

# Investigación sobre bombas de calor en México operando con energía geotérmica y calor de desecho

*A. García-Gutiérrez, R.M. Barragán-Reyes y V. Arellano-Gómez*

Instituto de Investigaciones Eléctricas, Av. Reforma 113, 62490 Cuernavaca, Mor., México. Correo: [aggarcia@iie.org.mx](mailto:aggarcia@iie.org.mx)

---

---

## Resumen

El Instituto de Investigaciones Eléctricas y la Comisión Federal de Electricidad han realizado trabajo de investigación y desarrollo (I&D) sobre bombas de calor (BC) en el pasado. Los sistemas probados incluyen compresión mecánica, absorción y transformadores térmicos. Este trabajo describe brevemente los principales aspectos de I&D sobre bombas de calor en forma general, y se da una descripción más detallada de tres de los principales estudios: (a) una BC por compresión mecánica tipo agua-agua diseñada para purificación de salmueras operando con vapor geotérmico de baja presión en el campo geotérmico de Los Azufres, Mich.; (b) una BC por absorción para enfriamiento y refrigeración operando con amoníaco-agua y energía geotérmica de baja entalpía, la cual fue probada en los campos geotérmicos de Los Azufres y Cerro Prieto, BC; y (c) un transformador térmico por absorción—llamado Bomba de Calor por Absorción Tipo II—, el cual fue probado para evaluar el comportamiento de diversas soluciones ternarias como fluidos de trabajo. A la fecha, se tienen planes para instalar y probar una bomba de calor geotérmica (acoplada al subsuelo) en Cerro Prieto o Mexicali, BC.

*Palabras Clave:* Bombas de calor, calor de desecho, energía geotérmica, investigación.

## Research on heat pumps in Mexico operating with geothermal energy and waste heat

### Abstract

The Instituto de Investigaciones Eléctricas and the Comisión Federal de Electricidad have done research and development (R&D) on heat pumps (HP) in past years. Tested systems include mechanical compression, absorption and heat-transformers. The main R&D aspects on HP are briefly described, and also a more detailed description about three of the main studies is presented: (a) a mechanical compression HP of the water-water type operated with low-pressure geothermal steam at the Los Azufres; Mich., geothermal field, and designed for purification of brine; (b) an absorption HP for cooling and refrigeration operating with ammonia-water and low-enthalpy geothermal energy, which was tested in the Los Azufres and Cerro Prieto, BC, geothermal fields; and (c) a heat-transformer by absorption—Absorption Heat Pump Type II—tested to assess the performance of several ternary solutions as work fluids. Plans exist to install and test a geothermal heat pump at Cerro Prieto or Mexicali, BC.

*Keywords:* Geothermal energy, heat pumps, research, waste heat.

---

---

### 1. Introducción

Una bomba de calor (BC) es una máquina térmica que opera como un refrigerador, pero a la inversa: el refrigerador está diseñado para fines de enfriamiento mientras que la BC está diseñada para propósitos de

calentamiento. Ambos sistemas producen ambos efectos simultáneamente. Sin embargo la BC extrae calor de una fuente a una temperatura  $T_S$ , como un efluente industrial o energía geotérmica de baja entalpía, y la entrega a un nivel de temperatura más útil,  $T_D$ . Para lograr este efecto la BC requiere de una cantidad pequeña de energía de alto nivel, la cual puede estar en forma de energía mecánica o térmica a alta temperatura, dependiendo del tipo de BC. Las BC son amplificadores o multiplicadores del calor utilizable, y el Coeficiente de Comportamiento o Rendimiento, COP, es una medida de la efectividad de la BC como proveedor de energía térmica en relación al uso directo de una fuente de calor de alto grado para propósitos de calentamiento.

Las BC se pueden clasificar en tres tipos: (1) compresión mecánica, (2) absorción, y (3) transformadores térmicos, llamados Bombas de Calor por Absorción Tipo 2 (Instituto de Investigaciones Eléctricas, 1990; Eriksson and Jernqvist, 1989; Santoyo *et al.*, 2006). La BC por compresión mecánica es el tipo mas común y típicamente entrega 3-4 kW de energía térmica equivalente por cada kW de electricidad usada, es decir, alcanza COPs de 4 a 3. Por otro lado, la BC por absorción alcanza valores de COP menores de uno, pero usa energía térmica en lugar de electricidad pues no requiere de un compresor.

A la fecha, se han desarrollado en México varios trabajos de investigación y desarrollo (I&D) sobre BC. Frías *et al.* (1991) instalaron y probaron una BC por compresión mecánica en el campo geotérmico de Los Azufres, Mich., cuyo objetivo fue la purificación de salmueras usando vapor geotérmico de baja presión. Best *et al.* (1986, 1990) instalaron y probaron una BC por absorción amoníaco-agua para enfriamiento y refrigeración de espacios en los campos geotérmicos de Los Azufres, Mich., y Cerro Prieto, BC. Barragán *et al.* (1998) probaron experimentalmente en un laboratorio diversas soluciones ternarias en un transformador térmico por absorción. Otra mezcla basada en Agua-Bromuro de Litio y usada en sistemas comerciales de refrigeración fue evaluada por Ayala (1995), mientras que Rivera *et al.* (1999) evaluaron experimentalmente un transformador térmico de una etapa operando con una mezcla de agua-Carrol<sup>TM</sup> como fluido de trabajo. Santoyo *et al.* (2006) describen un trabajo experimental sobre un sistema de destilación asistido por una BC para purificación de salmuera geotérmica. Este sistema también opera con efluentes industriales.

