

EVALUACIÓN DE LA INCERTIDUMBRE EN LA DETERMINACION EXPERIMENTAL DE LA EFICIENCIA DE UNA ENFRIADORA DE AGUA POR ABSORCION DE DOBLE ETAPA

G.R. Figueredo¹, F. Benitez¹, A. Coronas²

¹GITEA Universidad Tecnológica Nacional, French 414 CP 3500 Resistencia, Argentina
Tel: +54 3722 432928. / Fax: +54 3722 432683
e.mail: grfigueredo@gmail.com

²CREVER- Universitat Rovira i Virgili, Autovía de Salou, s/n, 43006 Tarragona, España
Teléfono : 977 54 02 05, Fax: 977 54 22 72

RESUMEN: La determinación experimental de las prestaciones de las máquinas de absorción exige la medición de caudales y temperaturas. El reducido cambio de la temperatura de los fluidos caloportadores ocasiona errores elevados en la determinación de los flujos de calor. Se expone el método de reconciliación de datos y de los coeficientes de acoplamiento para ajustar las mediciones y determinar los errores asociados. Durante los ensayos de una enfriadora de agua basada en BrLi-H₂O accionada a dos temperaturas se obtuvieron por ejemplo temperaturas a la salida del evaporador de 11,5°C/+0.1°C y eficiencias de 0,8/+0.14.

Palabras clave: Absorción, Refrigeración, Reconciliación de datos

INTRODUCCIÓN

En la actualidad la eficiencia energética es uno de los aspectos más importantes a considerar en las instalaciones de climatización de edificios debido al elevado costo de la energía, a rigurosas normativas gubernamentales y al compromiso de la población con el medio ambiente entre otras causas. Para seleccionar una tecnología y diseñar una instalación es necesario conocer ciertos parámetros característicos que permitan efectuar comparaciones entre diferentes alternativas y establecer las dimensiones globales de la instalación. También para recibir una instalación es necesario evaluar sus prestaciones y verificar si están dentro de las especificaciones establecidas de antemano en el proyecto de obra. Uno de los parámetros que permiten evaluar las prestaciones de una máquina determinada y comparar el desempeño de diferentes máquinas accionadas mediante el mismo tipo de energía es la eficiencia térmica o coeficiente de comportamiento designado como COP por sus iniciales en inglés. Cabe recordar que el COP pierde trascendencia al comparar máquinas accionadas con diferentes tipos de energía.

El núcleo de una instalación de aire acondicionado central es frecuentemente una enfriadora de agua accionada mediante energía eléctrica, gas natural o agua caliente producida en una caldera o en una planta solar. Las enfriadoras de agua comerciales accionadas mediante agua caliente son máquinas de absorción de BrLi-H₂O de simple efecto y pueden ser accionadas mediante agua caliente a aproximadamente 90°C producida en una planta solar basada en captadores solares planos pudiéndose utilizar también como respaldo una caldera a gas natural por ejemplo. En los últimos años se ha investigado la posibilidad de utilizar una enfriadora de doble etapa con accionamiento a dos niveles de temperatura: a 90°C mediante agua caliente producida en una planta solar y a 165°C mediante agua caliente presurizada obtenida con la combustión de gas natural en una caldera. Esta última alternativa ofrece interesantes ventajas como por ejemplo la elevada utilización de la planta solar y el bajo consumo de energía primaria (P.Lamp, F. Ziegler, 1998).

EL COP de una enfriadora por absorción es el cociente entre el flujo de calor absorbido a baja temperatura y el flujo de calor recibido a alta temperatura para el accionamiento. Estos flujos son transportados desde la caldera o planta solar hacia la enfriadora y desde la enfriadora hacia los recintos por circuitos secundarios que transportan un fluido caloportador (generalmente agua). Para determinar los flujos de calor es necesario conocer las temperaturas, caudales y propiedades termofísicas del fluido caloportador de los circuitos. Las máquinas de absorción admiten escasos cambios de temperatura en los fluidos caloportadores de los circuitos secundarios, generalmente menores a 6°C (Herold et al 1996). Por lo anteriormente expuesto al calcular los COP frecuentemente se obtienen rangos de incertidumbre que ocultan diferencias entre máquinas de diferentes fábricas y más aún entre tecnologías diferentes. No es raro obtener errores relativos en la determinación del COP del 40%; los mismos se tornan intolerables si se tiene en cuenta que el COP de una máquina de doble efecto es de 1,2 y el de una de simple efecto es de 0,7. Durante el ensayo de un sistema solar cualquiera es muy importante evaluar correctamente el error de la eficiencia del sistema, ya que una reducción en el consumo de energía podría quedar enmascarada por la incertidumbre en las mediciones y cálculos efectuados.

Numerosos ensayos han sido efectuados para caracterizar la operación de una enfriadora de agua de doble etapa accionada a dos niveles de temperatura mediante la combustión de gas natural y energía solar y demostrar la viabilidad de esta tecnología. Durante los ensayos se han estudiado los efectos de los caudales y temperaturas de los circuitos secundarios sobre la capacidad y COP de la máquina. En este trabajo se presenta el proceso de reconciliación de datos redundantes con los balances de energía y la evaluación de la incertidumbre en las diferentes magnitudes medidas y calculadas; la que es reducida mediante el proceso de reconciliación de datos.

