

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*

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

Integral use of geothermal resources is one of the most important objectives for the upcoming years. Presently, using geothermal heat pumps offer two benefits: use heat from residual brines and convert these brines in highly pure water. Design and description of an experimental system to purify geothermal brines integrated to an adsorption heat-pump are presented. This 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 Performance Coefficient (COP)_A of 1.4. These results are encouraging to project units at an industrial level, to be operated through geothermal and/or solar heat.

Key words: 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 estos 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):

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.

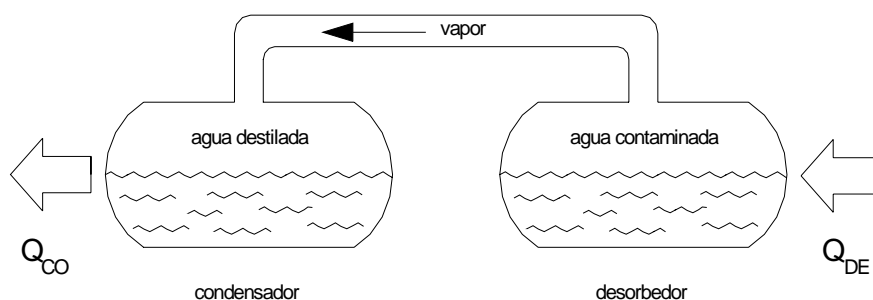


Fig. 1. Diagrama esquemático de un sistema de purificación de efluentes asistido por energía térmica

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).

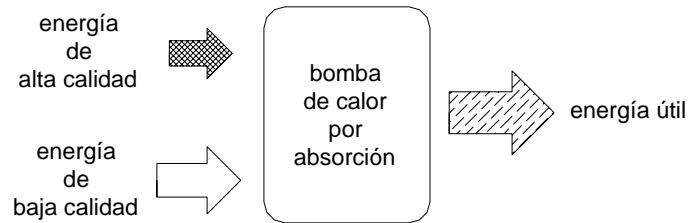


Fig. 2. Diagrama esquemático simplificado de una bomba de calor por absorción

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

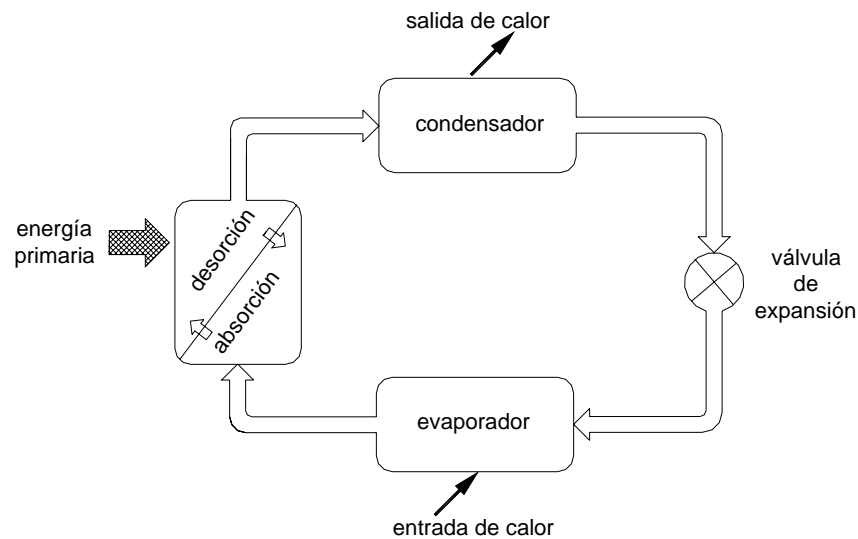


Fig. 3. Diagrama de bloques de una bomba de calor por absorción con sus principales componentes

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.