A nivel mundial, las BC geotérmicas o acopladas al subsuelo (BCG) se han convertido en el segmento de tecnología geotérmica con el más rápido crecimiento. En 2005 32 países usaron BCG para calentamiento, enfriamiento y aprovisionamiento doméstico de agua caliente. La capacidad instalada de las BCGs aumentó un 730% en los últimos 10 años y el uso de energía para calefacción creció en 500%. Los principales desarrollos se realizaron en algunos países de Europa y en EUA (Rybach, 2006).

El presente trabajo trata de una descripción en detalle de tres sistemas experimentales de BCs (Frías *et al.*, 1991; Best *et al.*, 1986, 1990; Barragán, 1998) instalados y probados por el Instituto de Investigaciones Eléctricas y la Comisión Federal de Electricidad en México. Estos sistemas son representativos de todos los tipos de BC. El trabajo a futuro incluye la instalación y prueba de una BCG en el área de Mexicali o Cerro Prieto, BC.

## 2. Aspectos teóricos

### 2.1. BC por compresión mecánica

La Fig. 1 muestra un esquema de una BC por compresión mecánica. El coeficiente real del comportamiento o rendimiento  $COP_A$  de esta BC está dado por la relación entre el calor entregado por el condensador  $Q_{CO}$  y el trabajo hecho por el compresor  $W$ :

$$COP_A = \frac{Q_{CO}}{W} \quad (1)$$

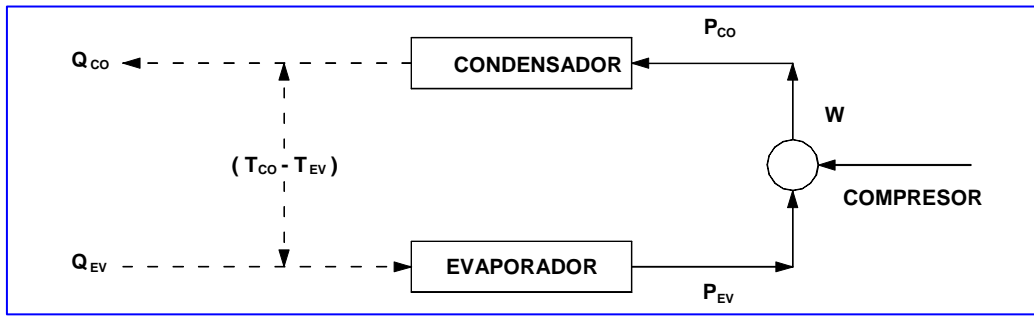


Fig. 1 Representación esquemática de una BC por compresión mecánica.

La efectividad de la BC ( $HPE_R$ ) se define como el trabajo requerido en un ciclo ideal Rankine para entregar una cantidad dada de calor al condensador:

$$(HPE_R) = \frac{COP_A}{COP_R} \quad (2)$$

Para una BC bien diseñada, la  $HPE_R$  puede exceder el 80%.

## 2.2. BC por absorción

En una BC por absorción, el compresor de la BC por compresión mecánica es reemplazado por un circuito secundario compuesto por un absorbedor, un generador y una bomba de circulación. Las ventajas que tienen este tipo de BC sobre las BCs por compresión mecánica incluyen:

- Usan muy poca energía mecánica.
- Los fluidos de trabajo comúnmente utilizados son amigables con el ambiente.
- No tienen componentes de alta tecnología, como los compresores, y están fácilmente disponibles en diversos países.
- Pueden ser fácilmente diseñados si se dispone de los datos termodinámicos.

El coeficiente de rendimiento real de este tipo de BC en modo enfriamiento, se puede definir como:

$$COP_A = \frac{Q_{EV}}{Q_{GE}} \quad (3)$$

Además, los coeficientes teóricos de Carnot ( $COP_{CCL}$ ) y Rankine ( $COP_{RCL}$ ) se pueden definir como:

$$COP_{CCL} = \left[ \frac{T_{GE} - T_{AB}}{T_{GE}} \right] \left[ \frac{T_{EV}}{T_{CO} - T_{EV}} \right] \quad (4)$$

$$COP_{RCL} = \frac{(H_{17} - H_{15})}{H_{10} - H_{11} - (H_{11} - H_7)FR} \quad (5)$$

donde  $Q_{GE}$  es el calor manejado por el generador y  $FR$  es la relación de flujo dada por:

$$FR = \frac{X_R - X_{GE}}{X_{AB} - X_{GE}} \quad (6)$$

Esta última se define con referencia al sistema probado en el campo, el cual se muestra en la Fig. 2.

## 2.3. BC de tipo transformador térmico

El proceso de transformación de calor puede definirse como aquel en el que una cantidad de calor dada se abastece a una temperatura  $T_M$  de la cual una fracción se rechaza a una temperatura menor  $T_O$ , y la energía remanente se re-grada a una mayor temperatura  $T_H$ .

Los transformadores de calor por absorción pueden ser usados para recuperar el 50% de calor de baja entalpía para uso a una temperatura mayor, usando solamente una pequeña cantidad de energía de alto nivel (Fig. 3).

