

Desarrollo de un intercambiador de calor compacto con esponjas metálicas

Moises Morera-Alfaro

Estudiante graduado

Escuela de Ciencia e Ing. de Materiales
Instituto Tecnológico de Costa Rica, Costa Rica
✉ mochemore@estudiantecr.onmicrosoft.com

Francisco Rodríguez-Mendez

Escuela de Ciencia e Ing. de Materiales
Instituto Tecnológico de Costa Rica, Costa Rica
✉ frarodriguez@itcr.ac.cr

Bruno Chiné-Polito

Escuela de Ciencia e Ing. de Materiales
Instituto Tecnológico de Costa Rica, Costa Rica
✉ bchine@tec.ac.cr

Marcela Meneses-Guzmán

Escuela de Ingeniería en Producción Industrial
Instituto Tecnológico de Costa Rica,
✉ mameneses@itcr.ac.cr

Resumen

Este artículo describe un trabajo de investigación desarrollado para evaluar experimentalmente un intercambiador de calor compacto fabricado mediante impresión 3D, en el cual se introducen esponjas metálicas de cobre para mejorar la superficie de intercambio térmico. Se han estudiado diversas condiciones de trabajo y configuraciones del dispositivo y los resultados experimentales han permitido obtener información para mejorar el sistema de intercambio de energía.

Palabras claves: Energía, dispositivos térmicos, materiales celulares, trabajo experimental.

Abstract

This paper describes a research work carried out to experimentally study a compact heat exchanger manufactured by 3D printing. The thermal device used metal sponges to increase the surface available for the heat transfer process. By studying several work conditions and different device configurations we obtained valuable experimental data to improve the energy transfer in the system.

Keywords: Energy, heat exchanger, cellular materials, experimental work.

Introducción

Debido a que el consumo de energía en el mundo crece, deben buscarse oportunidades para mejorar la eficiencia de su uso en, por ejemplo, aplicaciones de caleamiento, ventilación y aire acondicionado (HVAC, sigla en inglés de Calentamiento, Ventilación y Aire Acondicionado) de las instalaciones residenciales e industriales. El componente principal de un equipo HVAC es el intercambiador de calor, por lo que de este dependen la eficiencia energética, el costo y las dimensiones del sistema.

El uso de la energía generada a partir de combustibles fósiles acarrea un conjunto de problemáticas ambientales como la contaminación y el calentamiento global que impactan sobre nuestra sociedad y crean serias dificultades, ya no sostenibles. Costa Rica junto a países de todo el mundo, ha dado su adhesión a convenciones y protocolos internacionales referentes a Sostenibilidad y Cuidado del Medio Ambiente, comprometiéndose a dirigir sus esfuerzos para limpiar su huella de carbono y alcanzar condiciones de carbono neutralidad. En este sentido se precisa que el País se compromete a un máximo absoluto de emisiones de 9.374.000 TCO₂eq netas al 2030, con una trayectoria propuesta de emisiones de 1.73 toneladas netas per cápita para el 2030 [1]. También el Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático 2022-2026 [2] confirma que Costa Rica tiene políticas ambiciosas para reducir de manera significativa sus emisiones. Además, especifica que el País está comprometido con una trayectoria de emisiones alineada con la meta, para la mitad de este siglo, de no aumentar más de 1.5°C la temperatura media respecto de los valores preindustriales.

En este ámbito, la comunidad científica trabaja para desarrollar soluciones eficientes y seguras, mejorando el desempeño de los dispositivos energéticos residenciales e industriales y reduciendo el impacto ambiental. En el caso de los sistemas de intercambio térmico se investigan soluciones que puedan aumentar la eficiencia del proceso, por ejemplo, usando superficies extendidas, nanofluidos, materiales porosos y celulares, efectos magnetocalóricos, entre otros. En este artículo se analiza un sistema de intercambio térmico que usa, como superficies extendidas de un intercambiador de calor compacto, esponjas metálicas de cobre (Fig. 1). Con el uso de estos materiales celulares se pretende aumentar la superficie de transferencia y así mejorar la eficiencia térmica del dispositivo. Las esponjas metálicas tienen una alta proporción de espacios vacíos (poros), los cuales brindan valores de superficie específica muy grandes [3,4]. Además, presentan un bajo valor de densidad, por lo que también es posible reducir el peso de los dispositivos térmicos.

