

# Propuesta de Control automático de un Transformador Térmico de Doble Etapa para recuperación de Calor de Desecho

Automatic control of a Double Stage Heat Transformer (DSHT) for waste heat recovery:  
a proposal

\*Carmen Valeria Valdez-Morales<sup>1</sup>, Rosenberg. J. Romero D.2

<sup>1</sup>Posgrado en Ingeniería y Ciencias Aplicadas, Universidad Autónoma del Estado de Morelos, Av. Universidad 1001, Cuernavaca, Morelos, México. CP 62209. carmen.valdez@uaem.mx

<sup>2</sup>Centro de Investigación en Ingeniería y Ciencias Aplicadas, Universidad Autónoma del Estado de Morelos, Av. Universidad 1001, Cuernavaca, Morelos, México. CP 62209. rosenberg@uaem.mx

## PALABRAS CLAVE:

Transformador térmico, Relación de flujo, control automático

## RESUMEN

En este artículo se presenta una primera aproximación para la aplicación de un control automático de un transformador térmico de doble etapa que opera con la mezcla Carrol-Agua, estos equipos son utilizados para la recuperación de calor de desecho de procesos industriales. Se muestra la pantalla de adquisición de datos, la estrategia de automatización del sistema con la evaluación termodinámica que permite identificar y modificar las variables a controlar, la operación del sistema y sus capacidades de operación para la revalorización de energía.

## KEYWORDS:

Heat Transformer, Flow ratio, Automatic control

## ABSTRACT

In this paper, a first approach to the application of automatic control of a double stage heat transformer (DSHT) operating with water/Carrol is described, these equipments are utilized for recovering waste heat from industrial processes. The data acquisition display, automation strategy of system with thermodynamics evaluation to identify and modify variables to control, the operation of the system and its operational capabilities for the revalorization of energy is shown.

## 1 INTRODUCCIÓN

La revalorización de energía es un tema importante en sectores industriales, ya que para su funcionamiento requieren de gran cantidad de energía, tan solo el sector energético produce alrededor de dos tercios de las emisiones de gases de efecto invernadero [1], ya que más del 80% del consumo mundial de energía se basa en combustibles fósiles [2]. Debido a este problema se tiene el interés por nuevas investigaciones y técnicas que mejoren el uso de los recursos energéticos, los ciclos de absorción son una opción, debido a que la recuperación de energía térmica del ciclo puede ser utilizada en otro proceso. El uso de un transformador térmico de ciclo avanzado o transformador térmico de doble etapa DSHT (por sus siglas en inglés Double Stage Heat Transformer), es una acoplamiento de dos transformadores térmicos de una etapa SSHT (por sus siglas en inglés Single Stage Heat Transformer), estos dispositivos permiten la revalorización de la energía de desecho a un mayor nivel térmico, los componentes que integran dicho equipo son un total de diez intercambiadores de calor de placas, cinco por etapa, los cuales llevan por nombre: generador, condensador, evaporador, economizador y absorbedor [3], como se muestra en la Figura 1. Siendo el absorbedor el componente principal del sistema ya que en este componente se observan los incrementos de temperatura y la cantidad de energía revalorizada.

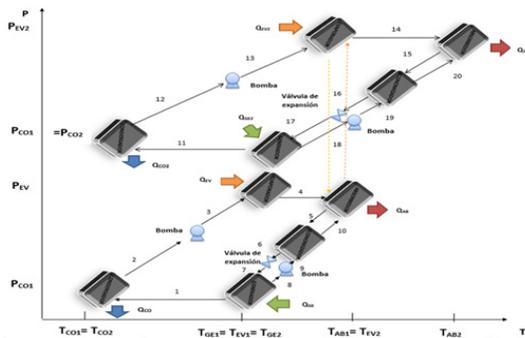


Figura 1.- Diagrama esquemático de un DSHT [3].

## 2 METODOLOGÍA

El transformador térmico utiliza una mezcla de fluido de trabajo – absorbente (Carrol-Agua) para revalorizar la energía que se suministra en el evaporador y en el generador [4]. La mezcla diluida en absorbente, se

conduce del absorbedor hacia el generador donde el fluido de trabajo se vaporiza parcialmente utilizando una cantidad de calor QGE. El fluido de trabajo evaporado es enviado al condensador donde cambia de fase al rechazar una cantidad de calor QCO. El condensado obtenido se bombea al evaporador donde experimenta un cambio de fase a una presión mayor que la presión en el generador utilizando una cantidad de calor QEV; por último, el vapor proveniente del evaporador se pone en contacto con la solución concentrada en el absorbedor, donde se produce una reacción exotérmica y cede una cantidad de calor QAB para iniciar el ciclo nuevamente. El economizador tiene como función precalentar la corriente de solución concentrada proveniente del generador utilizando el calor sensible de la corriente de solución diluida que abandona el absorbedor [5].

