

## **Procedimiento experimental para determinar la adsorción y desorción de pares adsorbente/refrigerante para sistemas de enfriamiento. Estudio de caso**

Experimental procedure to determinate adsorption and desorption of adsorbents/refrigerants pair for cooling systems. Case study

MSc. Celso Bayardo Bohorquez Escobar<sup>1</sup>  <https://orcid.org/0000-0001-9712-6299>

Dr. C. Reinaldo Guillén Gordín<sup>2\*</sup>  <https://orcid.org/0000-0002-4267-5618>

<sup>1</sup> Universidad Católica de Santiago de Guayaquil. Ecuador.

<sup>2</sup> Universidad de Oriente, Cuba.

\*Autor para la correspondencia. Correo electrónico: guillen@uo.edu.cu

### **RESUMEN**

El principal objetivo del trabajo es desarrollar un procedimiento experimental que permita determinar la cantidad de refrigerante, que adsorben y desorben los pares adsorbente/refrigerante, para su empleo en sistemas de enfriamiento por adsorción, así como realizar la evaluación del par ACX1/HFC410A. Se obtuvo que la diferencia entre la concentración máxima y mínima para las condiciones de operación establecidas resultó ser de 0,64545 kg de refrigerante HFC410A por cada kg de carbón activado ACX1, ello define la cantidad de refrigerante, también denominado adsorbato, que participa en la extracción de calor en un sistema de enfriamiento donde se use dicho par.

**Palabras clave:** adsorbente/adsorbato; Enfriamiento por adsorción; Carbón activado/HFC410A

### **ABSTRACT**

The main objective of the work is to develop an experimental procedure that allows to determine the amount of adsorbent, adsorbed and desorbed by adsorbents refrigerants

pairs for use in adsorption cooling systems, as well as to perform the evaluation of the ACX1/HFC410A pair. It was obtained that the difference between the maximum and minimum concentration for the established operating conditions turned out to be 0.64545 kg of HFC410A refrigerant per kg of ACX1 activated carbon, which defines the amount of refrigerant, also called adsorbate that participates in the heat extraction in a cooling system where said torque is used.

**Keywords:** adsorbent/Adsorbate; Cooling adsorption; Active carbon/HFC410A.

Recibido: 20/09/2019

Aceptado: 25/01/2020

## Introducción

La necesidad de producir, conservar, transportar y comercializar alimentos, medicamentos y otros productos perecederos, así como proporcionar el bienestar humano y posibilitar el desempeño de procesos y equipos vitales bajo condiciones adecuadas de temperatura y humedad, hace que los sistemas de enfriamiento para refrigeración o climatización sean indispensables para la era contemporánea y adquieran una importancia creciente en el desarrollo de la humanidad. El Instituto Internacional de Refrigeración estima que aproximadamente entre el 10-20% de toda la energía eléctrica generada en el mundo se utiliza para procesos de refrigeración y aire acondicionado de diversos tipos.<sup>(1)</sup>

Existen diferentes variantes para producir enfriamiento artificialmente, las más conocidas son: por compresión de vapor, por absorción, por adsorción y por efecto Peltier, de ellas la más generalizada mundialmente es la del ciclo termodinámico por compresión de vapor, frecuentemente utilizada en los equipos y sistemas de refrigeración, aire acondicionado y calefacción.

Los equipos de refrigeración por adsorción fueron los primeros que se utilizaron para producir efecto de enfriamiento artificialmente. Pero el desarrollo y generalización de las redes de distribución de energía eléctrica y la producción de los refrigerantes halogenados

en las primeras décadas del siglo XX, conllevaron a que los sistemas de refrigeración por compresión mecánica alcanzaran un mayor uso mundialmente. <sup>(1)</sup>

Debido a los altos consumos de energía eléctrica, y el impacto ambiental que ocasionan las tecnologías de refrigeración y aire acondicionado por compresión de vapor, cada día se avanza más en investigaciones y desarrollo de tecnologías para el uso de la refrigeración por absorción y adsorción con fuentes renovables de energía.

