

## PRODUCCIÓN DE FRÍO A PARTIR DE UNA SAL METÁLICA Y FUENTES DE BAJA TEMPERATURA

## COLD PRODUCTION FROM A METALLIC SALT AND LOW TEMPERATURE SOURCES

**Dr. Eng. Carlos J. Noriega Sanchez\*, Dr. Eng. Nelson Afanador García\*\*  
MSc. Gustavo Guerrero Gomez \***

\* **Universidad Francisco de Paula Santander**, Facultad de Ingeniería, Grupo de Investigación en tecnología y desarrollo en ingeniería (GITYD).  
Vía Acolsure, Sede el Algodonal, Ocaña, Norte de Santander, Colombia.  
Tel. +57-7- 5690088 Ext. 221.

\*\* **Universidad Francisco de Paula Santander**, Facultad de Ingeniería, Grupo de Investigación en Ingeniería Civil (GIIC).  
Vía Acolsure, Sede el Algodonal, Ocaña, Norte de Santander, Colombia.  
Tel. +57-7- 5690088 Ext. 218.  
E-mail: {cjniorgas, gguerrerog, nafanadorg}@dominio.edu.co.

**Resumen:** La refrigeración por adsorción química es una tecnología que facilita el ahorro de energía y produce menos impacto ambiental que el producido por los sistemas de refrigeración por compresión de vapor. En este sentido, el impacto de variables de diseño en el coeficiente de desempeño de un sistema de refrigeración por adsorción química que utiliza bromuro de sodio como sal metálica y amoníaco como refrigerante se evalúan a partir de un modelo matemático que describe la transferencia de calor al sistema. Los resultados indican que el tiempo del ciclo afecta favorablemente el coeficiente de desempeño así como la densidad específica aparente del adsorbente y el radio del reactor. Aunque los valores del coeficiente de desempeño son bajos en comparación con los sistemas de enfriamiento por compresión de vapor, el sistema puede funcionar con fuentes térmicas de baja temperatura alcanzables en colectores solares térmicos o gases de combustión, y puede aumentar la eficiencia energética de aplicaciones industriales o residenciales.

**Palabras clave:** Sal metálica, baja temperatura, coeficiente de desempeño, refrigerante.

**Abstract:** Chemisorption cooling is a type of technology that facilitates energy saving and produces less environment impact than that produced by vapor compression cooling systems. In this sense, the impact of design variables on performance coefficient of a chemisorption refrigeration system that uses sodium bromide and ammonia as working pairs are evaluated from a mathematical model that describes the heat transfer into the system. The results indicate that the cycle time affects favorably the coefficient of performance as well as the apparent specific density of the sorbent and the reactor radius. Although the coefficient of performance values are low when compared to vapor compression cooling systems, the system can be operated by low temperature thermal sources, found in thermal solar collectors or flue gases, and it can increase the energy efficiency of industrial or residential applications.

**Keywords:** Metallic salt, low temperature, performance coefficient, refrigerant.

## 1. INTRODUCCIÓN

El creciente aumento del consumo energético y la fuerte dependencia mundial por fuentes de energía no renovables están fomentando el estudio de aplicaciones alternativas que utilizan fuentes de energía renovables o sub-utilizadas (Mahmoudi *et al.*, 2018). Bajo este escenario, en las últimas décadas ha habido un aumento en los estudios sobre sistemas de refrigeración por adsorción, específicamente, sistemas de adsorción química (Sarbu, 2014; Wang y Oliveira, 2006). Los sistemas de refrigeración por adsorción química pueden funcionar con fuentes de calor en varios niveles de temperatura que se encuentran en aplicaciones de energía solar o calor residual, y no requieren una bomba rectificadora de líquido para el refrigerante (Wang y Oliveira, 2006). Además, los sistemas de adsorción no presentan problemas de corrosión debido a los pares de trabajo comúnmente utilizados y son menos sensibles a los golpes y a la posición del sistema (Wang y Oliveira, 2006; Meunier, 1998).

