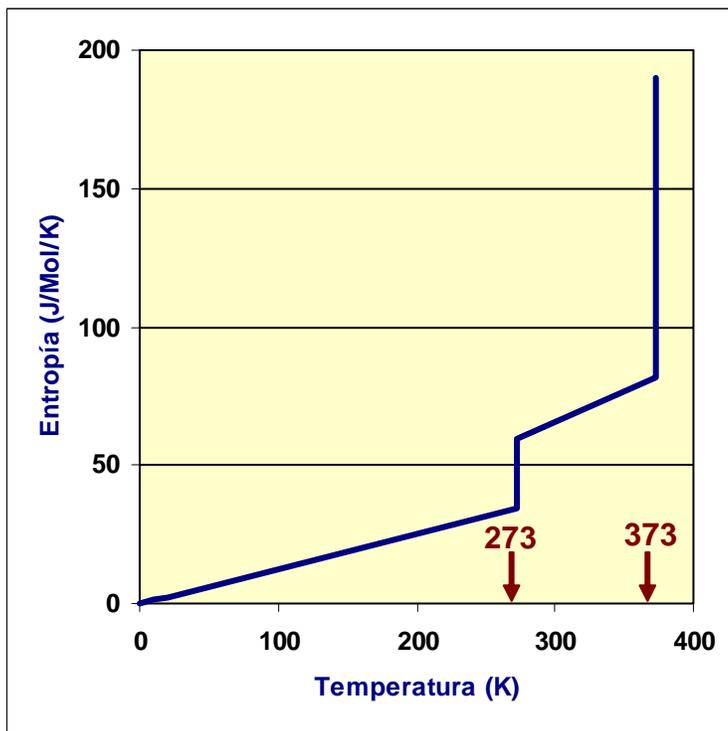


Fig. 1

La Figura 1 presenta la relación entre entropía y temperatura del agua, e ilustra que la entropía es una función de la organización de un sistema más que una mera función de su contenido de calor. Mientras la mayor parte de la curva demuestra una correlación general entre temperatura y entropía –es decir, conforme aumenta la temperatura lo hace la entropía–, hay dos discontinuidades mayores: una alrededor de los 273° K y otra a los 373° K. Por supuesto, estas son las temperaturas a las que el hielo se funde y el agua se convierte en vapor.

No puede ser una mera coincidencia que estos dramáticos incrementos en entropía, estas discontinuidades obvias, ocurran exactamente a las temperaturas donde podemos ver con nuestros propios ojos tan profundos cambios en la estructura de la materia (en este caso del agua).

Una lectura cuidadosa de la Figura 1 indica que la entropía debe de ser una función de la desorganización, o del desorden, puesto que se correlaciona con el movimiento crecientemente fortuito de las moléculas. Es este movimiento cada vez más azaroso el que ha llevado a veces a la percepción errónea de que la entropía es una función simple y directa del contenido de calor. La aplicación de calor a un cuerpo material ocasiona que las partículas del sistema vibren y se muevan al azar con velocidad creciente. Sin embargo, este proceso da por resultado no uno sino dos fenómenos: un aumento en el contenido energético del sistema –medible como un incremento de temperatura–, y un decremento en la organización del sistema –medible como un aumento de entropía. Aunque los dos, temperatura y entropía, van frecuentemente de la mano, representan procesos muy distintos. Esto se observa claramente siempre que uno compara los cambios de entropía con los cambios de temperatura en aquellas regiones donde ocurre un cambio mayor en la estructura de la materia: un gran cambio de entropía puede ocurrir sin cambio de temperatura.

De tal manera, un cambio de entropía puede ocurrir no sólo por un cambio en el contenido de calor del sistema, sino también por un cambio en su organización. Podemos desorganizar un sistema aplicando calor, como cuando un cubo de hielo se funde extrayendo calor de su derredor. Alternativamente, podemos desorganizar un sistema alterando su estructura, como al disolver un cubo de azúcar en agua. Nótese que en este segundo caso el cubo de azúcar que se disuelve realmente está emitiendo calor a su alrededor. De acuerdo con el postulado básico de que la organización es un reflejo del contenido de información de un sistema, podemos postular el teorema siguiente: la entropía de un sistema puede alterarse alterando su contenido de calor o su organización. En cualquier caso el resultado es un cambio en el contenido de información del sistema.

La ecuación de Schrödinger

Si un aumento de entropía representa una pérdida de organización, es decir una pérdida de información estructural, ¿cuál es entonces la relación precisa entre entropía e información? Para explorar este concepto empecemos con algunas ideas interesantes sugeridas hace más de 60 años por Erwin Schrödinger (1944). Partiendo de los trabajos de Boltzmann, Schrödinger estudió el significado estadístico de la entropía. La ecuación de Boltzmann, según Schrödinger, es: Entropía = $k \log D$, donde k es la constante de Boltzmann ($3,2983 \times 10^{-24}$ cal/° C) y D es “una medida cuantitativa del desorden atómico del cuerpo en cuestión”.

Schrödinger continúa indicando que el desorden (D) revela “... en parte el movimiento debido al calor, y en parte lo que es una mezcla de diferentes tipos de átomos y moléculas que se separan al azar en lugar de hacerlo ordenadamente, por ejemplo... azúcar y moléculas de agua...” Esto es, la difusión gradual del azúcar en un cuerpo líquido (como en una taza de te) representa un aumento del desorden (D). De manera similar, la adición de calor “...aumenta la confusión del movimiento debido al calor...”, y por tanto incrementa el desorden (D). Schrödinger enfatiza particularmente que cuando uno funde un cristal se “...destruye el arreglo ordenado y permanente de los átomos y moléculas y convierte el enrejado del cristal en una distribución fortuita continuamente cambiante.”

El subtítulo del libro de Schrödinger es *Aspectos físicos de la célula viva*. Entre otras cuestiones, se pregunta cómo expresar en términos estadísticos la tendencia de los sistemas vivientes a mantener tan bajos niveles de entropía. Sugiere que un organismo vivo “...se alimenta de entropía negativa...” Argumenta que si D es una medida del desorden, su recíproco $1/D$ puede ser considerado como una medida directa del orden. Por lo tanto, reformula la ecuación de Boltzmann de la manera siguiente: $-(\text{Entropía}) = k \log (1/D)$. En otras palabras, “la entropía, considerada con signo negativo, es por sí misma una medida del orden.” De esta manera, Schrödinger explica por qué un organismo mantiene bajos sus niveles de entropía. Lo hace “...extrayendo orden de su ambiente”.

