

Acondicionamiento de Espacios con Enfriamiento Evaporativo mediante Ladrillos Cerámicos

F. Flores M.¹, J. Hernández R.¹, F. Rey M.², E. Velasco G.², A. Tejero G.²

¹Departamento de Ingeniería, Universidad de Quintana Roo, México

²Departamento de Ingeniería Energética y Fluidomecánica, Universidad de Valladolid, España

Tel.: (00-52-983) 83-50300 ext. 207 Fax: (00-52-983) 83-50389 E-mail: feflores@uqroo.mx

Resumen

Se presenta un sistema combinado que consiste de un equipo de enfriamiento evaporativo semi-indirecto fabricado de ladrillos cerámicos huecos (refrigerador evaporativo cerámico REC), y de una batería de tubos de calor (TC) para recuperación de energía y obtener el enfriamiento y humidificación del aire exterior (caliente y seco) cuando es introducido hacia un espacio o cámara climática (CC). El REC es alimentado por un flujo de aire primario utilizado para el enfriamiento, el cual, entra en contacto directo con las gotas de agua de la superficie porosa del medio cerámico para favorecer la transferencia de calor y masa. El sistema se caracteriza mediante la técnica de diseño de experimentos, analizando cómo afectan los factores contemplados: caudal impulsado, temperatura del aire exterior y nivel de humedad en diferentes rangos. Se realizó una evaluación energética como equipo de acondicionamiento de aire en términos de calor recuperado, coeficiente de operación, eficiencia de saturación y eficacia, entre otros parámetros. Los resultados permiten concluir que el sistema REC-TC es una opción eficiente para lograr el confort en espacios interiores, ya que disminuye el consumo de adecuación térmica del aire de renovación impulsado a los locales y en consecuencia la potencia de los equipos generadores de frío "todo aire" convencionales.

Abstract

A combined system consisting of a semi-indirect evaporative cooling system made of hollow bricks (Ceramic Evaporative Cooler, CEC), a bank of heat pipes (HP) to permit heat recovery and obtain cooling and humidification of outside air (warm and dry) to be introduced into living space or climatic chamber (CC). This airstream gets into direct contact with the water drops in the porous surface of the bricks, enabling the heat and mass transfer. The system is characterised through the design of experiments technique. It is then analysed how variation within different ranges of the parameters considered affect (supply volume flow rate, outdoor air inlet temperature and humidity content). Finally, a study of the behaviour of the air conditioning system is developed, focusing in the heat recovery achieved, the coefficient of performance obtained, the saturation efficiency and effectiveness registered, among others. Results permit concluding that the HP-CEC system is an efficient alternative for the comfort of indoor spaces, as it reduces the energy consumption required for conditioning the ventilation air supplied, and thus downsizes the conventional systems air-air installed.

Palabras clave:

Acondicionamiento de aire, enfriamiento evaporativo, ladrillos cerámicos, recuperación de energía, tubos de calor.

Keywords:

Air-conditioning, evaporative cooling, heat pipes, heat recovery, hollow bricks.

Nomenclatura

ε_{in} :	Eficacia del REC – TC	[%]	D_{ext} :	Diámetro exterior	[m]
ε_{sat} :	Eficiencia de saturación del REC	[%]	D_{int} :	Diámetro interior	[m]
A:	Factor temperatura para el ANOVA		e:	Espesor	[m]
ANOVA:	Análisis de Varianza (por sus siglas en inglés)		h_{vpe} :	Entalpía del vapor de agua a la entrada del REC	[J/kg _{agua}]
B:	Factor caudal para el ANOVA		h_{vps} :	Entalpía del vapor de agua a la salida del REC	[J/kg _{agua}]
C:	Factor de humedad específica para el ANOVA		IAQ:	Calidad del aire interior (Indoor air quality)	
C_1, C_2, C_3 :	Niveles de caudal en el diseño de experimentos	[m ³ /h]	kWh _e :	Unidades de consumo eléctrico	
COP_t :	Coeficiente de operación total		kWh _t :	Unidades de demanda térmica	
$C_{p_{pe}}$:	Calor específico a presión constante del aire primario a la entrada del REC	[J/kg °C]	\dot{m}_{ap} :	Flujo másico de aire primario	[kg/s]
$C_{p_{ps}}$:	Calor específico a presión constante del aire primario a la salida del REC	[J/kg °C]	\dot{m}_{asp} :	Flujo másico de aire seco primario	[kg _{aire seco} /s]
C_{vent} :	Consumo del ventilador	[W]	NH ₁ , NH ₂ , NH ₃ :	Niveles de humedad específica en el diseño de experimentos	[g _{agua} /kg _{aire seco}]
C_{Bomba} :	Consumo de la bomba	[W]			

Q_l :	Potencia latente de refrigeración	[W]
Q_s :	Potencia sensible de refrigeración	[W]
REC:	Refrigerador evaporativo cerámico	
TC:	Tubos de calor	
T_1, T_2, \dots, T_5 :	Niveles de temperatura en el diseño de experimentos	[°C]
T_{pe} :	Temperatura seca del aire primario a la entrada del REC	[°C]
T_{ps} :	Temperatura seca del aire primario a la salida del REC	[°C]
T_{lh} :	Temperatura húmeda del aire primario a la entrada del REC	[°C]
T_{3h} :	Temperatura húmeda del aire secundario, o de retorno a la entrada del recuperador TC	[°C]
X_{pe} :	Humedad específica del aire a la entrada del REC	[kg _{agua} /kg _{aire seco}]
X_{ps} :	Humedad específica del aire a la salida del REC	[kg _{agua} /kg _{aire seco}]
Q_t :	Potencia térmica total del REC	[W]

Introducción

El enfriamiento evaporativo es un fenómeno que ocurre en la naturaleza. Cuando el aire y el agua entran en contacto, el agua se evapora dentro del aire circundante, reduciendo su temperatura. Este principio, por su sencillez, se ha venido aplicando en la industria desde hace poco más de cien años, aunque se ha utilizado desde tiempos antiguos. Fue implementado extensivamente por los romanos y por los árabes en sus palacios. La Alhambra de Granada con sus fuentes de agua en los patios e interior de algunos aposentos, es un notable ejemplo de aplicación de este proceso (Velasco y Rey, 2006a).

Los equipos de enfriamiento evaporativo son adecuados para casi todas las aplicaciones en las que se requiere refrigeración: aire acondicionado para edificios, industrias petroquímicas y farmacéuticas, industria alimentaria, industria automovilística, producción de acero, fabricación de componentes electrónicos y semiconductores, centrales eléctricas, plantas de cogeneración, frío industrial y comercial, refrigeración de maquinaria. De acuerdo a Velasco y Rey (2006a), sin estos equipos, muchos de los procesos generados en estas instalaciones no podrían realizarse o lo harían con un rendimiento sensiblemente inferior, de manera que se produciría un mayor consumo de recursos naturales, como la energía, el agua, el petróleo, el gas natural, y supondrían una mayor amenaza para el medio ambiente, fundamentalmente por los gases de efecto invernadero emitidos por las centrales térmicas de producción de energía eléctrica y por la contaminación acústica. Asimismo, dadas las implicaciones de carácter ambiental debido al uso de los sistemas de climatización convencional, la importancia de la tecnología denominada "enfriamiento evaporativo" ha cobrado mayor relevancia en los últimos años, lo cual, ha ocasionado que la utilización racional de los equipos que operan con este principio, sea de gran beneficio para el usuario y para el medio ambiente. Según Velasco y Rey (2006a), es una tecnología segura (si se realiza un mantenimiento mecánico y sanitario adecuado), respetuosa con el medioambiente, y más económica que otras alternativas de climatización.

Considerando lo anterior, varios países han tomado conciencia, y en ese sentido por ejemplo, en mayo de 2010 se llevó a cabo la revisión de la Directiva sobre eficiencia energética de los edificios en la Comunidad Europea (2002/91/CE), con el fin de reforzar los requisitos de eficiencia energética y para aclarar y simplificar algunas de sus disposiciones. Los edificios son responsables del 40% del consumo de energía y 36% de las emisiones de CO₂ de la Unión Europea (UE). La eficiencia energética de los edificios es fundamental para alcanzar los objetivos climáticos de la UE y Energía, entre otros, la reducción de un 20% de las emisiones de gases de efecto invernadero de aquí a 2020 y un ahorro energético del 20% en 2020. La mejora de la eficiencia energética de los edificios es una forma costo-efectiva de luchar contra el cambio climático y mejorar la seguridad energética, al tiempo que la creación de oportunidades de empleo, especialmente en el sector de la construcción. La Directiva sobre la eficiencia energética de los edificios (2002/91/CE) es el principal instrumento legislativo a escala europea para lograr la eficiencia energética en los edificios. En virtud de la presente Directiva, los Estados miembros deben aplicar requisitos mínimos en cuanto a la eficiencia energética de edificios nuevos y existentes, asegurar la certificación de su eficiencia energética y requieren la inspección periódica de calderas y sistemas de aire acondicionado en los edificios (OJEU, 2010).

