

## Automatización de bombas de calor por medio del control de bombas en un puerto LPT con adquisición de datos en un Puerto GPIB

R. J. Romero,\* Sotsil Silva-Sotelo,\*\* R. Best,\*\*\* J. Cerezo-Román\*\*\*\*

\*Centro de Investigación en Ingeniería y Ciencias Aplicadas,

\*\*Posgrado en Ingeniería y Ciencias Aplicadas,

Universidad Autónoma del Estado de Morelos, Avenida Universidad 1001, Col Chamilpa,  
Cuernavaca, Morelos, C.P. 62210, México.

\*\*\*Centro de Investigación en Ingeniería y Ciencias Aplicadas,

Universidad Nacional Autónoma de México, Privada Xochicalco s.n, Centro, Temixco, Morelos,  
C.P. 62580, México.

\*\*\*\*Instituto de Ingeniería, Universidad Autónoma de Baja California, Av. de la Normal s.n., Col.  
Insurgentes Este, Mexicali, B.C., C.P. 21280, México.

rosenberg@uaem.mx

**Resumen.** El presente trabajo muestra una primera aproximación para la automatización de una bomba de calor por absorción, operando en el modo de transformador térmico, para la recuperación de calor de desecho industrial. El programa de adquisición de datos fue realizado con programación dirigida a objetos y se hizo la configuración de la comunicación. También se muestra la estrategia de automatización con la señal enviada a través de un puerto LPT. Finalmente, se describe la operación de este sistema y su capacidad de operación para la revalorización de energía de desecho.

**Palabras clave:** bombas de calor, transformador térmico, programación dirigida a objetos, adquisición de datos, automatización y control.

**Abstract:** This work shows the first results for the control of an absorption heat pump. This heat pump is configured for operate as absorption heat transformer device. Heat transformer is used for recuperation of industrial waste heat. In this work, the data logger program and the communication configuration are shown. This program was development with object oriented programming. The strategy for the control is based on signal by LPT port. Finally, the results show the heat recuperation for waste heat case.

**Keywords:** Heat pump, absorption heat transformer, object oriented programming, control.

## 1 Introducción

El calentamiento global y el efecto invernadero se deben a la gran cantidad de personas que llevan a cabo actividades productivas. La mayor parte de la energía que se consume en el mundo proviene de diversas fuentes; entre ellas, la de mayor porcentaje corresponde a la quema de combustibles fósiles.<sup>1</sup> La mayor parte de los procesos industriales transforman energía por medio de una reacción de oxidación de un hidrocarburo, lo que produce vapor de agua y dióxido de carbono. Sin embargo, esta emisión puede disminuirse mediante estrategias de menor quema de combustibles por sustitución de fuentes de energía.<sup>2</sup>

Algunos procesos industriales no pueden llevarse a cabo con las fuentes alternativas de energía debido a sus bajos niveles térmicos.<sup>3</sup> La transformación de energía térmica a niveles altos, más útiles, aún no ha sido posible. La mayor parte de las ampliaciones o crecimientos industriales se hace adquiriendo calderas nuevas para la quema local de combustibles fósiles, o bien, mediante la conexión de equipos eléctricos para aumentar la capacidad instalada. Sin embargo, existe una opción, la cual fue utilizada en varias bombas de calor por absorción, con bajo consumo de energía eléctrica, desde los años noventa hasta la

fecha.<sup>4,5,6,7,8,9</sup> Uno de los principales problemas para la operación continua de este tipo de ciclos termodinámicos de bombeo de calor es el periodo transitorio previo al estado estable en que operan exitosamente estas tecnologías.