Los coeficientes de rendimiento (COP) alcanzados en sistemas de refrigeración por adsorción química son bajos en comparación con los COP de los sistemas de compresión de vapor (Wang y Oliveira, 2006), por lo que la clave para aumentar este rendimiento se basa en estudios de pares de trabajo (Adsorbente/Refrigerante) que mejoren la transferencia de calor dentro de estos sistemas. En este sentido, un adsorbente compacto hecho de  $\text{BaCl}_2$  y grafito expandido (GE) fue analizado por (Li *et al.*, 2009). Los autores demostraron que esta clase de adsorbente puede utilizar de manera eficaz fuentes de calor con temperaturas que oscilan entre 75 y 90 °C. El COP obtenido varió entre 0.50 y 0.53 cuando la temperatura de evaporación osciló entre 0 y 15 °C y la temperatura de generación fue de 80 °C (Li *et al.*, 2009). Otro material compacto hecho de GE impregnado con sal de cloruro de litio fue fabricado y probado para su utilización en sistemas de fabricación de hielo por adsorción accionados a baja temperatura (Kiplagat *et al.*, 2010). Los experimentos realizados en bloques con diferente proporción de GE, mostraron que la proporción de GE influye en la capacidad de enfriamiento específica de la sal y no hubo una influencia significativa sobre la capacidad de enfriamiento por unidad de masa del adsorbente, en el estudio, las temperaturas de generación oscilaron entre 75 y 80 °C. Si bien estos trabajos muestran un aumento en el COP de los sistemas de adsorción, es necesario evaluar aplicaciones que utilizan fuentes de temperatura inferiores a 75 °C las cuales son fáciles

de lograr en sistemas solares térmicos y como los parámetros geométricos y físicos influyen en su funcionamiento.

En este sentido, el presente trabajo aborda el modelado y la simulación numérica de un reactor para un sistema de refrigeración por adsorción química que permite evaluar cómo los parámetros de diseño impactan en el desempeño de este sistema - Es importante mencionar que el reactor realiza una operación similar a la del compresor en los sistemas tradicionales de refrigeración por vapor y es, por tanto, el elemento principal del sistema. Para ello, el par adsorbente/refrigerante utilizado fue una sal metálica de bromuro de sodio (NaBr) y amoníaco ( $\text{NH}_3$ ), respectivamente. Las capacidades de adsorción de NaBr pueden estar disponibles en niveles de temperatura de ~ 70 °C. Estos niveles de temperatura se pueden alcanzar en aplicaciones solares térmicas y, por lo tanto, tienen un gran potencial para reducir la carga de refrigeración en aplicaciones domésticas y/o industriales utilizando exclusivamente fuentes de energía renovable.

## 2. METODOLOGIA

En esta sección se detalla el modelo matemático que simula la transferencia de calor al interior del reactor del sistema de refrigeración por adsorción química. El reactor es el componente principal del sistema y su lecho adsorbente está compuesto por una sal metálica (NaBr) mezclada con GE y utiliza amoníaco como gas refrigerante.

### 2.1 Transferencia de calor en la región anular del reactor

Para modelar el reactor de un sistema de refrigeración química, es importante comprender cómo funciona el ciclo de refrigeración cuando se utiliza un adsorbente sólido. El ciclo básico de refrigeración por adsorción química no requiere energía mecánica y puede ocurrir utilizando solo energía térmica (Wang y Oliveira, 2006). El modelado y la simulación numérica del reactor tienen como objetivo encontrar el impacto que sobre el COP ejercen los parámetros operativos requeridos para el proyecto del reactor y del ciclo de refrigeración.

El reactor sólido-líquido se modela como un intercambiador de calor convencional ya que un fluido (caliente o frío) intercambia calor con un lecho adsorbente (sólido), y este intercambio ocurre durante los períodos de adsorción y desorción del refrigerante. La Figura 1 (a) muestra que el reactor

modelado es un intercambiador de calor de tubo concéntrico, donde el fluido transportador de calor (frío o caliente) fluye a través de la región anular del intercambiador, ésta región anular está entre el tubo interno y el tubo externo del reactor. El gas refrigerante (amoníaco) que puede ser adsorbido o desorbido por el adsorbente sólido fluye a través de la cavidad cilíndrica interna del reactor. La Figura 1 (b) muestra el lecho adsorbente que está compuesto por una mezcla entre una sal metálica (NaBr) y grafito expandido y las aletas anulares en contacto con el lecho adsorbente. Estas aletas se utilizaron para promover una mayor uniformidad de la temperatura interna del adsorbente y por otro lado, mejorar el contacto térmico entre el adsorbente y el fluido que pasa por la región anular del reactor.