En España, con el fin de cumplir con las medidas para mejorar la eficiencia energética de los edificios establecida por la Directiva Europea 2002/91/CE, EPBD, se realizó la revisión de su legislación tradicional en materia de los sistemas de climatización para edificios (RITE, Reglamento de Instalaciones Térmicas en Edificios). Esta nueva normativa establece los requisitos mínimos de eficiencia energética en sistemas de climatización que deben tenerse en cuenta. También proporciona una metodología para determinar tanto el consumo de energía y las emisiones de CO₂ en cuestión (MVIV, 2007). Asimismo, España le ha dado continuidad al Plan de Activación del Ahorro y de Eficiencia Energética 2008 – 2011, que supone una ambiciosa iniciativa del Gobierno para desarrollar medidas que intensifiquen el ahorro y eficiencia energética enmarcados en tres ejes estratégicos: movilidad sostenible, edificación sostenible y sostenibilidad energética (MVIV, 2009).

En México la normatividad vigente para determinar las cargas térmicas involucradas en una edificación es la NOM-008-ENER-2001, y sus tres principios son:

- Procurar congruencia con las ya existentes a nivel internacional (principalmente la ASHRAE).
- Asegurar los beneficios económicos y ambientales de las NOM.
- Promover la participación activa de representantes de todos los sectores involucrados.

La normalización para la eficiencia energética en edificios representa un esfuerzo encaminado a mejorar el diseño térmico de edificios, y lograr la comodidad de sus ocupantes con el mínimo consumo de energía.

En México, el mayor consumo de energía en las edificaciones es por concepto de acondicionamiento de aire, durante las épocas de mayor calor, principalmente en las zonas norte y costera del país. La ganancia por radiación solar es la fuente más importante a controlar, lo cual, se logra con un diseño adecuado de la envolvente. En este sentido, la NOM-008-ENER-2001 optimiza el diseño desde el punto de vista del comportamiento térmico de la envolvente, obteniéndose como beneficios entre otros, el ahorro de energía por la disminución de la capacidad de los equipos de enfriamiento convencionales de la misma capacidad y un mejor confort de los ocupantes.

Por lo anterior, el **objetivo** de este trabajo consiste en presentar la descripción y caracterización experimental de un banco de ensayos que consta de un sistema combinado de un refrigerador evaporativo semi-indirecto cerámico (REC) y una batería intercambiadora de energía mediante tubos de calor (TC) para el acondicionamiento de espacios interiores. Con este equipo se pretende contar con una opción eficiente para el enfriamiento de espacios, ya que disminuye el consumo energético, debido a la reducción de la potencia lograda en los equipos generadores de frío de tipo convencional, ya que aprovecha las características higrotérmicas del aire de retorno, antes de ser expulsado al exterior. En la Tabla 1 se muestran las condiciones del aire logradas. El aire primario (de impulsión) es introducido desde el exterior y el aire secundario (retorno) proviene del local climatizado. Para simular las condiciones ambientales del aire primario se utilizó una unidad de tratamiento del aire (UTA). El flujo de aire secundario se toma de un local climatizado o cámara climática (CC), oscilando los parámetros de temperatura y humedad en torno a las condiciones de confort para verano, que según la ASHRAE (1997), son de 25°C y 50% de humedad relativa.

Tabla 1. Condiciones del Aire

Aire	Temperatura (°C)		Humedad (%)	
	Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo
Primario (impulsión)	40 °C	20 °C	85 %	12 %
Primario (impulsión)	30 °C	18 °C	70 %	35 %

Descripción del Equipo Combinado (REC - TC)

El sistema combinado estuvo constituido por un refrigerador evaporativo semi-indirecto (REC) y una batería de tubos de calor (TC).

El equipo de refrigeración evaporativa REC diseñado y fabricado es de tipo semi-indirecto (por la característica del medio sólido poroso) y con una configuración de recuperación de energía para acondicionar un espacio (Cámara Climática), en donde se encuentra una Bomba de Calor como sistema de apoyo que permita conseguir las condiciones de confort térmico en su interior cuando las condiciones lo requieran. Se utilizaron doce ladrillos cerámicos de 4 cm x 19.5 cm x 41 cm, para formar una superficie total de 2.1 m². Cada uno con cuatro huecos de 2.2 cm x 3.6 cm x 41 cm. Todos ellos fueron

sellados en su parte inferior con espuma sintética y silicón. Así también, estuvieron flejados en grupos de cuatro para facilitar el montaje en una charola metálica de 92.5 cm x 36.5 cm, la cual, sirvió de balsa colectora de agua para una posterior recirculación hacia el interior de los mismos. Asimismo, a los ladrillos se les colocaron en la parte superior unas tapas del mismo material que en la base para sellarlos. A dichas tapas se les practicaron ranuras y dos orificios en su interior para ubicar en uno de ellos una manguera de entrada de agua y en el otro una manguera para salida de aire, es decir, las tapas tuvieron la función de operar como un **deareador** para evitar burbujas de aire y asegurar el llenado correcto de agua en todos los huecos de los ladrillos.

Se construyó una carcasa de PVC de 88.5 cm x 32.5 cm x 60.5 cm con dos orificios de diámetro interior de 24 cm para entrada y salida del aire primario, el cual, circuló por el exterior de los ladrillos en tres pasos debido a la disposición de dos placas deflectoras de PVC en el interior. Con este diseño, se canalizó la circulación del aire a través de una configuración plana por el exterior de los ladrillos porosos y húmedos.

El equipo de refrigeración evaporativo semi-indirecto operó con un flujo de aire primario utilizado para la refrigeración, el cual, se mantuvo en contacto directo con las gotas de agua de la superficie porosa de las paredes exteriores de los ladrillos para favorecer la transferencia de calor y masa. Dependiendo de la permeabilidad de la pared del sólido poroso que separa el flujo de aire, se desarrolló una mayor o menor difusión de líquido (agua), existiendo en todos los casos, evaporación hacia la corriente de aire primario desde los poros externos, siendo la humedad específica del aire primario el factor controlante de este proceso de transporte de masa que determina el calor latente. A este proceso se le denominó "*semi-indirecto*".

El agua se hizo circular por el interior de los conductos rectangulares (huecos) de los ladrillos. Se dispuso una charola colectora en la parte inferior del equipo, en donde se acumuló el agua procedente del enfriamiento adiabático y se canalizó a un tanque de almacenamiento de una torre adyacente a manera de condensador evaporativo. Dicha torre resguardó al banco de tubos de calor

La torre del condensador evaporativo cuenta en el nivel superior con un depósito de agua de 32 x 32 x 28 cm hecho de acrílico, y cuya función fue la de distribuir dicho líquido al REC mediante una manguera dispuesta en la parte superior de la carcasa del propio REC, en donde se interconectó con un sistema de mangueras, de modo que el agua ingresó por gravedad al interior de los ladrillos. El agua a la salida fue retenida en la charola colectora ubicada en la base del REC y posteriormente canalizada en un depósito metálico de 100 x 50 x 25 cm ubicado en la parte inferior de la misma torre.

Se construyó una batería de tubos de calor para una potencia máxima de recuperación de 1000 W, a distribuir en 28 tubos de calor, que equivale a una potencia aproximada de 35 W

por cada uno de ellos. Los tubos son de cobre y de 10 mm de diámetro exterior, de 2 mm de espesor de pared. En el tramo que corresponde al evaporador, los tubos son 43.5 cm de longitud y cuentan con aletas continuas de aluminio de 35.7 x 4.5 cm y con 0.08 mm de espesor. El otro tramo que corresponde al condensador, el material de cobre es tubo desnudo de 25 cm de longitud. Se implementó un mallado circular interior al tubo de calor de acero inoxidable. Se utilizó acetona como fluido de trabajo. La distribución de los tubos fue triangular de 2 filas por 28 columnas. Con una configuración alternada a fin de obtener una mayor transferencia de calor y permitiendo tener un banco de batería más compacto y mejorar también la eficiencia de las aletas continuas.

Los 28 tubos de calor estuvieron dispuestos dentro de una envoltura o carcasa en forma de torre, operando como un condensador evaporativo. El material utilizado en la construcción de la torre fue acrílico.

Se denominó carcasa a la envoltura que encierra el sistema de tubos de calor, y que separa la zona por donde circula el aire de impulsión, de la correspondiente al aire de retorno. El diseño de esta carcasa se realizó de tal forma, que con los correspondientes pliegues de las diferentes superficies de que consta su estructura, quedarán separadas las zonas por donde circuló el aire de impulsión y el de retorno, evitando la mezcla de ambas corrientes.

El banco de TC fue dispuesto sobre un soporte inclinado 45° y embocado mediante estructuras en dos conductos rectangulares paralelos, separados para dejar una zona intermedia de 2 cm. aislada con poliuretano expandido, denominada "zona adiabática" de separación del condensador y evaporador en los TC.

La zona de evaporación de los TC (parte aletada), quedó dispuesta en un ducto de 95 x 46 x 37.5 cm para la distribución del aire de impulsión (aire primario). Este ducto fue construido con estructura metálica y con paredes de acrílico transparente. La zona de condensación de los TC quedó dispuesta en un ducto de 139 x 37.5 x 36.5 cm, diseñado como torre con caída de chorro continuo de agua y en contracorriente con el aire de retorno (aire secundario) de una cámara climática CC. Este ducto fue construido de herrería metálica y con paredes laterales de plástico y el frente de acrílico. Ambos ductos estuvieron adyacentes y en contacto directo uno con el otro para mantener separados los fluidos de retorno y de impulsión al recinto o espacio por climatizar y además, su función fue resguardar al banco de TC.