## 2 Bombas de calor

Las bombas de calor son máquinas térmicas construidas con varios componentes de intercambio de calor y materia, en forma simultánea. El ciclo de bomba de calor se puede describir con base en la figura 1, de la siguiente manera: la energía, en forma de calor de desecho, está a una temperatura constante ( $T_{GE}$ ); esta energía se ingresa en un generador de vapor a baja presión, donde se lleva a cabo una transferencia de calor a un fluido concentrado en una sal afín a un fluido de trabajo. La presión en el interior del generador es suficientemente baja como para que ocurra un proceso de separación de fases. El fluido de trabajo vaporizado se conduce a un segundo componente que está a la misma presión pero que tiene retiro de calor por medio de un circuito secundario; el calor retirado de este componente realiza un cambio de fase y se obtiene fluido de trabajo en forma líquida. A este componente se le denomina “condensador” y opera a temperatura ambiente, siendo ésta ( $T_{CO}$ ) la menor de todo el sistema. El fluido de trabajo

en forma líquida se bombea por medio de una pequeña cantidad de energía eléctrica — prácticamente una centésima parte de la energía suministrada por el generador. El vapor que se produce en la etapa de presión mayor a la misma temperatura constante de ingreso de la energía, ya sea de energías alternativas o de desecho industrial, se pone en contacto con la solución concentrada que quedó en el generador, provocando esto una reacción exotérmica a alta presión y temperatura, conocida como “calor de absorción”. Este calor es útil y ocurre a la mayor temperatura del sistema. Después, la solución diluida que se ha formado pasa por un “intercambiador” de calor para precalentar la solución concentrada que va del generador al “absorbedor”; entonces, la solución diluida regresa al generador para comenzar de nuevo el ciclo de la bomba de calor, operando como transformador térmico para la revalorización de la energía.

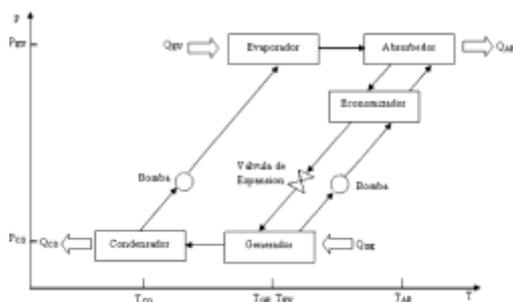
### 3 Estrategia de control

Estos sistemas térmicos tienen un periodo transitorio de mayor tiempo, comparado con cada una de las operaciones unitarias que tienen cada uno de los componentes por separado y que forman el ciclo termodinámico. Los periodos transitorios comienzan con la generación de vapor, cuando la energía suministrada para realizar el cambio de fase está en función del fluido de trabajo que se envía al condensador. El fluido de trabajo que se cambia de fase en el condensador se puede expresar mediante el cálculo del flujo en función lineal de la potencia del condensador y evaporador:

$$m_{WF} = \frac{Q_{CO}}{\lambda_{TCO}} \quad (1)$$

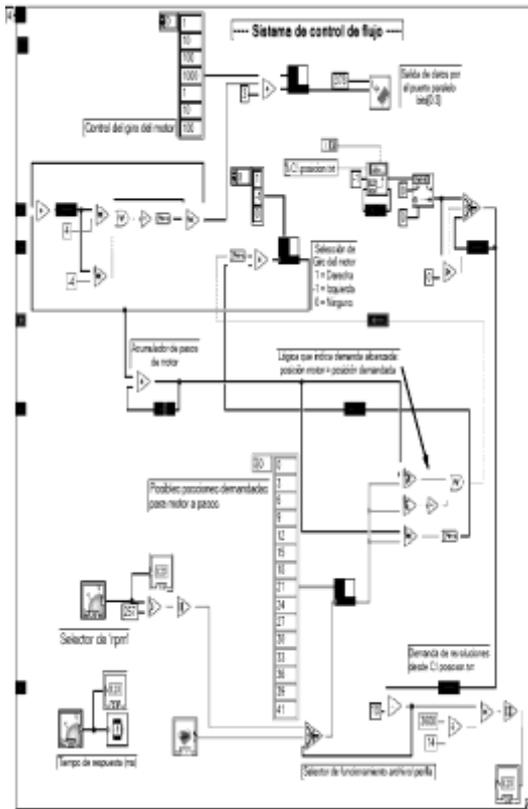
$$m_{WF} = \frac{Q_{EV}}{\lambda_{TEV}} \quad (2)$$