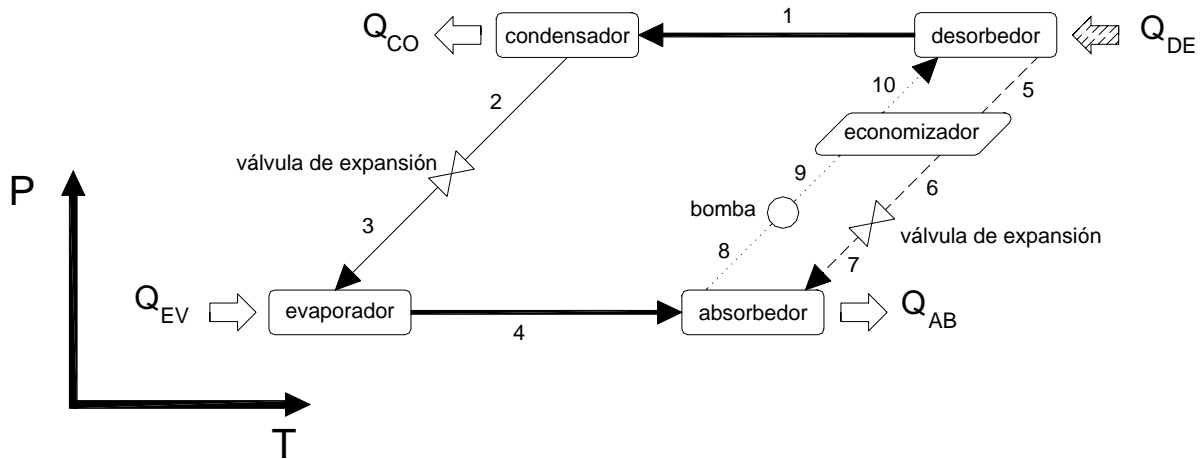


Fig. 4. Diagrama esquemático del ciclo de una bomba de calor por absorción en una gráfica de presión P contra temperatura T

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.

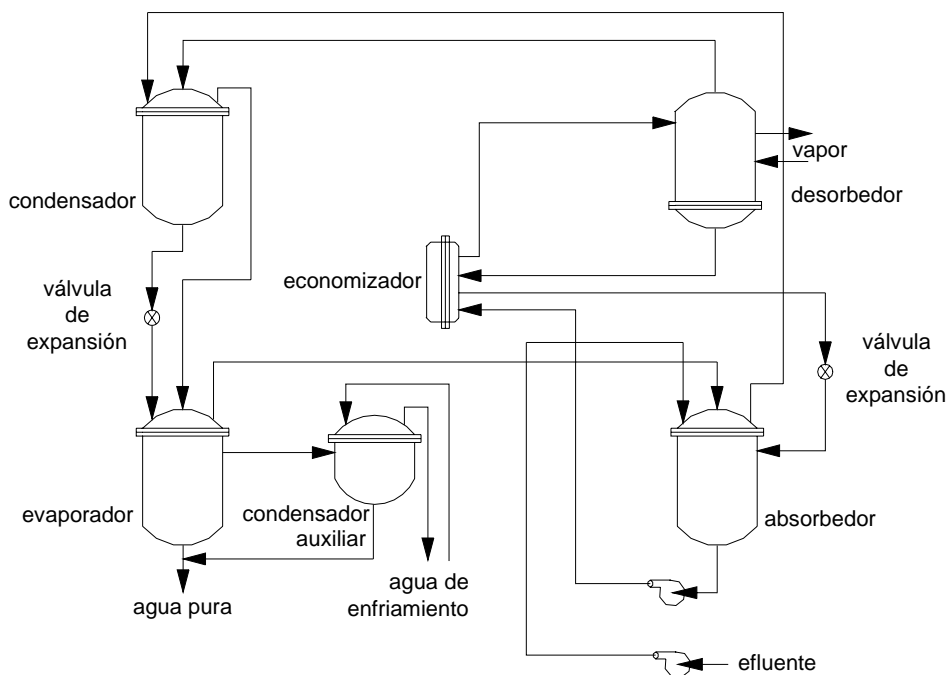


Fig. 5. Diagrama esquemático del sistema experimental de purificación de efluentes asistido por una bomba de calor por absorción.

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).

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, en el 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.