Con objeto de optimizar la eficiencia energética, el refrigerador evaporativo semi-indirecto se instaló de modo que recuperara mediante los tubos de calor, parte de la entalpía del aire de retorno (aire secundario en condiciones de confort térmico), por lo que operó en un ciclo de recuperación de calor. En las Figuras 1a y 1b se representa la configuración del esquema del equipo de ladrillos cerámicos. El sistema

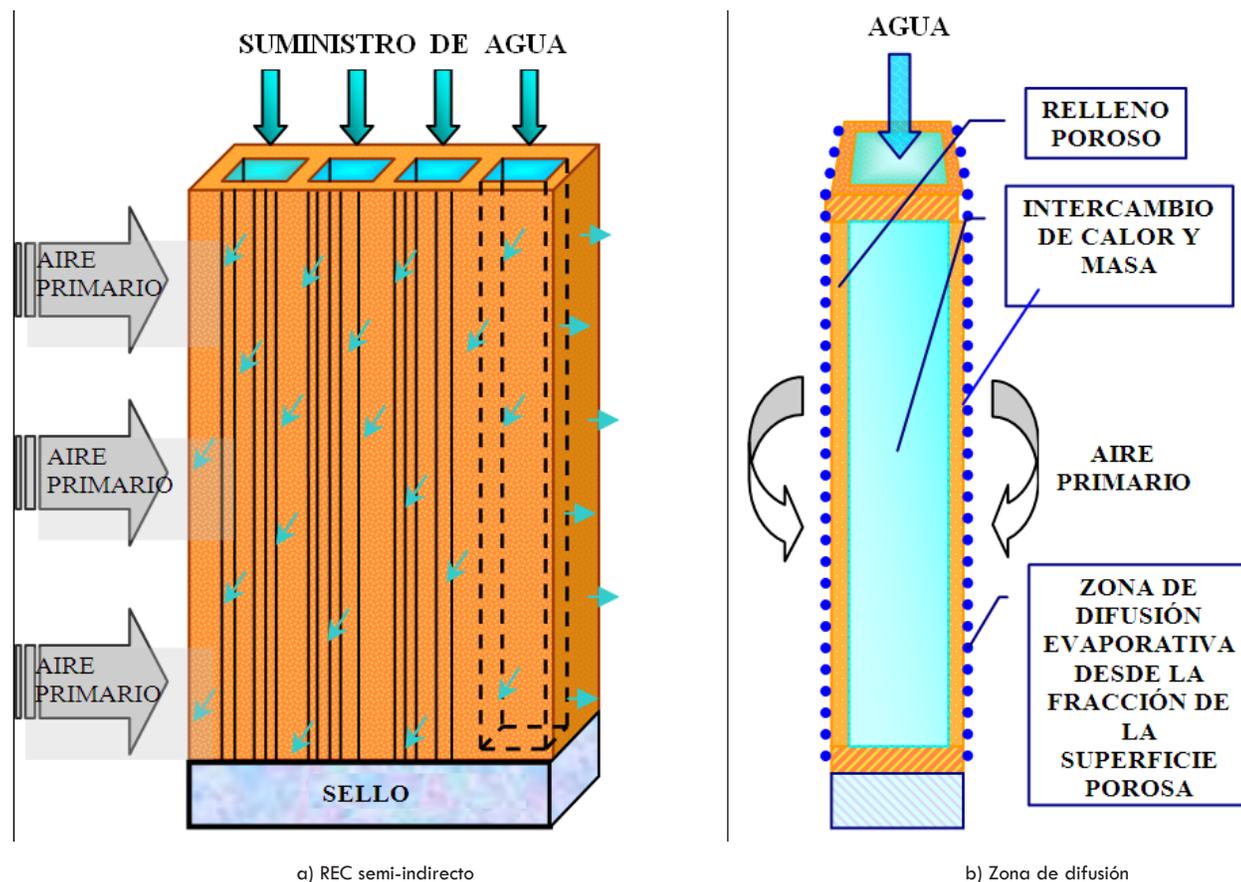


Figura 1. Esquema del equipo de ladrillos cerámicos: a) actuando como refrigerador evaporativo semi-indirecto; b) Zona de difusión y de intercambio de calor y masa (Flores, 2008).

recuperativo REC-TC se desarrolló en el Laboratorio de Calor y Frío Industrial, de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales en Valladolid, España.

El conjunto (Banco de Ensayo + Cámara Climática) ocupó una superficie aproximada de 20 m², siendo la altura de 3 m. En la Figura 2 se muestra la instalación del REC-TC en modo recuperación. El diseño de un equipo de aire acondicionado de material cerámico poroso como enfriador evaporativo, tuvo en cuenta criterios económicos y técnicos que lo hicieran posible y efectivo; entendiéndose por posible aquel diseño que se pueda materializar en una instalación de climatización; y por efectivo, que recupere la máxima energía disponible del aire procedente del local climatizado. El precio de la instalación depende fundamentalmente de los materiales y de su diseño. Económicamente, el refrigerador evaporativo debe tener un precio asequible. La instalación no debe producir grandes pérdidas de carga, ya que se incrementaría la potencia de los ventiladores, y se disminuiría la eficiencia del sistema (Flores, 2008).

El refrigerador evaporativo semi-indirecto funcionó con los siguientes mecanismos:

- Transferencia de calor y masa en la corriente de flujo de aire primario.
- Difusión de masa debido a la porosidad y transporte de calor a través de la pared sólida.

- Evaporación o condensación e intercambio de calor y masa en el flujo de aire primario.

Dado que la humidificación se realiza desde la superficie porosa, en este tipo de material no fue probable la aparición de aerosoles que dispersaran la legionella. Por otro lado, un diámetro de poro suficientemente pequeño puede actuar como filtro, evitando el paso de las bacterias desde el agua hasta el aire de impulsión. Por lo tanto, este equipo tuvo en cuenta algunos avances tecnológicos recientes en los nuevos diseños de equipos, los cuales, se basan en eliminar la formación de aerosoles y en evitar el arrastre de gotas, según Martín y Montero (2008). Todos estos fenómenos se presentan conjuntamente en el REC. Por lo tanto, de acuerdo a Herrero (2007), existe una transferencia combinada de calor y masa, incrementando el efecto refrigerativo del aire por acondicionar y se consigue una optimización en el proceso térmico.

En la Figuras 1a y 1b mostradas anteriormente del dispositivo construido, quedó establecido cual es la corriente de aire primario o exterior enfriado evaporativamente en la zona de difusión.

De lo anteriormente expuesto, el equipo diseñado consideró:

- Adecuada transferencia de calor.
- Adecuada transferencia de masa.
- Intensificación de la transferencia de calor por unidad de



a)



b)

Figura 2. a) Detalle de la instalación completa REC-TC en modo recuperativo. b) Imagen del Refrigerador Evaporativo Cerámico semi-indirecto REC.

volumen como consecuencia de la porosidad del medio sólido.

- Bajas caídas de presión.
- Bajo costo de fabricación. Construcción compacta con un mínimo de material y espacio.
- Una buena integración en un sistema de climatización.
- Una combinación simultánea de recuperación de calor mediante “tubos de calor” y refrigeración evaporativa semi-indirecta.
- Bajo consumo energético (bomba y ventiladores).
- Un sistema que permitiera compatibilizar un reducido consumo energético con una elevada calidad del ambiente interior (IEQ).

Implatación del Equipo de Aire Acondicionado en un Banco de Ensayos Experimental

El desarrollo de esta tarea consistió en ensamblar mediante conductos circulares flexibles a la unidad de tratamiento de aire (UTA), al refrigerador evaporativo cerámico (REC) y a la torre de enfriamiento que resguardó a la batería de tubos de calor (TC). Todos estos elementos con su instrumentación correspondiente conformaron el banco de ensayos experimental de laboratorio. El banco de ensayos donde se integró el equipo de aire acondicionado tipo REC se acopló mediante conductos a una cámara climática (CC) de 4 m x 4 m x 3 m, con techo de altura variable, equipada con 4 difusores de tipo rotacional, los cuales, permitieron lograr una buena difusión del aire primario. En dicha cámara, se midieron las condiciones higrotérmicas y de confort proporcionadas por el REC para el acondicionamiento del aire interior.

El sistema quedó dispuesto de manera que se obtuviera una configuración de flujo que permitiera operar en un ciclo de aire recuperativo de energía, aprovechando las características higrotérmicas del aire de retorno, que ya se ha demostrado en un proyecto de un equipo de aire acondicionado con tubos cerámicos de 2m² de superficie total, desarrollado anteriormente en el Laboratorio de Calor y Frío Industrial de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales en la Universidad de Valladolid (Herrero, Rey y Velasco, 2007) . Se puede mejorar sustancialmente la eficiencia de los equipos de climatización de aire mediante la simulación de otra configuración de operación: modo regenerativo, también denominado “todo aire exterior”.