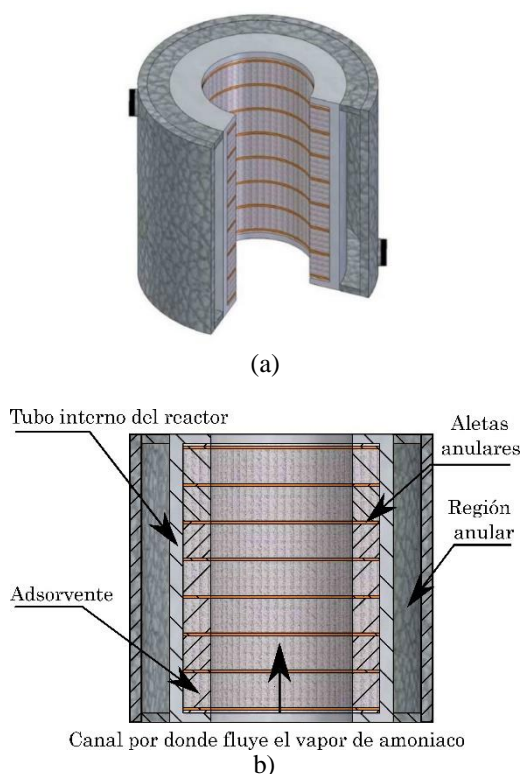


Fig. 1. Reactor del sistema de refrigeración por adsorción química, (a) vista isométrica del reactor y (b) componentes del reactor.

Para calcular la tasa de transferencia de calor sobre la longitud total del tubo, es necesario utilizar valores promedio del número de Nusselt definido en la Ecuación (1) de acuerdo con (Ramesh y Shah, 2003).

$$Nu = \frac{h x}{k_f} = \frac{1}{L} \int_0^L Nu_x dx, \quad (1)$$

El número de Nusselt en la configuración de tubo concéntrico del reactor depende de varios factores, incluido el tipo de fluido, el tipo de flujo y la relación entre los diámetros interno y externo del canal. Debido a que el modelo de transferencia de calor del canal considera tanto los flujos laminares como los turbulentos, en ambos tipos de flujo existe una región de entrada, en la cual, dependiendo de la condición hidrodinámica, la capa límite hidrodinámica, la capa límite térmica o las dos capas límite pueden o no estar completamente desarrolladas (Ramesh y Shah, 2003).

Para determinar los valores numéricos de los números de Reynolds y Prandtl necesarios para el computo del número de Nusselt, fue necesario ajustar funciones polinomiales según (Chapra y Canale, 2014) en función de la temperatura promedio del agua que fluye por la región angular del reactor ( $T_f$ ). Los valores experimentales de estas propiedades se extrajeron de (Ramesh y Shah, 2003), y los coeficientes de correlación para cada una de las funciones obtenidas entre la Ecuación (2) y la Ecuación (5) fueron  $R^2 = 0.995$ ,  $R^2 = 0.998$ ,  $R^2 = 0.993$  y  $R^2 = 0.999$ , respectivamente.

$$k_f = -7.35 \times 10^{-9} T_f^3 - 6.24 \times 10^{-6} T_f^2 + 0.002 T_f + 0.57 \quad (2)$$

$$\rho_f = 1.49 \times 10^{-5} T_f^3 - 0.006 T_f^2 + 0.006 T_f + 1000.24 \quad (3)$$

$$C_p = -4.85 \times 10^{-8} T_f^5 + 1.54 \times 10^{-5} T_f^4 - 0.002 T_f^3 + 0.12 T_f^2 - 3.45 T_f + 4216.93 \quad (4)$$

$$\mu_f = 2.92 \times 10^{-14} T_f^4 - 8.17 \times 10^{-12} T_f^3 + 9.01 \times 10^{-10} T_f^2 - 5.21 \times 10^{-8} T_f + 1.74 \times 10^{-6} \quad (5)$$