En un transformador térmico de doble etapa o DSHT, la cantidad de calor cedida por el absorbedor de la primera etapa QAB1 alimenta al evaporador de la segunda etapa, por lo que el fluido de trabajo es evaporado a una temperatura y presión mayor que en el evaporador de la primera etapa, esto permite que la cantidad de calor cedida por el absorbedor de la segunda etapa QAB2 tenga una temperatura mayor que en el absorbedor de la primera etapa.

Dos de los parámetros termodinámicos que se calculan en el transformador térmico son el coeficiente de operación COP (por sus siglas en inglés de Coefficient of Performance) y el GTL (por sus siglas en inglés de Gross Temperature Lift), el primero se define como el cociente entre la energía térmica cedida por el sistema entre la energía suministrada al sistema. A continuación se presentan las ecuaciones para determinar el COP de la primera y segunda etapa.

$$COP = QAB1 / (QGE1 + QEV1) \tag{1}$$

$$COP2 = QAB2 / (QGE1 + QEV1 + QGE2) \tag{2}$$

El incremento de temperatura GTL, se define como la diferencia de valores que existe entre la temperatura del absorbedor TAB y del evaporador TEV en donde se suministra la energía.

$$GTL1 = TAB1 - TEV1 \tag{3}$$

$$GTL2 = TAB2 - TEV1 \tag{4}$$

Debido al gran número de variables que conforman un transformador térmico, el control del sistema es un problema no lineal debido a las interacciones de las operaciones unitarias en el ciclo que complican el control del proceso [3]. En este trabajo se propone la generación de simulaciones y definir qué condición de operación es la adecuada para el control del sistema, es decir, bajo qué condiciones de operación se puede obtener la máxima temperatura, debido a que la doble etapa del transformador térmico recupera energía a un mayor nivel térmico, lo que incrementa el GTL.

Para lograr dicha condición se requiere la colocación de un control automático en los flujos que alimentan al absorbedor de la segunda etapa, ya que el flujo es una variable, así como las temperaturas, las entalpías y concentración de la mezcla de trabajo con la cual se realizan los cálculos de las potencias en cada uno de los componentes.

El control del flujo AB2 para el cálculo de la potencia en absorbedor (QAB2) se puede realizar de dos formas diferentes de control, en el primer caso mediante el control del flujo interno, y el segundo caso controlando el flujo externo del absorbedor, como se muestra en las siguientes ecuaciones:

$$Q_{AB2int} = \dot{m}_{12} \cdot h_{12} - \dot{m}_{11} \cdot h_{11} - \dot{m}_{17} \cdot h_{17} \quad (5)$$

$$Q_{AB2ext} = \dot{m}_{14} \cdot h_{14} - \dot{m}_{15} \cdot h_{15} \quad (6)$$

Otro de los parámetros importantes es la relación del flujo (FR), definido como la relación del flujo másico de la solución proveniente del absorbedor (AB) con el flujo másico del fluido de trabajo

$$FR = \dot{m}_{AB2} / \dot{m}_{EV2} \quad (7)$$

O bien expresada con respecto a las concentraciones de la mezcla de trabajo:

$$FR = X_{GE2} / (X_{GE2} - X_{AB2}) \quad (8)$$

Al realizar la variación de los flujos, esta relación se ve afectada, ya que los cambios afectan las concentraciones y entalpías, por lo que se realiza nuevamente cada uno de los cálculos de las ecuaciones de GTL2, COP2 y QAB2.

Para poder realizar cada uno de los cálculos se requiere de la adquisición de datos que permitan conocer los valores de asociados en las ecuaciones 1 –8, donde cada una de las temperaturas se puede determinar por

el sistema de adquisición de datos que censa durante el periodo transitorio y estable cada 5 segundos.

El tipo de control utilizado para el sistema es de lazo cerrado, se propone el uso de este tipo de control debido a que es necesario el control de la temperatura y flujos, midiendo la temperatura real y comparándola con la temperatura de referencia, es decir la temperatura o flujo deseados, para que las válvulas y flujómetros se activen o desactiven para asegurar que el sistema se mantenga constante, contando con un control de retroalimentación estable a perturbaciones y variaciones internas [6].