La disposición en el banco de ensayos se complementó con equipos auxiliares tales como bombas, ventiladores, válvulas, reguladores de flujo, medidores de flujo (placas de orificio), una unidad de tratamiento de aire UTA para simulación de condiciones del aire exterior y una bomba de calor BC como equipo de respaldo. La Figura 3 muestra el diagrama esquemático de la instalación en modo “recuperación”.

La medición y monitorización de las variables físicas que intervienen en un proceso es fundamental para caracterizar adecuadamente nuestro sistema REC–TC. En esta etapa, se llevó a cabo la instalación de la instrumentación que nos permitió medir y almacenar las magnitudes físicas que intervinieron durante la realización de las experiencias. Asimismo, permitieron determinar las interacciones y relaciones entre las variables estudiadas.

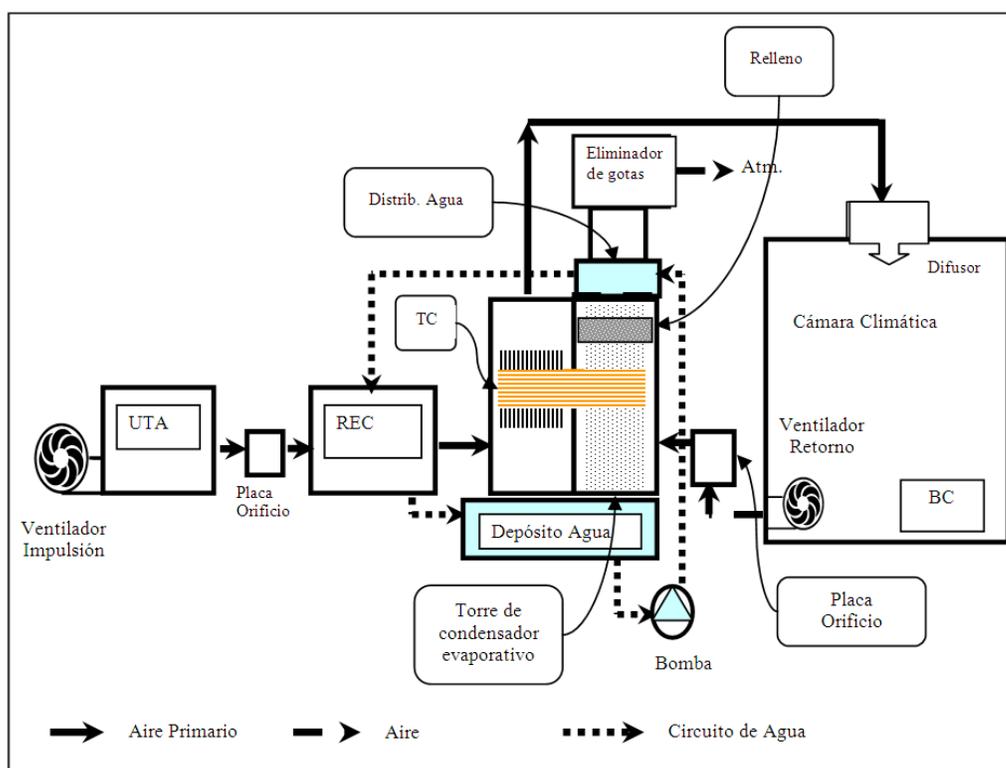


Figura 3. Esquema de la instalación completa en configuración a modo recuperación (Flores, 2008).

Para la medida de la temperatura en todos los puntos de la instalación, se utilizaron sensores de resistencia de platino "Pt 100". En algunos casos, como por ejemplo, en los instrumentos situados en el conducto de impulsión (aire primario), en un mismo tubo de protección se incorporaron dos sensores calibrados: temperatura y humedad relativa. Estos últimos son sensores con solución de cloruro de litio (CLi).

Las vainas de protección de los sensores utilizados en donde el medio es únicamente aire, están perforadas y con el hilo de platino en contacto directo con el fluido, favoreciendo la transferencia térmica. En el depósito de agua y en la torre donde se formó agua en forma de niebla, se dispusieron vainas cerradas para la protección de los sensores.

Las especificaciones de los sensores de temperatura Pt100, son: Marca TECHNTERM. Modelo: serie 60. Rango: de -5°C a 250°C . Precisión: 0.1°C . Salida: $4 \div 20$ mA. Material del alojamiento: vaina o tubo de acero inoxidable para su protección.

Las especificaciones de los sensores de medida de humedad relativa son: sensor: solución CLi. Modelo: transmisor de humedad HIH-3610. Marca: Honeywell. Rango: 0 a 100% HR. Precisión: ± 2 % RH (0 – 100 % HR). Salida: $V_{\text{out}} = 5$ (0.0062 (Sensor RH) + 0.16), a 25°C . Material del alojamiento: molde color gris de aluminio, tubo o vaina de acero inoxidable.

El caudal de aire primario (aire suministrado al espacio por climatizar) y secundario (aire de salida o retorno del espacio climatizado) introducido en el sistema, se midió mediante unas placas de orificio concéntricas de bordes rectos fabricadas con PVC de $D_{\text{ext}} = 24$ cm, $D_{\text{int}} = 10$ cm y $e = 6$ mm, las cuales, fueron previamente calibradas con una tobera de flujo (Tecner Ingeniería) de acero inoxidable modelo TG-50, cuyo rango es de 3,200 l/min a 13,000 l/h, con salidas para manómetro diferencial.

Las diferencias de presión realizadas tanto en la tobera TG-50 como en las placas de orificio, se realizaron con un instrumento Testo 452 con conexión a una sonda que trabaja con un sensor de presión diferencial, utilizando el principio del extensiómetro de resistencia eléctrica (DMS), con escala de medición de 0 a 100 hPa.

Todos los cables de los sensores se canalizaron en una estructura y de ahí se conectaron a un sistema de adquisición de datos Agilent 34970A. Asimismo, mediante una interface se conectó el sistema a una computadora portátil y mediante un software del mismo sistema de adquisición, se monitorearon todas las variables en tiempo real, tal como se muestra en la Figura 4.

La variación de la temperatura se efectuó mediante un controlador ubicado en el panel de la Unidad de Tratamiento de Aire UTA. El caudal de aire primario se modificó mediante un variador de frecuencia TELEMECANIC, el cual, permitió accionar el ventilador de la UTA. El caudal de aire secundario se controló mediante una compuerta de apertura variable dispuesta en la succión del ventilador de la cámara climática, ya que la operación del propio ventilador es a velocidad constante.



Figura 4. Sistema de adquisición de datos Agilent, interface y monitoreo de variables.

Pruebas Experimentales

Con el fin de describir el comportamiento de la instalación, se realizó un estudio para caracterizar el sistema combinado REC-TC siguiendo la metodología de "diseño de experimentos" (Cochran, 1990), utilizando como factores de control a aquellas variables que afectarían el comportamiento de nuestro equipo, y que fueron programadas en el propio sistema descrito anteriormente. Por lo tanto, se desarrolló el diseño de experimentos, en el cual, se presentó la combinación de niveles de acuerdo a la Tabla 2.

Tabla 2. Diseño de experimentos para el modo recuperación

Temperatura Exterior ($^{\circ}\text{C}$)	Caudal (m^3/h)	Humedad Específica ($\text{g}_{\text{agua}}/\text{kg}_{\text{aire seco}}$)
T1: 20		
T2: 25	C1: 230	NH1: 09.35
T3: 30	C2: 380	NH2: 13.34
T4: 35	C3: 535	NH3: 15.63
T5: 40		

Puede observarse de la Tabla 2 que se contemplaron como factores de diseño, la temperatura del aire exterior, el caudal y el nivel de humedad específica, caracterizando así el comportamiento en condiciones de verano, con diferentes niveles de humedad específica.

Las pruebas desarrolladas en la instalación se llevaron a cabo en **modo recuperación energética** (descrito anteriormente), suministrando aire seco (condiciones de verano) en rangos aproximados de caudal primario (impulsión) de 230, 380 y 535 m^3/h y humedades relativas del 12 al 85% en la entrada del REC.

Cada caudal fue ensayado con temperaturas correspondientes de 20, 25, 30, 35 y 40°C , de manera que se obtuvieron en la descarga del REC temperaturas entre 18 y 30°C con humedades relativas de 35 a 70%. En virtud de que el ventilador del aire secundario o de retorno opera a velocidad constante, las pruebas se desarrollaron con la compuerta de succión de este

ventilador, dispuesta de tal manera que permitiera manejar un caudal igual al del ventilador del aire de impulsión, ya que este último es de velocidad variable.

El número de ensayos realizados para poder mantener el producto del número de niveles de todos los factores fue:

$$5 \text{ (temperatura)} \times 3 \text{ (caudal)} \times 3 \text{ (humedad específica)} = 45 \text{ ensayos}$$

Por otro lado, se realizaron ensayos similares en modo **regeneración** (todo aire exterior), cuyo objetivo principal es evaluar el impacto energético del aire exterior, únicamente en la batería de los TC y no en el REC como en el caso anterior (modo recuperación). Se utilizó una válvula de compuerta, regulada de tal manera que se obtuvieran los caudales manejados en las placas de orificio como en el modo recuperación. Aquí no se genera aire secundario proveniente de la cámara climática. El único fluido que circula es el aire primario que proviene de la UTA, y el cuál, mediante la válvula de compuerta se divide una parte hacia el REC y la otra parte se dirige hacia la torre del condensador evaporativo.

