DOI: 10.21134/9n4f0761

CYTEF XII Congreso Ibérico y X Congreso Iberoamericano de Ciencias y Técnicas del Frio
Universidad Miguel Hernández de Elche
26-06 28-06/2024
UNIVERSITAS Miguel Hernández

SISTEMA DE ENFRIAMIENTO EVAPORATIVO INDIRECTO FABRICADO CON IMPRESIÓN 3D Y RESINA CERÁMICA

Francisco Comino[1]*, Pablo E. Romero[1], José A. Martinez[1], Jesús Castillo-González[2], Francisco J. Navas-Martos[2] y Manuel Ruiz de Adana[3]

1: Departamento de Mecánica, Escuela Politécnica Superior, Universidad de Córdoba, Campus de Rabanales, Antigua Carretera Nacional IV, km 396, 14071 Córdoba, España. e-mail: francisco.comino@uco.es
2: Centro Tecnológico del Plástico Andaltec, Calle Vilches 34, Ampliación Polígono Cañada de la Fuente, 23600 Martos Jaén, España
3: Departamento de Química Física y Termodinámica Aplicada, Escuela Politécnica Superior, Universidad de Córdoba, Campus de Rabanales, Antigua Carretera Nacional IV, km 396, 14071 Córdoba, España

Resumen: *Los sistemas de enfriamiento evaporativo indirecto presentan una alternativa prometedora a los métodos convencionales de enfriamiento basados en compresión de vapor. Este estudio se centró en el diseño y la fabricación de un sistema de enfriamiento evaporativo de punto de rocío utilizando resina cerámica y la técnica de fabricación aditiva DLP (Digital Light Processing). A diferencia de los diseños tradicionales con canales rectangulares, este sistema emplea un diseño tubular. Se realizaron pruebas experimentales en condiciones de laboratorio, variando la temperatura del aire de entrada de 30 °C a 45 °C y el caudal de aire de 12 m³/h a 30 m³/h. Los resultados mostraron una significativa reducción de la temperatura del aire de hasta 20 °C y una alta eficiencia energética de enfriamiento (EER) de hasta 11, especialmente a la temperatura máxima de entrada y al caudal mínimo de aire. Estos hallazgos indican que los enfriadores evaporativos indirectos compactos pueden lograr un enfriamiento eficaz con bajo consumo de energía y un impacto ambiental reducido.*

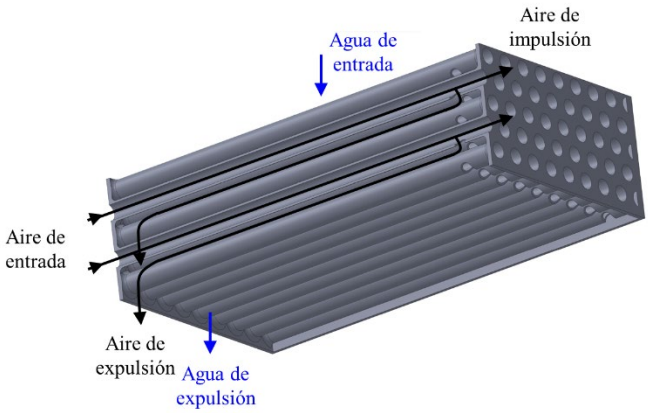

Figura 1. Diseño del sistema de enfriamiento evaporativo indirecto de punto de rocío.

Palabras clave: enfriamiento de aire, intercambiador de calor y masa, fabricación aditiva, resina cerámica.

1. INTRODUCCIÓN

Las políticas de la Unión Europea han impulsado la disminución del uso de energía primaria y promovido la incorporación de energías limpias en edificaciones, desplazando así a los combustibles fósiles [1]. Esto responde a que una fracción considerable del consumo energético y las emisiones de CO_2 proviene de los sistemas de calefacción, ventilación y aire acondicionado (HVAC). Los sistemas HVAC tradicionales, que operan mediante unidades de expansión directa, son comunes en la refrigeración, pero dependen de electricidad y pueden emitir gases contaminantes debido al uso de refrigerantes [2].