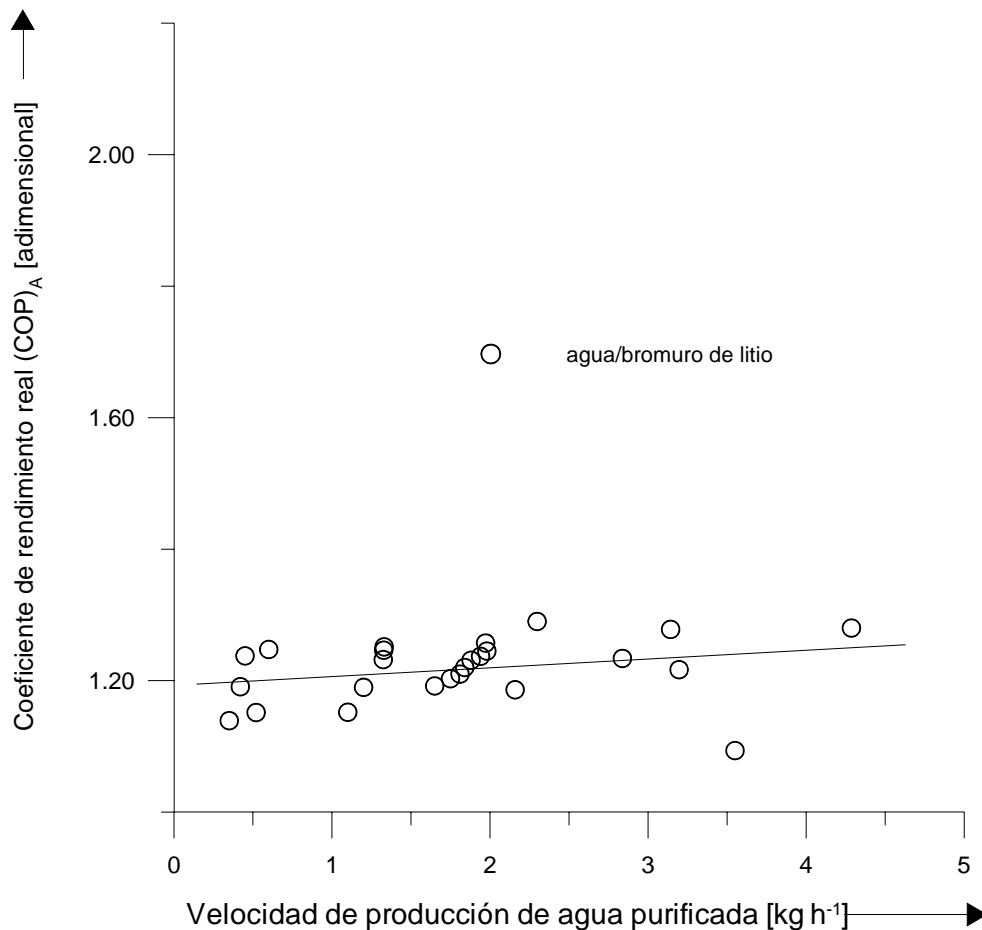


Fig. 6. Comportamiento del coeficiente de rendimiento real $(COP)_A$ contra la velocidad de producción de agua purificada obtenida con el sistema experimental de purificación de efluentes asistido por una bomba de calor por absorción

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.

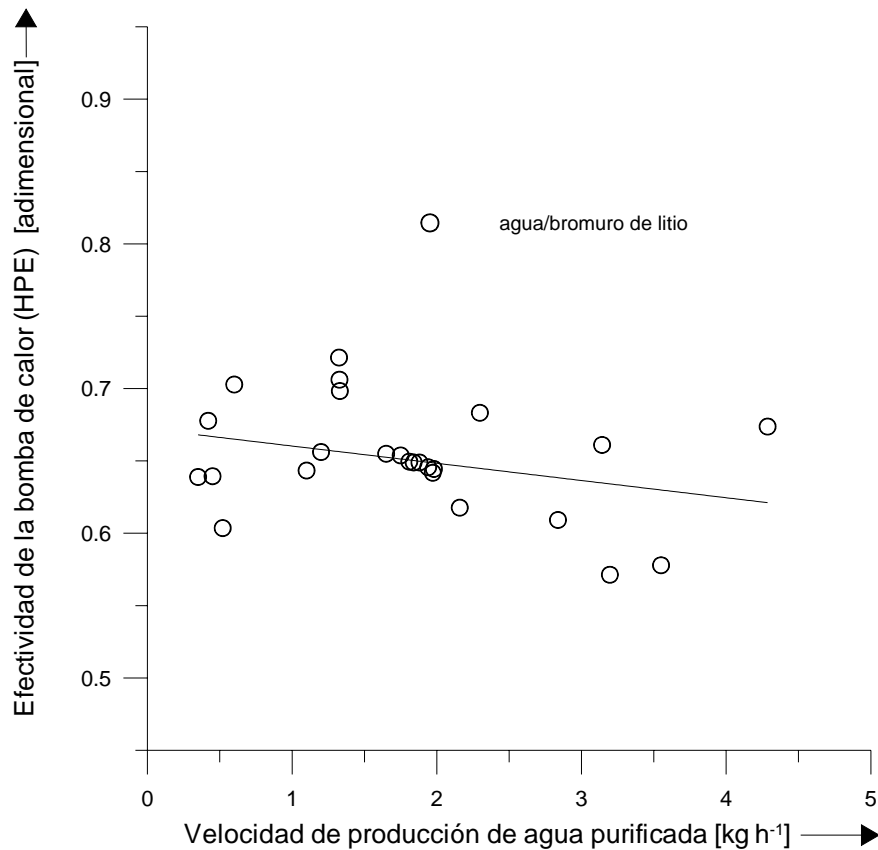


Fig. 7. Comportamiento de la efectividad como bomba de calor (HPE) contra la velocidad de producción de agua purificada obtenida con el sistema experimental de purificación de efluentes asistido por una bomba de calor por absorción

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.

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. Un estudio adicional se está conduciendo, cuyos resultados finales serán tema de un trabajo posterior.

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

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.

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.

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 el de 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.Sc 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., 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. (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., 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. Sc. 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.