LA MÁQUINA DE ABSORCIÓN DE DOBLE ETAPA

La máquina ensayada utiliza agua a presión menor que la atmosférica como refrigerante y una solución de bromuro de litio (LiBr) en agua como absorbente. Consta de 3 conjuntos principales alojados en 3 carcasas independientes interconectadas por tuberías, Figura 1. En la carcasa de alta presión (700mBar) se producen 2 procesos: separación de vapor de agua desde la solución diluida en el generador G2 mediante aporte de calor a 160°C y condensación de dicho vapor en el condensador C2. Procesos similares se producen en la carcasa de media presión (60 mBar) donde la generación de vapor en el G1 se produce re-aprovechando el calor de condensación del C2 más el aporte de la planta solar a 90°C aproximadamente. El efecto útil es decir la producción de agua fría se desarrolla en el conjunto de baja presión (6 mBar) donde en el evaporador E0 se evapora el agua condensada en C1 y C2 y el vapor de agua absorbido se absorbe en A0 en la solución concentrada proveniente del G1. El calor dissipado a temperaturas cercanas a los 35°C en el absorbedor A0 y condensador C1 se libera a la atmósfera mediante una torre de enfriamiento. Greiter et al (1991) y Figueredo et al (2003) dan una descripción más detallada del funcionamiento de esta máquina.

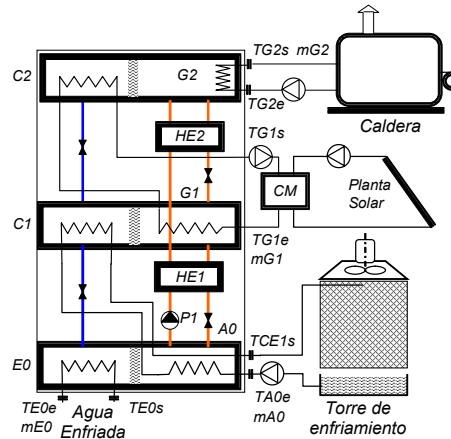


Figura 1 Esquema de la instalación de la enfriadora de doble etapa

Para determinar las prestaciones y el comportamiento de la enfriadora de agua se midieron durante los ensayos los caudales y las temperaturas de entrada y salida del fluido caloportador de los 4 circuitos secundarios: circuito de agua enfriada entre E0 y el aprovechamiento, circuito de disipación entre A0-C1 y la torre de enfriamiento, circuito de accionamiento a media presión entre G1 y la planta solar y por último el circuito de accionamiento a alta temperatura entre G2 y la caldera. Las temperaturas se midieron mediante resistencias de platino tipo Pt100 y los caudales mediante caudalímetro magnéticos. Además se midieron una gran variedad de parámetros internos de los circuitos de solución y de refrigerante de la enfriadora.

PROCESAMIENTO DE LAS MEDICIONES

Al efectuar las pruebas experimentales se realizaron, en forma automática, una gran cantidad de mediciones; desde el momento del arranque de la instalación se midieron, con intervalos de 1 minuto, temperaturas, caudales y presiones mediante un sistema electrónico compuesto por sensores, un adquirente de datos y una computadora personal. Como resultado de los cambios de las condiciones de operación se producían periodos de inestabilidad en el desarrollo del ciclo. Las variables medidas, aún durante los periodos estacionarios, sufrían leves variaciones que generaban errores de definición; al mismo tiempo los sensores tienen errores intrínsecos que son inevitables y también se producían errores, entre las causas más importantes a destacar, debido al montaje de los mismos y a interferencias electromagnéticas sobre los circuitos de medición.

La cantidad de magnitudes medidas fue superior a las necesarias para determinar el ciclo termodinámico y los flujos de energía, es decir las magnitudes medidas fueron redundantes. Cuando se da esta situación en sistemas termodinámicos es factible controlar que las mediciones estén de acuerdo con los balances de energía, materia y funciones de estado de las propiedades termodinámicas de los fluidos en los distintos estados. Si se efectúan tales comprobaciones como consecuencia de los errores asociados a las mediciones (entre otros motivos) con seguridad se van a detectar apartamientos de dichas leyes.

Las mediciones efectuadas fueron sometidas a varios procesos consecutivos a fin de obtener los valores más probables de las magnitudes, los errores asociados a las mediciones y su propagación a los parámetros calculados a partir de esas mediciones, como pueden ser los flujos de energía y los coeficientes de operación en los diferentes estados. El procesamiento se divide en varias etapas relacionadas como indica el diagrama de flujo de la Figura 2. La primera etapa consiste en la selección de periodos de operación en estado estacionario y cálculo de los promedios para obtener los valores más probables de las magnitudes medidas durante el periodo estacionario. Posteriormente se obtienen los valores más probables ajustados de las magnitudes mediante reconciliación de datos con los balances de energía y consideración de los errores del instrumental (E). La etapa del cálculo de los factores de acoplamiento entre las diferentes magnitudes y de los errores relativos reducidos luego del proceso de reconciliación de datos precede a la última etapa que consiste en la estimación de la incertidumbre de las magnitudes calculadas mediante el estudio de la propagación de errores.

SELECCIÓN DE PERIODOS ESTACIONARIOS

Durante los ensayos se modificaron las temperaturas y caudales de los circuitos externos para analizar el comportamiento de la enfriadora en diferentes condiciones de operación. Luego de una modificación de los parámetros generalmente sobrevinía

un periodo de inestabilidad hasta que los controladores electrónicos lograban una operación estable nuevamente. Para la selección de los periodos a considerar se evaluaron las evoluciones de todos los parámetros registrados durante la operación de la máquina y se extrajeron aquellos periodos donde se observa una operación estable de la enfriadora. Para la operación en efecto combinado se lograron extraer 34 periodos con una duración promedio de 24 minutos, siendo el periodo más largo de 40 minutos y el más corto de 10 minutos. Durante esos periodos de operación estable la mayor variación se produjo solo en una oportunidad en la temperatura de salida del condensador evaporador CE1 cuando la diferencia máxima alcanzó a los 1.13°C. Para el evaporador E0 la mayor diferencia fue de 0.41°C en la salida, siendo el promedio de las diferencias de todos los puntos 0.21°C. Para el generador de alta presión G2 la diferencia máxima fue de 0.56°C en la salida y el promedio fue de 0.25°C. En relación con los caudales externos (de los fluidos caloportadores) la mayor variación se produjo para el caudal del evaporador, donde la diferencia máxima alcanzó a 0.44 l/s siendo el promedio de las diferencias para el mismo de 0.37l/s.