De la Ecuación (1) a la Ecuación (5)  $k_f$ ,  $\rho_f$ ,  $C_p$  y  $\mu_f$  representan la conductividad térmica, la densidad, el calor específico y la viscosidad cinemática del agua que fluye a través de la región anular, que se expresan en  $W m^{-1} K^{-1}$ ,  $kg m^{-3}$ ,  $J kg^{-1} K^{-1}$  y  $m^2 s^{-1}$ , respectivamente.

## 2.2 Transferencia de calor en el lecho adsorbente

En el proceso de adsorción, hay una adhesión de una molécula de fluido (refrigerante) a una superficie sólida (adsorbente). La cantidad adsorbida depende de la temperatura o presión del adsorbente químico. Manteniendo la presión constante, la cantidad de refrigerante adsorbido disminuye con una cantidad igual al coeficiente estequiométrico siempre que la temperatura del adsorbente sea superior a la temperatura de equilibrio de la reacción (Li *et al.*, 2009).

Según (Huang *et al.*, 2004), es posible obtener una ecuación que describe la difusión de calor bidimensional para los procesos de adsorción y desorción del refrigerante en el reactor de geometría cilíndrica (ver Figura 1(a)). Esta ecuación se obtiene a partir de balances de energía en el lecho adsorbente y se presenta en la Ecuación (6).

$$C(x) \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda_{e,r} \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{\lambda_{e,r}}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \lambda_{e,z} \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + nN_s \Delta H_r \frac{\partial x}{\partial t} \quad (6)$$

Donde  $C(x)$  es la capacidad específica del lecho adsorbente ( $\text{J m}^{-3} \text{K}^{-1}$ ),  $\Delta H_r$  es la entalpía de reacción ( $\text{J mol}^{-1}$  de gas),  $\lambda_e$  es la conductividad térmica efectiva del medio ( $\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$ ),  $N_s$  es el número de moles de sal (adsorbente) por unidad de volumen del medio ( $\text{mol m}^{-3}$ ),  $n$  es el número de moles de refrigerante adsorbido o desorbido. Las expresiones matemáticas utilizadas para el avance local  $\frac{\partial x}{\partial t}$  en la

Ecuación (6) se pueden encontrar en la referencia (Huang *et al.*, 2004). Como condiciones iniciales de temperatura y conversión local para la Ecuación (6) se consideraron  $25^\circ \text{C}$  y 0, respectivamente. Las condiciones de contorno en la dirección  $r$  y  $z$  para la Ecuación (6) se consideró una resistencia de contacto entre la pared del reactor y el lecho adsorbente y resistencia de contacto entre la aleta y el lecho adsorbente, respectivamente.

Finalmente, la Ecuación (7) que muestra la transferencia de calor en el fluido térmico que fluye a través de la región anular se modela de acuerdo con (Chapra y Canale, 2014).

$$(\rho C)_f \frac{\partial T}{\partial t} + (\rho C_p)_V \left( \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \frac{h(2\pi r_{ext})}{A_{anul}} (T_p - T_f) \quad (7)$$

Sujeta a  $T|_{z=0} = T_{entrada}$ ,  $V$  es la velocidad de flujo en la región anular y  $A_{anul}$  en la ecuación (7) es el área de la región anular.

## 2.3 Método numérico para resolver la ecuación diferencial parcial del lecho adsorbente

Considerando que el reactor a analizar en este estudio tiene una geometría bien descrita en coordenadas cilíndricas, se utilizó la técnica de diferencias finitas con formulación implícita para discretizar la ecuación de transferencia de calor bidimensional con generación de energía en el lecho adsorbente, así como la transferencia de energía entre el fluido térmico y la pared del reactor (Chapra y Canale, 2014).