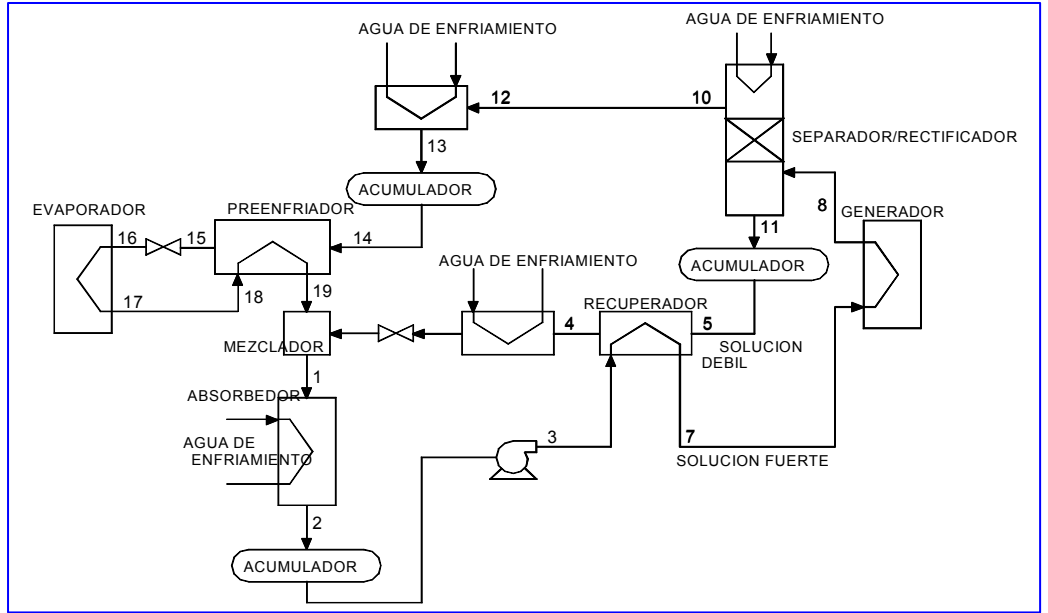


Fig. 2. Esquema de la BC por absorción amoníaco-agua probada para refrigeración en los campos geotérmicos de Los Azufres y Cerro Prieto (Best et al., 1986; 1990)

En un transformador de calor, el coeficiente real de rendimiento se define como:

$$COP_A = \frac{Q_{AB}}{Q_{GE} + Q_{EV}} \quad (7)$$

La relación de flujo en recirculación se define como el flujo másico de la solución que sale del absorbedor dividido entre el flujo másico del fluido de trabajo:

$$FR = \frac{X_{GE}}{X_{GE} - X_{AB}} \quad (8)$$

Los principales parámetros de diseño de este tipo de BC son:

- La elevación total de temperatura (GTL por sus siglas en inglés), definida como la diferencia entre las temperaturas del absorbedor y el evaporador.
- La relación de flujo de recirculación (FR), definida como la relación de flujo másico de solución que sale del absorbedor entre el flujo másico del fluido de trabajo:  $FR = X_{GE}/(X_{GE}-X_{AB})$ , donde X es la concentración de la solución absorbente.
- El coeficiente real de rendimiento  $(COP)_A$ , definido como la relación entre el calor útil entregado por el absorbedor y el calor total suministrado al sistema, el cual es una medida de la eficiencia del proceso:  $(COP)_A = Q_{AB}/(Q_{GE} + Q_{EV})$ .

**3. BC por compresión mecánica tipo agua-agua para purificación de salmueras instalada y probada en el campo geotérmico de Los Azufres, Mich.**

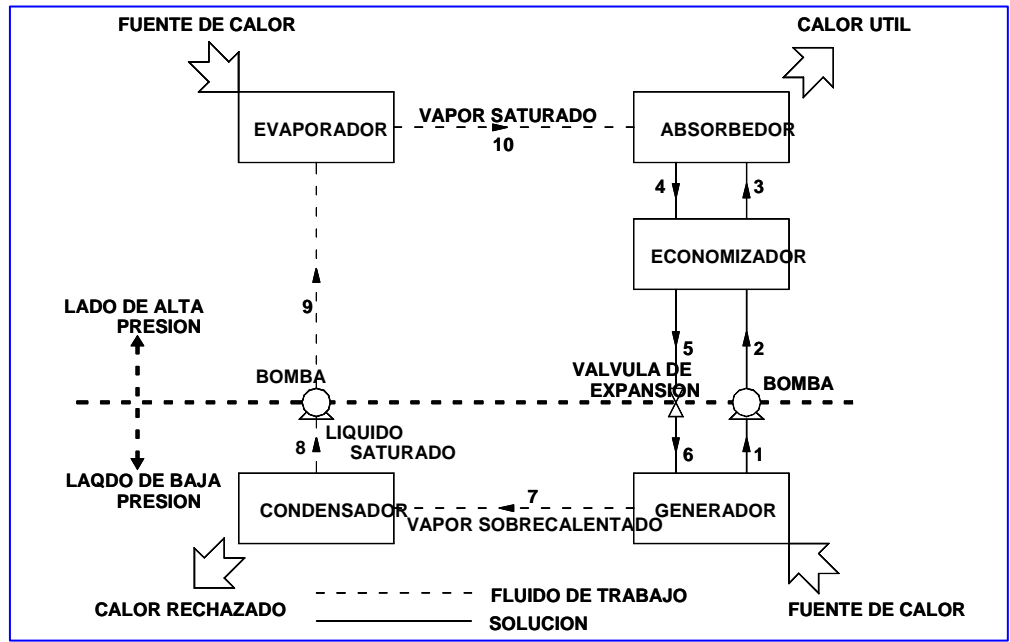


Fig. 3. Diagrama esquemático del transformador térmico por absorción (Barragán et al., 1998)

Esta es una BC marca Westinghouse Electric, modelo TPB20 con dos circuitos del fluido de trabajo y con capacidad de 56 kW<sub>t</sub> a 71° C con un COP<sub>A</sub> de 4.74 a partir de una fuente de calor a 52° C. La unidad opera con Freón R114 como fluido de trabajo y tiene un intercambiador de calor auxiliar para calentar agua libre de sales la cual se suministra al evaporador como fuente de calor. Otro intercambiador recibe el fluido caliente con la energía térmica proporcionada por la BC. La Fig. 4 muestra en forma esquemática el arreglo de este sistema.