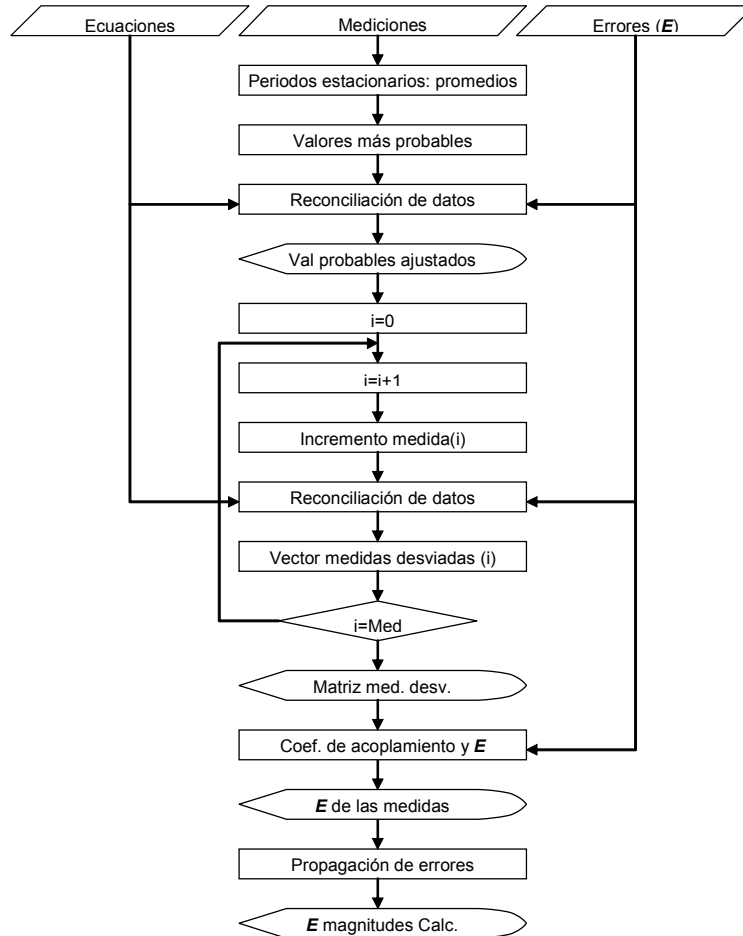


Figura 2 Diagrama de flujo del procesamiento de datos experimentales

RECONCILIACIÓN DE DATOS (RD)

Cuando se efectúan M mediciones en un sistema que tiene un determinado grado de libertad L y la cantidad de mediciones efectuadas M es superior al grado de libertad del sistema L se dice que las mediciones son redundantes. En este caso se dispone de más información que la estrictamente necesaria para conocer el comportamiento de la instalación. Cuando se verifican a partir de las mediciones el cumplimiento de ciertos principios (conservación de energía, materia, etc.) y de las relaciones entre ciertas propiedades de los fluidos (por ejemplo relación entre presión y temperatura en el cambio de fase de una sustancia pura) se registran incoherencias o incompatibilidades entre las mediciones. En estos casos se recurre al proceso de reconciliación de datos que se describe a continuación.

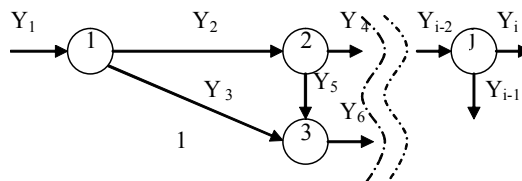


Figura 3 Esquema de la instalación para reconciliación de caudales.

Por ejemplo analicemos la conservación de materia en una instalación constituida por J procesos interconectados con i tuberías, Figura 3. Si llamamos X_i al conjunto de caudales reconciliados y Y_i al conjunto de caudales medidos, el error en cada medición será la diferencia entre ambos y la reconciliación de datos consiste en minimizar la suma de los errores cuadráticos medios normalizados (Heenan y Serth, 1986).

$$\phi(X_i) = \sum_i \frac{(X_i - y_i)^2}{\sigma_i^2} \quad \text{Ec. 1}$$

Sujeto a las restricciones impuestas por los j balances de materia

$$\psi_j(X_i) = \sum_i a_{ij} X_i = 0 \quad \text{Ec. 2}$$

Donde ψ_j es la restricción correspondiente al balance de materia del nodo j, σ_i es el error o la varianza de la medición i (relacionado con el error proporcionado por el fabricante del instrumento y la experiencia del investigador) y a_{ij} es el coeficiente de X_i en la ecuación j, siendo $a_{ij}=1$ para flujos que ingresan al nodo, $a_{ij}=-1$ para los flujos que salen del nodo y $a_{ij}=0$ para las corrientes que no se conectan a ese nodo.

La aplicación del método de Lagrange implica la solución del sistema de ecuaciones Ec. 3 y Ec. 4 donde λ es un multiplicador de Lagrange.

$$\frac{\partial}{\partial X_i} \left[\phi(X_i) + \sum_j \lambda_j \psi_j(X_i) \right] = 0 \quad \text{Ec. 3}$$

$$\frac{\partial}{\partial \lambda_j} \left[\phi(X_i) + \sum_j \lambda_j \psi_j(X_i) \right] = \psi_j(X_i) = 0 \quad \text{Ec. 4}$$

Cualquier técnica que sirva para resolver el sistema de ecuaciones conduce a un conjunto de caudales ajustados X_i que satisfacen los balances de materia de todos los nodos.