## 2.4 Hipótesis simplificativas

Se consideraron las siguientes hipótesis para realizar las simulaciones numéricas del sistema de refrigeración modelado:

- La presión del evaporador y del condensador fueron 0.62 MPa y 1.17 MPa, respectivamente. Con estos valores de presión, las temperaturas iniciales de equilibrio son  $T_{e, evaporador} = 27.1^\circ \text{C}$  y  $T_{e, condensador} = 56.01^\circ \text{C}$ , es decir, estas son las temperaturas mínimas para que el adsorbente sólido (NaBr) inicie la adsorción y desorción de  $\text{NH}_3$ .
- Se arbitró  $30^\circ \text{C}$  como la temperatura del fluido térmico (agua a presión atmosférica) durante la fase de adsorción y  $70^\circ \text{C}$  durante la fase de desorción. Estos valores promueven una diferencia de temperatura adecuada para garantizar el funcionamiento del ciclo.
- Se despreció la resistencia a la transferencia de masa porque la presión para las fases de adsorción y desorción son superiores a 300 kPa (Lu *et al.*, 1996)
- Para mejorar la transferencia de calor en el lecho adsorbente (Wang *et al.*, 2004), se añadió grafito expandido al NaBr. Como resultado, se consideró que la conductividad térmica aparente del polvo adsorbente fue de  $\lambda_e = 0.469 \text{ W m}^{-1} \text{K}^{-1}$ .

## 2.5 Coeficiente de desempeño y diseño de experimentos

El coeficiente de desempeño (COP) del ciclo de adsorción para el adsorbente en polvo mezclado con grafito expandido y usando amoníaco como fluido refrigerante se determinó de acuerdo con (Li *et al.*, 2009).

Un diseño del experimentos (Myers *et al.*, 2009) se utilizó en el presente trabajo para determinar la influencia de la densidad aparente del compuesto adsorbente (NaBr/GE) en polvo ( $\rho_b$ ), el radio del tubo del reactor ( $R_T$ ) y el tiempo de ciclo ( $\tau$ ) en el COP del sistema. Los valores considerados para las anteriores variables de diseño se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1: Valores y niveles de las tres variables independientes utilizadas en el diseño de experimentos

Nivel	$\rho_b$ (kg m <sup>-3</sup> )	$\tau$ (min)	$R_T$ (mm)
-1.68	11.68	20	18.9
-1	21.4	30	23.6
0	35.4	45	30.6
+1	49.4	60	37.5
+1.68	59.0	70	42.2

Los valores de coeficiente de contacto térmico, longitud del tubo del reactor, flujo volumétrico y espesor de las aletas de aluminio se consideraron constantes para las simulaciones con valores de 550 W m<sup>-2</sup> K<sup>-1</sup>, 0.75 m, 3.7 Lpm y 0.25 mm, respectivamente (Huang *et al.*, 2004).

## 3. RESULTADOS Y DISCUSIONES

A partir del modelo matemático, las sucesivas simulaciones en los diferentes niveles de cada una de las variables consideradas en el diseño de experimentos (ver Tabla 1 sección 2.5), y la ejecución de un diseño central compuesto (Myers *et al.*, 2009), fue posible ajustar un polinomio para el COP del sistema de refrigeración. A partir de este modelo polinomial, es posible identificar cómo la densidad aparente del adsorbente compuesto ( $\rho_b$ ), el tiempo de ciclo ( $\tau$ ) y el radio del tubo del reactor ( $R_T$ ) impactan este parámetro de rendimiento. El modelo polinomial se muestra en la Ecuación (8) y tiene un valor del coeficiente de correlación de  $R^2 = 0.993$ .

$$\begin{aligned} COP = & 0.130 + 0.028\rho_b - 0.0068\rho_b^2 \\ & + 0.017\tau - 0.005\tau^2 + 0.024R_T - \\ & 0.006R_T^2 + 0.003\rho_b\tau \\ & + 0.002\rho_bR_T + 0.003\tau R_T \end{aligned} \quad (8)$$

En esta función polinomial, se deben usar los valores codificados de las variables independientes, no sus valores verdaderos (ver niveles en la Tabla 1 sección 2.5).