La información como una función exponencial inversa de la entropía

La ecuación de Schrödinger es nuestro punto de partida. Empecemos con las dos consideraciones de Schrödinger: uno, que el desorden (D) es equivalente a la función de probabilidad de Boltzmann (W) tal como aparece expresada en su ecuación original $S = k \log (W)$, y dos, que el orden es el recíproco del desorden, esto es $Or = 1/D$, donde Or es una medida del orden del sistema.

Introduzcamos una tercera consideración. El contenido de información estructural de un sistema (Is) es una función del orden: $Is = f (Or)$

Para ser más precisos, la información estructural y la organización están directa y linealmente relacionadas. Así como a mayor contenido de materia de un sistema mayor es su masa, cuanto mayor información contiene tanto mayor es su estado de organización. Se podría argumentar, por ejemplo, que la cantidad de información contenida en un sistema está en función de las uniones que vinculan a las subunidades en un todo organizado (uniones que pueden romperse calentando el sistema). Sin embargo, hasta aquí es suficiente con asumir que la información estructural y la organización están directa y linealmente relacionadas, de modo que la ecuación $Is = f (Or)$ puede escribirse como $Is = c (Or)$, donde c es una constante a definir.

Como corolario, podemos considerar al orden como una función de la información, es decir: $Or = Is/c$, lo que significa $D = 1/Or = c/Is$. Como $D = W$, podemos sustituir en la ecuación original de Boltzmann el término c/Is para obtener (a) $S = k \log (c/Is)$. Despejando a Is se obtiene (b) $Is = c e^{-S/k}$.

Las ecuaciones (a) y (b) definen la relación fundamental entre la información estructural (Is) y la entropía (S). En la Figura 2 se presenta una gráfica de esta relación.

Entropía positiva

La Figura 2 muestra que mientras la entropía (S) aumenta, la información (I) decrece. Conforme la entropía se aproxima al infinito, la información se aproxima a cero. Puede ser difícil visualizar cómo un gas consistente de moléculas que se mueven al azar puede poseer alguna información. La curva que relaciona información con entropía debería caer rápidamente a cero (I) conforme uno se mueve a la derecha a lo largo del eje S , más que ser asíntótica a él.

No obstante, un gas consiste de moléculas y las moléculas contienen información estructural. La organización intrínseca de las moléculas afecta su comportamiento como gas. Esto es lo que explica que dos gases distintos, calentados igualmente bajo condiciones estándares, presenten cambios diferentes en los incrementos de entropía. Calentar un gas puede aumentar la velocidad a la cual se mueven las moléculas, pero tal aumento ocasiona sólo un incremento marginal de azar (desorden). Por lo tanto, la pérdida de organización a nivel intermolecular es mínima. A nivel intramolecular no se afecta la estructura interna de las moléculas. Por tanto, la pérdida total de información es escasa.

Pero si se sigue calentando el gas ocurrirán discontinuidades a las que pueden observarse grandes saltos de entropía asociados con la destrucción de la organización a niveles más fundamentales (véase la revisión de Greiner y Stocker, 1985). La primera de ellas implica la ionización de los gases conforme la intensidad de las colisiones moleculares ocasiona que los electrones salgan despedidos y los átomos se disocian. Por ejemplo, el vapor calentado a mil grados centígrados se vuelve un plasma de iones y electrones. A niveles de energía más altos, la propia integridad de los átomos queda en riesgo. En los estados normales de la materia el núcleo atómico es como una gota de líquido adentro de la cual los nucleones se mueven libremente pero raramente se aventuran más allá de su superficie. Aplicando energías suficientemente altas, la materia nuclear llega a 'hervir'. A temperaturas aun más altas, los nucleones mismos se desorganizan para dar lugar a un plasma de quarks y gluones (un *quagma*).

De particular interés es la relación de la entropía con esas transformaciones. Un grupo de la Universidad Estatal de Michigan ha utilizado el efecto de la entropía sobre el espectro de masa para medir la entropía producida en colisiones. El grupo encontró un aumento de la entropía producida en colisiones de partículas a energías intermedias considerablemente más alto que el que se esperaba a partir de cálculos basados en las propiedades de la materia nuclear normal. Lazlo P. Csernai de la Universidad de Minnesota sugirió que la entropía extra puede reflejar la transición de un líquido a vapor, y describió la secuencia de eventos que podrían conducir a tal observación.

El modelo hidrodinámico de colisiones de iones pesados descansa en conceptos termodinámicos. Estos asumen que las partículas en movimiento se mueven al azar. Es totalmente cierto que esta condición se cumple dentro de la materia del núcleo. Es decir, las partículas muy bien pueden interactuar entre sí. Sin embargo, las moléculas de gas en los sistemas termodinámicos clásicos se asumen ideales, esto es que no interactúan entre sí. Obviamente, este no es el caso en el mundo real. Por lo tanto, aun si las partículas nucleares interactúan ello no impide un análisis termodinámico. El aumento inexplicado de entropía en las reacciones nucleares probablemente está asociado con el rompimiento de cuerpos organizados.

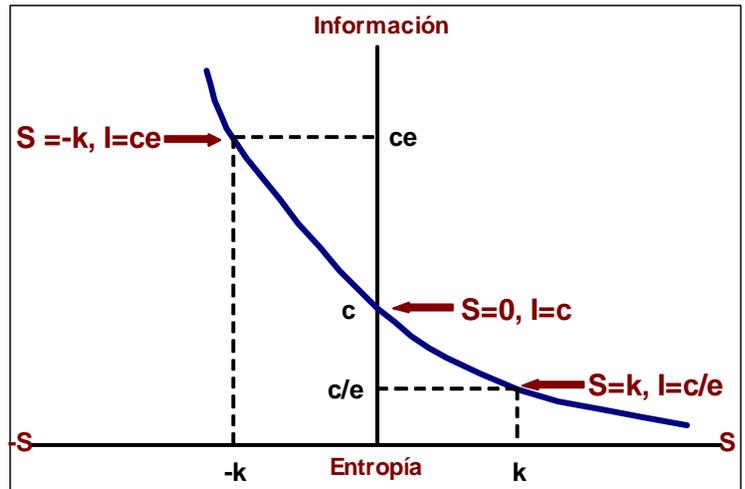


Fig. 2

El calor latente absorbido cuando el hielo se funde refleja el calor extra requerido para convertir una estructura cristalina en un líquido. Lo mismo es cierto cuando el agua líquida se evapora. Los puntos a lo largo de la curva calor-temperatura en los que se observa una discontinuidad en la relación entre la aplicación de calor, el aumento de temperatura (o la ausencia de ello) y el incremento de entropía, están siempre asociados con cambios básicos en la organización de la materia. Este principio es válido no sólo a cambios en la organización inter-molecular, sino también en la organización sub-molecular, sub-atómica y sub-nuclear.