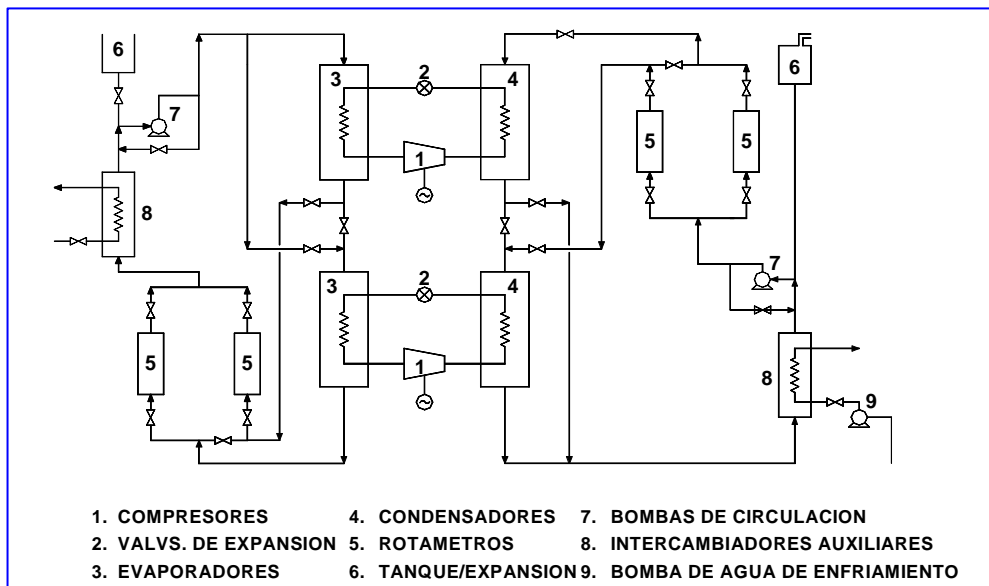


Fig. 4. Arreglo esquemático de la BC por compresión mecánica probada en el campo geotérmico Los Azufres (Frias et al., 1991)

Antes de acoplar la BC y el sistema de purificación de salmuera, se verificó la operación de la BC y se corrieron diversas pruebas al estado estable. La Fig. 5 muestra la variación de los coeficientes de rendimiento de Carnot, Rankine y real como función de la elevación total de temperatura, GTL. Se observa que los valores de COP<sub>C</sub> son mayores que los de COP<sub>R</sub> y que éstos son siempre mayores que los valores de COP<sub>A</sub>, como es de esperarse. También se observa que el COP<sub>A</sub> varía entre 4.5 y 2.2 para elevaciones de temperatura entre 26 y 52° C.

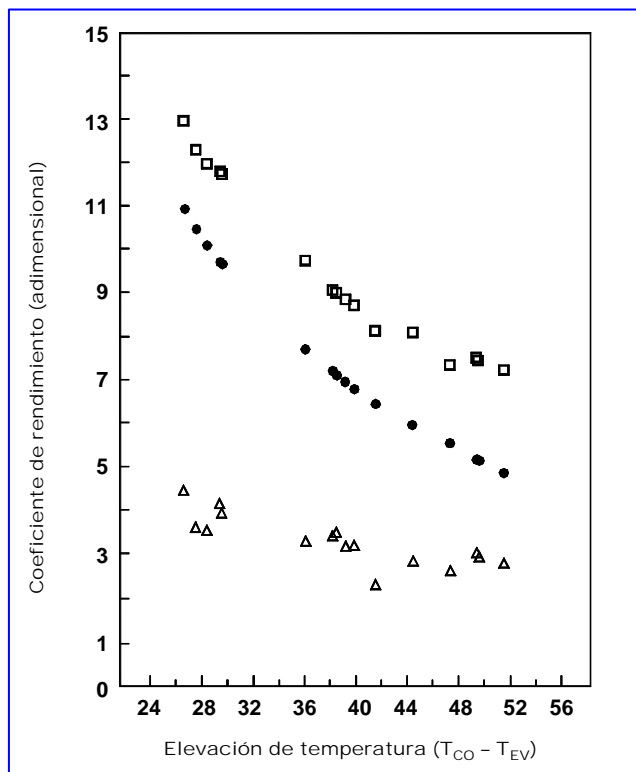


Fig. 5. Variación del coeficiente de rendimiento como función de la elevación total de temperatura de la BC por compresión mecánica (Frías et al., 1991).

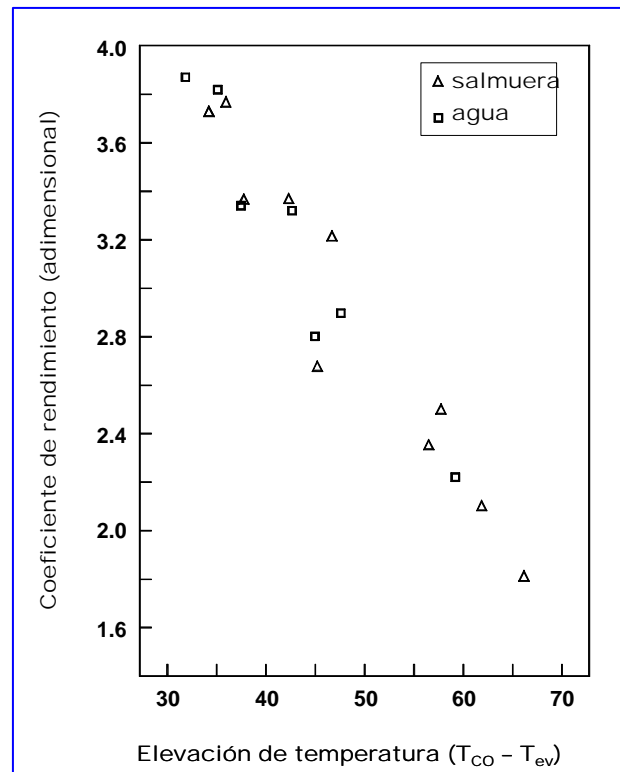


Fig. 6. Variación del coeficiente **real** de rendimiento como función de la elevación total de temperatura de la BC por compresión mecánica (Frías et al., 1991)