RD EN MODO DOBLE EFECTO

En el caso de los ensayos experimentales del prototipo en modo doble efecto se efectuó la reconciliación de los caudales y temperaturas de los circuitos externos con el balance de energía global de la máquina.

Al ensayar el prototipo se midieron 9 parámetros relacionados con el balance energía de los 3 circuitos del mismo. Estos parámetros comprenden 3 temperaturas de entrada, 3 temperaturas de salida y 3 caudales, Figura 4. Al aplicar el método de los multiplicadores de lagrange queda un sistema constituido por 10 ecuaciones con 10 incógnitas. Las 10 ecuaciones incluyen 9 derivadas Ec. 5 a Ec. 13 más el balance de energía expresado en la Ec. 14.

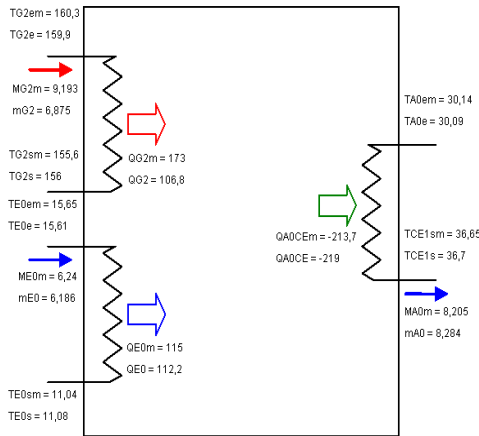


Figura 4 Ejemplo de la RD de un ensayo

$$2 \cdot \left[\frac{mG2 - MG2m}{\sigma_1} \right] + \delta_1 \cdot cpg \cdot (TG2e - TG2s) = 0 \quad \text{Ec. 5}$$

$$2 \cdot \left[\frac{mA0 - MA0m}{\sigma_2} \right] + \delta_1 \cdot cpa \cdot (TA0e - TCE1s) = 0 \quad \text{Ec. 6}$$

$$2 \cdot \left[\frac{mE0 - ME0m}{\sigma_3} \right] + \delta_1 \cdot cpe \cdot (TE0e - TE0s) = 0 \quad \text{Ec. 7}$$

$$2 \cdot \left[\frac{TCE1s - TCE1sm}{\sigma_4} \right] - \delta_1 \cdot mA0 \cdot cpa = 0 \quad \text{Ec. 8}$$

$$2 \cdot \left[\frac{TA0e - TA0em}{\sigma_5} \right] + \delta_1 \cdot mA0 \cdot cpa = 0 \quad \text{Ec. 9}$$

$$2 \cdot \left[\frac{TG2s - TG2sm}{\sigma_6} \right] - \delta_1 \cdot mG2 \cdot cpg = 0 \quad \text{Ec. 10}$$

$$2 \cdot \left[\frac{TG2e - TG2em}{\sigma_7} \right] + \delta_1 \cdot mG2 \cdot cpg = 0 \quad \text{Ec. 11}$$

$$2 \cdot \left[\frac{TE0s - TE0sm}{\sigma_8} \right] - \delta_1 \cdot mE0 \cdot cpe = 0 \quad \text{Ec. 12}$$

$$2 \cdot \left[\frac{TE0e - TE0em}{\sigma_9} \right] + \delta_1 \cdot mE0 \cdot cpe = 0 \quad \text{Ec. 13}$$

$$mG2 \cdot cpg \cdot (TG2e - TG2s) + mE0 \cdot cpe \cdot (TE0e - TE0s) + mA0 \cdot cpa \cdot (TA0e - TCE1s) - 10 = 0 \quad \text{Ec. 14}$$

Se asume que existe una pérdida de calor de 10kW en el calor que se aporta al generador como se observa en la ecuación del balance de energía. Los productos del calor específico por la densidad del fluido a la temperatura media del evaporador, absorbedor y generador en kJ/L°C están expresados en la siguiente tabla.

Cpe	cpa	cpg	Cppl
4.195	4.164	3.953	4.0595

Los valores de los coeficientes de normalización del error para las temperaturas y los caudales se encuentran resumidos en la siguiente tabla donde en la primera fila se encuentran las variables medidas, en la segunda la nomenclatura y en la tercera los valores numéricos.

mG2	mA0	mE0	TCE1s	TA0	TG2s	TG2e	TE0e	TE0s	TE0e	mG1	TG1s	TG1e
σ_1	σ_2	σ_3	σ_4	σ_5	σ_6	σ_7	σ_9	σ_8	σ_9	σ_{10}	σ_{11}	σ_{12}
10	2	0.2	0.1	0.1	1	1	0.1	0.1	0.1	2	1	1

El sistema de ecuaciones se resolvió para cada ensayo con el software Engineering Equation Solver (EES).

La temperatura de producción de agua fría varió en los diferentes ensayos entre 12 y 6°C y el retorno de la misma se producía entre 16 y 12°C. El cambio que produce el proceso de RD en ambas lecturas es muy pequeño no superando en ningún caso los 0,2°C. En las temperaturas del generador se efectuó un ajuste levemente superior originado en la mayor varianza de la medición de temperaturas (que son del orden de los 150°C) pero que en ningún caso supera los 0,4°C. La disipación de energía mediante el agua de torre se produjo en un rango de 27 a 38°C, retornando el agua a la máquina en un rango que va desde los 23 a 31°C. El proceso de RD no produce modificaciones significativas en las temperaturas de disipación. En los caudales máscicos del evaporador y absorbedor tampoco se producen modificaciones significativas mientras que en el caudal del generador se produce un ajuste más marcado, originado en la mayor varianza de la lectura de este caudalímetro que trabaja a una temperatura elevada y en una zona donde el flujo no estaba completamente desarrollado.