Características analizadas

Los resultados experimentales se trataron de manera que se pudieran calcular las características necesarias para poder explicar el comportamiento de los sistemas de recuperación estudiados en el proyecto. La descripción de las características analizadas se presenta a continuación:

Flujo de calor recuperado sensible o potencia sensible

Se define a esta característica como la variación de energía sensible (variación de temperatura) que sufre la corriente de aire exterior a su paso por el equipo (ecuación 1).

$$Q_s = \dot{m}_{ap} (C_{p_{pe}} T_{pe} - C_{p_{ps}} T_{ps}) \quad (1)$$

Donde:

- Q_s : Potencia sensible de refrigeración (W)
- \dot{m}_{ap} : Flujo másico de aire primario. (kg/s)
- $C_{p_{pe}}$ y $C_{p_{ps}}$: Calores específicos a presión constante del aire primario a la entrada y a la salida respectivamente. (J/kg °C)
- T_{pe} , T_{ps} : Temperatura del aire primario a la entrada y a la salida (°C).

Flujo de calor recuperado latente o potencia latente

Uno de los parámetros que caracterizan el calor intercambiado entre las dos corrientes en el equipo es la potencia latente de refrigeración, definida por la ecuación 2:

$$Q_l = \dot{m}_{asp} (X_{pe} h_{v_{pe}} - X_{ps} h_{v_{ps}}) \quad (2)$$

Donde:

- Q_l : Potencia latente de refrigeración (W).
- \dot{m}_{asp} : Flujo másico de aire seco primario. (kgas/s)
- X_{pe} y X_{ps} : Humedad específica del aire a la entrada y a la salida. (kg_{agua}/kg_{as})

$h_{v_{pe}}$ y $h_{v_{ps}}$: Entalpía del vapor de agua a la entrada y a la salida. (J/kg_{agua})

Flujo de calor total recuperado o potencia total

Es el resultado de la suma de las potencias sensibles y latentes. Proporciona la transferencia de calor y masa global involucrados en el proceso (ecuación 3).

$$Q_t = Q_s + Q_l \quad (3)$$

COP total (Coefficient of Performance)

Uno de los parámetros que caracteriza el calor intercambiado entre dos corrientes en un intercambiador de calor es el coeficiente de operación. El COP (Coefficient of Performance) según ASHRAE, se define como el cociente entre la energía aprovechada y la consumida, como parámetro de rentabilidad de la instalación se ha definido el COP en base a las energías intercambiadas y se analizó como característica del diseño. Para el REC, la determinación de la característica mencionada es mediante la siguiente expresión:

$$COP_t = \frac{Q_t}{C_{vent} + C_{bomba}} \quad (4)$$

Donde C_{vent} y C_{Bomba} son los consumos del ventilador y la bomba respectivamente. Para el REC, en esta característica se suman los resultados de las prestaciones máximas obtenidas de forma sensible y latente, mediante el empleo del calor total. Su análisis permite contrastar la importancia de los Watts consumidos por la bomba y el ventilador a lo largo de la fase experimental y facilita la búsqueda de los valores óptimos de consumo durante la operación.

En el caso de la batería de TC, se aplica la misma expresión anterior, ya que se requiere de consumo de potencia del ventilador para suministro de caudal de aire en el evaporador y de consumo de potencia eléctrica para el bombeo de agua requerido en el condensador.

Eficiencia de saturación del REC

Hay dos índices que definen el comportamiento de un refrigerador evaporativo: la eficiencia de saturación y la efectividad. Dado que nuestro refrigerador es semi-indirecto, su comportamiento no puede enclavarse puramente como indirecto ni como directo, estos índices serán esclarecedores para el análisis del mismo.

Se ha de mencionar que, dado que estos parámetros son propios de los equipos refrigeradores, sólo en condiciones estivales tiene sentido su evaluación. La eficiencia de saturación es un índice utilizado para evaluar los resultados de un refrigerador evaporativo directo. Considerando equivalentes los flujos másicos de aire primario y secundario, según Wang (2000):

$$\varepsilon_{sat} = \frac{(T_{pe} - T_{ps})}{(T_{pe} - T_{1h})} \quad (5)$$

Donde:

T_{pe} : Temperatura seca del aire primario a la entrada del REC (°C).

T_{ps} : Temperatura seca del aire primario a la entrada del REC (°C).

T_{1h} : Temperatura húmeda del aire primario a la entrada del REC (°C).

Eficacia del REC - TC

La bondad de un intercambiador evaporativo indirecto se determina a partir del valor de la efectividad. Considerando equivalentes los flujos másicos de aire primario y secundario, según Wang (2000):

$$\varepsilon_{in} = \frac{(T_{pe} - T_{ps})}{(T_{pe} - T_{3h})} \quad (6)$$

Donde:

- T_{pe} : temperatura seca del aire primario a la entrada del REC (°C).
- T_{ps} : temperatura seca del aire primario a la salida del REC (°C).
- T_{3h} : temperatura húmeda del aire secundario, o de retorno a la entrada del recuperador TC (°C).

Otra característica analizada fue la conductancia térmica.

Resultados Obtenidos y Discusión

Con los resultados experimentales de los diseños de experimentos planteados, se determinaron las características presentadas anteriormente, cuyos análisis determinaron el comportamiento del equipo REC - TC.

El análisis de las diferentes características se realizó en dos etapas, presentando primero los valores medios de los niveles de cada factor y de sus interacciones, que establecieron el comportamiento de la característica con el factor, y posteriormente se certificarán las conclusiones con la contribución de los factores e interacciones con el análisis de varianza ANOVA.

El análisis de varianza es un procedimiento basado en el método de mínimos cuadrados. Así, la varianza debida al error, es el mínimo valor de la suma de cuadrados en torno a un valor de referencia, dividido por los grados de libertad del error. Esa suma de cuadrados es mínima cuando el valor de referencia coincide con la media.

El presente estudio consideró tres factores controlados, posteriormente se implementó el análisis de varianza (ANOVA) de 3 vías. Las contribuciones planteadas fueron las correspondientes a los 3 factores, y sus 3 interacciones dobles, y los resultados proporcionados certifican la validez de los obtenidos con los valores medios de los factores y sus interacciones.

La contribución a la variabilidad de las medidas se analizó calculando la suma de cuadrados asociada a cada uno de los factores y sus interacciones.

Los índices de contribución a la suma de cuadrados totales (SS_T), son los procedentes de los factores, las interacciones y el error:

$$SS_{Total} = SS_A + SS_B + SS_C + SS_{AxB} + SS_{AxC} + SS_{BxC} + SS_{AxBxC} + SS_{Error} \quad (7)$$

Cada una de esas contribuciones se evalúa por separado, y el valor obtenido del cálculo de su suma de cuadrados es proporcional a la variación que se introduce sobre la media de los cambios de nivel que experimentan los factores. En las ecuaciones siguientes se muestra como se realizan los cálculos de las correspondientes sumas de cuadrados:

- Suma de cuadrados del total de las medidas:

$$SS_{Total} = \sum_{i=1}^N Y_i^2 - \frac{T^2}{N} \quad (8)$$

- Suma de cuadrados de un factor:

$$SS_A = \sum_{j=1}^{k_A} \frac{A_j^2}{N_{A_j}} - \frac{T^2}{N} \quad (9)$$

- Suma de cuadrados de una interacción doble:

$$SS_{AxB} = \sum_{j=1}^{k_{AxB}} \frac{(AxB)_j^2}{N_{(AxB)_j}} - \frac{T^2}{N} - (SS_A + SS_B) \quad (10)$$

- Suma de cuadrados de una interacción triple:

$$SS_{AxBxC} = \sum_{j=1}^{k_{AxBxC}} \frac{(AxBxC)_j^2}{N_{(AxBxC)_j}} - \frac{T^2}{N} - (SS_A + SS_B + SS_C + SS_{(AxB)} + SS_{(AxC)} + SS_{(BxC)}) \quad (11)$$

Donde:

- Y_i : Medida i-ésima.
- SS_x : Suma de cuadrados correspondiente a X (factor, interacción o error).
- N: Número total de observaciones.
- T: Suma de todas las medidas Y_i .
- \bar{Y} : Media de las medidas Y_i .
- A_i : Suma de todas las observaciones para el nivel i del factor A.
- $(AxB)_j$: Suma de todos los valores de la interacción AxB, en su cruce j.
- N_{A_i} : Número de observaciones bajo el nivel i del factor A.
- $N_{(AxB)_j}$: Número de valores de el cruce j, de la interacción AxB.
- k_A : Número de niveles del factor A.
- k_{AxB} : Número de cruces existentes en la interacción del factor A con el factor B.

La suma de cuadrados del error se obtiene por diferencia entre la SS_{Total} y el resto de las contribuciones de los factores.

Cuando se hace el estudio mediante un análisis de varianza, el comportamiento de los niveles de un factor fijo, no se persigue como única finalidad del análisis, saber si los distintos

niveles del factor son significativamente distintos entre sí, sino que interesa conocer, una vez contrastado que las diferencias son significativas, que niveles producen un efecto superior a los otros.