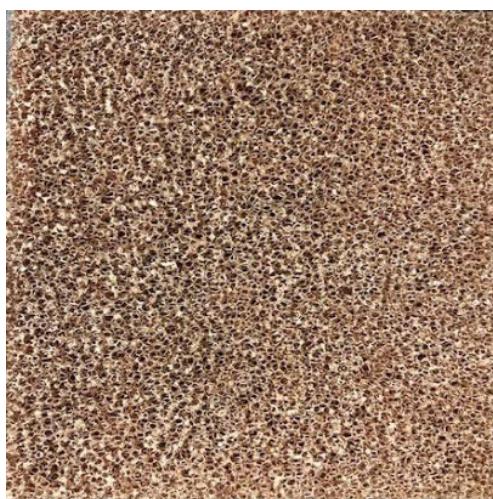


Fig. 1. Esponja de cobre. [3]

Metodología

En el proyecto se han llevado a cabo actividades de diseño y construcción del intercambiador de calor, completándolo con un sistema de transporte y alimentación de los fluidos térmicos, así como con accesorios e instrumentos para la adquisición de los datos experimentales [5].

Se selecciona una alternativa de diseño de un intercambiador de calor compacto, de simple construcción y que permita incorporar modificaciones en su estructura durante el desarrollo del trabajo experimental. La Fig. 2 muestra el modelo modular del dispositivo elaborado en SolidWorks (Dassault Systèmes SolidWorks Co., Waltham, MA, USA), en el cual se aprecian centralmente las dos mitades de esponja de cobre, que se unen a unos pequeños tubos centrales de cobre donde circula agua caliente en dirección transversal al equipo. En las dos extremidades del dispositivo se posicionan dos conexiones, una en cada extremidad, con el propósito de unir el intercambiador al sistema de alimentación de aire frío que fluye en el equipo en dirección axial. Así se crea centralmente una transferencia de calor en régimen de flujo cruzado, entre el agua caliente que circula en los tubos y el aire frío en movimiento axial, usando las esponjas para extender la superficie exterior de los tubos de cobre y aumentar así la tasa de transferencia de energía térmica.

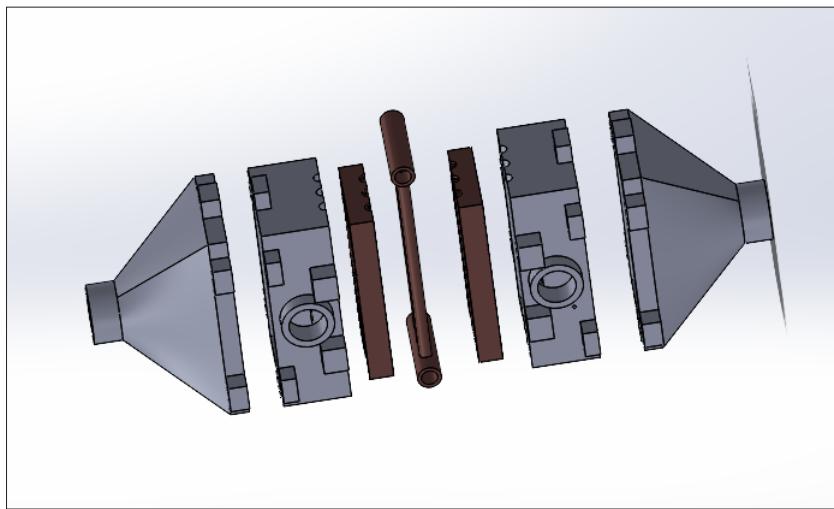


Fig. 2. Vista de las secciones del intercambiador de calor elaborado con SolidWorks. [5]