La Figura 2 muestra la influencia del tiempo de ciclo y la densidad aparente del adsorbente en el COP del sistema. Se puede observar que el aumento del COP debido al aumento del tiempo de ciclo y la masa específica del adsorbente es el resultado del aumento de la relación del calor de reacción al calor suministrado al sistema y, al aumento entre la masa adsorbente y la masa metálica del reactor. La Figura 2 también muestra que un aumento en la densidad (o masa específica) del adsorbente de 14.4 a 70.9 kg m<sup>-3</sup> produce un aumento medio en el COP de 0.16. En consecuencia, un aumento en la masa específica del adsorbente da como resultado un lecho adsorbente más compacto y, por lo tanto, mejores propiedades térmicas.

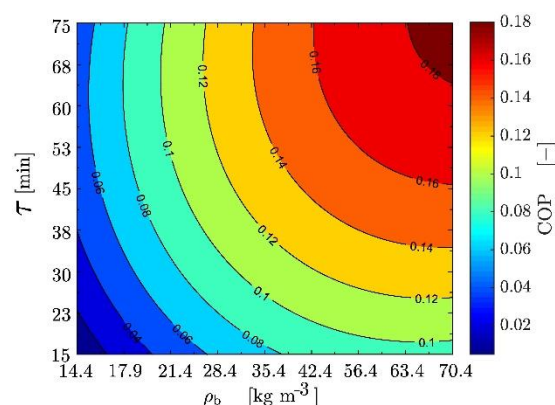


Fig. 2. Variación de COP en función del tiempo del ciclo y de la densidad específica aparente del lecho adsorbente para un radio del tubo del reactor de 30.6 mm.

La Figura 3 muestra el impacto del tiempo de ciclo y el radio del tubo del reactor sobre el COP, considerando una densidad aparente específica del adsorbente de 59 kg m<sup>-3</sup>. El cambio de 15 a 75 minutos en el tiempo de ciclo (adsorción/desorción) produce un aumento promedio del COP de 0.19 ya que la capacidad de enfriamiento del refrigerante



muestra un crecimiento proporcionalmente mayor que el consumo de energía. Por otro lado, a medida que aumenta el radio del reactor, la relación masa adsorbente/metal aumenta y, por tanto, acaba reduciendo la inferencia negativa del calor sensible del metal en el COP.

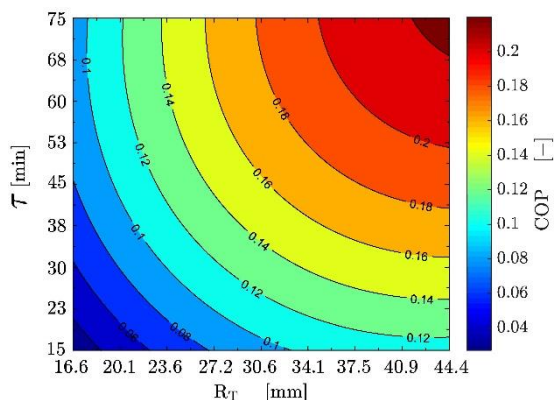


Fig. 3. Variación de COP en función del tiempo del ciclo y del radio del tubo del reactor para densidad aparente del adsorbente de con un radio de tubo de  $59 \text{ kg m}^{-3}$ .

La Figura 4 muestra el impacto del radio del tubo del reactor y la densidad aparente específica sobre el COP, considerando un tiempo de ciclo de 30 min. Un lecho adsorbente más compacto aumenta significativamente el valor de COP del ciclo, es decir, la tendencia constructiva de estos sistemas es incorporar lechos consolidados que se compactan antes de su instalación en el reactor para producir un mejor aprovechamiento del calor que se suministra al reactor, así como, un tamaño de sistema más pequeño para producir una potencia de enfriamiento determinada. Sin embargo, esta condición puede producir un aumento en el costo del sistema. Por lo tanto, los aspectos económicos deben incorporarse en futuros análisis de desempeño de estos sistemas.

