

BANCO PARA ENSAYOS TRANSITORIOS PARA ENFRIADORAS Y BOMBAS DE CALOR AGUA-AGUA Y AIRE-AGUA

BERLANGA CAÑETE, FÉLIX A.⁽¹⁾; RUIZ DE ADANA SANTIAGO, MANUEL⁽¹⁾
RUZ RUIZ, MARIO L.⁽²⁾; VÁZQUEZ, FRANCISCO⁽²⁾
ZAMORA, MIGUEL⁽³⁾; CEREZUELA, ADORACIÓN⁽³⁾

felix.berlanga@uco.es

⁽¹⁾Universidad de Córdoba, Departamento de Química Física y Termodinámica Aplicada

⁽²⁾Universidad de Córdoba, Facultad, Departamento de Informática y Análisis
Numérico

⁽³⁾Compañía Industrial de Aplicaciones Térmicas (CIAT), Departamento de I+D+i

RESUMEN

Se ha desarrollado un banco de ensayos hidráulico con el cual se puede regular la temperatura y el caudal de agua entregados a una máquina climatizadora.

El sistema de control posee una regulación capaz de ajustar los caudales y las temperaturas del agua entregada a la máquina a ensayar en tiempo real.

Las temperaturas de operación del banco de ensayos permiten realizar ensayos sobre máquinas enfriadoras como sobre bombas de calor.

La medida de la energía térmica intercambiada por la máquina a ensayar se determina haciendo un balance entre la temperatura de entrada y salida de la misma conocido el caudal. El consumo eléctrico de la máquina se monitoriza para poder realizar cálculos sobre la eficiencia.

El desarrollo del banco de ensayos responde a la necesidad de ensayo y evaluación de los equipos de producción de la empresa CIAT en sus instalaciones en Montilla, España.

Palabras clave: Banco de Ensayos; Máquinas Climatizadoras; Sistemas Agua - Agua; Sistemas Partidos; Sistemas Aire - Agua.

1. Introducción

En el proceso de diseño de una nueva gama de producto dentro de una compañía industrial, el ensayo de prototipos reales previos a la producción en masa del producto final es una etapa fundamental. Es importante comprobar el nivel de concordancia entre los cálculos teóricos y las simulaciones llevadas a cabo con los resultados de la máquina que finalmente será construida.

El ensayo de prototipos ha de permitir obtener datos del comportamiento un equipo bajo unas condiciones de trabajo reales controlables. Estos datos han de ser suficientes para permitir la toma de decisiones en el proceso de diseño. Además, estas decisiones pueden variar desde modificaciones puntuales en el diseño de un equipo concreto hasta la salida de un nuevo producto al mercado.

La construcción de una instalación experimental específica para cada gama de producto en desarrollo en una compañía es una solución cara y poco práctica. Sin embargo, es una práctica habitual en algunos entornos empresariales. Como alternativa, en este estudio se plantea la construcción de un banco de ensayos polivalente que permita en ensayo de una gama amplia de productos sin variar su configuración fundamental.

En este documento se desarrolla el diseño y construcción de un banco de ensayos que permita ensayar equipos de climatización de configuración aire-agua, todoagua y equipos partidos. La instalación experimental permite el ensayo de máquinas tanto en modo refrigeración como en modo calefacción.

La configuración seleccionada para el banco de ensayos tanto en su parte hidráulica como de control permite modificar las temperaturas y caudales del fluido con el cual intercambia calor el sistema de climatización a ensayar. De este modo podremos modificar indirectamente las temperaturas de referencia del ciclo termodinámico. Dependiendo del tipo de ensayo podremos fijarla temperatura de evaporación o de condensación o ambas. También se podrán simular ciclos transitorios de carga.

El estudio de un sistema en régimen transitorio permite analizar su comportamiento de manera más realista, pudiendo estudiar diferentes situaciones que se pueden plantear en el desempeño habitual del equipo en su vida útil. También se puede estudiar la reacción del mismo ante condiciones de cambios extremos.

Para la obtención del diseño final se ha buscado información en estudios previos en los que se ha evaluado el rendimiento de diferentes sistemas de climatización[1], [2], [3].

2. Objetivos

El objetivo principal del trabajo es construir una instalación experimental que permita estudiar la eficiencia de diferentes equipos de climatización. Los valores para medir el rendimiento de un equipo de climatización son, en el caso de que se trate de un equipo destinado a la generación de calor, el COP (Coefficient of Performance) y en el caso de que el equipo se destine a la generación de frío el EER (EnergyEfficiency Ratio)[4].