A la luz de ello, uno esperaría que el estado de ‘cero información-entropía infinita’ se acerque cuando el sistema consiste de un plasma de partículas fundamentales puras que no contiene la menor organización (no sólo al nivel inter sino ni siquiera al nivel intra-partículas). El estado de ‘cero información-entropía infinita’ se alcanzaría cuando incluso las partículas fundamentales son transformadas (¿evaporadas?) en energía pura. En este punto la adición de más energía no tendría mayor impacto en la organización de la materia, dado que esta ya no existiría. En otras palabras, el estado de ‘entropía infinita’ no sólo comprendería el estado de información cero sino también el estado de cero materia.

Entropía negativa

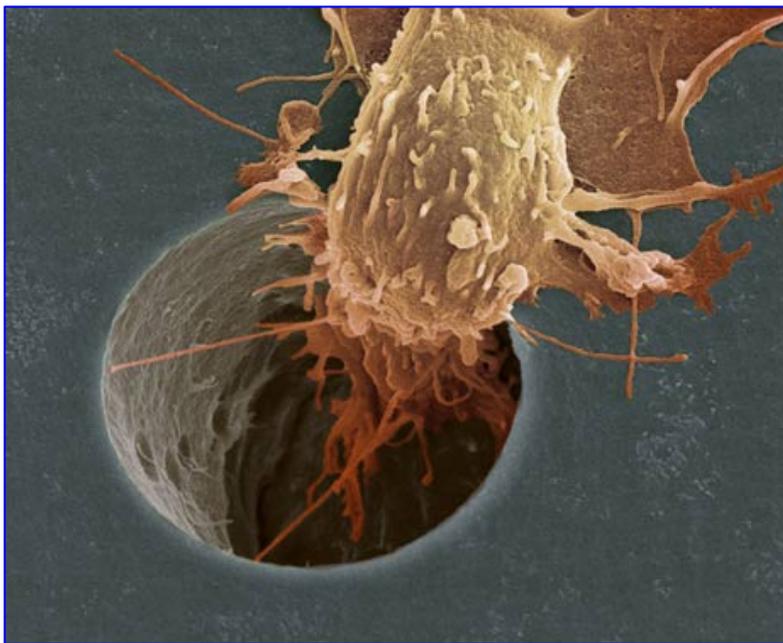
Las leyes de la termodinámica son tan aplicables a los sistemas químicos y biológicos como lo son a los sistemas físicos. Pero los sistemas biológicos son profundamente distintos de los físicos. Puesto que hay una entrada constante de energía en los sistemas biológicos desde una fuente distante (el sol), no resulta extraño que los científicos biólogos encuentren que en los sistemas que estudian hay con frecuencia reacciones en las que la entropía decrece continuamente. Al biólogo no le preocupa el hecho de que tal proceso ocurra solamente a expensas de la actividad solar (y por tanto aumentando la entropía total del universo). La experiencia rutinaria del biólogo con la acumulación de entropía negativa en el sistema que estudia, lo lleva obviamente a un concepto de la materia diferente del que tiene el físico o el ingeniero que casi nunca lo ve. No es por ello sorprendente para el biólogo que la curva que grafica la relación entre información y entropía indique que mientras la información siempre permanece positiva la entropía pueda volverse negativa. Esto lleva a la pregunta: ¿qué es la entropía negativa?

La entropía mide lo fortuito o desorganizado de la materia. La entropía contenida en la materia puede reducirse de una de estas dos maneras: extrayendo calor o agregando información. Si todo el calor posible pudiera ser extraído de un sistema, su temperatura sería de 0° K y, de acuerdo con W. Nernst, su entropía también sería cero. Esto se conoce como la Tercera Ley de la Termodinámica. La física de la información puede modificar esta ley. Si se acepta que la entropía es la medida de la organización, estando inversamente relacionadas, entonces a 0° K no hay nada que impida que el sistema se pueda volver aun más organizado agregando más información. Esto es, mientras que es imposible extraer más calor de un sistema que ya está a 0° K, volviendo así imposible reducir más la entropía (hacia un valor negativo) por la extracción de más calor, no hay ninguna razón teórica que impida que se reduzca la entropía agregando información. Y así como la temperatura puede descender de 0° F, punto que Fahrenheit seleccionó porque era lo más frío que se podía alcanzar en su época, la entropía puede seguir descendiendo del punto cero que Nerst seleccionó con base en sus estudios.

Hay otra manera de conceptualizar la posibilidad de que la entropía descienda de cero: visualizar una estructura aun más improbable que un cristal perfecto en el cero absoluto. ¿Qué podría ser más improbable que tal cristal? Un cristal perfecto a temperatura ambiente. Aunque la materia no ha sido investigada propiamente, las moléculas y sistemas orgánicos presentan propiedades que los cristales inorgánicos tienen cerca del cero absoluto. En primer lugar, los enlaces covalentes y de otro tipo –como los electrones pi resonantes–, estabilizan vínculos interatómicos de materia altamente organizada y compleja en estructuras fuertemente unidas. Es decir, a temperaturas bastante superiores a 0° K la restricción de libertad de movimiento de los

átomos en una molécula orgánica es igual a la de un cristal inorgánico a 0° K. Esta restricción de movimiento en un cristal orgánico organizado, tal como una molécula de proteína, es probablemente la causa de los grandes cambios de entropía cuando se desorganiza.

El segundo fenómeno que ocurre a 300° K en sistemas orgánicos y que sólo se encuentra cerca del cero absoluto en los inorgánicos, es la superconductividad. De nuevo, la materia no ha sido investigada apropiadamente, pero A. Szent-Gyorgyi (1968) sugirió hace buen tiempo que la función de una molécula como el caroteno es facilitar el movimiento de los electrones con una pérdida mínima de energía. Ciertamente, si se consideran las estructuras de resonancia electrónica no sólo de los carotenoides sino también de los fenoles, la clorofila, la hemoglobina, las membranas y otros sistemas similares, que se hallan en abundancia en todas las células, y se agregan a los hallazgos que los bioquímicos han alcanzado al dilucidar una miríada de sistemas metabólicos de transporte de electrones, se concluirá que es muy probable que muchas moléculas y sistemas orgánicos se comporten como superconductores.