Para la correcta evaluación del sistema de purificación de salmuera, se utilizó un proceso de destilación por lotes y se corrieron 17 pruebas con la BC acoplada a este sistema. En siete pruebas se usó agua y en las diez restantes se usó salmuera en el evaporador del sistema de purificación, con temperaturas de ebullición entre 60 y 85° C. Las temperaturas en el condensador variaron entre 45 y 60° C, y para la determinación de las temperaturas de ebullición del agua y las velocidades de destilación en el sistema de purificación de la salmuera se aplicó un vacío al sistema de purificación.

La Fig. 6 muestra que el  $COP_A$  decrece a medida que la diferencia de temperaturas entre el condensador y el evaporador ( $T_{CO} - T_{EV}$ ), o elevación total de temperaturas, aumenta y, por lo tanto, la velocidad de destilación de agua o salmuera aumenta a medida que disminuye el aumento total de temperaturas. Las velocidades de destilación de la salmuera alcanzaron un valor de 0.00777 kg/s con un valor del coeficiente real de rendimiento  $COP_A$  de 3.8 a una temperatura de 83° C. Los valores alcanzados de la Efectividad de la BC ( $HPE_R$ ) varían entre 0.4 y 0.6 para estas pruebas.

#### 4. BC por absorción amoníaco-agua para refrigeración probada en los campos geotérmicos de Los Azufres y Cerro Prieto

Una BC experimental de 10.5 kW<sub>t</sub> con fines de enfriamiento y operando con amoníaco y agua fue inicialmente instalada y probada en el campo geotérmico de Los Azufres, Mich. La unidad fue diseñada con un costo mínimo ya que el único componente de acero inoxidable fue el serpentín helicoidal del generador. Para el condensador y el evaporador se utilizaron unidades disponibles comercialmente cuyas capacidades

nominales fueron de 17.6 y 10.6 kW, respectivamente. El generador, rectificador y pre-enfriador son intercambiadores de calor de tipo tubos y coraza, mientras que el fluido de trabajo usado en las pruebas efectuadas en Los Azufres consistió en una mezcla de 49.3 kg de agua, 35.7 kg de amoníaco y 0.75 kg de cromato de sodio como inhibidor de corrosión. Se usó vapor geotérmico para alimentar el generador durante la operación del sistema. La Fig. 2 muestra un esquema de esta unidad, en la cual se alcanzó una capacidad de refrigeración de 10.3 kW con una temperatura del generador de 91.5° C y del evaporador de -13° C, que se considera adecuada para refrigeración y almacenamiento de alimentos perecederos, por ejemplo.

Posteriormente, esta unidad fue modificada y probada en el campo geotérmico de Cerro Prieto con el fin de operar a mayores temperaturas ambientales y del agua de enfriamiento, las cuales alcanzan hasta 40° C o más en el verano. Los cambios incluyen un nuevo separador/rectificador para operar en un rango mayor de flujos de la solución, un intercambiador de calor adicional entre el recuperador y el mezclador para alcanzar un mayor enfriamiento de la solución débil de amoníaco, y una bomba de pistón que reemplazó a la bomba original de venas rotatorias, entre otros. El sistema fue operado a temperaturas fijas del generador, y el flujo de la solución fue variado para cada una de las temperaturas del generador.

La Fig. 7 es una gráfica de los coeficientes de rendimiento de Carnot, Rankine y real, ecuaciones 3-5, contra la temperatura del generador para un valor fijo del flujo de solución de  $6.3 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{seg}$ . Se puede observar que el coeficiente de rendimiento real es menor que los coeficientes de Carnot y Rankine, pero está dentro de un 60% del coeficiente de Rankine,  $\text{COP}_{\text{ECL}}$ , (ecuación 5). También se ve que todos los valores de COP aumentan al disminuir la temperatura del generador. Las pruebas realizadas con este sistema en los dos campos geotérmicos nacionales muestran que puede ser operada exitosamente bajo condiciones ambientales extremas y con altas temperaturas del agua de enfriamiento, usando fluidos geotérmicos de baja entalpía u otras fuentes de calor similares.