En la Figura 2 se muestra el diagrama de bloques indicando paso a paso las variables a controlar del sistema como se menciona anteriormente, a continuación se enumeran los pasos a seguir:

1. Iniciar el programa de adquisición de datos.
2. Determinar los valores iniciales de temperatura y flujo que se requieren experimentalmente.
3. Al determinar los valores mencionados el programa realiza el cálculo de los parámetros termodinámicos como el COP, potencias y entalpías.
4. El programa verifica si las condiciones de operación son las adecuadas.
5. En caso de que las condiciones no se cumplan, se determinan nuevamente los valores para realizar nuevamente el cálculo.
6. Si las condiciones de operación son las adecuadas se envía la información al puerto para el control de las bombas y suministrar la potencia necesaria para la alimentación del flujo en el transformador térmico

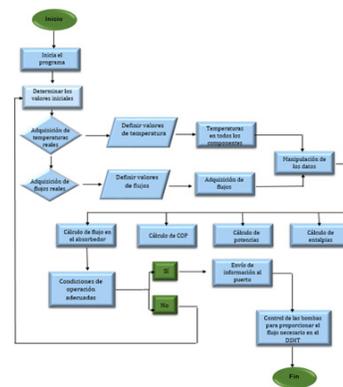


Figura 2. Diagrama de bloques para el control de variables en el transformador térmico.

### 3 Resultados

Se realizaron pruebas experimentales en el transformador térmico, las cuales tienen un periodo transitorio que dura aproximadamente de 30 a 40 minutos hasta que los flujos y temperaturas de cada uno de los componentes del transformador térmico se estabilizan de acuerdo con la determinación de los valores iniciales como se observa en el diagrama de bloques. En la Figura 3 se observa físicamente el equipo experimental con la instrumentación que se requiere para su funcionamiento, así como la ubicación de los intercambiadores de calor que lo conforman.

El sistema utilizado para la adquisición de datos es el programa HpVee Pro, el cual realiza las lecturas de temperaturas durante el periodo transitorio y establece cada 5 segundos, graficando los datos durante el proceso. Se utilizó un adquirente de datos marca Agilent Technologies modelo 34970A, con dos módulos multiplexores de 20 canales cada uno, en los cuales se conectaron termopares tipo T con señal de entrada en mV, la pantalla de adquisición de datos y parte de la programación se muestra en la Figura 4.

1. Generador (primera etapa)
2. Condensador (primera etapa)
3. Economizador (primera etapa)
4. Absorbedor (primera etapa)
5. Evaporador (primera etapa)
6. Generador (segunda etapa)
7. Condensador (segunda etapa)
8. Economizador (segunda etapa)
9. Evaporador (segunda etapa)
10. Absorbedor (segunda etapa)
11. Tanque de etilenglicol



Figura 3. Equipo Experimental del Transformador Térmico de Doble Etapa.

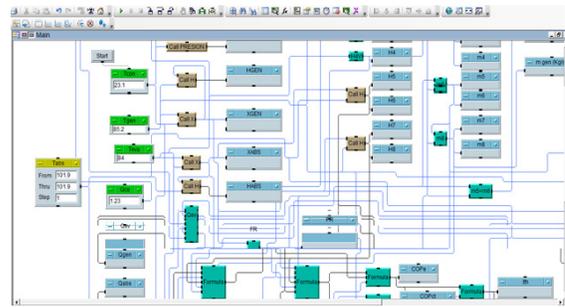


Figura 4. Pantalla del programa para la adquisición de datos.

En las Figuras 5 y 6 se muestran los resultados obtenidos de la simulación para la obtención del COP<sub>2</sub>, GTL<sub>2</sub>, FR y TAB<sub>2</sub>, donde se puede observar en la Figura 4 como disminuye el COP con respecto a un mayor incremento del GTL, marcando en líneas punteadas los datos experimentales y las mejores condiciones para ese punto en específico que se esperan obtener manteniendo un estado estable durante un tiempo determinado.

En la Figura 6 se muestra la relación de flujo FR, en comparación de la temperatura del absorbedor, como se puede observar que en efecto la variación de flujo aumenta en medida que la temperatura en el absorbedor también presenta un aumento, esto se debe a la variación de temperatura que origina el cambio en las concentraciones, que están en relación con las entalpías como lo muestra las ecuaciones 5 y 6.

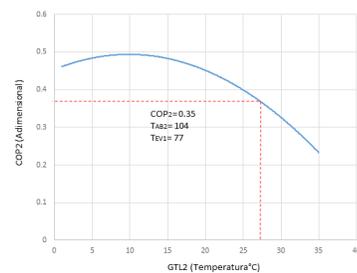


Figura 5. Relación del Coeficiente de Operación de la segunda etapa en función del incremento de temperatura de la segunda etapa.