Los sistemas de enfriamiento por adsorción en la actualidad adquieren importancia por su posibilidad de utilizar la energía solar térmica y pares de refrigerantes-adsorbentes amigables con el ambiente, lo cual lo convierten en una tecnología limpia. Es necesario también desarrollar alternativas para el uso de sistemas de enfriamiento por adsorción con fuentes energéticas tradicionales incluyendo el residuo térmico. Estos sistemas pueden ser alimentados por fuentes térmicas a bajos niveles de temperatura, lo cual permite mayor aprovechamiento de las fuentes de energía disponibles. <sup>(2)</sup>

Los sistemas de enfriamiento basados en la adsorción sólido-gas representan una alternativa interesante, debido a la reversibilidad del mecanismo de adsorción y desorción, así como por la relativa facilidad y simplicidad en la tecnología, tanto constructiva como operacional; su diferencia con los refrigeradores convencionales, es que el compresor se sustituye por el adsorbedor-generador, por ello el ciclo de enfriamiento se representa mediante el diagrama de Clapeyron y no en un diagrama presión v/s entalpia como en los sistemas de compresión de vapor.

Un sistema de enfriamiento por adsorción básicamente está constituido por el adsorbedor, el generador, el condensador, la válvula de expansión y el evaporador, para su funcionamiento se requiere un par de sustancia de trabajo constituida por el adsorbente y el adsorbato o refrigerante. Muchas investigaciones además de las mejoras del esquema térmico investigan el comportamiento de nuevos pares de trabajo. Los pares más utilizados son el carbón activado/metanol, zeolita/agua, sílica gel/agua y carbón activado/amoniaco. Existe una gran variedad de carbones activados y zeolitas, y cada uno de estos materiales presenta diferentes capacidades adsortivas y desortivas. <sup>(3)</sup>

Los métodos encontrados en la bibliografía para evaluar pares adsorbentes/refrigerantes describen el comportamiento de los procesos que tienen lugar en el ciclo de enfriamiento por adsorción y muestran el equipamiento que utilizan. <sup>(4)</sup> Sin embargo, no describen el procedimiento de operación para determinar los estados de las sustancias. Este trabajo explica el procedimiento experimental para determinar los puntos de estados necesarios que permiten trazar el ciclo de enfriamiento por adsorción y poder realizar los cálculos termodinámicos correspondientes.

## Materiales y métodos

En esta investigación se desarrolla un método que permite determinar la adsorción y desorción de pares adsorbente/refrigerante para su uso en sistemas de enfriamiento por adsorción. Se realiza un estudio de caso donde se determina la capacidad de adsorción y desorción del par carbón activado ACX1 y el refrigerante hidrofluorcarbonado HFC410A constituido por una mezcla zeotrópica de  $\text{CH}_2\text{F}_2 + \text{CHF}_2\text{CF}_3$  al 50 % en peso de cada componente; este carbón activado se utiliza para el filtrado de ron en el Central Azucarero Antonio Guiteras, luego de su regeneración se utilizó en esta investigación, para evaluar su posible aplicación en sistemas de enfriamiento por adsorción. El comercialmente denominado HFC410A o R410A es un refrigerante de amplio uso actualmente en equipos de climatización.