Y aun más improbables y altamente organizadas que las moléculas y sistemas orgánicos son las células vivientes. Regresando a la Figura 2, conforme nos movemos en la curva de derecha a izquierda y atravesamos el eje I, nos movemos del reino de la termodinámica tradicional al reino de la biología y la física de la información. A medida que vamos hacia arriba de la curva en el cuadrante izquierdo estamos trazando la evolución de un arreglo de materia y energía aun más improbable y complejo. En la actualidad los sistemas biológicos, con pequeñas excepciones (como ciertas bacterias quimiosintéticas), obtienen su energía directa o indirectamente del sol. La luz, como hemos discutido en otro lado (Stonier, 1986), es una forma de energía con

un elevado componente de información. En general, los sistemas biológicos absorben calor –sea en forma de energía o de productos. Cuando generan calor, este es un subproducto de reacciones metabólicas y refleja usualmente una ineficiencia del sistema. La única excepción evidente es la producción de calor para mantener constante la temperatura en animales de sangre caliente. Esta necesidad de temperatura constante refleja sin duda un aumento de eficiencia de sistemas metabólicos avanzados que operan en un ambiente altamente organizado. Para mantener los muy elevados niveles de información estructural en el sistema, los cambios de entropía asociados con cambios de temperatura deben mantenerse al mínimo. El sistema de procesamiento de información más avanzado conocido es el cerebro de los mamíferos. Cuando la temperatura se eleva más allá de un límite crítico, así sea ligeramente (como en una fiebre alta), el sistema empieza a fallar y el individuo alucina. Por otro lado, un descenso relativamente pequeño de temperatura conduce a la narcosis. Así, incluso cambios relativamente menores de entropía (inducidos por el calor) cambian la delicada organización del sistema hasta interferir con el procesamiento efectivo de la información.

Por lo tanto, en la única excepción en la que los sistemas biológicos producen y utilizan calor, la función del calor agregado no es proporcionar energía sino mantener una temperatura estable para minimizar los cambios de entropía inducidos desde afuera. En otras palabras, el calor se utiliza para ayudar a estabilizar la organización –siendo un ejemplo donde la aplicación controlada de calor constituye una entrada de

información. Otro, que ocurre en un sistema físico inorgánico, es la inestabilidad de Benard y representa también un ejemplo en el que la energía se convierte en información. Esta inestabilidad aparece bajo ciertas circunstancias, cuando se calienta la superficie inferior de una capa líquida horizontal (como lo indican Prigogine y Stengers, 1985). Se forma un gradiente vertical de temperatura con un flujo permanente de calor de abajo hacia arriba. Si el gradiente no es demasiado grande, el calor se transmite sólo por conducción. Pero conforme el calor se aumenta ligeramente se alcanza un valor límite en el cual aparece la convección para transferir calor del fondo a la superficie. En la inestabilidad de Benard, este proceso puede implicar un movimiento de moléculas sumamente organizado. Prigogine y Stengers (1985) describen que “la inestabilidad de Benard es un fenómeno espectacular... Millones de moléculas se mueven coherentemente formando celdas hexagonales de convección de un tamaño característico.” En lugar de producir un mero aumento de desorganización por el aumento de calor, la inestabilidad de Benard crea estructuras que ayudan a transferir calor a través de la capa de líquido. Los autores también resaltan que “...la transferencia de calor era considerada como una especie de desperdicio en la termodinámica clásica. En la celda de Benard se vuelve una fuente de orden.”

Ese es, por tanto, un caso evidente en el que la aplicación de energía da por resultado un incremento en la organización del sistema. Esta forma particular de organización se mantiene sólo en la medida en que hay un flujo de calor de magnitud adecuada atravesando la capa horizontal de líquido. Cuando la energía se retira la estructura se colapsa –la información desaparece. (Por supuesto, si la aplicación de calor es demasiado grande, el líquido no puede transportarlo hacia arriba de manera suficientemente rápida y las corrientes de convección se vuelven más y más turbulentas conforme el líquido empieza a hervir.)

Mientras los físicos en el pasado han estado visualizando un universo que se dirige hacia un estado de completo azar sin ninguna estructura –que llevaría finalmente a su ‘muerte entrópica’–, los biólogos han venido observando lo opuesto: la evolución de sistemas crecientemente complejos. Para los biólogos, virtualmente todo sistema estudiado ha incrementado su complejidad conforme evoluciona. El proceso siempre es el mismo, sea que estudien el ADN y los sistemas genéticos relacionados, los sistemas metabólicos, las estructuras celulares, el desarrollo de órganos como el corazón o el cerebro, la evolución de los organismos, los ecosistemas o la biosfera. Sistemas simples se vuelven más complejos, más diferenciados, más integrados, tanto dentro de sí mismos como hacia afuera en su ambiente –en resumen, los sistemas biológicos evolucionan para volverse crecientemente improbables.

El resto del universo puede dirigirse a un estado de máxima entropía, pero en este planeta (con la ayuda del sol) la entropía está disminuyendo continuamente. Esto es cierto no sólo para los sistemas biológicos, sino que se vuelve más evidente cuando uno observa la evolución cultural, la cultura tecnológica y la evolución de los sistemas humanos de información.

Magnitudes de la información

El hecho de que (I) como función exponencial inversa de (S) pueda implicar magnitudes ridículas no debe detenernos. La probabilidad de que ocurran espontáneamente estructuras sumamente organizadas a temperaturas superiores a 0° K debe de ser infinitesimal. Los enormes números asociados con la improbabilidad de sistemas avanzados de información llevan a que uno se pregunte de entrada cómo tales sistemas pueden ser posibles. La respuesta está en las propiedades recurrentes de los sistemas de información. Los sistemas organizados tienen resonancias. Las resonancias conducen a oscilaciones. Las oscilaciones representan ciclos temporales en los cuales pueden ocurrir cambios. Estos cambios pueden disminuir o amplificar las oscilaciones existentes. O pueden crear nuevas resonancias y excitar nuevas series de oscilaciones. A mayor complejidad del sistema, mayor probabilidad de introducir cambios en él durante un ciclo determinado. De ahí el crecimiento exponencial de la información.