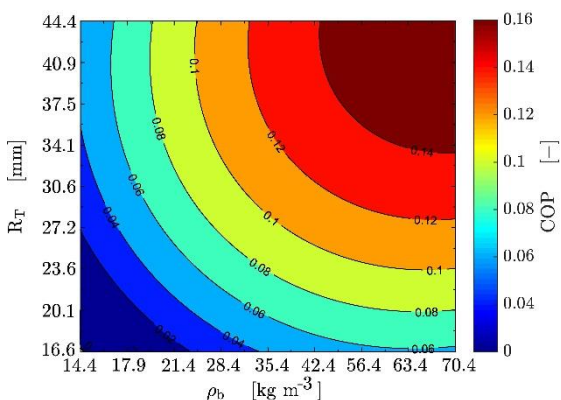


Fig. 4. Variación de COP en función del radio del tubo del reactor y de la densidad específica aparente del lecho adsorbente para un tiempo de ciclo de 30 minutos.

#### 4. CONCLUSIONES

La ecuación polinomial ajustada en el presente trabajo permitió determinar cómo parámetros operacionales y físicos impactan el COP del sistema de refrigeración por adsorción química que utiliza  $\text{NH}_3$  como fluido refrigerante y consecuentemente, la producción de frío de una sal metálica compuesta de  $\text{NaBr/EG}$ .

La densidad aparente y el tiempo son las variables de diseño preponderantes al momento del diseño del sistema para el tipo de adsorbente evaluado, es decir, un aumento en estas variables permite un mejor aprovechamiento del calor aportado al sistema y, por tanto, un mejor COP.

El efecto de aumentar el tiempo de ciclo en radios de tubo más grandes da como resultado un aumento promedio mayor en el COP que el observado cuando se usa en radios más pequeños.

Finalmente, cualquier sistema que utilice adsorbente en polvo debe diseñarse con un lecho de masa específica alta ya que cuando opera con valores altos de esta variable, el sistema alcanza el valor máximo de COP.

#### REFERENCIAS

- Mahmoudi A., Fazli M. y Morad M. (2018) *A recent review of waste heat recovery by Organic Rankine Cycle*, Applied Thermal Engineering, **Vol. 143**, pp. 660-675.
- Sarbu I. (2014) *A review on substitution strategy of non-ecological refrigerants from vapour compression-based refrigeration, air-conditioning and heat pump systems*, International Journal of Refrigeration, **Vol. 46**, pp. 123-141.
- Wang R. y Oliveira R. (2006) *Adsorption refrigeration—An efficient way to make good use of waste heat and solar energy*, Progress in Energy and Combustion Science, **Vol. 32(4)**, pp. 424-458
- Meunier F. (1998) *Solid sorption heat powered cycles for cooling and heat pumping applications*, Applied Thermal Engineering **Vol. 18(9)**, pp. 715-729.

- Li T., Wang R., Wang L. y Kiplagat J. (2009) *Study on the heat transfer and sorption characteristics of a consolidated composite sorbent for solar-powered thermochemical cooling systems*, Solar Energy, **Vol. 83**, pp. 1742–1755.
- Kiplagat J., Wang R., Oliveira R. y Li T. (2010) *Lithium chloride – Expanded graphite composite sorbent for solar powered ice maker*, Solar Energy, **Vol. 84**, pp. 1587 – 594.
- Ramesh S. y Shah K. (2003) *Fundamentals of Heat Exchanger Design*, John Wiley & Sons, New Jersey.
- Chapra S. y Canale R. (2014) *Numerical Methods for Engineers*, McGraw-Hill Education, Sexta edición, New York.
- Huang H., Wu G., Yang J., Dai Y., Yuan W. y Lu H. (2004) *Modeling of gas–solid chemisorption in chemical heat pumps*, Separation and Purification Technology, **Vol. 34**, pp. 191 – 200.
- Lu H., Mazet N. y Spinner B. (1996) *Modelling of gas-solid reaction—Coupling of heat and mass transfer with chemical reaction*, Chemical Engineering Science, **Vol. 51(15)**, pp. 3829–3845.
- Wang L., Wang R., Wu J. y Wang K. (2004) *Compound adsorbent for adsorption ice maker on fishing boats*, International Journal of Refrigeration, **Vol. 27(4)**, pp. 401–408.
- Myers R., Montgomery D. y Anderson-Cook C. (2009) *Response Surface Methodology: Process and Product Optimization Using Designed Experiments*, Wiley, New York.