Sucesivamente, se construye el intercambiador de calor modular (Fig. 3) que incorpora partes en material plástico, representados por las componentes de extremidad del dispositivo y los elementos centrales para colocar las esponjas y tres pequeños tubos metálicos de cobre para la alimentación del agua. Las partes en material plástico se imprimen en la Escuela de Ingeniería en Producción Industrial del TEC, con una impresora 3D usando resina polimérica. La manufactura del intercambiador se completa en el CIEMTEC (Centro de Investigación y Extensión en Materiales del TEC) ensamblando todos los elementos diseñados. Los tubos cilíndricos de cobre primero se cortan y sucesivamente se forman, usando un arreglo mecánico que permite doblarlos, sin deformar la sección transversal de geometría circular. Las esponjas metálicas ERG de 40 PPI seleccionadas [1], inicialmente de dimensiones 101.6 mm por 101.6 mm y espesor de 12.7 mm, se dividen en dos mitades iguales del mismo espesor, mediante una electro-erosionadora de hilo caliente. Posteriormente se unen las esponjas metálicas mediante grasa térmica a los tubos de cobre, donde circula internamente el agua caliente, con el propósito de reducir la resistencia térmica de contacto y mejorar así la transferencia de calor hacia el aire frío que se mueve en flujo cruzado. También se fabrican otros pequeños componentes estructurales para permitir el acceso de los fluidos y posicionar accesorios, instrumentación y sensores del sistema experimental. El circuito experimental de prueba se desarrolla en el Laboratorio de Materiales Porosos y Celulares ubicado en el CIEMTEC y se diseña planificando fundamentalmente dos secciones: la primera para alimentar el aire

al intercambiador; la segunda para permitir el flujo de agua hacia este. Los componentes principales del sistema son el compresor de aire, el tanque de almacenamiento y la bomba con inversor para el agua y los circuitos neumático e hidráulico para el movimiento de los dos fluidos. La adquisición digital de los datos se obtiene usando sensores de temperatura, flujo y presión y se controla mediante el software LabVIEW (National Instruments, Austin, TX, USA).



Fig. 3. Vista del Intercambiador de calor compacto fabricado mediante impresión 3D: se aprecian los tres tubos de cobre para la circulación del agua caliente y las dos mitades de esponjas de cobre que se unen a estos. [5]

Resultados

En la Fig. 4 se trazan las temperaturas de entrada y salida del aire, en correspondencia de diferentes caudales de agua, entre 1.0 gal/min y 3.0 gal/min y variando el caudal de entrada del aire desde 7.068 L/min hasta 23.408 L/min. Se logra apreciar el aumento en los valores de la temperatura de salida del aire, de hasta 5°C respecto de los valores de entrada, para cada prueba realizada. En este caso el incremento es observado para todos los caudales de agua ensayados, indicando que entre mayor sea el caudal de agua más calor recibe el aire.

En el caso de la Fig. 5 se muestran, para los caudales de agua de 0.5 a 3.0 gal/min, las temperaturas tanto de entrada como de salida del agua en función del caudal de aire. Se observa que existe una diferencia de temperatura muy pequeña, menor que 1°C, entre la entrada y la salida del agua. Alimentando el mismo caudal de agua, cuando en el intercambiador se añaden otros tres tubos de cobre, con las respectivas esponjas de cobre (es decir un total de seis tubos y cuatro superficies extendidas), los valores del intercambio de energía mejoran. La Fig. 6 compara los valores de la diferencia de temperatura salida-entrada del aire, para tres casos ensayados: a) tres tubos de cobre para la circulación del agua sin esponjas metálicas; b) tres tubos de cobre y dos esponjas metálicas; c) seis tubos de cobre y cuatro esponjas metálicas. Se observa que al variar del caudal del aire y del agua, la diferencia de temperatura salida-entrada del aire en el intercambiador es de aproximadamente 1°C para el caso a), de casi 5°C para el caso b) y hasta mayor de 6°C en el caso c). La disminución de la temperatura del agua en todos los casos no supera 1°C. En el caso del aire, los resultados anteriores permiten concluir que cuando se incorporan las esponjas metálicas, el fluido a contacto con estas recibe de manera más eficiente el calor y modifica mayormente su temperatura. En este caso las esponjas de cobre mejoran la transferencia de calor hacia el aire, que comúnmente representa el lado débil de estos dispositivos

[6]. En el caso del agua, que fluye en el interior de los tubos cilíndricos, la variación de su temperatura es muy reducida. Esto es consecuente con los mecanismos físicos de la transferencia de calor, ya que la capacidad térmica y la densidad del agua son mucho mayor que las del aire. Para soportar la consideración anterior, se brindan en la Fig. 7 y 8 los resultados de simulaciones computacionales [7] realizadas con el software COMSOL Multiphysics (COMSOL Inc., Burlington, MA, USA), asumiendo que en el intercambiador de calor compacto se alimenten dos fluidos de aire, uno frío a 300 K (26.85°C) y el otro caliente a 312 K (38.85°C), sustituyendo así el agua caliente. La Fig. 7 brinda el valor de la temperatura del aire caliente en la salida de dos tubos de cobre del intercambiador, en ambos casos muy cercana ahora a los 300 K, que es el valor mínimo alcanzable de esta configuración térmica. En cambio, la Fig. 8 traza la temperatura del aire caliente a lo largo del eje longitudinal del tubo de cobre, que disminuye desde 312 K a un valor próximo al mínimo de 300 K. Aunque el modelo computacional presente algunas simplificaciones, en particular asume que las paredes exteriores del intercambiador son adiabáticas y que las uniones de los materiales no crean resistencias térmicas adicionales, los resultados de Fig. 7 y 8 confirman que las propiedades físicas de los fluidos alimentados influencian directamente el desempeño del dispositivo.