Para evitar aumentar la complejidad del tratamiento de los resultados, en el presente trabajo no se presentan las pruebas de significación asociadas al tratamiento estadístico de los datos, puesto que el interés del diseño de experimentos es determinar cómo afectan los factores analizados sobre las diferentes características, y no tanto los valores numéricos obtenidos para esas características en los diferentes niveles.

Para evitar que el presente trabajo sea demasiado extenso, solo se presentan los resultados en *modo recuperación* del intercambio de calor latente de enfriamiento, COP latente, eficiencia de saturación y eficacia, respectivamente.

Características: Calor latente; COP latente; Eficiencia de saturación y Eficacia del REC-TC

Se presenta el diseño de experimentos para analizar el factor de nivel de humedad, el factor temperatura bajo condiciones estivales y el factor de caudal de aire. A continuación se presentan en las gráficas de las Figuras 5, a 8 y en las Tablas 3, 5, 7 y 9 los valores medios obtenidos para cada nivel de los factores analizados. Además, en dichas tablas se ha incluido el error de medición, establecido en el rango de valores proporcionados por el laboratorio de calibración, ya que el método seguido para hacer el ensayos rechaza los valores no estacionarios, teniendo en cuenta que los resultados son estacionarios cuando el rango de variación de la variable es menor que la precisión del equipo de medición. El análisis de errores se realizó con el método propuesto en EA-4/02 con un factor de cobertura de 95%, utilizando la expresión de la ecuación (7):

$$u_T = \sqrt{u_{cal}^2 + u_{res}^2 + u_{der}^2 + u_{sta}^2} \quad (12)$$

donde u_T es la incertidumbre de la medición; u_{cal} es la incertidumbre de la calibración; u_{res} es la incertidumbre de la resolución de la sonda; u_{der} es la incertidumbre de la desviación (medida entre dos calibraciones) y u_{sta} es la incertidumbre de la estabilidad.

Los ensayos se llevaron a cabo verificando que los resultados de la temperatura y de humedad se mantuvieran estables en un período de tiempo de 2 h. Los valores de incertidumbre para la temperatura y la humedad fueron: u_T para la temperatura ± 0.1 °C y para la humedad $\pm 2\%$; u_{cal} para la temperatura de 0.1/2 y para la humedad 1/2; u_{res} para la temperatura 0.01/2(3)^{1/3} y para la humedad 0.1/2(3)^{1/3}; u_{der} para la temperatura es 0.1/(3)^{1/3} y para la humedad 2/(3)^{1/3}, y u_{sta} para la temperatura está entre 0.04 y 0.06 y para la humedad está entre 1.1 y 1.5. Asimismo, la incertidumbre de la medición para el sensor de presión es $u_T = \pm 0.11$ mm. c.a

Las Tablas 4, 6, 8 y 10 de los análisis de varianza "ANOVA" correspondientes, incluyen como error las contribuciones aso-

ciadas a las interacciones de orden superior (en este caso la interacción triple). Se consideró el factor A como el de temperatura, el factor B como el de caudal y el factor C como el de nivel de humedad, respectivamente.

Característica: "calor latente de enfriamiento"

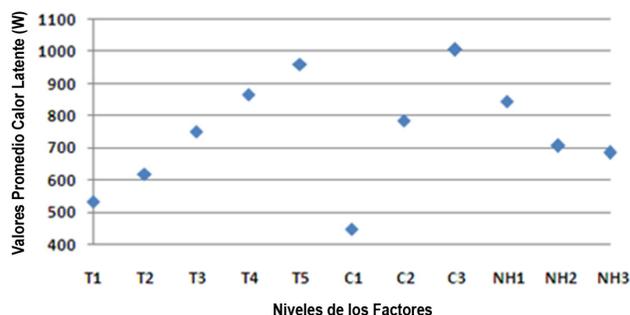


Figura 5. Gráfica de resultados para la característica "calor latente" para los diferentes niveles de los factores considerados.

Tabla 3. Característica Calor Latente del REC

Característica Calor Latente (W)			
Factores	Valores	Factores	Valores
T ₁	532.90	C ₁	447.32
T ₂	617.58	C ₂	784.59
T ₃	752.43	C ₃	1006.26
T ₄	866.24	NH ₁	846.46
T ₅	961.03	NH ₂	706.85
		NH ₃	684.86

Tabla 4. ANOVA para el calor latente de refrigeración del REC

Factor	SS	%Contrib.
Total	4223819.34	100.00
A	1103428.27	26.12
B	2376469.38	56.26
C	230462.43	5.46
AxB	82129.99	1.94
BxC	202131.19	4.79
AxC	73906.40	1.75
Error	155291.68	3.68

Dados los resultados obtenidos en la Tabla 3, se obtuvo el comportamiento del REC, respecto a la característica de calor latente con base a los siguientes factores:

- **Temperatura.** Al aumentar la temperatura del aire exterior, la energía latente aumenta. Este factor el resultado de la característica, pues aumentando la temperatura también aumenta la capacidad de evaporación del aire.
- **Caudal.** La cantidad de energía latente es directamente proporcional al caudal, ya que aumenta el coeficiente de transferencia másico. Este factor afecta de manera significativa al resultado de la característica. El calor latente intercambiado aumenta al incrementar el coeficiente

convectivo, pero el calor latente específico disminuye al reducirse el tiempo de residencia del aire en el interior del dispositivo experimentado.

- **Humedad específica.** Este factor no afecta de manera apreciable la característica. No obstante, dado que el nivel de humedad en el aire depende de aporte de vapor y del caudal de aire, el análisis de cómo afecta el nivel de humedad se realizará mejor en la interacción caudal x nivel de humedad.

Adicionalmente al análisis de resultados, se presentan los índices de contribución que determinan la característica "calor latente". Dichos índices fueron obtenidos por el análisis de la varianza, que certifican la validez de las conclusiones derivadas del anterior análisis. Así, de los datos de la Tabla 4, se observa una contribución de la temperatura, pero la más significativa es para el caudal y es prácticamente nula para la humedad específica.

Característica: "COP latente"

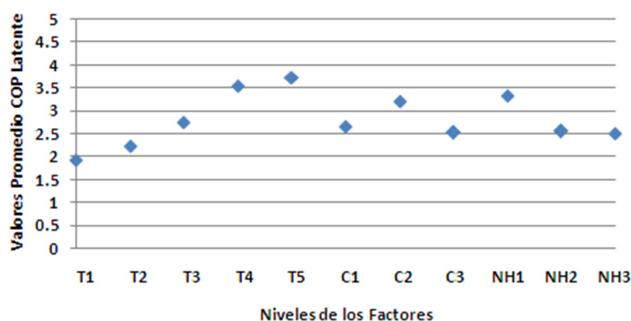


Figura 6. Gráfica de resultados para la característica "coeficiente de operación latente" para los diferentes niveles de los factores considerados.

Tabla 5. Característica COP Latente del REC

Característica COP Latente			
Factores	Valores	Factores	Valores
T ₁	1.92	C ₁	2.66
T ₂	2.24	C ₂	3.22
T ₃	2.76	C ₃	2.52
T ₄	3.55	NH ₁	3.34
T ₅	3.73	NH ₂	2.55
		NH ₃	2.51

Tabla 6. ANOVA para el COP latente del REC

Factor	SS	% Contrib.
Total	49.59	100.00
A	20.45	41.24
B	4.20	8.46
C	6.69	13.50
AxB	4.51	9.09
BxC	6.52	13.15
AxC	2.26	4.55
Error	4.96	10.00

De los resultados obtenidos en la Tabla 5, se obtuvo el comportamiento del REC, respecto a la característica de COP latente con base a los factores: temperatura, caudal y humedad específica.

El análisis de los factores permite obtener las mismas conclusiones que en el de la característica calor latente recuperado visto anteriormente. Hay que considerar la contribución de los consumos de energía de la bomba y el ventilador. Por este motivo, el COP más elevado se obtiene en el factor caudal, para el nivel intermedio donde es máximo el calor latente intercambiado respecto al consumo del ventilador.

Por otro lado, también se presentan los índices de contribución que determinan la característica "COP latente". Dichos índices fueron obtenidos por el análisis de la varianza, que certifican la validez de las conclusiones derivadas del anterior análisis. Así, de los datos de la Tabla 6, se observa que la contribución preponderante es la temperatura, seguida de la humedad específica y menos significativa para el caudal e interacciones.

Característica: "eficiencia de saturación"

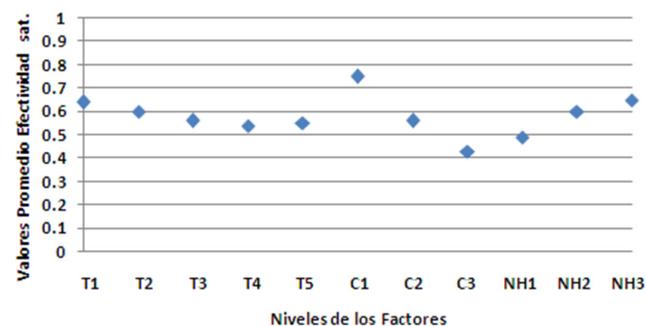


Figura 7. Gráfica de resultados para la característica "eficiencia de saturación" para los diferentes niveles de los factores considerados.