Poundstone (1985) ve al universo como “un objeto geométrico definido de manera recurrente”. Esto significa que puede construirse complejidad sobre la complejidad. La improbabilidad se alimenta de más improbabilidad. Uno no arranca de cero información y se atiene a que los proverbiales monos mecanografiando al azar lleguen a componer el Hamlet (Bennet, 1977). Por el contrario, un sistema de información sumamente avanzado llamado William Shakespeare nació en un sistema de información aun más avanzado llamado sociedad Isabelina –y en su momento agregó mayor información conforme el universo avanzaba otro ciclo.

Sumario y conclusión

Los sistemas futuros de computación tendrán que sustentarse cada vez más en los avances en la ingeniería del conocimiento para que puedan ser aplicados de manera efectiva. De momento, la ingeniería del conocimiento es un negocio fortuito que debe sustentarse en métodos empíricos de prueba y error, siendo aún la inteligencia artificial incapaz de cumplir las expectativas que levantó décadas atrás. Al menos una parte del problema, tal vez la mayor parte, es nuestra ignorancia. No sabemos cómo trabaja el cerebro, no entendemos el fenómeno de la ‘inteligencia’ y ni siquiera comprendemos qué es ‘información’. Esto último resulta particularmente irónico ya que la información es la materia prima con la que trabaja una computadora. Obviamente, una de las tareas mayores que enfrenta la ingeniería del conocimiento es bosquejar una teoría general de la información.

Este trabajo es un primer paso en una serie de estudios que, esperamos, llevarán a una auténtica teoría de la información. En síntesis, este trabajo propone que:

1. La información es una propiedad física del universo, tan ‘real’ como la materia y la energía. La existencia del ADN mucho antes de que apareciera el cerebro de los mamíferos, demuestra que la información no es una invención de la mente humana.
2. Todo sistema que presente organización contiene información. La organización es a la información lo que la masa a la materia o el momento a la energía mecánica.
3. A mayor organización de un sistema, mayor su contenido de información. Se asume que así como hay una correlación directa y lineal entre materia y masa, también existe una correlación directa y lineal entre información y organización: $I_s = c (Or)$.
4. La entropía de un sistema es una medida de su estado de desorganización. Entropía e información están inversamente relacionadas: $S = k \log (c/I_s)$.
5. A medida que se desarrolla una teoría de la información y se vuelve posible medir la entropía de sistemas de información avanzados, los ingenieros del conocimiento no deberían sorprenderse si encuentran que se viola la Tercera Ley de la Termodinámica. Los sistemas avanzados de información tendrán valores negativos de entropía, siendo estos valores negativos resultado no de extraer calor sino de agregar o acumular información.
6. Sea lo que la unidad básica de información física pruebe ser, los sistemas avanzados de información contendrán tales magnitudes de unidades básicas que requerirán notaciones matemáticas que habrán de empujarse las notaciones actualmente utilizadas por los astrónomos. Sólo se necesita reflexionar sobre la improbabilidad termodinámica de tener un universo físico e inorgánico que contenga a dos seres humanos discutiendo sobre la improbabilidad termodinámica de su discusión. Queda por ver si esas gigantescas magnitudes constituirán un problema para dilucidar el contenido verdadero de información de, por ejemplo, un sistema experto.

Referencias

- Bennet, W.R. (1977). How artificial is intelligence? *Amer. Scient.* 65, pp. 694-702.
- Greiner, W., and H. Stocker (1985). Hot nuclear matter. *Scientif. Amer.* 252(1), pp. 58-66.
- Poundstone, W. (1985). *The Recursive Universe*. Contemporary Books, Chicago.
- Prigogine, I., and I. Stengers (1985). *Order Out of Chaos*. Fontana, London.
- Scarrot, G. (1986). The need of a 'science' of information. *Jour. Inform. Technol.* 1(2), pp. 33-38.
- Schrödinger, E. (1944). *What is Life?* Cambridge University Press.
- Stonier, T. (1986). Towards a new theory of information. *Telecom. Policy* 10(4), pp. 278-281.
- Stonier, T. (1986). What is information?, in *Research and Development in Expert Systems III*. M.A. Bramer (Ed.), Cambridge University Press, pp. 217-230.
- Szamosi, G. (1986). *The Twin Dimensions: Inventing Time and Space*. McGraw-Hill, New York.
- Szent-Gyorgyi, A. (1968). *Bioelectronics*. Academic Press, New York.
- Whitrow, G.J. (1975). *The Nature of Time*. Penguin Books, Harmondsworth, Middlesex.

Nueva columna del Boletín del GRC ***Susan Hodgson***

Geothermal History, es una nueva columna regular del **Boletín** del GRC (*Geothermal Resources Council*), que está abierta a los historiadores de la geotermia en todo el mundo. Si usted es parte de la comunidad geotérmica, seguramente tiene guardado algo que es parte de la historia de la geotermia. Cada experiencia geotérmica merece ser publicada... desde antiguas creencias y usos que usted haya descubierto hasta desarrollos que haya observado que desembocaron en prácticas actuales. Todo es importante: herramientas, ideas, métodos operativos.

Las dimensiones de los asuntos históricos no importan. Pueden ser muy cortos o bastante largos, un párrafo o un ensayo, un dibujo o una foto. El objetivo es salvar nuestra herencia geotérmica y, por fortuna, la publicación es una buena manera de hacerlo. Mande sus ideas de publicación a cosmos@dcn.org (Necesitamos comentar sobre sus fotos antes de que las mande por correo electrónico debido a restricciones de descarga.)

Congreso anual 2006 y XIV Asamblea General de la Asociación Geotérmica Mexicana

Luis C.A. Gutiérrez Negrín

CFE, Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos

Alejandro Volta 655, Col. Electricistas, Morelia, Mich., México, CP 58290, luis.gutierrez03@cfe.gob.mx

El 8 de septiembre de 2006 se llevaron a cabo el Congreso Anual 2006 y la décimo cuarta Asamblea General Ordinaria de la Asociación Geotérmica Mexicana (AGM), en un solo evento realizado en las instalaciones de la Comisión Federal de Electricidad del campo geotérmico de Cerro Prieto, BC.