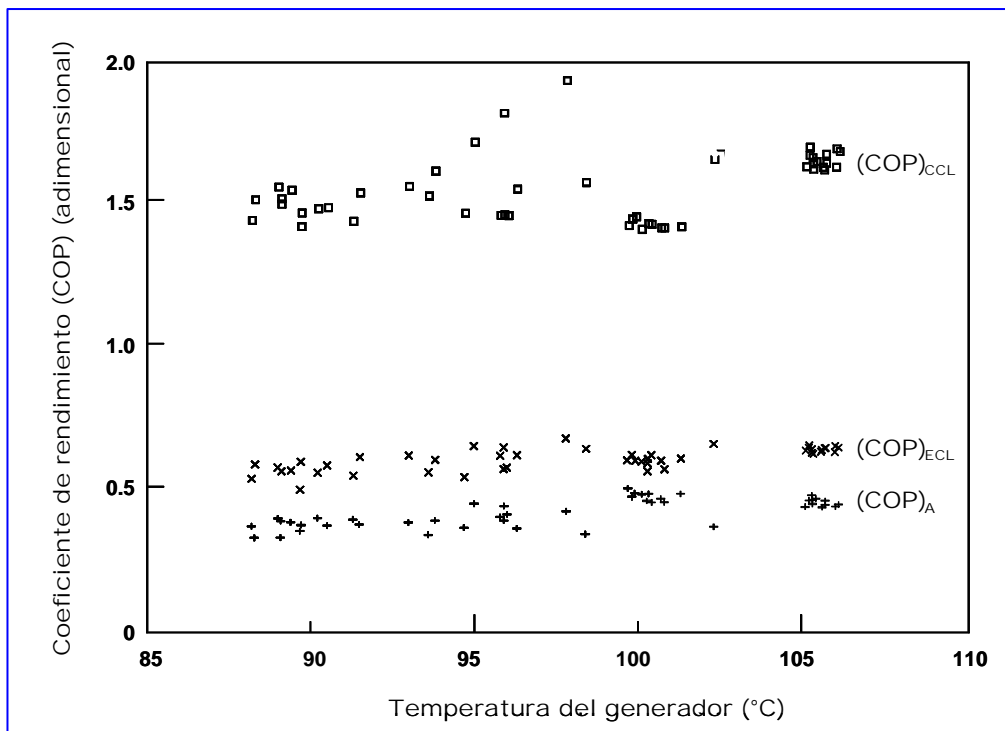


Fig. 7 Variación del coeficiente real de rendimiento como función de la temperatura del generador de la BC por absorción amoníaco/agua (Best et al., 1986; 1990)

## 5. Transformador térmico por absorción para pruebas de comportamiento de soluciones ternarias como fluidos de trabajo

Se diseñó y construyó un transformador térmico por absorción para efectuar pruebas de fluidos de trabajo compatibles con el medio ambiente. Resultados experimentales obtenidos previamente con este equipo para los sistemas  $\text{H}_2\text{O}/\text{LiCl}$ ,  $\text{H}_2\text{O}/\text{CaCl}_2$  y  $\text{H}_2\text{O}/\text{CaCl}_2/\text{ZnCl}_2$  fueron documentados por Barragán *et al.* (1995, 1996a, 1996b).

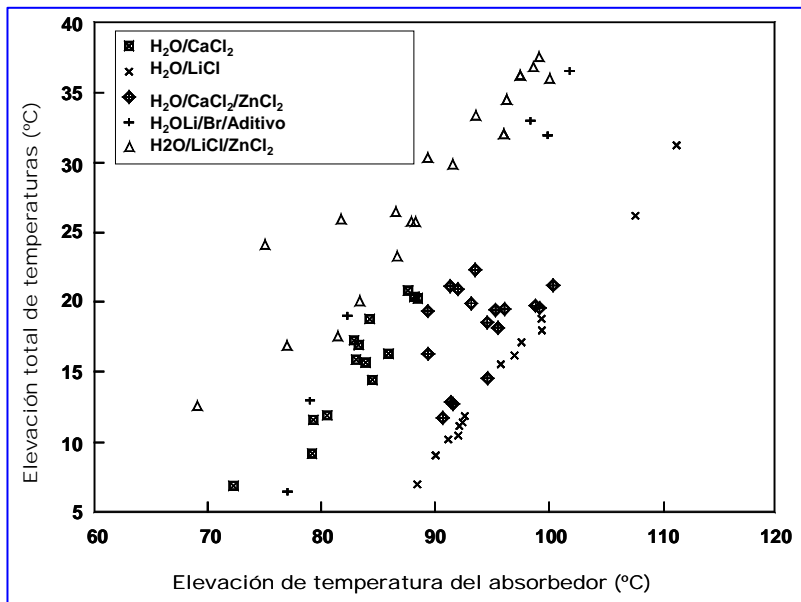


Fig. 8. Elevación total de temperatura como función de la temperatura del absorbedor en el transformador térmico (Barragán *et al.*, 1998)

rendimiento con respecto a las otras soluciones. La elevación de temperatura obtenida fue de  $37.5^\circ\text{C}$  para esta solución, hecho que se considera relevante ya que compara muy bien contra los resultados obtenidos para la solución de  $\text{H}_2\text{O}/\text{LiBr}$  obtenidos en la Universidad de Salford, U.K. (Siddig *et al.*, 1983). Para el caso de la solución de  $\text{H}_2\text{O}/\text{CaCl}_2/\text{ZnCl}_2$ , los valores de la elevación total de temperaturas se comparan bien contra los obtenidos para la solución de  $\text{H}_2\text{O}/\text{LiCl}$  para temperaturas del absorbedor de hasta  $105^\circ\text{C}$ .

La Fig. 9 muestra la elevación total de temperatura de los fluidos de trabajo contra la concentración en el absorbedor. En todos los casos la elevación de temperatura dependió de la concentración de la solución absorbente. La elevación de temperaturas más alta fue obtenida para la solución de  $\text{H}_2\text{O}/\text{LiCl}/\text{ZnCl}_2$  para una concentración de 60%, y a pesar de que se obtuvieron concentraciones mayores (del orden de 65% para la solución de  $\text{H}_2\text{O}/\text{CaCl}_2/\text{ZnCl}_2$ ), la elevación de temperaturas fue de menos de  $20^\circ\text{C}$ .