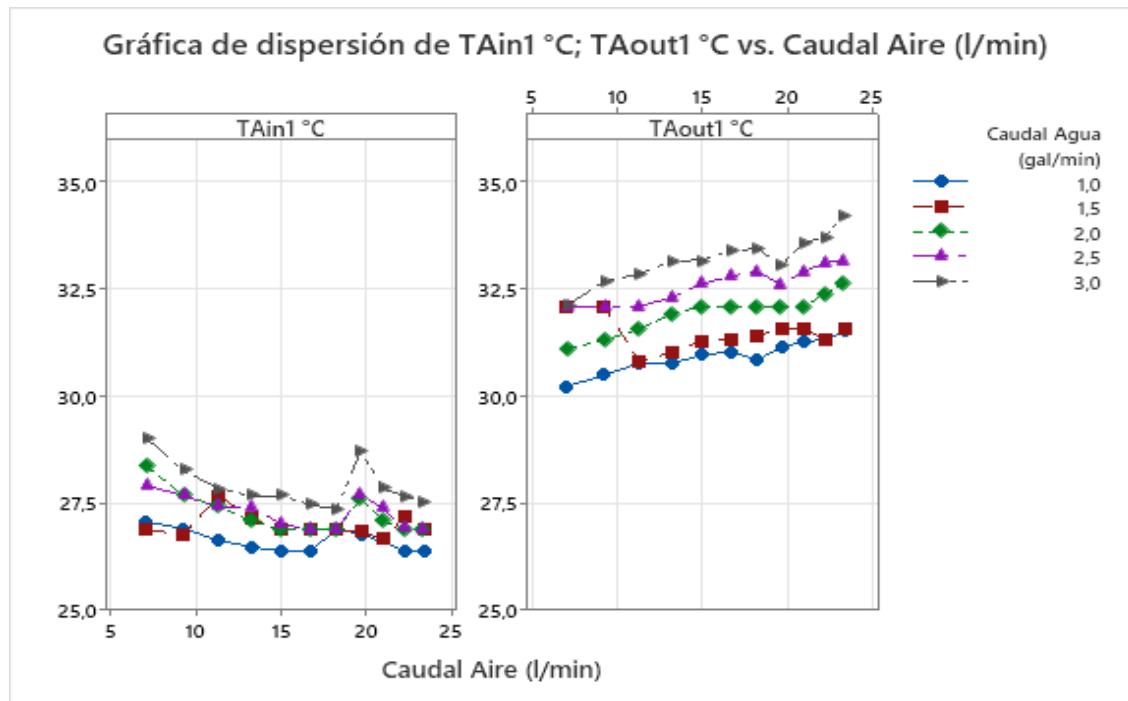


Fig. 4. a) Temperatura entrada aire (TAin1 en $^{\circ}\text{C}$) y b) Temperatura salida aire (TAout1 en $^{\circ}\text{C}$) versus el caudal de aire, para diferentes valores de caudal de agua. [5]