El evento se realizó bajo el programa siguiente:

Horario	Actividad / Ponencia	Autor(es)
9:00 – 10:00	Registro e inscripciones en la Residencia General de Cerro Prieto	
10:00 – 10:25	Simulación numérica de la red de vaporductos del campo geotérmico de Cerro Prieto, BC	<u>A. García</u> , J.I. Martínez, A.F. Hernández, M. Ceceñas, R. Ovando, E. Salaces, I. Canchola, O. Mora, S. Gutiérrez, C. Miranda, M. Hernández y S. López
10:25 – 10:50	Red de instrumentación geotécnica en el Valle de Mexicali, BC	<u>Ewa Glowacka</u> , Olga Sarychikhina, Rogelio Vázquez, Francisco Farfán, Guillermo Díaz de Cossío, Luis Orozco y Miguel Guzmán
10:50 – 11:15	Medio ambiente, geotermia y toma de conciencia	<u>Sergio Mercado</u> , Víctor M. Arellano y Rosa María Barragán
11:15 – 11:40	Análisis de la evolución productiva del pozo M-19A del campo geotérmico de Cerro Prieto, BC	<u>Marco Helio Rodríguez Rodríguez</u> y Francisco Romero Ríos
11:40 – 12:05	Modelación de la subsidencia en el campo geotérmico de Cerro Prieto, BC	<u>Olga Sarychikhina</u> , Ewa Glowacka, Miguel Guzmán y Francisco Suárez
12:05 – 12:20	Receso	
12:20 – 12:45	Ensayos de polimerización y depósito de sílice, pruebas de radiotrazadores y simulación numérica en el campo geotérmico de Berlín, El Salvador, CA	Marlon R. Castro Fuentes, Dina López y <u>Jaime Alonso Reyes López</u>
12:45 – 13:10	Interpretación preliminar de la composición gaseosa de pozos del sector CP IV, del campo geotérmico de Cerro Prieto, México	<u>Rosa María Barragán R.</u> , Víctor M. Arellano G., Enrique Portugal M., Alfredo Pérez R., Marco Helio Rodríguez R., Jesús de León V.
13:10 – 13:35	Respuesta piezométrica del acuífero freático a los eventos de deformación superficial en el campo geotérmico de Cerro Prieto, BC	<u>Rogelio Vázquez</u> , Olga Sarychikhina, Ewa Glowacka y Alejandro Díaz
13:35 – 14:00	Características corrosivas de salmueras geotérmicas	Benjamín Valdez y Michael Schorr (presentado por <u>Margarito Quintero</u>).
14:00 – 15:30	Lunch	
15:30 – 17:00	XIV Asamblea General Ordinaria de la AGM	

Las memorias del congreso se prepararon en un disco compacto que se entregó a todos los asistentes, mismos que también recibieron una impresión con los resúmenes. Además, la mayor parte de los trabajos se publicará en la revista *Geotermia*.

Al inaugurar el congreso, el Fís. José Luis Quijano León, Vicepresidente de la AGM, dio lectura a cartas con saludos enviados por John W. Lund, Presidente de la *International Geothermal Association* (IGA), y de Raffaele Cataldi, Vicepresidente de la Unión Geotérmica Italiana (UGI). Tanto la AGM como la UGI son parte de la IGA.

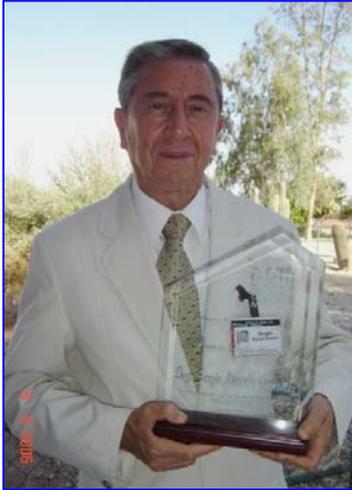


Después del congreso se llevó a cabo la XIV Asamblea General Ordinaria de la AGM bajo la siguiente orden del día, de acuerdo con la convocatoria respectiva:

1. Lectura del acta de la XIII Asamblea General Ordinaria.
2. Informe de actividades del Consejo Directivo saliente.
3. Informe del Tesorero saliente de la AGM.
4. Entrega del Premio "Pathé" 2006.
5. Elección del Consejo Directivo 2006-2008.
6. Toma de posesión del Consejo Directivo 2006-2008.
7. Asuntos Generales.

El acta de la XIII Asamblea y los informes de actividades del Consejo Directivo saliente y del Tesorero saliente fueron aprobados unánimemente, y el Premio Pathé 2006 fue entregado al Ing. Sergio Mercado González quien lo recibió de manos del Ing. Héctor Alonso Espinosa, recipiendario del Premio Pathé 2005.

El galardonado de este año es un ingeniero químico de profesión involucrado en la geotermia desde los años sesenta. En 1977 ingresó al Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE) donde fundó el Departamento de Geotermia y lo dirigió hasta 1984. Ha sido especialista en geotermia para la Organización de las Naciones Unidas y presidente del Panel de Expertos en Geotermia de esta organización entre 1979 y 1981. En 1982 realizó una inmersión a 2 mil 600 metros de profundidad en aguas del Océano Pacífico a bordo del minisubmarino Alvin y descubrió una zona de chimeneas geotérmicas submarinas. Ha publicado más de 120 trabajos técnicos, es titular de tres patentes y fue miembro del Sistema Nacional de Investigadores entre 1984 y 1996. A la fecha continúa trabajando en el IIE.



El Consejo Directivo 2006-2008 quedó constituido de la manera siguiente:

Presidente:	Fís. José Luis Quijano León
Vicepresidente:	Ing. Raúl Maya González
Secretario:	Dr. Rogelio Vázquez González
Tesorero:	Ing. Luis C.A. Gutiérrez Negrín
Prosecretario:	Dr. Alfonso García Gutiérrez
Protesorera:	M.C. Magaly del Carmen Flores Armenta

El Mundo de la Energía

(Con información recopilada por Alfredo Mañón Mercado)

□ Energía de las olas en España y Estados Unidos

La primera planta eléctrica que funcionará con energía de las olas en España se construirá en las costas de Santoña, Cantabria. Constará de diez boyas ancladas en el lecho marino a una profundidad de 50 metros. Con una capacidad total de 1.25 a 2 MW, utilizará el primer prototipo de la tecnología *PowerBuoy*, desarrollada por *Ocean Power Technologies* (OPT). El *PowerBuoy* es un convertidor de energía situado en el mar que se sumerge más de un metro bajo la superficie. Contiene dentro un pistón que con las sacudidas producidas por las olas transmite el movimiento a un generador eléctrico, produciendo la electricidad, que se envía a tierra firme por un cable subacuático.