El total de este flujo es la variable limitante del proceso y esta variable participa en todos los balances de materia y energía, en cada uno de los cálculos de las operaciones unitarias de generación, condensación, evaporación, absorción e intercambio de calor. Para controlar el flujo



**Figura 1.** Esquema de un transformador térmico para la revalorización del calor.

que limita al sistema,<sup>10</sup> se ha propuesto la estrategia siguiente:



**Figura 2.** Diagrama de control de flujo refrigerante.

Para llevar a cabo este algoritmo, se requiere de la adquisición de datos vía GPIB,<sup>11</sup> y así se conocen los valores asociados en las ecuaciones (1) y (2), mediante las siguientes ecuaciones:

$$Q_{CO} = mC_P^{TCO} (T_1 - T_2) \quad (3)$$

$$Q_{EV} = mC_P^{EV} (T_3 - T_4) \quad (4)$$

Donde las temperaturas  $T_1$ ,  $T_2$ ,  $T_3$  y  $T_4$ , cambian durante el periodo transitorio cada cinco segundos, por lo que se debe hacer el cálculo de las dos potencias expresadas en las ecuaciones (3) y (4). Se considera que los valores de los fluidos que retiran energía del condensador y la suministran al evaporador, permanecen en función de las temperaturas  $T_{CO}$  y  $T_{EV}$ , respectivamente, y se pueden determinar por el sistema de adquisición de datos.

#### 4 Control automático

Para el control automático del transformador térmico de una etapa, se ha propuesto un algoritmo de control<sup>12</sup> cuyo diagrama se exhibe en la figura 3. Con este algoritmo, se ha construido un dispositivo acoplable al puerto de comunicaciones LPT. En este caso, se han modificado los controladores que operan la bomba que envía el fluido de trabajo del condensador al evaporador (mEV), para que el potenciómetro opere con un motor a pasos, el cual puede variar las revoluciones entre 50 y 3500 upm, con variaciones de 5 upm.



Térmica Aplicada (LITA), del Centro de Investigación en Ingeniería y Ciencias Aplicadas (CIICAp) de la Universidad Autónoma del Estado de Morelos (UAEM). Para su operación se ha utilizado la mezcla carrol-agua. Se ha simulado el calor proveniente de las energías alternativas, con niveles térmicos de colectores solares de alta eficiencia<sup>13</sup> o de calor de desecho industrial, con niveles térmicos entre 60 y 80 °C.

*Calibración del sensor de flujo.* Para la calibración del sensor de flujo tipo turbina se siguió la siguiente metodología:

1. Se consideró como patrón a un sensor de flujo tipo Coriolis.
2. El sensor de flujo a calibrar se colocó en serie con el Coriolis.
3. Se fijó una temperatura de 25 °C y se varió el flujo másico 0.3 1, 3, 5, 10 y 15 kg/min, esperando en cada lectura un tiempo mínimo de condiciones de estabilidad de 15 minutos para el registro del potencial que mostraba el sensor. Estos datos se almacenaron en un archivo.
4. Después, se incrementó la temperatura con un  $\Delta T = 10^\circ\text{C}$  y se varió el flujo másico descrito en el punto 3, hasta llegar a una temperatura de 150 °C.
5. A continuación, se procedió a calcular el flujo másico contra el voltaje y se calculó una correlación correspondiente. Las

ecuaciones de los extremos de la calibración fueron las siguientes:

$$\text{A } 20^\circ\text{C} \quad F = 10.421x - 13.166 \quad (5)$$

$$\text{A } 150^\circ\text{C} \quad F = 10.024x - 12.176 \quad (6)$$

Donde F es el flujo masico, en kg/min, y "x" el potencial en voltios.