Tabla 7. Característica eficiencia de saturación del REC

Característica Eficiencia de Saturación			
Factores	Valores	Factores	Valores
T ₁	0.64	C ₁	0.75
T ₂	0.60	C ₂	0.56
T ₃	0.56	C ₃	0.43
T ₄	0.54	NH ₁	0.49
T ₅	0.55	NH ₂	0.60
		NH ₃	0.65

Tabla 8. ANOVA de eficiencia de saturación del REC

Factor	SS	% Contrib.
Total	1.28	100.00
A	0.07	5.13
B	0.79	62.03
C	0.19	14.68
AxB	0.02	1.40
BxC	0.08	6.43
AxC	0.06	4.60
Error	0.07	5.73

Similarmente a lo anterior, con los resultados obtenidos en la Tabla 7, se obtuvo el comportamiento del REC, respecto a la característica eficiencia de saturación con base a los factores:

- **Temperatura.** Afecta muy poco este factor sobre la característica. La tendencia que aparece en la gráfica es que al aumentar la temperatura, se reduce ligeramente la efectividad de saturación, pues se precisaría aumentar más la cantidad de agua evaporada para conseguir la saturación.
- **Caudal.** Al disminuir el caudal de aire, se incrementa la eficiencia de saturación del REC. Este factor es el que más contribuye en el efecto de la característica. Este comportamiento es debido a que cuanto menor es el caudal, mayor es el tiempo de permanencia, lo cual, permite que el aire que circula por el dispositivo se sature más.
- **Humedad específica.** Al aumentar la humedad específica, la eficiencia de saturación se incrementa proporcionalmente. Este factor tiene un efecto significativo en el resultado de la característica. Esto es debido que al aumentar la temperatura, también aumenta la temperatura de bulbo húmedo del aire, por lo que el denominador de la Ecuación 6 (eficacia) se reduce, provocando que, incluso para saltos térmicos menores en la temperatura del aire primario, al reducir el valor del denominador, la eficiencia de saturación aumenta.

Por otro lado, también se presentan los índices de contribución que determinan la característica "eficiencia de saturación del REC". Dichos índices fueron obtenidos por el análisis de la varianza, que certifican la validez de las conclusiones derivadas del anterior análisis. Así, de los datos de la Tabla 8, se observa una contribución preponderante del caudal y humedad específica, y menos significativa para la temperatura. Las interacciones son significativas en donde contribuyen conjuntamente el caudal y la humedad específica.

Característica: "eficacia del REC-TC"

Dados los resultados obtenidos en la Tabla 9, se obtuvo el comportamiento del REC, respecto a la característica eficacia con base a los factores:

- **Temperatura.** Cuando se reduce la temperatura del aire primario, se reduce la diferencia entre esa temperatura y la de bulbo húmedo de la corriente de retorno, ocasionando que el denominador de la expresión utilizada para el cálculo de la eficacia sea menor. Este factor es el de mayor contribución sobre la característica estudiada.
- **Caudal.** Al disminuir el caudal de aire exterior suministrado se incrementa significativamente la eficacia. Este factor tiene un efecto bajo sobre el resultado de la característica. Este comportamiento se debe al efecto ocasionado por el tiempo de permanencia explicado ya en apartados anteriores.
- **Humedad específica.** Este factor tiene poco efecto en el resultado de la característica, se aprecia que al aumentar la humedad relativa del aire de impulsión, disminuye la eficacia térmica pues el grado de enfriamiento evaporativo en el aire de impulsión disminuye, manteniendo constante el máximo salto térmico definido en el numerador de la expresión 6.

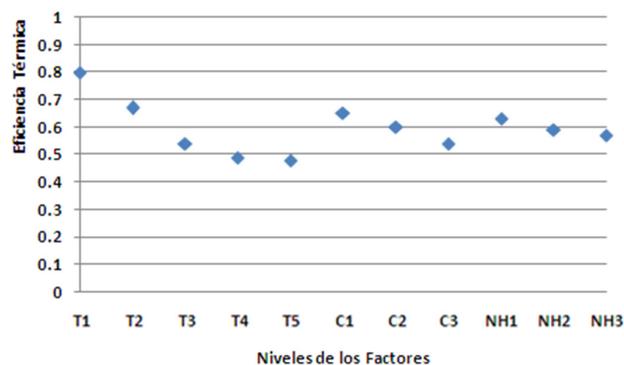


Figura 8. Gráfica de resultados para la característica "eficacia" (eficiencia térmica) del REC-TC para los diferentes niveles de los factores considerados.

Tabla 9. Característica eficacia del REC-TC

Eficacia de Saturación			
Factores	Valores	Factores	Valores
T ₁	0.80	C ₁	0.65
T ₂	0.67	C ₂	0.60
T ₃	0.54	C ₃	0.54
T ₄	0.49	NH ₁	0.63
T ₅	0.48	NH ₂	0.59
		NH ₃	0.57

Tabla 10. ANOVA de la eficacia del REC-TC

Factor	SS	% Contrib.
Total	1.06	100.00
A	0.67	63.35
B	0.09	8.73
C	0.02	2.28
AxB	0.09	8.47
BxC	0.05	4.35
AxC	0.06	5.84
Error	0.07	6.99

También se presentan los índices de contribución que determinan la característica "eficacia del REC-TC". Dichos índices fueron obtenidos por el análisis de la varianza, que certifican la validez de las conclusiones derivadas del anterior análisis. Así, de los datos de la Tabla 10. Se observa que la contribución preponderante es la del factor temperatura y es poco significativa para el resto de los factores e interacciones.

Por otro lado, según Wang (2000) uno de los parámetros representativos que ha de tenerse en cuenta en los sistemas evaporativos directos es la eficiencia de saturación, cuyo rango típico oscila entre el 0.75 y 0.95. Para los sistemas indirectos se considera la efectividad, cuyo rango típico oscila entre el 0.6 y el 0.8. En este sentido y de acuerdo a la Tabla 7, se presenta un valor máximo de 0.75 y de acuerdo a la Tabla 9, se tienen valores dentro de un rango de 48% al 80% de dicha eficacia.

Resultados Adicionales

Posteriormente a la caracterización del sistema, se realizó una simulación de la evaluación energética e impacto ambiental del REC-TC aplicada a una habitación (37 m²) de una vivienda tipo para 5 personas, ubicada en diferentes zonas climáticas espa-

ñolas, con el fin de obtener resultados acerca de sus prestaciones con respecto a un equipo de aire acondicionado convencional tipo "Split" de potencia equivalente a la del REC evaluado. La simulación se efectuó mediante un software de cálculo de cargas térmicas denominado "dpClima", el cual, considera las diferentes climatologías, materiales de la envolvente, distribución de las cargas internas, ventilación mínima y el tiempo de consumo energético.

Se determinó el consumo energético de los dos sistemas mediante los valores del COP para todas las situaciones y así, se estableció en cuales ciudades el REC trabaja de forma óptima con caudal de retorno mínimo. Asimismo, se consideró un COP constante de 2.3 para el equipo convencional según Cerdá (1999). El consumo eléctrico, en kWh_e, se determinó como el cociente de la demanda térmica, dada en kWh_t, entre el COP medio estacional característico que corresponda al equipo. La diferencia entre el consumo del split de aire y el asociado al funcionamiento del REC, para cada ciudad y mes, nos da el ahorro energético que supone en cada caso la utilización del equipo REC frente al convencional. Estos resultados se recogen en la Figura 9.

Por otro lado, a partir de los consumos de energía eléctrica de los dos sistemas, es posible determinar el impacto ambiental derivado de su utilización indicando las emisiones de CO₂ asociadas, recurriendo al parámetro denominado "coeficiente de paso", el cual, relaciona a la energía eléctrica consumida y los gramos de CO₂ no emitidos. En el caso de la Península Ibérica, le corresponde un valor de 649 gCO₂/kWh_e. (RITE, 2007). La Figura 10 muestra la diferencia de las emisiones asociadas a los dos equipos respectivamente. Dado que este indicador es directamente proporcional al consumo de energía Resultados similares se presentan en la gráfica de la Figura 9, en donde existe variabilidad entre los distintos meses en las ciudades seleccionadas.

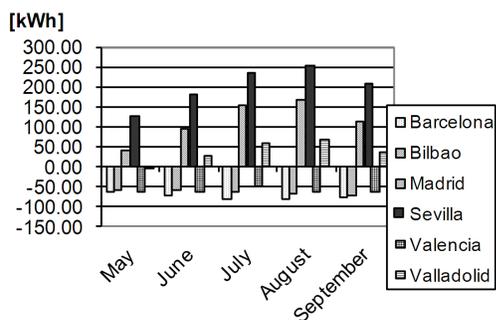


Figura 9. Ahorro de energético considerando la instalación del REC en lugar del equipo "Split".

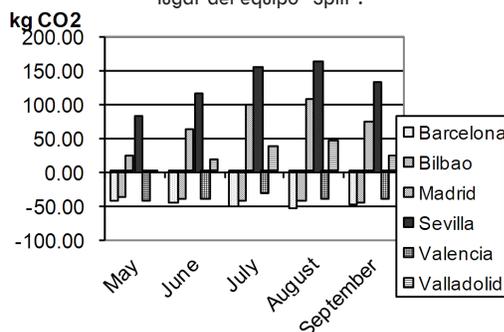


Figura 10. Diferencia de emisiones de CO₂ considerando la instalación del REC en lugar del equipo "Split".