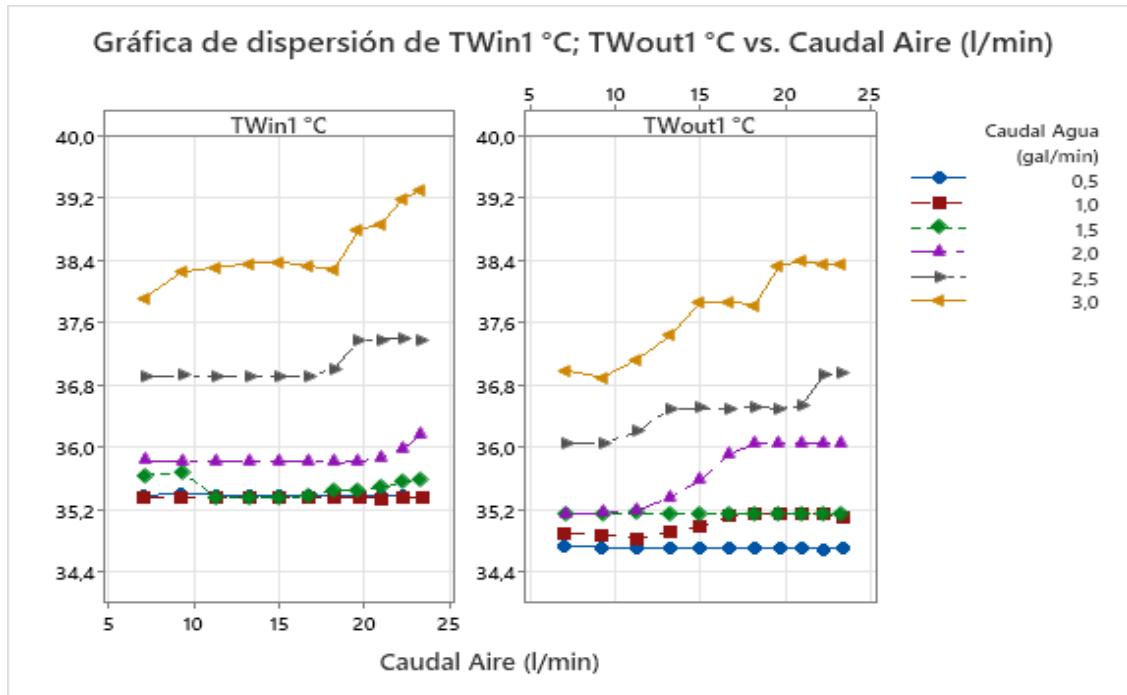


Fig. 5. a) Temperatura entrada agua (T_{Win1} en $^\circ\text{C}$) y b) Temperatura salida agua (T_{Wout1} en $^\circ\text{C}$) versus el caudal de aire, para diferentes valores de caudal de agua. [5]

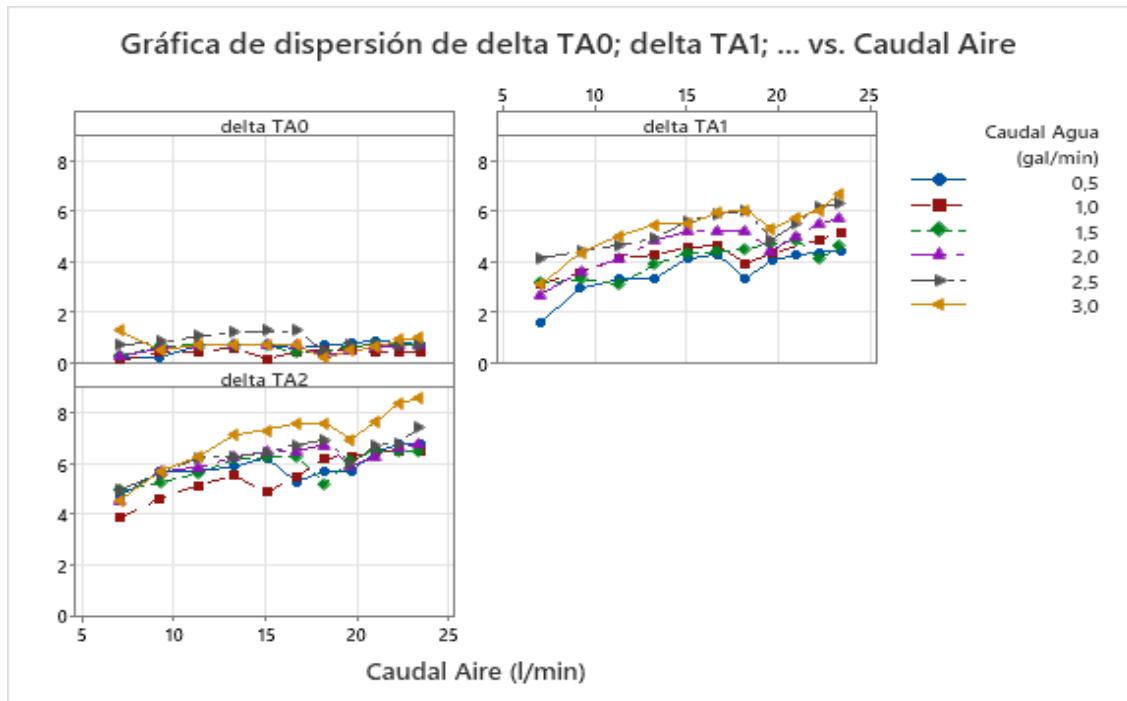


Fig. 6. Diferencia de temperatura salida-entrada ($^\circ\text{C}$) del aire versus el caudal de aire, para diferentes caudales de agua: (a) tres tubos de cobre para la circulación del agua sin esponjas metálicas; b) tres tubos de cobre y dos esponjas metálicas; c) seis tubos de cobre y cuatro esponjas metálicas. [5]