*Calibración del sensor de temperatura.* Para la calibración del sensor de temperatura se siguió la siguiente metodología:

1. Se fijó una temperatura de 20 °C en un baño térmico.
2. Se introdujo un sensor de temperatura patrón y el testigo.
3. Se tomaron las lecturas de ambos sensores hasta condiciones de estabilidad y se almacenaron los datos en un archivo.
4. Después, se aumentó la temperatura un  $\Delta T = 10^\circ\text{C}$  y se regresó al punto 3 hasta alcanzar una temperatura de 150 °C.
5. A continuación, se calculó la ecuación de la línea de tendencia del sensor testigo:

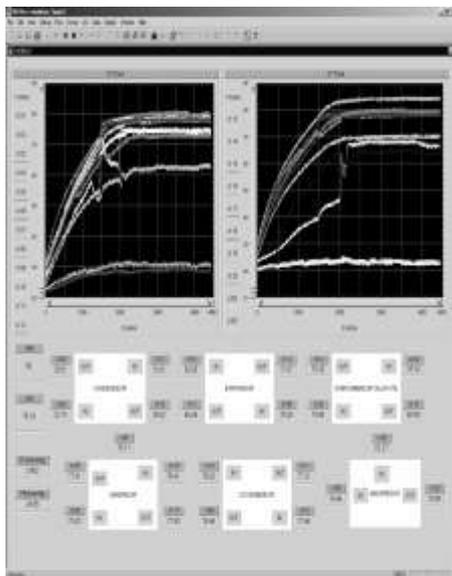
$$T = 1.0107(a) - 1.6722 \quad (7)$$

Donde T es la temperatura calibrada del sensor testigo en °C, válida en un rango de 20 °C y hasta 150 °C.

El control del flujo refrigerante es fundamental para el control del sistema.

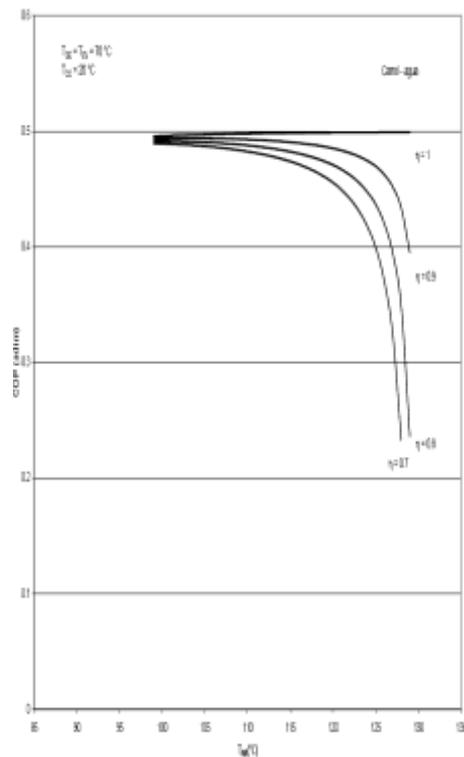
Cuando éste no se controla, no se alcanza el periodo estable del sistema y no se recupera energía (véase la figura 6).

La puesta en marcha del control automático por medio del fluido de trabajo en el condensador y en el evaporador muestra que se pueden alcanzar los estados permanentes en los que se han calculado las potencias de cada una de las operaciones unitarias involucradas en el ciclo termodinámico de recuperación de calor, el cual puede provenir de energías alternativas o de desecho industrial.



**Figura 6.** Transitorio de la operación de un sistema de recuperación de energía de desecho.

En la figura 6 se muestran los datos del periodo transitorio de la operación del sistema completo para la recuperación de energía de desecho y su revalorización.