RD EN MODO COMBINADO

Cuando la máquina opera en modo combinado opera un cuarto circuito exterior, el encargado del accionamiento a media temperatura, esto implica que se miden 3 parámetros más (2 temperaturas y 1 caudal). En total en el sistema participan ahora 13 incógnitas y consecuentemente se agregan 3 ecuaciones más. Las Ec. 15, Ec. 16 y Ec. 17 corresponden a las derivadas.

$$2 \cdot \left[\frac{mG1 - MG1m}{\sigma_{10}} \right] + \delta_1 \cdot cpG1 \cdot (TG1e - TG1s) = 0 \quad \text{Ec. 15}$$

$$2 \cdot \left[\frac{TG1s - TG1sm}{\sigma_{11}} \right] - \delta_1 \cdot mG1 \cdot cpG1 = 0 \quad \text{Ec. 16}$$

$$2 \cdot \left[\frac{TG1e - TG1em}{\sigma_{12}} \right] + \delta_1 \cdot mG1 \cdot cpG1 = 0 \quad \text{Ec. 17}$$

Al balance de energía se le agrega un término que representa la energía aportada en el generador de media, Ec. 18 que reemplaza a la Ec. 14 en la que se considera además una disipación de energía de 10kW hacia el medio.

$$mG1 \cdot cpG1 \cdot (TG1e - TG1s) + mG2 \cdot cpG \cdot (TG2e - TG2s) + mE0 \cdot cpe \cdot (TE0e - TE0s) + \quad \text{Ec. 18}$$

$$+ mA0 \cdot cpa \cdot (TA0e - TCE1s) - 10 = 0$$

Durante el proceso de reconciliación de datos no se observaron cambios de más de 0,2°C en las temperaturas. Debido a la magnitud de los errores asociados a la determinación del caudal en el generador de alta se produjo un ajuste apreciable en dicho caudal. En la Figura 5 se graficaron los caudales reconciliados en función de los caudales medidos y se aprecia la desviación en los caudales del generador de alta. En la Figura 6 se observan los flujos de calor calculados en función de los parámetros reconciliados; se nota una apreciable desviación de los flujos de calor en el generador de alta.

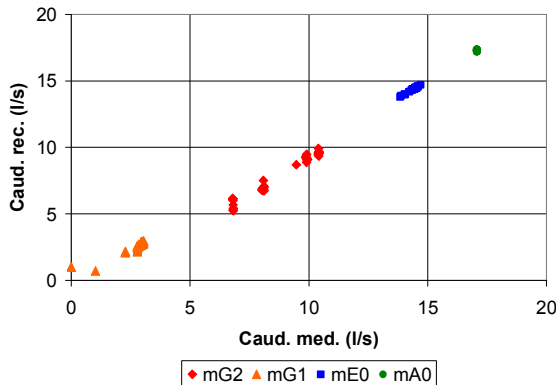


Figura 5 Caudales reconciliados vs medidos en los generadores, evaporador y absorbedor.

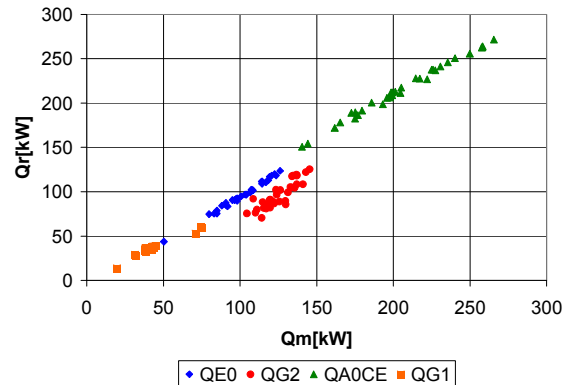


Figura 6 Flujos de calor reconciliados vs calculados en el evaporador, absorbedor, condensador y generadores.

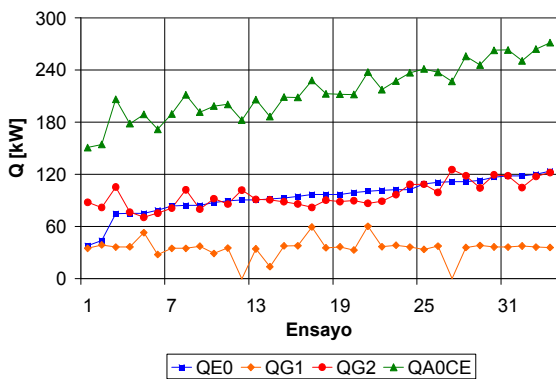
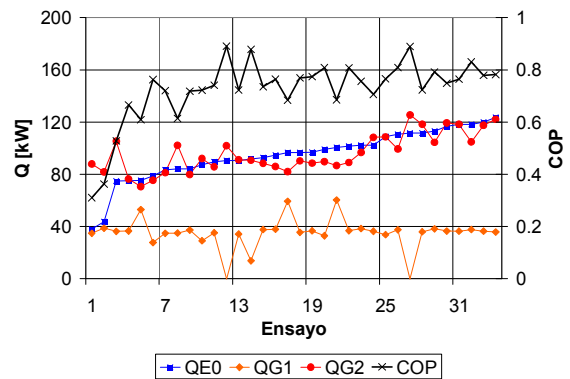