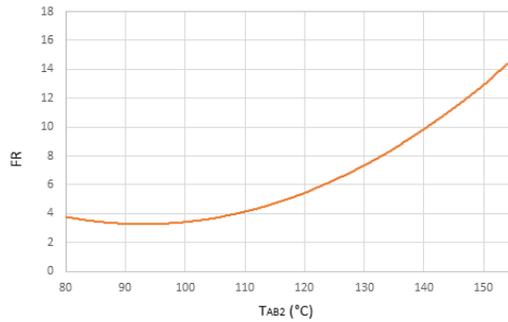


Figura 6. Relación de flujo en función de la temperatura de absorción para segunda etapa.

Finalmente se realiza la comparación de las pruebas experimentales identificando las variables con mayor repetitividad que permitieron mantener un mayor tiempo en estado estable, para posteriormente repetir dichas condiciones y obtener las temperaturas deseadas para cada caso.

#### 4 CONCLUSIONES

La evaluación termodinámica permite identificar las variables que afectan la operación del transformador térmico, muestran que al modificar algún parámetro para una sola condición, se observa la variación en la relación de flujo, así como el incremento de temperatura, del cual dependen la entalpía y la concentración de la mezcla.

El tipo de control para el transformador térmico por absorción de doble etapa debe ser de lazo cerrado, debido a la implementación del control automático que favorece la revalorización de energía y la repetitividad de las condiciones de operación.

#### AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a los proyectos CB-167434 y CEMIE-SOL-P09 del CONACYT Y Secretaría de Energía.

## REFERENCIAS

1. Balance nacional de Energía, SENER. Recuperado el 23 de Febrero de 2014, de [http://www.sener.gob.mx/res/PE\\_y\\_DT/pub/2013/BNE%202013.pdf](http://www.sener.gob.mx/res/PE_y_DT/pub/2013/BNE%202013.pdf).
2. International Energy Agency, Redrawing the Energy – Climate. Recuperado en Junio, 2014, de <https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/world-energy-outlook-2014---executivenglish.html>
3. C. V. Valdez – Morales, R. J. Romero. Evaluación termodinámica de un prototipo de transformador térmico de doble etapa operando con mezcla Carrol – Agua. Memorias del XXXVI Encuentro Nacional de la Academia Mexicana de Investigación y Docencia en Ingeniería Química. 2015, 2048-2052.
4. J. Ibarra Bahena, R. J. Romero, J. Cerezo, C. V. Valdez Morales, Y. R. Galindo Luna, L. Velázquez Avelar. Experimental assessment of an absorption heat transformer prototype at different temperature levels into generator and into evaporator operating with water/Carrol mixture. *Experimental Thermal and Fluid Science*. 2015, 60, 275 – 283, 2015
5. J. Ibarra Bahena, L. Velázquez Avelar, R. J. Romero, C. V. Valdez Morales, Y. R. Galindo Luna. Experimental thermodynamic evaluation for a single stage heat transformer prototype build with commercial PHEs. *Applied Thermal Engineering*. 2015, 75, 1262 – 1270.
6. Gierkes H, Golobic I. Operation of an adaptively controlled absorption heat pump under variable and disturbed conditions. [Ed.]. *Instrumentation Science and Technology*, Volume 30, 2012, 123 – 138.
7. [7] Romero J. R, Rodríguez Martínez A., Casillas Gonzalez E. Laboratory instrumentation and object oriented desing for working fluid control in an absorption heat pump using Water / Carrol. *Innovations and advanced techniques in computer and information sciences and engineering*, Springer. 2010, 429 – 432.

### Acerca de los autores



MICA Carmen Valeria Valdez Morales. Primer autor es Ingeniero Químico por la Universidad Autónoma del Estado de Morelos en 2012. Maestra en Ingeniería y Ciencias Aplicadas por la Universidad Autónoma del Estado de Morelos, es estudiante de doctorado en el Centro de Investigación en Ingeniería y Ciencias Aplicadas en

2014, perteneciente a la Universidad Autónoma del Estado de Morelos. Realiza sus investigaciones en bombas de calor por absorción desde 2012, actualmente trabaja en modelado y aplicación de automatización en ciclos termodinámicos para recuperación de calor de desecho con validación experimental, como coautora cuenta con varios artículos internacionales en energía y termodinámica.



Dr. Rosenberg J. Romero D. Segundo autor, es Ingeniero Químico por la Universidad Autónoma de Puebla, Maestro en Energía Solar y Doctor en Ingeniería Energética por el Centro de Investigación en Energía de la Universidad Nacional Autónoma de México. El Doctor Rosenberg Romero es profesor Investigador de Tiempo

Completo en el Centro de Investigación en Ingeniería y Ciencias Aplicadas de la Universidad Autónoma del Estado de Morelos. Perteneció al Sistema Nacional de Investigadores (SNI) nivel II, sus líneas de investigación son en el área de bombas de calor por absorción desde 1996 y cuenta con artículos internacionales de energías renovables y sustentabilidad energética.