**Figura 7.** Condiciones de operación para revalorización de energía de 70 °C.

En la figura 7 se muestran las condiciones de operación para la revalorización. Obsérvese que se llega a recuperar entre 25 y 33% de la energía de desecho con al menos 20 °C por arriba de la

temperatura a la que fueron desechados. El nivel de recuperación de calor permite obtener 33% a 112 °C y hasta 25% a 120 °C de la energía simulada en el LITA-CIICAp.

En las figuras 8 y 9 se ven las pantallas del control de fluido de trabajo, por medio de revoluciones por minuto, realizado en LabView, y la pantalla del usuario para la adquisición de datos cada cinco segundos, realizada en HPVee Pro, desde donde se llama al programa de control cuando es necesario, en función del algoritmo mostrado en la figura 3.



**Figura 8.** Pantalla del usuario para el control de rpm de bomba de fluido refrigerante.



**Figura 9.** Pantalla de usuario para adquisición de datos.

## 6 Conclusiones

El control automático para un transformador térmico de una etapa, con el cual se lleva a cabo la revalorización de energía proveniente de energías alternativas o de desecho industrial, se puede hacer por medio del control del flujo entre el condensador y el evaporador, conocido como fluido refrigerante. La operación se logra por medio del control del flujo mEV, en el cual se puede hacer una revalorización de energía de 80 °C a 120 °C, en el mejor escenario.

## Agradecimientos

Los autores desean expresar su agradecimiento al proyecto Desarrollo y Aplicación de un Sistema de Refrigeración

Termosolar Autosuficiente y Sustentable para Conservación de Productos Perecederos en Comunidades Costeras Alejas de la Red, por su apoyo parcial para esta investigación.

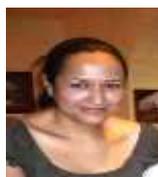
### Referencias

1. Balance Nacional de Energía (SENER), 2008.
2. Romero, R. J., E. Velasco Uribe y J. Casillas Solano, "Comparación de la producción de CO2 contaminante basada en el rendimiento de bombas de calor", *Memorias del XXVIII Encuentro Nacional de la AMIDIQ*, Manzanillo, Colima, 2007.
3. Beltrán Couste, J., "Evaluación de un sistema experimental de refrigeración por absorción, que opera a baja temperatura con la mezcla monometilamina-agua", tesis de licenciatura en Ingeniería Mecánica, FCQEI-UAEM, 2009.
4. Fathalah, K. y S. E. Aly, "Theoretical Study of a Solar Powered Absorption/MED Combined System", *Energy Conversion and Management*, vol. 31, núm. 6, 1991, pp. 529-544.
5. Al-Juwayhel, F., H. El-Dessouky y H. Ettouney, "Analysis of Single-Effect Evaporator Desalination Systems Combined with Vapor Compression Heat Pumps", *Desalination*, núm. 114, 1997, pp. 253-275.
6. Elshamarka, S., "Absorption Heat Pump for a Potable Water Supply in a Solar House", *Applied Energy*, vol. 40, núm. 1, 1991, pp. 31-40.
7. Nguyen, M., S. B. Riffat y D. Whitman, "Solar-Gas-Driven Absorption Heat-Pump Systems", *Applied Thermal Engineering*, vol. 16, núm. 4, 1996, pp. 347-356.
8. Huicochea, A., J. Siqueiros y R. J. Romero, "Portable Water Purification System Integrated to a Heat Transformer", *Desalination*, núm. 165, 2004, pp. 385-391.
9. Romero, R. J. y A. Rodríguez-Martínez, "Optimal Water Purification Using Low Grade Waste Heat in an Absorption Heat Transformer", *Desalination*, vol. 220, núms. 1-3, marzo de 2008, pp. 506-513.
10. Alanís Navarro, J. A., D. C. Labastida del Toro, M. Fernández Resenos y R. J. Romero, "Control de flujo refrigerante en una bomba de calor por absorción de una etapa", *Memorias del Encuentro de Investigación en Ingeniería Eléctrica*, Zacatecas, 2006, pp. 204-208.
11. Romero, R. J., J. A. Sequeiros, M. A. Basurto-Pensado, J. J. Escobedo y J. M. Sierra, "Instrumentación específica para un transformador térmico de una etapa", *Memorias de la XXVII Semana Nacional de Energía Solar*, Chihuahua, 2003.