En Estados Unidos, la misma compañía OPT ha solicitado un permiso para instalar una central de 50 MW con la tecnología *PowerBuoy* frente a las

costas de Oregon, en Reedsport. Como parte inicial del permiso, se instalarán boyas a unos 4 km de la costa y ancladas a 50 metros de profundidad con una capacidad total de 2 MW, y el permiso para la central mayor quedaría sujeto al desempeño de esta primera etapa.

Más información:

<http://www.proyectosfindecarrera.com/olas-energia.htm>,

<http://www.oceanpowertechnologies.com/index.htm>

□ Diferencias en las temperaturas oceánicas para calefacción y refrigeración

Al noreste de la ciudad costera de Dalian, China está construyendo la primera instalación de bombas de calor marinas para calefacción y refrigeración doméstica. El sistema aprovecha la energía liberada por las diferencias de temperatura del agua de mar para proporcionar aire acondicionado y calefacción a edificios residenciales en un área de dos kilómetros cuadrados. Por ejemplo, en el Mar del Sur la temperatura superficial del agua es de unos 28° C, permaneciendo más o menos constante en todo el año, mientras que a unos 35 metros de profundidad la temperatura desciende a menos de 3° C. En otras partes, como en el Mar Amarillo y la Bahía de Bohai, las temperaturas fluctúan a lo largo del año, pero siempre con un diferencial aprovechable entre la superficie y la profundidad.

Más información:

<http://www.worldwatch.org/node/4537>

□ Aerogeneradores marinos gigantes

El Departamento de Energía (DOE) de Estados Unidos ha firmado un acuerdo de colaboración con el fabricante de aerogeneradores GE Energy para desarrollar una nueva generación de aerogeneradores con una potencia unitaria de 5 a 7

MW y con aplicación en el entorno marino. Se prevé que la nueva máquina tendrá una altura de 150 metros, 30 más que el modelo actual de aerogenerador marino de GE de 3,6 MW. Estará concebida para aguas de hasta 40 metros de profundidad, superando en 10 metros la máxima alcanzable actualmente. El primer prototipo estará listo hacia 2011.

Más información: <http://www.ge.com/en/>
<http://www.energias-renovables.com/paginas>

□ Aerogeneradores flotantes

El Instituto de Tecnología de Massachusetts ha diseñado un aerogenerador que puede colocarse a 150 kilómetros de la costa, en plataformas flotantes mar adentro, donde los vientos son fuertes y continuos. Este aerogenerador podría trabajar a profundidades en el rango de 30 a 200 metros y tendrían una potencia de 5 MW.

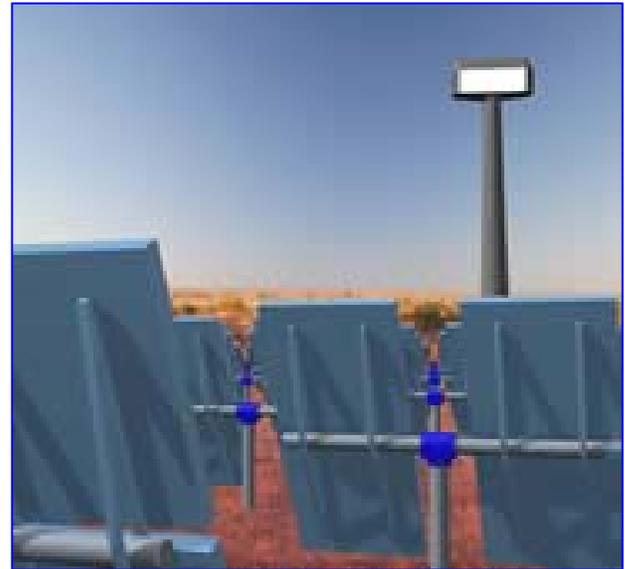
Como las turbinas no estarán permanentemente ancladas al piso del océano, se podrían cambiar de sitio.

Más información: <http://web.mit.edu/erc/>
<http://www.renewableenergyaccess.com/rea/news>

□ Se construye en Australia la mayor central solar fotovoltaica del mundo, de 154 MW

El gobierno australiano ha anunciado la próxima construcción de una central solar de tecnología fotovoltaica de concentración que tendrá una potencia de 154 MW, lo que la convertirá en la mayor del mundo. La central, con un costo estimado de 420 millones de dólares, será construida al noroeste de Victoria por la compañía australiana Solar Systems y estará conectada a la red nacional de distribución. Utilizará celdas solares con multi-uniones de alto desempeño, diseñadas originalmente para satélites, en módulos que trabajan mil 500 veces mejor que los paneles solares estándares en el tipo de tecnología conocida como concentrador fotovoltaico heliostático (HCPV). Contará con 19 mil 250 heliostatos, 246 receptores y 62 mil 976 módulos

fotovoltaicos. Se estima que la primera etapa se completará en 2010 y entrará en funcionamiento total hacia el año 2013, cuando empiece a generar unos 270 GWh al año, suficiente para satisfacer la demanda de 45 mil hogares. Se calcula que la central evitará la emisión a la atmósfera de unas 396 mil toneladas de gases de invernadero al año.



Más información:

<http://www.solarsystems.com.au/154MWVictorianProject.html>,
<http://www.energias-renovables.com/paginas/>

□ Proyecto Elioth: “Montañas solares”

El proyecto Elioth, desarrollado por la empresa francesa OTH, tiene como origen el concepto de chimeneas solares diseñadas por Günther en 1931. Se basa en un principio de central solar de chimenea que ha sido objeto de una patente internacional. La idea que da origen al proyecto es que se pueden aprovechar los relieves naturales de la superficie terrestre, que son las montañas. Así, una chimenea solar puede alcanzar los 200 metros o incluso los 3 mil metros de altura sin que esto constituya mayor problema, si el conducto de la chimenea sigue y se apoya en el relieve de las montañas. Según los responsables de Elioth, las montañas solares permitirían crear centrales eléctricas con potencias que pueden llegar a los 500 MW, a un costo de construcción que podría ser inferior a mil euros por kilowatt instalado. La compañía tiene un proyecto en estudio en

Australia que contempla una central de 200 MW con un tiro térmico acentuado gracias a una chimenea de mil metros de altura. Las llamadas “montañas solares” permiten una construcción ultrarrápida y libre de impactos ambientales, y su sencillez permite desmontarlas fácilmente, sin dejar mayor rastro, cuando ya no se consideran necesarias.