En contraste, la refrigeración evaporativa emerge como una alternativa, fundamentada en el intercambio de calor y masa entre el aire y el agua [3]. Existen dos modalidades principales: los sistemas de enfriamiento evaporativo directo (DEC), que permite el contacto directo entre el aire y el agua, y los sistemas de enfriamiento evaporativo indirecto (IEC), que separa los flujos de aire mediante una superficie, diferenciando entre una corriente de aire húmeda, en la que el aire y el agua están en contacto, y una corriente de aire seca, en la que solo circula aire [4]. Además, existen diferentes tipos de sistemas IEC, sin embargo, este documento se enfoca en los sistemas IEC de punto de rocío (DIEC), los cuales permiten enfriar la temperatura del aire impulsión hasta la temperatura de punto de rocío, por lo que es una de las soluciones de enfriamiento más eficientes [5].

Los sistemas DIEC han sido objeto de estudio en diversas aplicaciones [6], demostrando un notable potencial para el ahorro energético. Por ejemplo, su aplicación en viviendas residenciales en China ha evidenciado ahorros energéticos de hasta un 39% en comparación con los sistemas de expansión directa [7]. La combinación de sistemas DIEC con tecnologías desecantes ha permitido además controlar la temperatura y humedad ambientales de manera independiente [8].

Los sistemas IEC han sido ampliamente analizados por muchos autores en la literatura disponible [9], analizando variables críticas para el desempeño de estos sistemas, tales como la temperatura y humedad del aire de entrada, así como el coeficiente de rendimiento bajo diversas condiciones operativas [10]. También se ha evaluado la influencia del caudal de agua [11], lo que tiene un efecto significativo en el rendimiento del sistema. La influencia del material del intercambiador fue estudiada en otros trabajos [12].

Otros trabajos también han analizado el diseño de sistemas IEC para mejorar su comportamiento térmico. Se analizó el poder de enfriamiento de un sistema DIEC con diferente número de perforaciones entre los canales seco y húmedo [13]. Los resultados mostraron que la configuración con un solo paso de aire aumentó la potencia de enfriamiento en comparación con las configuraciones con cuatro pasos de aire. Tradicionalmente estos sistemas han sido diseñados con módulos de intercambio con diseño de placas [14]. Sin embargo, algunos autores han analizado el rendimiento de sistemas IEC tubulares con sección circular [15]. Recientemente, un sistema IEC tradicional con diseño tubular y fibra conductora de humedad ha sido analizado [16] Los resultados mostraron valores de rendimiento energético y eficiencia de bulbo húmedo muy altos. No obstante, pese a que intercambiadores de calor de tubos circulares son bien conocidos en la industria, los sistemas IEC tubulares no ha sido ampliamente investigados. Los sistemas IEC tubulares podrían facilitar un flujo más laminar y uniforme que los sistemas IEC de placas, reduciendo así la caída de presión del sistema y su consumo energético. Este diseño también podría permitir mayor facilidad de limpieza y mantenimiento, gracias a la ausencia de esquinas donde se pueden acumular depósitos.

Por tanto, el uso de una unidad de enfriamiento de aire eficiente, como los sistemas IEC, que no dependen principalmente de energía eléctrica y no utilizan ningún refrigerante, podría ser una alternativa interesante a las unidades de refrigeración por aire convencionales basadas en ciclos de compresión de vapor. Las principales ventajas de los sistemas evaporativos son su simplicidad constructiva y su alta eficiencia.

El objetivo principal del presente trabajo fue diseñar, fabricar y ensayar un sistema de enfriamiento evaporativo indirecto de punto de rocío (DIEC) utilizando resina cerámica y la técnica de fabricación aditiva DLP (Digital Light Processing). A diferencia de los diseños tradicionales con canales rectangulares, este sistema emplea un diseño tubular circular.