El diseño de la instalación experimental ha de permitir obtener dichos valores de medida de la eficiencia. Para calcularlos se precisa medir, por un lado, la energía térmica obtenida como producto en el equipo a estudiar, y por otro, la energía eléctrica utilizada por el equipo para lograrlo.

Para poder comparar los valores de medida de la eficiencia entre diferentes equipos ensayados, se necesita que las medidas registradas se hayan realizado en las mismas condiciones ambientales. Para ello, la instalación experimental ha de permitir fijar y controlar las condiciones experimentales en las que se desarrolla cada experimento. Mediante el control de dichas condiciones ha de ser posible simular regímenes transitorios en los sistemas a ensayar.

3. Métodos

Como se ha planteado en el apartado anterior se necesita medir tanto la energía eléctrica consumida por la máquina a ensayar como la energía intercambiada por la misma.

Medida de la energía eléctrica consumida

La medida de la energía eléctrica consumida por el equipo a ensayar se lleva a cabo utilizando un analizador de potencia eléctrica trifásica comercial. El dispositivo utiliza medidas de tensión e intensidad de cada una de las fases para obtener la potencia eléctrica instantánea consumida.

La medida de la tensión se realiza de manera directa sobre cada una de las fases. Para medir la intensidad circulante se recurre a unos transformadores de intensidad de tipo toroidal que se sitúan en torno a cada uno de los conductores por los que circula la corriente de alimentación del equipo a ensayar.

El dispositivo proporciona la medida directa de la potencia consumida por el equipo en pruebas, así como los valores de tensión y corriente de fase. El fabricante asegura una precisión en la medida de la potencia consumida de $\pm 0.5\%$.

Medida de la energía térmica intercambiada

Las máquinas que se pretenden probar en la instalación experimental, poseen intercambiadores de placas en los que se produce la transferencia de energía por parte del refrigerante circulante por el equipo. La medida de la energía térmica se realiza el circuito secundario de dicho intercambiador, por el que circula un caudal controlado de agua. La medida del caudal circulante y de las temperaturas de entrada y salida del agua nos proporciona el valor de la energía intercambiada.

$$\dot{Q}_T = \dot{m} \cdot c_p \cdot (T_e - T_s)$$

Siendo \dot{Q}_T la potencia transferida en el intercambiador de calor, \dot{m} el flujo másico circulante, T_e y T_s la temperatura de entrada y salida al intercambiador de calor respectivamente y c_p el calor específico del fluido en el que medimos el intercambio.

Se hace necesario por tanto, el uso de un sistema que proporcione un flujo controlado de agua, tanto en caudal como en temperatura, para realizar el intercambio. El sistema diseñado se puede observar en la Figura 1.

Diseño de la instalación hidráulica

Esquemáticamente, el sistema de control diseñado es el que se muestra en la Figura 1.

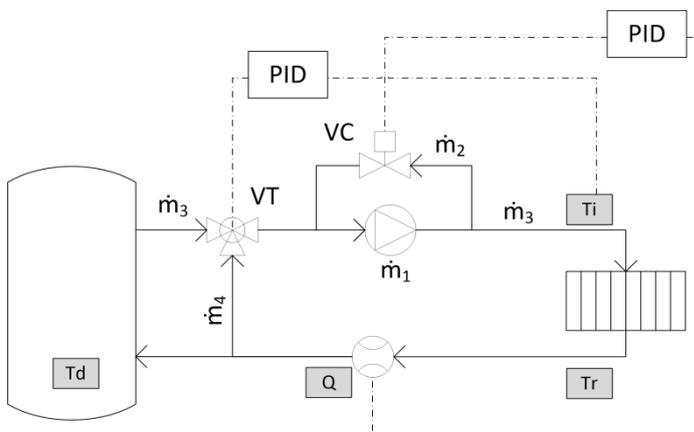


Figura 1: Esquema de regulación hidráulica.

Para impulsar el agua que circulará por el intercambiador se utiliza una bomba centrífuga. El caudal de este tipo de bombas depende de la pérdida de carga en el circuito. Para poder regular el caudal con independencia de las citadas pérdidas en el circuito se sitúa una válvula de 2 vías regulable en paralelo con la bomba. Esta válvula recirculará parte del agua impulsada por la bomba, obteniendo así el caudal deseado en el circuito de ensayo (\dot{m}_3).