Esas dos tendencias del comportamiento de la elevación de temperaturas de la solución de  $\text{H}_2\text{O}/\text{CaCl}_2/\text{ZnCl}_2$  mostraron dependencia de la temperatura del evaporador. En la tendencia superior se obtuvieron menores temperaturas del

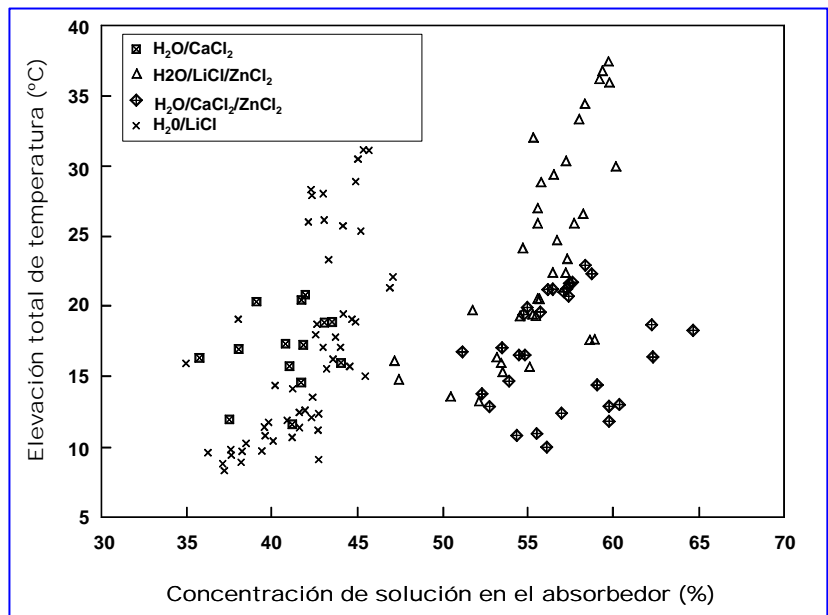


Fig. 9. Elevación total de temperatura como función de la concentración de solución en el absorbedor del transformador térmico (Barragán *et al.*, 1998)

Posteriormente, se consideró que la alta solubilidad del Cloruro de Zinc,  $\text{ZnCl}_2$ , era deseable para mejorar la solubilidad de  $\text{LiCl}$  y  $\text{CaCl}_2$  en las soluciones, y se agregó a las mezclas binarias experimentales de  $\text{H}_2\text{O}/\text{LiCl}$ ,  $\text{H}_2\text{O}/\text{CaCl}_2$  para obtener mayores concentraciones de las soluciones y evitar el problema de cristalización. Finalmente, se realizaron una serie de experimentos cuyos resultados se resumen como sigue (Barragán *et al.*, 1998).

La elevación total de temperatura dependía de la temperatura para el caso de las soluciones binarias y ternarias, como se ve en la Fig. 8, en la cual también se incluyen para comparación los resultados de Ayala (1995) obtenidos para  $\text{H}_2\text{O}/\text{LiBr}/\text{Aditivo}$ . Se puede observar que la solución ternaria de  $\text{H}_2\text{O}/\text{LiCl}/\text{ZnCl}_2$  muestra el mejor



evaporador que en la parte localizada debajo de ésta. Las elevaciones de temperatura obtenidas para la solución ternaria de  $\text{H}_2\text{O}/\text{CaCl}_2/\text{ZnCl}_2$  fueron ligeramente superiores que para la solución binaria de  $\text{H}_2\text{O}/\text{CaCl}_2$ , lo cual demuestra que hay una ligera ganancia en rendimiento al usar la solución ternaria. La Tabla 1 muestra las elevaciones máximas de temperatura obtenidas para cada una de las soluciones probadas.

Fluido de trabajo:	$\text{H}_2\text{O} / \text{LiCl}$	$\text{H}_2\text{O} / \text{LiCl} / \text{ZnCl}_2$ (1:1 en peso)	$\text{H}_2\text{O} / \text{CaCl}_2$	$\text{H}_2\text{O} / \text{CaCl}_2 / \text{ZnCl}_2$ (2.5:1 en peso)	$\text{H}_2\text{O} / \text{MgCl}_2$	$\text{H}_2\text{O} / \text{MgCl}_2 / \text{ZnCl}_2$ (2:1 en peso)
Elevación de temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ):	32.5	37.5	20	22.9	18.5	19.6
$T_{\text{AB}}$ ( $^{\circ}\text{C}$ ):	111	96	85	85	101	98

Tabla 1. Elevaciones máximas de temperatura para diferentes fluidos de trabajo (Barragán et al., 1998)

El coeficiente real de rendimiento  $\text{COP}_A$  tiende a disminuir al aumentar la relación de flujo de recirculación, FR (Fig. 10). Considerando ambas soluciones ternarias, los valores del coeficiente de rendimiento de la solución  $\text{H}_2\text{O}/\text{CaCl}_2/\text{ZnCl}_2$ , decrecieron en forma más drástica al variar la relación de flujo FR que para el caso de la solución de  $\text{H}_2\text{O}/\text{LiCl}/\text{ZnCl}_2$ . Durante los experimentos se observó una viscosidad relativamente alta para la solución de  $\text{H}_2\text{O}/\text{CaCl}_2/\text{ZnCl}_2$ , de manera que la viscosidad puede ser la causa de los menores coeficientes de rendimiento obtenidos. Por otro lado, si se minimizan las pérdidas de calor, el comportamiento del coeficiente de rendimiento con respecto a la relación de flujo resulta en un mejor rendimiento de la solución  $\text{H}_2\text{O}/\text{LiCl}/\text{ZnCl}_2$ .