2. METODOLOGÍA

2.1. Diseño y operación del sistema de DIEC

Los enfriadores evaporativos indirectos de punto de rocío (DIEC) representan una tecnología avanzada en las técnicas de refrigeración, buscando maximizar la eficiencia térmica y minimizando el consumo de energía. A diferencia de los enfriadores evaporativos directos, los sistemas DIEC permiten enfriar el aire de entrada sin aumentar su humedad relativa, utilizando un proceso de dos etapas que separa el flujo de aire que será enfriado

del flujo de aire utilizado para la evaporación del agua.
En el presente trabajo, se llevó a cabo un nuevo diseño de sistema DIEC tubular, como se muestra en la Figura 1. Este diseño se caracteriza por la circulación del flujo de aire de entrada a través de canales secos, donde su temperatura se reduce sin alterar la humedad absoluta del aire. Parte de este flujo de aire primario se recircula mediante orificios situados al final de estos canales, fijando el porcentaje de flujo recirculado en el 50%. El flujo de aire recirculado, actuando como corriente secundaria, fluye en contraflujo, generando un efecto de enfriamiento evaporativo y transfiriendo calor sensible a los canales secos a lo largo de toda la sección hasta ser expulsado por la parte inferior del módulo.
Una característica distintiva del diseño es el uso de canales circulares dispuestos a tresbolillo, lo que optimiza el contacto entre el agua de entrada y la superficie exterior de los canales. El agua se introduce por la parte superior del módulo, y el exceso que no se evapora se expulsa a través de los mismos orificios utilizados para la expulsión del aire. En la Tabla 1 se muestran los parámetros principales de diseño del sistema DIEC.

Tabla 1. Parámetros de diseño del sistema DIEC.

Parámetros	Valores
Longitud x Ancho x Alto [mm]	110 x 110 x 30
Número de canales primarios	80
Diámetro interior de canales [mm]	0,4
Espesor de canales [mm]	0,1
Porcentaje de aire recirculado [%]	50

2.2. Material y técnica de fabricación del sistema DIEC

La fabricación del sistema DIEC fue llevada a cabo mediante la técnica de fabricación aditiva de procesamiento digital de luz (DLP). Esta técnica se basa en la exposición selectiva de resina líquida a una fuente de luz para formar capas sólidas y muy finas del material que se apilan para crear un objeto sólido. Cada capa curada se separa del fondo del tanque de resina y la base de impresión asciende para dejar que fluya resina limpia por debajo. El proceso se repite hasta que termina la impresión.
El material usado para la fabricación del sistema DIEC fue una resina compuesta por materiales poliméricos reforzada con nanopartículas cerámicas. La temperatura de reblandecimiento de este material es 204 °C, sugiriendo una aplicabilidad en ambientes de alta temperatura. Por el contrario, esta temperatura en materiales solo poliméricos suele ser menor a 100 °C. Por lo tanto, las nanopartículas cerámicas permitieron mejorar las propiedades mecánicas y térmicas del material frente a un material solo polimérico. Además, para mejorar las características mecánicas y térmicas de este material, el objetivo tras ser impreso, se llevaron a cabo dos procesos de curado, un curado con UV y un curado térmico. Los parámetros usados para su curado fueron: (i) luz ultravioleta durante 60 minutos a 60 °C y (ii) proceso térmico durante 120 minutos a 100 °C. Estos procesos de curado permiten completar el proceso de polimerización del material.

2.3. Evaluación experimental del sistema DIEC

Una instalación experimental fue usada para analizar el comportamiento energético del sistema DIEC fabricado. En la Figura 2 se representa un esquema de esta configuración experimental. La planta experimental permitió ajustar las condiciones del aire de entrada, la temperatura, la humedad y el caudal de aire, con una unidad de tratamiento de aire (UTA). En un estudio previo se incluyó una descripción detallada de la planta experimental y las características técnicas de los elementos HVAC [8].
La configuración experimental también estuvo compuesta por un conjunto de sensores de temperatura de bulbo seco (T), temperatura de punto de rocío (T_d) y diferencia de presión (ΔP). La ubicación de estos sensores se muestra en la Figura 2. El tiempo de muestreo fue de 3 s y los valores se promediaron cada 15 min.