Más información: www.eliotech.com, www.oth.fr

□ Estufa urbana de concentración solar

Investigadores del Instituto Politécnico Nacional (IPN), de México, trabajan en el diseño y la construcción de una estufa urbana de concentración solar, única a nivel mundial. El antecedente de ese electrodoméstico es la estufa solar rural, con la que la institución obtuvo el segundo lugar nacional en la categoría de Energías Renovables, en un certamen organizado por la Secretaría de Energía de México. La Estufa de Concentración Solar cuenta con reflectores planos segmentados y un tanque térmico que acumula una temperatura de casi 500° C, el cual permite su funcionamiento en días nublados, de día y de noche.

Más información:

<http://www.presidencia.gob.mx/buenasnoticias/>

□ Más vehículos que consumen etanol y biodiésel

Daimler-Chrysler, Ford y General Motors duplicarán su producción de vehículos que pueden funcionar con etanol o mezclas de biodiésel, y

esperan producir para 2010 unos dos millones de automotores que usen E85 (85% de etanol) o mezclas de biodiésel. Las compañías hicieron este compromiso en una carta dirigida a miembros del congreso norteamericano, firmada por sus presidentes y/o directores generales Tom LaSorda (Chrysler), Bill Ford (Ford) y Rick Wagoner (GM). Indicaron que esta producción adicional de vehículos de ese tipo ayudará a la independencia energética de Estados Unidos.

Más información: <http://domesticfuel.com/?cat=30>

□ Bacterias energéticas

Las bacterias se pueden utilizar para generar electricidad, para producir combustibles alternos como el etanol e incluso para mejorar la producción de pozos petroleros existentes, empleando diversas fuentes naturales de alimentación. Las celdas microbianas de combustible son potencialmente capaces de convertir desechos orgánicos y biomasa renovable en electricidad. Investigadores de la Universidad de Massachussets, en Estados Unidos, consiguieron decuplicar la producción de electricidad de una celda microbiana de combustible permitiendo a las bacterias crecer sobre bio-películas en los electrodos de una celda de combustible. De esta manera las bacterias pudieron transferir electrones a los electrodos a través de la bio-película. Los investigadores descubrieron que las bacterias producen filamentos de proteína conductivos, llamados pili nanocables, para transferir sus electrones.

Por su parte, otro grupo de investigadores de la Universidad Nacional Autónoma de México anunció que mediante ingeniería genética ha logrado que la bacteria *Bacillus subtilis* fermente directamente la glucosa del azúcar para convertirla en etanol con una alta eficiencia del 86%. Este es el primer paso para desarrollar una bacteria capaz de romper y fermentar la celulosa de la biomasa para convertirla directamente en etanol.

Más información:

<http://www.renewableenergyaccess.com/rea/news/>

□ Plantas eléctricas de hidrógeno

El gigante petrolero British Petroleum (BP) y General Electric (GE) desarrollarán de diez a quince estaciones eléctricas de hidrógeno, que incluirán la captura y almacenamiento de carbono. Estas estaciones trabajan convirtiendo combustibles fósiles en hidrógeno, el cual se utiliza para generar energía eléctrica y bióxido de carbono. En este caso, las dos firmas emplearán tecnología de secuestro de carbono para capturar este gas de efecto invernadero y enterrarlo, en lugar de emitirlo a la atmósfera. GE se ha unido a BP en la construcción de dos de esas plantas en Escocia y California, como un primer paso de su asociación.

Más información:

http://www.edie.net/news/news_story.asp?id=11777&channel=0

□ Invernadero con calor geotérmico en Turquía

La empresa Agrobay de Turquía, la más grande proveedora de productos de invernadero a Europa, informa que construirá el invernadero más grande del mundo con nuevas inversiones. Esta empresa exporta actualmente a Europa unos 4 millones de euros anuales con su producción de tomates y pimientos de sus invernaderos calentados con calor geotérmico que tienen 250 m² de superficie, y fueron construidos en el año 2003. Agrobay es la primera empresa en utilizar tecnología geotérmica en Turquía.

Más información: <http://www.alternative-energy-news.info/geothermal-power/>

□ 25 aniversario de la Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos de la CFE

La Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos (GPG) de la Comisión Federal de Electricidad, cumplió 25 años el pasado 18 de noviembre de 2006. Esta gerencia, que tiene a su cargo la exploración, desarrollo y explotación de los recursos geotérmicos y de otras nuevas fuentes de

energía de México, se formó a partir de la integración de dos grupos que habían venido trabajando separadamente en el centro del país y en el campo geotérmico de Cerro Prieto.

Hace un cuarto de siglo la capacidad geotermoeléctrica de México era de 150 MW, constituida por cuatro unidades a condensación y doble flasheo de 37,5 MW cada una que operaban en ese campo. Hoy, la capacidad instalada se ha sextuplicado, llegando a los 953 MW, instalados en 36 unidades de diversos tipos (condensación, flasheo simple y doble, contrapresión, ciclo binario) y tamaños (de 1,5 a 110 MW), que operan cotidianamente en cuatro campos en explotación.

El crecimiento de la geotermia en ese periodo equivale a haber instalado un promedio de 32 MW en cada uno de esos 25 años, es decir a incorporar a la producción un campo geotérmico casi del tamaño actual del campo geotérmico de Los Hornos.

Fuera del ámbito de la geotermia, la GPG diseñó y construyó las plantas eólicas de La Venta I y La Venta II, en Oaxaca, y Guerrero Negro, en Baja California Sur, así como los proyectos híbridos (eólico, solar, diésel) de San Juanico y de Puerto Alcatraz, ambos en este último estado.



El Consejo Editorial de la revista *Geotermia* felicita a la GPG por su vigésimo quinto aniversario y le desea que cumpla otros 25 años y continúe promoviendo el desarrollo de la geotermia y otras fuentes alternas de energía en México.

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

luis.quijano@cfe.gob.mx, luis.gutierrez03@cfe.gob.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, y se colocará entre paréntesis el año de la publicación después del apellido del último autor. 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

luis.quijano@cfe.gob.mx, luis.gutierrez03@cfe.gob.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. *Geothermia* 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, putting into parenthesis the year of publication after the last author. 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. *Geothermia*, 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 *Geothermia* 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.