La regulación de la temperatura se lleva a cabo utilizando una válvula de 3 vías en una configuración mezcladora. Dicha válvula permite la mezcla de dos flujos de agua a diferentes temperaturas para lograr la temperatura deseada en la entrada al intercambiador.

La energía térmica intercambiada por la máquina ensayada hace que el agua del depósito de inercia tienda a variar su temperatura. Para evitar este hecho se dispone de un sistema de respaldo que mantiene la temperatura de los depósitos. De este modo se pueden realizar ensayos de larga duración.

La energía térmica que se puede transferir en el intercambiador de calor depende directamente del flujo de agua circulante. Para aumentar el rango de potencias de ensayo admisibles, la instalación construida consta de dos circuitos hidráulicos de funcionamiento similar, cada uno con un rango diferente de caudales admisibles. Estos circuitos pueden conectarse indistintamente a los dos depósitos de inercia instalados. Los depósitos contienen agua a temperaturas diferentes, uno contiene agua a una temperatura elevada (45 °C) y el otro a una temperatura baja (7 °C). De este modo se puede dar respaldo a ensayos tanto de refrigeración como de calefacción. La configuración de los dos circuitos hidráulicos se puede observar en la Figura 2. En la Figura 3 se muestra la instalación finalmente construida.

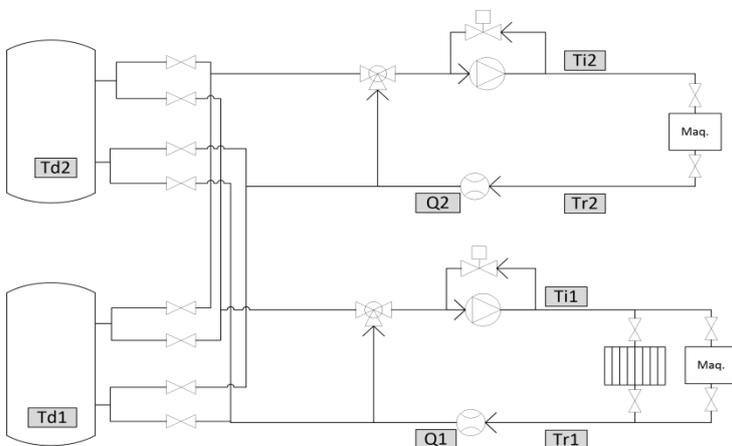


Figura 2: Instalación planteada.



Figura 3: Instalación construida.

Sistema de regulación y toma de datos

La regulación y la toma de datos experimentales se encuentran centralizadas en una tarjeta de control y adquisición de datos común. Dicha tarjeta posee una serie de entradas y salidas analógicas y digitales utilizadas para conectar los sensores y actuadores utilizados en el circuito.

El sistema hidráulico de ensayos descrito con anterioridad precisa un sistema de regulación que permita controlar las válvulas de control de caudal y temperatura motorizadas. El control de dichas válvulas se basa en un lazo de control retroalimentado. El mecanismo de control utilizado en ambos casos es de tipo Proporcional Integral Derivativo (PID).

La retroalimentación de ambos sistemas de control se lleva a cabo a través de medidas en tiempo real de las variables en el sistema. En el caso de la válvula reguladora de caudal se utiliza la medida del caudalímetro del circuito ensayado. En el caso de la temperatura, se puede utilizar la medida de la sonda de temperatura situada a la entrada del equipo a ensayar.

Los sistemas de control PID poseen tres variables que han de ser ajustadas. El ajuste de las mismas se realiza en la instalación in situ, a partir de los resultados experimentales obtenidos.

La tarjeta de adquisición de datos permite adquirir y registrar las variables del sistema con un periodo de muestreo configurable. Las principales variables registradas para cada banco de ensayos son las siguientes: temperatura de depósitos, temperaturas de impulsión y retorno y caudal de la máquina. Además se registran los valores asociados al consumo eléctrico. Una muestra de los datos adquiridos en un ensayo real se puede observar en la Figura 1.

Posibles configuraciones de ensayo

La instalación finamente construida puede ser utilizada para ensayos con equipos de refrigeración o con bombas de calor. Para ello, se ha de utilizar el juego de llaves que se puede observar en la Figura 1, y que permite seleccionar el depósito de inercia de respaldo a utilizar (agua fría o caliente). De esta manera se puede disponer de una fuente a la temperatura deseada para el tipo de ensayo a llevar a cabo. Los ensayos de un sistema que genere calor se han de realizar con el banco de ensayos conectado al depósito de agua fría para compensar la temperatura entregada. Por el contrario, los ensayos de sistemas que enfrían se han de realizar con el banco de ensayos conectado con el depósito de agua caliente.