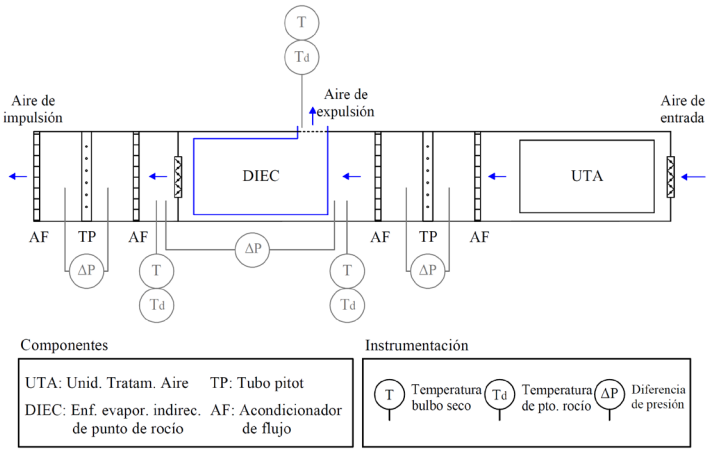

Figura 2. Esquema de la configuración experimental de ensayos del sistema DIEC.

Esta instalación permitió realizar pruebas experimentales del sistema DIEC bajo condiciones controladas, variando la temperatura del aire de entrada de 30 °C a 45 °C y el caudal de aire de 12 m³/h a 30 m³/h.
El rendimiento energético del sistema DIEC fue evaluado en términos de los siguientes parámetros:

- Diferencia de temperatura de aire de bulbo seco (ΔT) entre la temperatura de entrada (T_e) e impulsión (T_{imp}):

$$\Delta T = T_e - T_{imp} \tag{1}$$

- Ratio de Eficiencia Energética (EER) obtenida como la relación entre la potencia de refrigeración del aire ($\dot{Q}_c$) y el consumo total de energía eléctrica ($\dot{W}$). $\dot{Q}_c$ fue calculada con el caudal másico del aire de impulsión ($\dot{m}_{imp}$) y la diferencia de entalpía del aire de entrada (h_e) e impulsión (h_{imp}). $\dot{W}$ integró el consumo eléctrico de una bomba hidráulica de 4 W y el consumo eléctrico teórico de un ventilador, cuyo rendimiento se fijo en 0.5.

$$EER = \frac{\dot{Q}_c}{\dot{W}} \tag{2}$$

$$\dot{Q}_c = \dot{m}_{imp} \cdot (h_{imp} - h_e) \tag{3}$$

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados experimentales del sistema DIEC fabricado son mostrados en este apartado. En la Figura 3 se muestra los resultados de ΔT bajo diferentes condiciones de temperatura y caudal de entrada. Se puede observar que ΔT aumentó cuando se disminuyó el caudal de aire de entrada y la temperatura del aire se mantuvo constante. ΔT también aumentó cuando se incrementó la temperatura del aire de entrada y se fijó el caudal. Por lo que, estos resultados muestran que el sistema DIEC podría enfriar más cuanto más desfavorable es la temperatura del aire exterior, un comportamiento opuesto a los sistemas tradicionales de compresión de vapor. El máximo valor de ΔT fue alcanzado para condiciones de aire de entrada 45 °C y 12 m^3/h, como se muestra en la Figura 3.

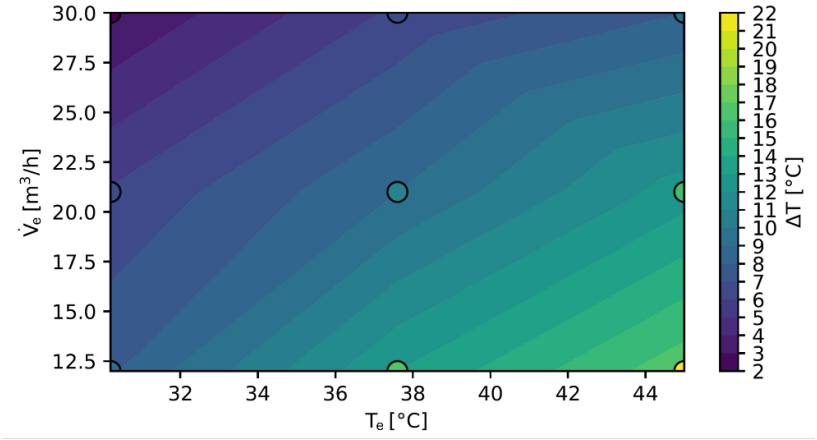

Figura 3. Resultados de ΔT del sistema DIEC para diferentes valores de temperatura y caudal de entrada.