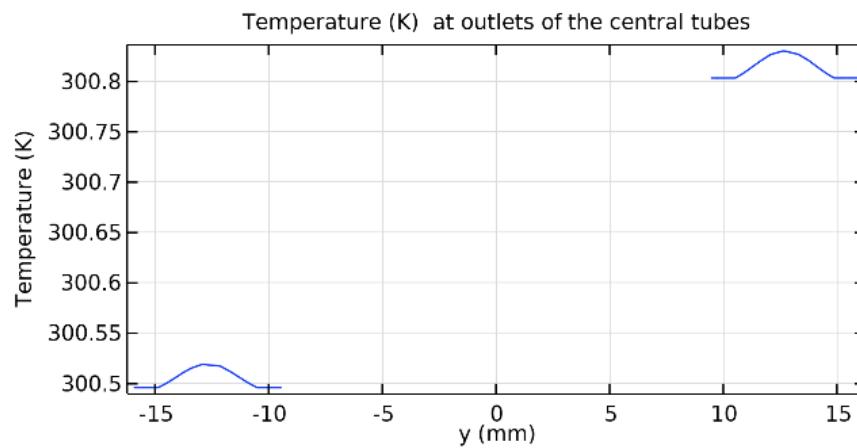


Fig. 7. Magnitud de la temperatura (grados K) del aire caliente en correspondencia de la salida de los dos tubos centrales e inferiores del intercambiador. Temperaturas de entrada: aire frio 300 K, aire caliente 312 K. [7]

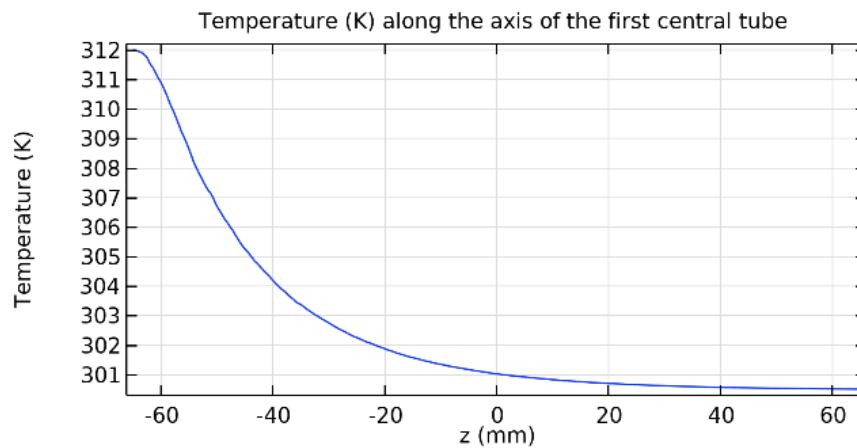


Fig. 8. Perfil axial de temperatura del aire caliente en el centro de un tubo del intercambiador. Temperaturas de entrada: aire frio 300 K, aire caliente 312 K. [7]

Conclusiones

Se ha diseñado y fabricado un intercambiador de calor compacto, introduciendo esponjas de cobre como superficies extendidas, para mejorar la transferencia de energía entre agua caliente y aire frío. Sucesivamente se ha desarrollado un circuito experimental de prueba y llevados a cabo experimentos de laboratorio para evaluar el desempeño térmico del sistema.

Los resultados obtenidos permiten concluir que el intercambiador de calor compacto es efectivo en transferir energía hacia el aire frío, siendo que este fluido a contacto con las superficies extendidas de las esponjas recibe de manera eficiente el calor y cambia su temperatura. En el caso del agua caliente, que fluye en el interior de los tubos del intercambiador, la variación de la temperatura no es tan marcada. Lo anterior es consecuente con los mecanismos físicos de la transferencia de calor, ya que la capacidad térmica y la densidad del agua son mucho mayor que las del aire.