En la Figura 4 se muestran numeradas las tres configuraciones posibles de ensayo utilizando la instalación hidráulica construida. Los equipos aire – agua se ensayan conectando el intercambiador de placas, ya sea como evaporador (E) o como condensador (C), a uno de los circuitos de ensayo, como se muestra en la configuración 1. La configuración 2 muestra cómo se conectaría a la instalación experimental un equipo de tipo agua – agua, haciendo uso de los dos circuitos de ensayo, cada uno conectado a un intercambiador de placas de la máquina a ensayar. Uno de los bancos de ensayos posee un circuito auxiliar en el que se encuentra un intercambiador de placas. Este intercambiador puede realizar funciones de condensador o evaporador en las pruebas de equipos partidos, tal y como se muestra en el esquema 3.

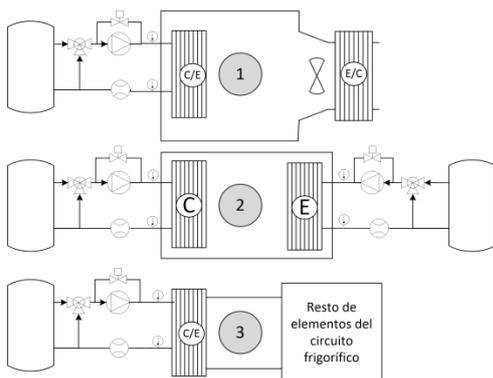


Figura 4. Esquema de posibles configuraciones de ensayo

Cada banco de ensayo posee conexiones flexibles para llevar el agua al intercambiador de calor de la máquina que se pretende ensayar. Para la prueba de equipos aire-agua se seleccionará uno de los bancos y se conectionará al equipo a ensayar al mismo. Para ensayos de tipo agua-agua se han de conectionar cada uno de los bancos de ensayos a los intercambiadores de calor que hagan las funciones de condensador y evaporador de la máquina.

4. Resultados

Se ha conseguido un sistema que permite realizar los ensayos deseados, almacenando los datos obtenidos durante los mismos, para que puedan ser analizados a posteriori. Se pueden obtener, los datos necesarios para calcular los valores de medida de la eficiencia deseados (COP, EER), potencias térmicas generadas por las máquinas y potencias eléctricas consumidas.

El sistema de registro de la energía eléctrica cumple con los requisitos establecidos tanto en el rango de trabajo admisible como en precisión de la medida. En cuanto a la medida de la energía eléctrica consumida por el equipo a ensayar, se pueden registrar potencias consumidas de hasta 69 kW. La precisión de la medida de la potencia activa consumida es de un 1% (Clase 1)[5].

La potencia térmica intercambiada que se puede registrar está dividida en dos rangos de potencia correspondientes a las dos instalaciones de intercambio de energía térmica construidas. El banco de ensayos de mayor capacidad es capaz de regular temperaturas en el rango fijado entre 3 y 10 m³/h mientras que el banco de menor capacidad está dimensionado para realizar ensayos de equipos cuyo caudal nominal oscile entre 1 y 2.5 m³/h. Las características de cada uno de los bancos se resumen en la Tabla 1.

Tabla 1 Rango de potencias térmicas admisibles en la instalación hidráulica.

Banco de ensayos	Regulación de caudal	Rango de potencias (kW) que se pueden medir para diferentes saltos térmicos entregados ($T_s - T_e = \Delta T$)		
		$\Delta T = 3$ K	$\Delta T = 5$ K	$\Delta T = 8$ K
Banco de menor capacidad	De 1 a 2.5 m ³ /h	De 3.48 a 8.71 kW	De 5.81 a 14.51 kW	De 9.29 a 23.22 kW
Banco de mayor capacidad	De 3 a 10 m ³ /h	De 10.45 a 34.83 kW	De 17.42 a 58.06 kW	De 27.87 a 92.89 kW

Para conseguir unos resultados de los ensayos que nos permitan obtener conclusiones válidas se precisa que las condiciones de entorno permanezcan estables. Como se trata de modificar la temperatura de un agua circulante, las condiciones de caudal y temperatura que se entregan a la máquina han de ser lo más estables posibles.