En la Figura 4 se muestran los resultados de EER del sistema DIEC fabricado para diferentes temperaturas y caudales de entrada. Se puede observar que, por lo general, los valores de EER disminuyeron al aumentar el caudal de entrada, manteniendo la temperatura de entrada constante. Esta tendencia fue debida principalmente al aumento del consumo energético eléctrico ($\dot{W}$), ver Figura 4. Respecto a la temperatura de entrada, los valores de EER se incrementaron al aumentar este parámetro y mantener el caudal de aire constante. En este caso, los valores de $\dot{Q}_c$ aumentaron al aumentar la temperatura de entrada y los valores de $\dot{W}$ variaron ligeramente respecto a la temperatura de entrada. El máximo valor de EER alcanzado fue 11,25, obtenido para el mínimo caudal y máxima temperatura de entrada analizada. Por lo tanto, estos resultados muestran el gran potencial de enfriamiento de estos sistemas DIEC con muy alta eficiencia energética.

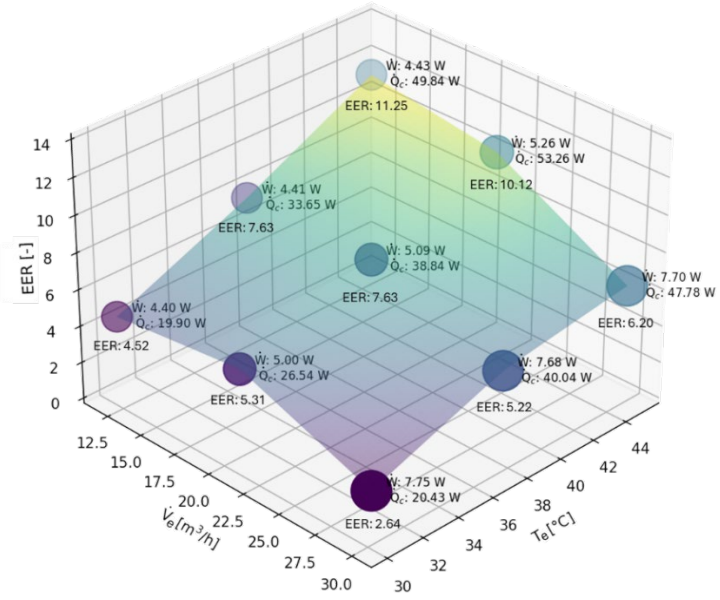

Figura 4. Resultados de EER del sistema DIEC para diferentes valores de temperatura y caudal de entrada.

4. CONCLUSIONES

En el presente trabajo, se diseñó, fabricó y evaluó experimentalmente un sistema de enfriamiento evaporativo indirecto de punto de rocío (DIEC). Materiales cerámicos y la técnica de fabricación DLP fue usada para su desarrollo. El sistema diseñado y fabricado destacó por su alta compacidad.

Los resultados experimentales de enfriamiento del aire del sistema mostraron una alta reducción de la temperatura tras ser tratado, hasta 20 °C. Principalmente cuando la temperatura exterior es más elevada. Se alcanzaron altos valores de Ratio de Eficiencia Energética (EER) hasta 11,25 con el sistema fabricado, debido principalmente a la potencia de enfriamiento del sistema y su bajo consumo energético eléctrico.

Estos resultados sugieren que enfriadores evaporativos indirecto pueden ser una alternativa eficiente a los sistemas de enfriamiento tradicionales, así como una solución para descarbonizar los sistemas HVAC.

Agradecimientos: Los autores agradecen la financiación recibida en el proyecto DCOOL, referencia TED2021-129648B-I00, financiado por la Unión Europea con fondos NextGenerationEU Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia y por MCIN/AEI/10.13039/501100011033. También agradecen la financiación recibida de la UE al proyecto WEDISTRICT, H2020-WIDESPREAD2018-03-857801 dentro del programa Horizonte 2020.