Para mejorar el desempeño del intercambiador de calor, en particular para reducir la temperatura del agua caliente en la salida, se prevé incorporar algunas modificaciones en el dispositivo. Algunas de

estas, que serán objeto de futuras actividades experimentales basadas en diseño de experimentos y de modelación computacional, son:

- a. aumentar la longitud de los tubos para la circulación del agua caliente, por ejemplo, creando un serpentín, que permita un recorrido más largo y por lo tanto un área de intercambio mayor;
- b. mantener el tamaño del intercambiador compacto, proveyendo un sistema de circulación del aire frío acorde a la solución indicada en a);
- c. reducir el espesor de pared de los pequeños tubos de cobre para la circulación del agua, facilitando el flujo de calor y por lo tanto contribuyendo a mejorar el sistema;
- d. sustituir la unión con pasta térmica, entre las esponjas y los tubos, con soldadura fuerte o braseado.

El presente estudio se ha enfocado solamente en aspectos básicos del intercambiador, otros factores a considerar, no analizados en este trabajo, podrían ser representados por los costos del dispositivo propuesto, la comparación con otras soluciones novedosas y alternativas, etc.

Agradecimientos

Los autores desean agradecer a la Vicerrectoría de Investigación del Instituto Tecnológico de Costa Rica, al personal docente, administrativo y técnico de la Escuela de Ingeniería en Producción Industrial y de la Escuela de Ciencia e Ingeniería de Materiales.

Referencias

- [1] Ministerio de Ambiente y Energía, Dirección de Cambio Climático, "Costa Rica: Programa País de Carbono Neutralidad 2.0., Categoría Organizacional", 2019.
- [2] Ministerio de Ambiente y Energía, Dirección de Cambio Climático, "Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático de Costa Rica, 2022 – 2026", San José, Costa Rica, 2022.
- [3] Copper Foam | Duocel® Open Cell Foam Foam, Disponible: <https://ergaerospace.com/> [21/11/2024].
- [4] F. García-Moreno, "Commercial Applications of Metal Foams: Their Properties and Production", Materials, vol. 9, no. 2, p. 85, 2016, doi: 10.3390/MA9020085.
- [5] M. Morera A., "Diseño y construcción de una propuesta de intercambiador de calor compacto con materiales porosos", Proyecto Final de Graduación de Licenciatura en Ingeniería en Materiales, TEC, Cartago, 2024.
- [6] J. He y A. Jacobi, "Air-side heat transfer enhancement by a new winglet-type vortex generator array in a plain-fin round-tube heat exchanger", Journal of Heat Transfer, vol.132, 2010.
- [7] M. Guzman M, B. Chiné P, M. Conejo S. y F. Rodriguez M., "Desarrollo y evaluación de un dispositivo de intercambio térmico con esponja metálica como elemento de transferencia del calor", Informe final de proyecto de investigación, VIE-TEC, Cartago, 2024.

Sobre los autores:

Moises Morera-Alfaro

Estudiante graduado de la Escuela de Ciencia e Ing. de Materiales del Instituto Tecnológico de Costa Rica.

Bruno Chinè-Polito

Profesor de la Escuela de Ciencia e Ing. de Materiales del Instituto Tecnológico de Costa Rica, Costa Rica. Su formación académica es en el área de la ingeniería metalúrgica, con doctorado de la Universidad de Trieste (Italia) y sus intereses de investigación son en el área de los fenómenos de transporte computacional y experimental. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6966-5973>.

Francisco Rodríguez-Mendez

Profesor de la Escuela de Ciencia e Ing. de Materiales, del Instituto Tecnológico de Costa Rica. Su formación académica es en ingeniería electrónica con una Maestría en Ingeniería en Dispositivos Médicos del ITCR. Actualmente se encuentra finalizando sus estudios del Doctorado en Ingeniería del mismo ITCR, con tema de investigación en el campo de los materiales funcionales magnetocalóricos. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5870-2967>

Marcela Meneses-Guzmán

Profesora de la Escuela de Ingeniería en Producción Industrial, Instituto Tecnológico de Costa Rica, Su formación académica es en el área de la ingeniería industrial, con doctorado del Politécnico de Milano (Italia) y sus intereses de investigación contemplan la estadística aplicada y mejora continua para la calidad. <https://orcid.org/0000-0001-5922-0145>.