Se ha comprobado que la deriva de caudal en el control, una vez estabilizado, no excede el 2% del valor consignado. En cuanto a la temperatura, se han observado variaciones en la medida que no superan en ningún caso un rango de ± 0.8 K, lo que no supera el 2.5 % del valor deseado.

Para ilustrar un ensayo realizado en régimen transitorio, en las Figura 5 se muestran los registros de temperatura impulsada y caudal circulante durante un ensayo del banco contra una enfriadora. En ambas figuras se observan datos registrados por el sistema de forma simultánea. Se han dividido los datos referentes a temperaturas de los datos referentes a caudales en dos gráficas diferentes para simplificar la comprensión de los datos.

Por un lado, y en color azul, se muestra la consigna deseada para cada una de las variables. En color verde se muestra el valor registrado por los elementos de medida del sistema, sonda de temperatura y caudalímetro. En rojo se muestra la señal de control enviada por el control al actuador de la válvula reguladora, en mV (se utiliza una señal de 0-10 V DC). Esta señal hace que el vástago de la válvula se mueva, y por tanto cambie la temperatura de mezcla.

En las gráficas mostradas se observa un cambio en la consigna de temperatura de agua impulsada de 5 K así como la perturbación que el cambio en la consigna de temperatura a la entrada de la máquina a ensayar produce en los registros tanto de caudal como de temperatura. Se comprueba que la consigna elegida se alcanza en un periodo de tiempo razonable. Se puede comprobar también que el control del caudal no es completamente independiente del control de temperatura, ya que al variar la posición de la válvula de tres vías mezcladora, se produce una influencia en la posición necesaria de la válvula de 2 vías que regula el caudal del sistema. Sin embargo el sistema de control es capaz de corregir dicha influencia y mantener el caudal dentro de la consigna.

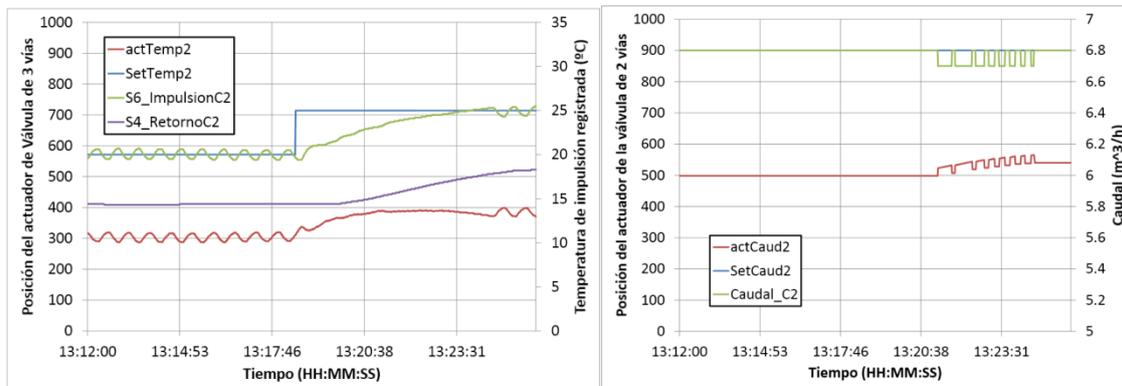


Figura 5. Registros de temperatura y caudal obtenidos en un ensayo

En la Figura 6 se muestran los resultados obtenidos de un ensayo estacionario de una bomba de calor. Se muestran registros de caudal, temperatura y consumo eléctrico de la máquina en tres gráficas diferentes con la misma base temporal. A partir de los datos recopilados se puede realizar un cálculo del COP durante el periodo registrado a través del valor medio de las variables medidas.

$$COP = \frac{\bar{Q}}{\bar{W}} = \frac{4,1813 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \cdot 5,4384 \text{ K} \cdot \frac{2}{3,6} \text{ kg/s}}{5,7257 \text{ kW}} = 2,205$$

En la anterior ecuación (\bar{Q}) representa el valor medio de la potencia térmica instantánea transferida en el intercambiador de placas, calculado como se describe en el apartado de métodos. El valor medio de la potencia eléctrica instantánea consumida por el equipo en pruebas se representa por (\bar{W}).