REFERENCIAS

[1] European Parliament, European Directive 2010/31/EU on the Energy Performance of Buildings, 2010. https://doi.org/doi:10.3000/17252555.L_2010.153.eng.

[2] P. Sun, J.Y. Wu, R.Z. Wang, Y.X. Xu, Analysis of indoor environmental conditions and heat pump energy supply systems in indoor swimming pools, Energy Build 43 (2011) 1071–1080. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.08.004.

[3] B. Porumb, P. Ungureşan, L.F. Tutunaru, A. Şerban, M. BĂlan, A Review of Indirect Evaporative Cooling Operating Conditions and Performances, Energy Procedia 85 (2016) 452–460. https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.12.226.

[4] B. Porumb, P. Ungureşan, L.F. Tutunaru, A. Şerban, M. BĂlan, A Review of Indirect Evaporative Cooling Technology, Energy Procedia 85 (2016) 461–471. https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.12.228.

[5] H. Sadighi Dizaji, E.J. Hu, L. Chen, A comprehensive review of the Maisotsenko-cycle based air conditioning systems, Energy 156 (2018) 725–749. https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.05.086.

[6] M.H. Mahmood, M. Sultan, T. Miyazaki, S. Koyama, V.S. Maisotsenko, Overview of the Maisotsenko cycle – A way towards dew point evaporative cooling, Renewable and Sustainable Energy Reviews 66 (2016) 537–555. https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.08.022.

[7] Z. Duan, X. Zhao, J. Liu, Q. Zhang, Dynamic simulation of a hybrid dew point evaporative cooler and vapour compression refrigerated system for a building using EnergyPlus, Journal of Building Engineering 21 (2019) 287–301. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2018.10.028.

[8] M.J. Romero-Lara, F. Comino, M. Ruiz de Adana, Experimental assessment of the energy performance of a renewable air-cooling unit based on a dew-point indirect evaporative cooler and a desiccant wheel, Energy Convers Manag 310 (2024). https://doi.org/10.1016/j.enconman.2024.118486.

[9] F. Comino, S. Milani, S. De Antonellis, C.M. Joppolo, M. Ruiz de Adana, Simplified performance correlation of an indirect evaporative cooling system: development and validation, International Journal of Refrigeration 88 (2018) 307–317. https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2018.02.002.

[10] A. Ahmad, S. Rehman, L.M. Al-Hadhrami, Performance evaluation of an indirect evaporative cooler under controlled environmental conditions, Energy Build 62 (2013) 278–285. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.03.013.

[11] S. De Antonellis, C.M. Joppolo, P. Liberati, S. Milani, L. Molinaroli, Experimental analysis of a cross flow indirect evaporative cooling system, Energy Build 121 (2016) 130–138. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.03.076.

[12] A. Tejero-González, M. Andrés-Chicote, E. Velasco-Gómez, F.J. Rey-Martínez, Influence of constructive parameters on the performance of two indirect evaporative cooler prototypes, Appl Therm Eng 51 (2013) 1017–1025. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2012.10.054.

[13] S.J. Oh, M.W. Shahzad, M. Burhan, W. Chun, C. Kian Jon, M. KumJa, K.C. Ng, Approaches to energy efficiency in air conditioning: A comparative study on purge configurations for indirect evaporative cooling, Energy 168 (2019) 505–515. https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.11.077.

[14] H. Yang, W. Shi, Y. Chen, Y. Min, Research development of indirect evaporative cooling technology: An updated review, Renewable and Sustainable Energy Reviews 145 (2021). https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111082.

[15] F.J.R. Martínez, E.V. Gómez, R.H. Martín, J.M. Gutiérrez, F.V. Diez, Comparative study of two different evaporative systems: An indirect evaporative cooler and a semi-indirect ceramic evaporative cooler, in: Energy Build, 2004: pp. 696–708. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2003.10.010.

[16] X. Cui, C. Yang, W. Yan, L. Zhang, Y. Wan, K.J. Chua, Experimental study on a moisture-conducting fiber-assisted tubular indirect evaporative cooler, Energy 278 (2023). https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.128014.