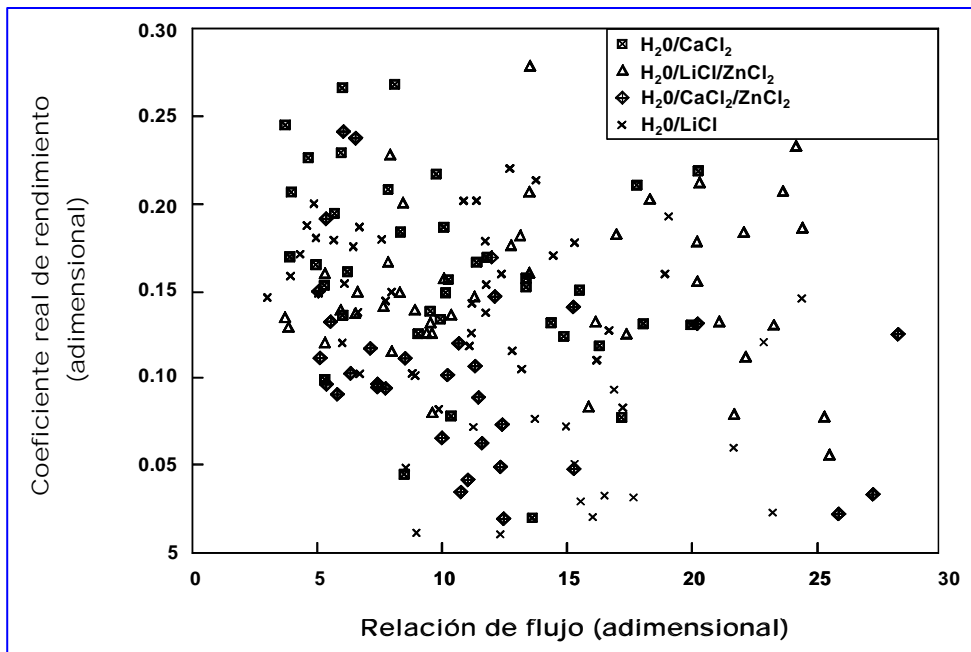


Fig. 10. Coeficiente real de comportamiento como función de la relación de flujo en el transformador térmico (Barragán et al., 1998)

## 6. Conclusiones

A la fecha se ha desarrollado una cantidad sustancial de investigación y desarrollo sobre BC en México con relación al uso integral de la energía geotérmica, de tal suerte que se han instalado y probado BC por compresión mecánica, por absorción y transformadores térmicos tanto en los campos geotérmicos del país como en el laboratorio. Se han obtenido resultados sobre: (a) purificación de agua y salmueras geotérmicas para obtener agua destilada, (b) calentamiento, enfriamiento y refrigeración de espacios y otros fluidos, y (c) el desarrollo de

fluidos de trabajo avanzados que sean económicos, seguros y amigables con el ambiente en su uso. A la fecha, se tienen planes de instalar y probar una BC geotérmica, acoplada al subsuelo, en las áreas de Mexicali o Cerro Prieto, en Baja California.

## Referencias

- Ayala, R., 1995. An experimental study of heat driven absorption cooling systems. Ph.D. thesis, University of Salford, U.K. Inédito
- Barragán, R.M., C.L. Heard, V.M. Arellano, R. Best, and F.A. Holland, 1995. Experimental performance of the water-lithium chloride system in a heat transformer. *Int. J. of Energy Research*, **19**, pp. 593-602.
- Barragán, R.M., C.L. Heard, V.M. Arellano, R. Best, and F.A. Holland, 1996(a). Experimental performance of the water/calcium chloride system in a heat transformer. *Int. Journal of Energy Research*, **20**, pp. 651-661.
- Barragán, R.M., C.L. Heard, V.M. Arellano, R. Best, and F.A. Holland, 1996(b). Experimental performance of the water/magnesium chloride system in a heat transformer, *Int. Journal of Energy Research*, **21**, pp. 139-151.
- Barragán, R.M., V.M. Arellano, C.L. Heard, and R. Best, 1998. Experimental performance of ternary solutions in an absorption heat transformer. *Int. Journal of Energy Research.*, **22**, pp. 73-83.
- Best, R., C.L. Heard, H. Fernández, and J. Siqueiros, 1986. Developments in geothermal energy in México-Part 5: The commissioning of an ammonia/water absorption cooler operating on low enthalpy geothermal energy. *Heat Recovery Systems and CHP*, **6**(3), pp. 209-216.
- Best, R., C.L. Heard, P. Peña, H. Fernández, and F.A. Holland, 1990. Developments in geothermal energy in México-Part 26: Experimental assessment of an ammonia/water absorption cooler operating on low enthalpy geothermal energy. *Heat Recovery Systems and CHP*, **10** (1), pp. 61-70.
- Eriksson, K. A. and Jernqvist, 1989. Heat transformer with self-circulation: design and preliminary operational data. *Rev. Int. Froid*, **12**, pp. 15-19.
- Frías, J.L., J. Siqueiros, H. Fernández, A. García, and F.A. Holland, 1991. Developments in geothermal energy in México-Part 36: The commissioning of a heat pump assisted brine purification system. *Heat Recovery Systems and CHP*, **11**(4), pp. 297-310.
- Instituto de Investigaciones Eléctricas, 1990. Manual sobre Tecnología de Bombas de Calor. Cuernavaca, Morelos, México. Inédito.
- Rivera, W., R.J. Romero, R. Best, and C.L. Heard, 1999. Experimental evaluation of a single-stage heat transformer operating with the water/Carroll<sup>TM</sup> mixture. *Energy*, **4**(4), pp. 317-326.
- Rybach, L., 2006. Geothermal heating and cooling – the worldwide advance of geothermal heat pumps. *Renewable Energy 2006 Proceedings*, 9-13 October, Chiba, Japan, pp. 1512,-1515.
- Santoyo, S., R.M. Barragán-Reyes, and F.A. Holland, 2006. Bomba de calor para purificación de salmuera geotérmica. *Geotermia*, Vol. 20, No. 1, pp. 41-51.

Siddig, B.E., F.A. Watson, and F.A. Holland, 1983. Study of the operating characteristics of a reversed absorption heat pump system (heat transformer). *Chem. Eng. Res. Des.* **61**, pp. 283-289.