Figura 7 Flujos de calor en el evaporador, generador de media, Figura 8 Flujos de calor en el evaporador, generador de media, generador de alta y en el absorbedor-condensador



Durante los ensayos de la máquina operando en modo combinado se obtuvieron 34 puntos estables. Luego de aplicado el proceso de reconciliación de datos resultaron los flujos de calor representados en la Figura 7 a la que se le aplicó un orden ascendente en los flujos de calor en el evaporador. Se observa que la potencia de frío al igual que la potencia en el generador de alta anduvieron entre los 80 y 120 kW, mientras que la potencia del accionamiento a baja temperatura fue de aproximadamente 40kW. En la Figura 8 se representó el COP de la máquina considerando como energía requerida por el ciclo la suma del calor aportado en el generador de media y en el generador de alta. La eficiencia aumentó para el caso de las mayores potencias de frío llegando a superar 0,8 en algunos casos.

CÁLCULO DE LOS ERRORES RELATIVOS REDUCIDOS

Cuando se mide una única magnitud con un único valor con diferentes instrumentos independientes, cada uno con un error relativo conocido; el valor de la magnitud se puede obtener como el promedio de los diferentes valores obtenidos con los distintos instrumentos. El valor del error asociado a la magnitud medida será menor al de cada uno de los instrumentos utilizados. En el caso de que se mida con 2 instrumentos diferentes cada uno con errores Er1 y Er2 el error asociado al valor de la magnitud será Er según la Ec. 19. Una explicación del método fue efectuada por Alefeld, et al (1995)

$$Er = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{1}{Er1}\right)^2 + \left(\frac{1}{Er2}\right)^2}} \quad \text{Ec. 19}$$

Cada error Er1 y Er2 se acopla directamente con el error global Er los factores de acoplamiento en este caso son iguales a la unidad. Con el procedimiento de reconciliación de datos se logra ajustar las mediciones dentro del rango aceptado para su variación debido al error inherente al instrumento de medición de forma que se verifiquen ciertas leyes o funciones que se sabe de antemano que se tienen que cumplir.

Todavía resta la pregunta de cual es el error que tienen asociados los datos reconciliados. Cuando se mide una magnitud con varios instrumentos independientes se logra obtener un valor de la magnitud con un error menor al del instrumento con menor error de todos. Algo similar sucede cuando se miden diferentes magnitudes que están relacionadas entre si por leyes conocidas. El significado de los factores de acoplamiento se verá claramente en el ejemplo que se expone a continuación. Sea el caso de una cámara de mezcla a la que ingresan 2 corrientes y de la que sale una corriente, si se miden los 3 caudales se debe cumplir el balance de materia que indica que la suma de las corrientes entrantes es igual al valor del caudal en la que sale. Probablemente los datos medidos no cumplan con esta condición, si se reconcilian los datos con el procedimiento antes descrito se obtendrán nuevos valores, estos nuevos valores reconciliados tendrán asociado un error que en general será inferior al de los instrumentos individuales con los que se obtuvieron. En los apartados que siguen se da una descripción paso a paso del y un ejemplo para uno de los estados estacionarios (Alefeld, et al 1995).

Primer paso:

Si se ejecuta de nuevo el proceso de reconciliación de datos, descrito en el apartado correspondiente, tomando a los valores ya ajustados como datos de partida, la suma de los errores cuadráticos medios normalizados será igual a cero. Para obtener los factores de acoplamiento ejecutamos nuevamente el proceso de RD pero incrementando uno de los caudales y manteniendo el resto iguales a los valores reconciliados ya obtenidos. Es decir tomamos como datos de partida $X_1 + \Delta X_1$, X_2 , X_3, \dots, X_n y minimizamos nuevamente la función cumpliendo los balances de materia. Como resultados se obtienen nuevos valores $X_1 + \delta X_1$, $X_2 + \delta X_2$, $X_3 + \delta X_3, \dots, X_n + \delta X_n$. Los factores de acoplamiento formarán una matriz y estarán definidos como

$$\frac{\delta X_i}{X_i} = K_{i,k} \cdot \frac{\Delta X_k}{X_k} \quad \text{Ec. 20}$$

Donde los subíndices toman los siguientes valores $i=1,2,\dots,n$; $k=1,2,\dots,n$. Un incremento del caudal k ocasiona una variación $k_{i,j}$ veces del caudal i. El valor de $K_{i,k}$ representa que porcentaje varia el valor reconciliado del caudal i cuando el caudal k se modifica en un uno por ciento.

Segundo Paso

El factor de acoplamiento de un caudal cualquiera sobre si mismo es diferente de la unidad ya que el proceso de RD al minimizar los errores propaga la variación a los demás caudales y disminuye su incidencia sobre si mismo.

$$Er_i^n = \frac{k_{i,i}}{\sqrt{\sum_{k=i}^n \left(\frac{K_{i,k}}{Er_k}\right)^2}} \quad \text{Ec. 21}$$

Proceso detallado de un ensayo

Se presenta a continuación a modo de ejemplo el proceso de cálculo de los errores reducidos para el ensayo en el que se obtuvo la mejor eficiencia en modo doble efecto, el mismo se realizó el 6 de octubre a las 16:00 hs. El análisis se efectuó para los caudales y temperaturas de los circuitos de accionamiento, agua enfriada y disipación. Los valores medidos y reconciliados con los balances de energía de dichos parámetros se exponen en las columnas 3 y 4 de la Tabla 1 juntos con los valores incrementados (Inc) y los errores absolutos asociados al instrumental de medición (E).