12. Barajas Mendoza A., *Algoritmo de control y propuesta de control automático para un transformador térmico por absorción de una etapa para revalorización de energía térmica*, tesis de licenciatura en Ingeniería Química, FCQEI-UAEM, México, 2007.
13. Romero, R. J., A. Barajas Mendoza y L. Rayón López, "Propuesta para el control de flujo refrigerante en una bomba de calor por absorción de una etapa", *Memorias de la XXX Semana Nacional de Energía Solar*, Puerto de Veracruz, 2006.



El **Dr. Rosenberg J Romero D** es Profesor Investigador de tiempo completo, actualmente es el responsable del Laboratorio de Ingeniería Térmica Aplicada del Centro de Investigación en Ingeniería y Ciencias Aplicadas de la Universidad Autónoma del Estado de Morelos (UAEM), Cuenta con 27 artículos en revistas indexadas de las áreas de ingeniería y energía. Ha participado en 11 proyectos de investigación. Es autor de un libro y diversos capítulos de libros en los temas de energías renovables y aplicaciones de ciclos termodinámicos. Ha participado con 66 memorias en extenso en congresos internacionales y nacionales. Ha dirigido 12 tesis de licenciatura, 5 de maestría y 1 de doctorado. Imparte cátedras de licenciatura, maestría y doctorado en la Facultad de Ciencias Químicas e Ingeniería de la UAEM. El Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología lo ha reconocido en el Sistema Nacional de Investigadores con el Nivel II hasta el 2013.



La Maestra en Ingeniería y Ciencias Aplicadas **Sotsil Silva Sotelo**, es estudiante que realiza su proyecto doctoral en el área de máquinas térmicas. Ha publicado 4 artículos en revistas indexadas y tiene dos capítulos en libros relacionados a las bombas de calor. Se ha especializado en los estudios de transferencia de calor en dos fases y el modelado de los ciclos de las bombas de calor. Es directora de una tesis de licenciatura y realizó sus estudios de licenciatura en la Facultad de Ciencias Químicas e Ingeniería de la UAEM.



El **Dr. Roberto Best y Brown** es Investigador Titular de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) es reconocido por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por parte del Sistema Nacional de Investigadores con el nivel III. Ha desarrollado diversos sistemas para uso de energías renovables y patentado un sistema novedoso de absorción para refrigeración solar. Tiene vigentes 11 proyectos y ha publicado más de cien artículos en las áreas de ingeniería, energía y procesos. Fue presidente de la Asociación Nacional de Energía Solar del año 1998 al año 2000, es miembro de la Academia Nacional de Ingeniería desde 1990, miembro distinguido de la Academia Mexicana de Ciencias desde 1994.



**J. Cerezo-Román** Realizó los estudios de licenciatura en Ingeniería Química en el Instituto Tecnológico de Zacatepec, la maestría en Ingeniería en Energía en la

Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), el doctorado en Ingeniería Química y Procesos en la Universidad Rovira i Virgili en Tarragona, España y un postdoctorado sobre desarrollo de componentes de absorción en la UNAM, además pertenece al Sistema Nacional de Investigadores (SNI) en la categoría C. Entre sus producciones académicas cuenta con 5 artículos en revistas arbitradas a nivel internacional y 10 artículos en extenso en congresos nacionales e internacionales y docencia en diferentes universidades nacionales. Recientemente se ha incorporado como investigador en el Laboratorio de Energía Solar del Instituto de Ingeniería y pertenece al cuerpo académico de medio ambiente (área de energía y medio ambiente), sus líneas de investigación esta relacionado con el desarrollo tecnológico de equipos de refrigeración y aire acondicionado por absorción y sistemas fototérmicos.