Conclusiones

El trabajo de investigación teórico-experimental aquí presentado, consistió en la descripción constructiva y caracterización experimental de un sistema combinado de enfriamiento evaporativo cerámico REC de aire primario y de una batería de tubos de calor TC que emplea como fluido de trabajo acetona, y cuya zona de condensación operó utilizando el agua enfriada en una torre de condensador evaporativo, y donde se utilizó el aire procedente de la CC o local (modo recuperativo) y con aire exterior (modo regenerativo). Las conclusiones derivadas de este trabajo de investigación son:

- El sistema REC-TC diseñado, fabricado y caracterizado permitió intercambiar energía entre la corriente de aire primario y la superficie húmeda exterior de los ladrillos, reduciendo los consumos de adecuación térmica en los sistemas de climatización convencional "todo aire". El REC-TC empleado, se manifiesta como una alternativa más dentro de las posibles aplicaciones de sistemas de aire acondicionado.
- Cabe destacar que el material cerámico de los ladrillos presentó como ventajas una resistencia a la corrosión y oxidación, economía y de fácil adquisición. Asimismo, debido al comportamiento del sólido poroso, se presentó en el equipo una buena transferencia de calor y masa entre los flujos de aire primario y el agua que pasa a través de los ladrillos. Por esa razón, a este proceso se le ha denominado *refrigeración evaporativa semi-indirecta*.
- El banco de tubos de calor también cumplió con la función de operar como un "amortiguador térmico", estabilizando las oscilaciones de temperatura que presentaron las corrientes de aire al atravesar el sistema de intercambio energético.
- El equipo REC-TC estuvo apoyado con un sistema de Bomba de Calor, con el fin de garantizar estrictamente los parámetros de confort térmico en el aire procedente del local utilizado durante el desarrollo experimental.
- La caracterización del equipo REC-TC se desarrolló empleando la técnica de diseño de experimentos, realizando un diseño factorial completo, analizando cómo afectan los factores contemplados: temperatura del aire exterior (cinco niveles), caudal impulsado (tres niveles), y nivel de humedad específica (tres niveles). También se analizaron las interacciones dobles planteadas para cada una de las características objeto de estudio. Su contribución se corroboró mediante el análisis de varianza de los resultados obtenidos. Los factores analizados en el diseño de experimentos, permitieron caracterizar el comportamiento del REC-TC.
- De acuerdo con los resultados obtenidos se puede decir que este equipo de refrigeración evaporativo cerámico, trabajó adecuadamente (COP total) entre los 35 y 40 °C de temperatura exterior suministrada en condiciones de verano para los rangos mínimos de caudal suministrado de 230 m³/h. Los resultados se encuentran dentro de la zona de confort según la ASHRAE (1997), lo cual, permite establecer a estos dispositivos como adecuados para aplicaciones en edificaciones residenciales y no residenciales con espacios limitados, y permitió asegurar que el enfriamiento evaporativo es una manera efectiva de enfriar aire cuando la humedad es baja. Sin embargo,

la eficacia se reduce cuando se incrementan los niveles de humedad, y eventualmente cuando el aire se satura completamente, el efecto de enfriamiento desaparece.

- Este sistema permitió conseguir un beneficio medioambiental, tanto en la reducción de las emisiones de CO₂ como en el uso de refrigerantes orgánicos, comparado con respecto a un equipo convencional de capacidad similar. Se controló de manera más precisa la temperatura del aire de impulsión mediante los tubos de calor y logró un mejor grado de calidad del aire interior (IAQ) al aumentar el nivel de ventilación, sin penalizar el consumo de energía convencional.
- Del análisis comparativo de los dos sistemas de aire acondicionado, desarrollado a partir de los datos conocidos sobre el Split de aire y de la aplicación de los resultados experimentales obtenidos del REC, se concluye que el uso del equipo REC prototipo de investigación no es recomendable en climas muy húmedos, como es el caso de Barcelona, Bilbao y Valencia; conclusión demostrada tanto en lo que respecta al ahorro energético como al impacto ambiental. Por el contrario, su implementación se muestra interesante en climas con humedades relativas medias en verano menores al 50%, como son los propios de Madrid, Sevilla o Valladolid (climatología continental).
- El comportamiento del REC para un buen desempeño, va a depender principalmente de la humedad relativa característica de la zona climática y en menor grado de la temperatura. Así, debido a la dependencia de la humedad relativa del aire, los resultados mostraron variaciones importantes del consumo de energía y, por lo tanto, de las emisiones de CO₂ en los meses de verano para los climas secos. A pesar de parecer un inconveniente, ya que puede esperarse que el REC solamente opere durante los meses críticos (julio y agosto), su eficiencia varía muy poco.

Agradecimientos

El Dr. Fernando E. Flores Murrieta agradece al Programa de Mejoramiento del Profesorado PROMEP (México), el apoyo otorgado para la realización de Posgrados de Alta Calidad en el extranjero, cuyo resultado ha sido el trabajo aquí presentado y emanado de su tesis doctoral denominada: “Fabricación, monitorización y caracterización de un equipo de aire acondicionado de bajo impacto ambiental, utilizando un sistema combinado: refrigerador evaporativo cerámico y tubos de calor REC-TC”.

La Ingeniera Ana Tejero agradece a la Consejería de Educación de la Junta de Castilla y León (España), el apoyo recibido a través de la Estrategia Regional de Investigación Científica y Desarrollo Tecnológico del Fondo Social Europeo.

Referencias

- ASHRAE, 1997. *Fundamentals Handbook*. Chapter 8. Thermal Comfort. Washington, D. C
- Cochran, W., y Cox G. 1990. “Diseños Experimentales”, Ed. Trillas. ISBN 968 24-3669-9. (2ª Ed. en español). Pp. 177-186.
- EA-4/02: Expression of uncertainty of measurement in calibration. European co-operation for accreditation; 1999.

Flores M. Fernando E. 2008. “Fabricación, monitorización y caracterización de un equipo de aire acondicionado de bajo impacto ambiental, utilizando un sistema combinado: refrigerador evaporativo cerámico y tubos de calor REC-TC”. Tesis Doctoral. Universidad de Valladolid, España. Noviembre. Pp. 150, 151, 161 y 214.

Herrero Martín R., Rey Martínez F. J., Velasco Gómez E. 2007. “Thermal confort analysis of a low temperatura waste energy recovery system SIECHP”. Energy and Buildings ELSEVIER. Doi:10.1016/j.enbuil.2007.04.009. Abril.

Martín Zorraquino, J. V., Montero Sola A., Gurrutxaga Arruza P. 2008. “Minimización del riesgo de legionelosis en los sistemas de refrigeración”. Revista: El instalador. Nº 449. Editorial: El instalador, S. L. Madrid, España. ISSN: 0210-409. Pp. 12– 14. Febrero.

Ministerio de Fomento, IDAE e Instituto Cerdá. 1999. “Guía de la edificación sostenible. Calidad energética y medioambiental en edificación”. Madrid.

Ministerio de Industria, Turismo y Comercio: Secretaría general de energía (Gobierno de España), 2009. La Energía en España 2009, Centro de publicaciones del Ministerio de Industria, Turismo y Comercio, Madrid. Pp. 6.

Ministerio de vivienda (Gobierno de España), 2007. Código Técnico de la Edificación: Parte 1.

Ministerio de Industria, Turismo y Comercio y Ministerio de vivienda (Gobierno de España), 2007. “Reglamento de Instalaciones Térmicas en Edificios RITE”.

Norma Oficial Mexicana: NOM-008-ENER-2001. Eficiencia Energética en Edificaciones, envolvente de edificios no Residenciales.

Norma ANSI-ASHRAE Estándar 55-92.

Official Journal of the European Union. 2010. Legislation. L153. V53. ISSN: 1725-2555. Pp. 1-13. Jun.

Velasco Gómez E. Rey Martínez F. J. 2006a. “Beneficios del enfriamiento evaporativo”. Revista: Montajes e instalaciones. Nº 401. Editorial: Alción, S. L. Unipersonal. Madrid, España. ISSN: 0210-184X. Pp. 47 – 51. Enero.

Velasco Gómez E. Rey Martínez F. J. 2006b. “Enfriamiento evaporativo y tubos de calor como sistemas de recuperación de energía”. Revista: El instalador. Nº 434. Editorial: El instalador, S. L. Madrid, España. ISSN: 0210-409. Pp. 56–74. Octubre.

Velasco Gómez E. Rey Martínez F. J. Varela Diéz F. Flores Murrieta F. Dapena Echeverría M. 2007. “La utilización del enfriamiento evaporativo como alternativa energética eficiente”. Revista: Eco construcción. Nº 4. Editorial Omnimedia. S. L. Madrid, España. D. L.: M-19132-2006. Pp.: 44–49. Publicación enero – febrero.

Wang Shan K. 2000. “Handbook of air conditioning and refrigeration”. 2nd edition. New York: McGraw-Hill. ISBN: 0-07-068167-8.