Para obtener los factores de acoplamiento entre las diferentes magnitudes se debe ejecutar repetidamente el proceso de RD partiendo de un set de variables reconciliadas con la excepción de una de ellas (que ingresa incrementada) a efectos de observar su influencia en las restantes variables y en si misma. Entonces siendo 9 las variables se repite 9 veces el proceso de RD y en cada corrida se incrementa una sola de las variables y entonces se obtienen 9 vectores que contienen las variables reconciliadas luego de haberse modificado una sola variable de entrada. En la Tabla 2 se exponen los resultados del proceso de RD para cada vector de entrada. Por ejemplo en la columna 1 se incremento en 1°C la temperatura de entrada al

evaporador, pasando de 14.4°C a 15.4°C, las demás variables permanecieron sin cambios e iguales a los valores reconciliados originales. La influencia de la variación de TE0em en el resto de las variables se observa en la columna 1 donde se aprecia que dicha temperatura tomo el valor de 15.3°C pero que también las restantes variables sufrieron modificaciones entre ellas por ejemplo el caudal en el absorbedor paso de valer 17,2kg/s a 17,5 kg/s.

Variable	Unid	Med	Rec	Inc	E	Er	Ern
TE0em	°C	14.4	14.4	15.4	0.236	0.017	0.007
TE0sm	°C	11.5	11.5	12.5	0.229	0.020	0.010
mE0m	kg/s	11.7	11.7	14.0	0.234	0.020	0.018
TG2em	°C	160.1	160.0	161.0	0.600	0.004	0.001
TG2sm	°C	155.4	155.5	156.5	0.589	0.004	0.001
mG2m	kg/s	8.5	7.8	9.3	0.155	0.021	0.021
TA0em	°C	27.7	27.7	28.7	0.269	0.010	0.003
TCE1sm	°C	31.4	31.4	32.4	0.279	0.009	0.003
Ma0m	kg/s	17.1	17.2	20.7	0.344	0.020	0.024

Tabla 1 Parámetros medidos, reconciliados, incrementados y errores absolutos

Variable	Unidad	1	2	3	4	5	6	7	8	9
TE0e	°C	15.3	14.4	14.4	14.4	14.4	14.4	14.3	14.4	14.4
TE0s	°C	11.6	12.5	11.6	11.6	11.5	11.6	11.6	11.5	11.5
mE0	kg/s	11.7	11.7	14.0	11.7	11.7	11.7	11.7	11.7	11.7
TG2e	°C	159.8	160.2	159.9	160.9	160.2	159.9	159.7	160.3	160.2
TG2s	°C	155.7	155.3	155.6	155.6	156.3	155.6	155.8	155.2	155.3
mG2	kg/s	6.5	9.0	7.1	7.0	8.5	8.7	5.8	9.4	9.0
TA0e	°C	27.6	27.7	27.6	27.6	27.7	27.6	28.6	27.7	27.7
TCE1s	°C	31.5	31.4	31.4	31.4	31.4	31.4	31.5	32.3	31.4
mA0	kg/s	17.5	17.0	17.4	17.3	17.1	17.3	17.5	16.9	20.5

Tabla 2 Conjuntos de parámetros incrementados y reconciliados

A partir de los errores relativos y los factores de acoplamiento se pueden obtener mediante la Ec. 20 los nuevos errores relativos corregidos luego de la reconciliación de datos. Se observa en la tabla Er y Ern que los errores relativos se reducen a menos de la mitad, por ejemplo en la temperatura de entrada al evaporador se tenía 1,7% y se redujo al 0,7%.

PROPAGACIÓN DE ERRORES A LA EFICIENCIA

Cuando la enfriadora opera en modo doble efecto puro la eficiencia de la máquina se puede definir como el cociente entre el calor aportado en el evaporador y el calor en el generador de alta presión.

$$COP = \frac{QE0}{QG2} \quad \text{Ec. 22}$$

Teniendo en cuenta que ambos circuitos operan con agua, los valores intercambiados se pueden determinar en función de los caudales y las temperaturas de ambos circuitos.

$$COP = \frac{mE0 \times C_p \times (TE0e - TE0s)}{mG2 \times C_p \times (TE0e - TE0s)} \quad \text{Ec. 23}$$

Las 6 variables medidas en los circuitos extremos tienen asociados errores que se propagan cuando se calcula la eficiencia de la enfriadora. El error asociado al COP de la enfriadora se puede obtener como la sumatoria de los productos de las derivadas parciales del COP con respecto a cada una de las variables medidas por los errores de cada instrumento de medición.

$$\Delta COP = \left| \frac{\partial COP}{\partial mE0} \right| \times \Delta mE0 + \left| \frac{\partial COP}{\partial mG2} \right| \times \Delta mG2 + \left| \frac{\partial COP}{\partial TE0e} \right| \times \Delta TE0e + \left| \frac{\partial COP}{\partial TE0s} \right| \times \Delta TE0s + \left| \frac{\partial COP}{\partial TG2s} \right| \times \Delta TG2s + \left| \frac{\partial COP}{\partial TG2e} \right| \times \Delta TG2e \quad \text{Ec. 24}$$

Las derivadas parciales del COP con respecto a cada variable medida están expresadas en las siguientes 6 ecuaciones:

$$\frac{\partial COP}{\partial mE0} = \frac{TE0e - TE0s}{mG2 \times (TG2e - TG2s)} \quad \text{Ec. 25}$$

$$\frac{\partial \text{COP}}{\partial mG2} = -\frac{mEO \times (TEOe - TEOs)}{mG2^2 \times (TG2e - TG2s)} \quad \text{Ec. 26}$$

$$\frac{\partial \text{COP}}{\partial TEOe} = \frac{mEO}{mG2 \times (TG2e - TG2s)} \quad \text{Ec. 27}$$

$$\frac{\partial \text{COP}}{\partial TEOs} = -\frac{mEO}{mG2 \times (TG2e - TG2s)} \quad \text{Ec. 28}$$

$$\frac{\partial \text{COP}}{\partial TG2e} = -\frac{mEO \times (TEOe - TEOs)}{mG2 \times (TG2e - TG2s)^2} \quad \text{Ec. 29}$$

$$\frac{\partial \text{COP}}{\partial TG2s} = \frac{mEO \times (TEOe - TEOs)}{mG2 \times (TG2e - TG2s)^2} \quad \text{Ec. 30}$$