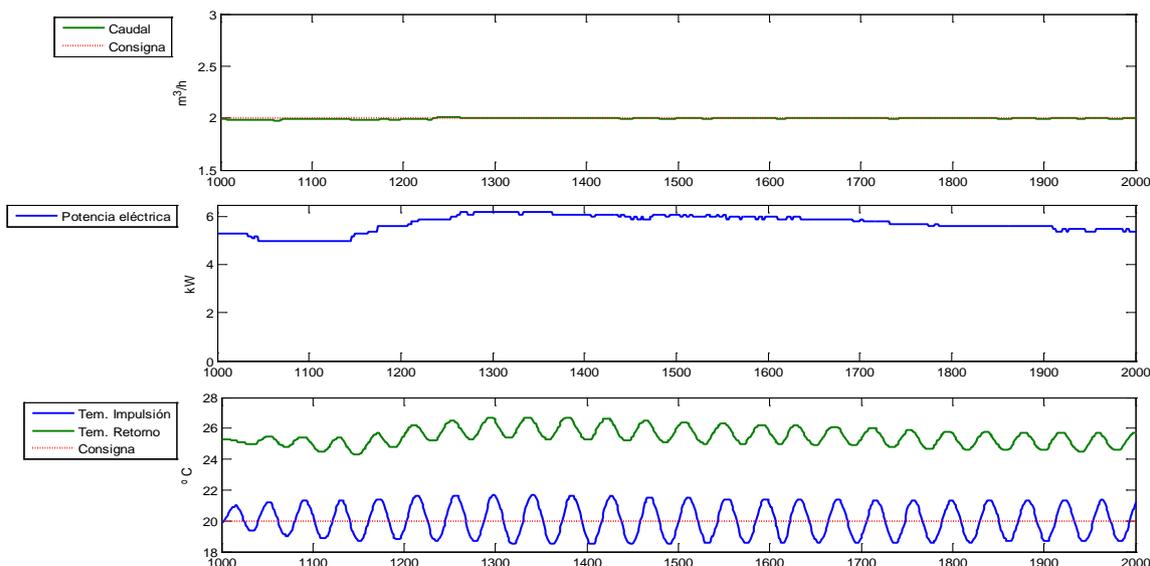


Figura 5. Registros obtenidos durante un ensayo

5. Conclusiones y consideraciones finales

Se ha construido una instalación experimental que permite obtener coeficientes de rendimiento de diferentes configuraciones de máquinas climatizadoras para un amplio rango de potencias de trabajo.

La instalación permite asimismo variar las temperaturas de referencia del ciclo termodinámico a través de la modificación de las temperaturas del medio al que se intercambia calor, permitiendo de esta manera el estudio de regímenes transitorios.

La instalación construida constituye un punto de partida a partir del cual, y a través del afino de la configuración de control, o la sustitución de elementos de control y adquisición de datos se pueda lograr la homologación como equipo de ensayos según norma[4].

6. Agradecimientos

El presente trabajo es parte del proyecto NATURCOOL cofinanciado por la Agencia de Innovación y Desarrollo de Andalucía Expte. IDEA 360281 y la Corporación Tecnológica de Andalucía Expte. CTA 13/668.

7. Referencias

- [1] P. Nekså, H. Rekstad, G. R. Zakeri, y P. a. Schiefloe *CO₂-heat pump water heater: characteristics, system design and experimental results*. Revista Int. J. Refrig., vol. 21, pp. 172-179, 1998.
- [2] J. F. Urchueguía, M. Zacarés, J. M. Corberán, Á. Montero, J. Martos, y H. Witte *Comparison between the energy performance of a ground coupled water to water heat pump system and an air to water heat pump system for heating and cooling in typical conditions of the European Mediterranean coast*. Revista Energy Convers. Manag., vol. 49, pp. 2917-2923, 2008.

- [3] L. Fu, X. L. Zhao, S. G. Zhang, Y. Jiang, H. Li, y W. W. Yang, *Laboratory research on combined cooling, heating and power (CCHP) systems*. *RevistaEnergy Convers. Manag.*, vol. 50, pp. 977-982, 2009.
- [4] Comité: AEN/CTN 100, *UNE-EN 14511. Acondicionadores de aire, enfriadoras de líquido y bombas de calor con compresor accionado eléctricamente para la calefacción y la refrigeración de locales*. Madrid: AENOR, 2012.
- [5] Comité: AEN/CTN 207, *CEI 62053-21:2003 Equipos de medida de la energía eléctrica (c.a.). Requisitos particulares. Parte 21: Contadores estáticos de energía activa (clases 1 y 2)*. Madrid: AENOR, 2003.