Los errores corregidos de los caudales y las temperaturas reconciliadas se obtienen mediante el proceso de cálculo descrito en los apartados anteriores. El error relativo que se comete al calcular el COP queda expresado como la relación entre el error absoluto y el valor del COP.

$$\text{ErCOP} = \frac{\Delta \text{COP}}{\text{COP}} \quad \text{Ec. 31}$$

Si reemplazamos las derivadas y los correspondientes errores de los instrumentos en la expresión del error relativo resulta:

$$\text{ErCOP} = \text{Er}_{mEO}^n + \text{Er}_{mG2}^n + \frac{\text{Er}_{TEOe}^n \times TEOe}{(TEOe - TEOs)} + \frac{\text{Er}_{TEOs}^n \times TEOs}{(TEOe - TEOs)} + \frac{\text{Er}_{TG2e}^n \times TG2e}{(TG2e - TG2s)} + \frac{\text{Er}_{TG2s}^n \times TG2s}{(TG2e - TG2s)} \quad \text{Ec. 32}$$

Con esta última expresión y los valores de los errores relativos corregidos Er_i^n se obtiene un error relativo en el valor del COP de 0.18. Teniendo en cuenta que los valores del COP se aproximan a la unidad también los errores absolutos en el COP serán de aproximadamente ese mismo valor. Como los valores de los parámetros no presentan grandes variaciones y los errores relativos de los instrumentos permanecen constantes el error en el COP no se modificará de un estado al otro.

CONCLUSIONES

La determinación experimental de las prestaciones de las máquinas térmicas en general y de las máquinas de absorción en particular exige la medición de caudales y cambios de temperatura generalmente pequeños. Frecuentemente las magnitudes medidas y calculadas tienen asociados errores groseros que no son evaluados durante el procesamiento de datos y que desvirtúan conclusiones acerca de ahorros energéticos y eficiencias. El avance de la electrónica permite registrar muchas variables con intervalos reducidos generándose gran cantidad de datos redundantes que el método de reconciliación de datos permite ajustar.

La determinación de los coeficientes de acoplamiento entre las diferentes medidas permite apreciar el error de las magnitudes medidas los que mediante la propagación de errores se extrapolan hacia los parámetros calculados. Aplicando este novedoso método los errores relativos en la medición de la temperatura por ejemplo se reducen desde el 2% al 1% en el rango de los 10°C. La propagación de estos errores a la eficiencia da un error del 18% valor que dificulta la evaluación del impacto de ciertas condiciones de operación sobre la eficiencia de la máquina. Las eficiencias obtenidas se expresan como $\text{COP}=0.8 \pm 0.14$. En próximos trabajos se publicarán como afecta las condiciones de operación a la eficiencia y potencia de la enfriadora.

REFERENCIAS

- Alefeld, G., Greiter, I., Hoffman, L., Schweigler, C., Wagner, A., Weiss, V., Ziegler, F., (1995). Absorptionwärmepumpe mit variabler Wärmeauskopplung auf zwei Temperaturniveaus, Informations Zentrum Wärmepumpen + Kältetechnik, IZWBericht. Eggenstein-Leopoldshafen.
- Figueredo G. Ortiga J. Bruno J.C. Coronas A. (2003) Bomba de calor/enfriadora de agua por absorción de agua-LiBr de doble etapa accionada con energía solar. III Jornadas Nacionales de Ingeniería Termodinámica. Valencia, España.
- Greiter, I., Kern, W., Alefeld, G., (1991). A 500 kW Heatpump for Heating at two Temperature Levels and for Air-Conditioning, Proceedings of the International Absorption Heat Pump Conference, pag 285-290, Tokio, Japon.
- Greiter, I., Schweigler, C., Scharfe, J., Alefeld, G., (1993). A 500 kW Absorption Heatpump for Heating at two Temperature Levels: Experience of the First Heating Season, Proceedings of the International Absorption Heat Pump Conference, pag 85-92, New Orleans, USA.
- Heenan, W., Serth, W. (1986). Detecting Errors in Process Data. Chemical Engineering. November 1986. pp 99-103
- Herold K.E., Radermacher R., Klein S.A. (1996). Absorption Chillers and Heat Pumps, CRC Press, Inc., New York, EEUU.
- Kern, W., A Two-Stage Absorption Heat Pump for Heating and Cooling, (1989). Newsletter of the IEA Heat Pump Center, vol 7, no. 3, 22-23.
- P.Lamp, F. Ziegler, (1998) European research on solar-assisted air conditioning,, International Journal of Refrigeration 21 (2) (1998) 89-99.

ABSTRACT

The performance experimental determination in absorption machines requires flow and temperatures measures. Small changes in heat transfer flows originate high mistakes in heat flows determination. Then it is exposed a data reconciliation method and coupling coefficients method in order to fit and determinate related errors. Water chillers based on BrLi-H₂O was tested using two driving temperatures. In an experiment were obtained evaporator outlet temperatures of 11, 5 °C +/- 0.1 °C and efficiencies of 0.8 +/- 0.14.

Keywords: absorption chiller, air conditioning, data reconciliation