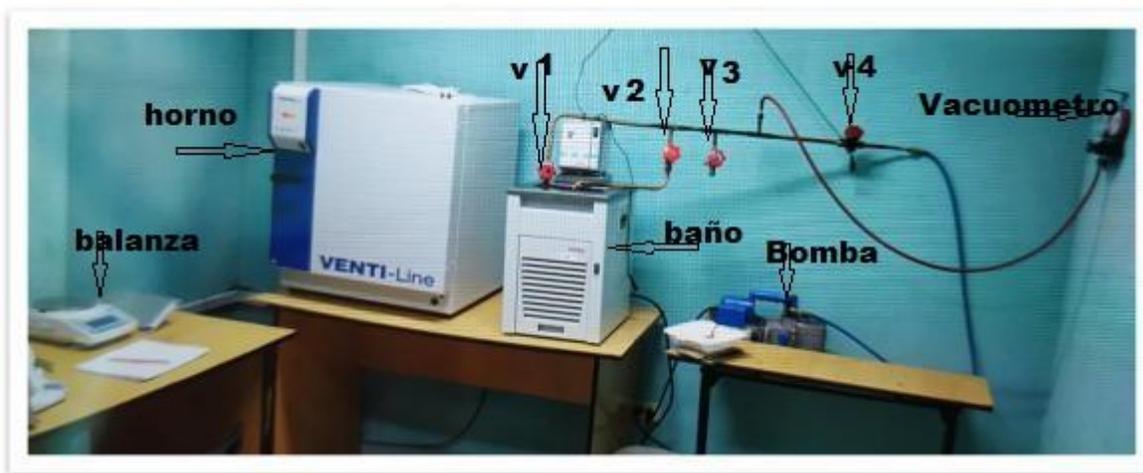
El ciclo de enfriamiento por adsorción se representa por el diagrama de Clapeyron  $\ln P$  vs  $-1/T$  lo conforman dos procesos isobáricos y dos procesos isostéricos, donde se pueden obtener las magnitudes de presión, temperatura y masa de refrigerante por unidad de masa adsorbente.

Para cada tipo de par adsorbente/refrigerante, es necesario conocer el estado termodinámico que permite representar el ciclo de enfriamiento. El sistema opera por el principio reversible de adsorción entre el adsorbente y el refrigerante, dependiendo de la temperatura del adsorbente y la presión del vapor del refrigerante. <sup>(4)</sup>

En este artículo se desarrolla un método experimental cualitativo, que emplea un equipamiento básico relativamente generalizado, que sirve para determinar las

condiciones de estado de las sustancias de trabajo del ciclo de enfriamiento por adsorción, y representarlo en el diagrama de Clapeyron. Este método ahorra tiempo y recursos al agilizar la caracterización de los pares sin necesidad de construir una instalación de enfriamiento por adsorción. El método experimental que se describe permite determinar las propiedades de diferentes pares de trabajo que se deseen evaluar para su uso en sistemas de enfriamiento por adsorción, y con ello realizar un diseño adecuado en correspondencia con la capacidad de enfriamiento deseada y las condiciones de operación que se establezcan, de modo que se pueden obtener las propiedades adsorptivas y desorptivas de diferentes pares, para distintas condiciones de presión y temperatura que pueden ser reguladas en el experimento, lo que posibilita seleccionar el más adecuado para el diseño de la instalación de enfriamiento que se pretenda realizar. <sup>(5)</sup>

Para la experimentación se diseñó y construyó la instalación de la figura 1, en el Centro de Estudios de Energía y Refrigeración de la Universidad de Oriente. El diseño de la instalación tiene en cuenta que los materiales utilizados no reaccionen con las sustancias de los pares adsorbente/refrigerante que se evalúen. La instalación está constituida por dos porta muestras, uno contiene el adsorbente y otro el refrigerante. También consta de un manómetro, una bomba de vacío, así como de cuatro válvulas para controlar las diferentes operaciones que se realizan. Las conexiones entre los recipientes, el manómetro, y la bomba de vacío, se realizan por medio de tuberías de cobre de 6 mm de diámetro y mangueras de goma. Además, se dispone de un baño termostático, que permite regular la temperatura desde  $-20^{\circ}\text{C}$  hasta  $110^{\circ}\text{C}$ , una balanza con precisión de  $10^{-5}$  kg y un horno que permite secar el adsorbente antes de iniciar los ensayos. <sup>(6)</sup>



**Fig.1-** Instalación experimental para evaluar los pares adsorbentes/refrigerantes

Nota: Los porta-muestras de refrigerante y adsorbente se encuentran dentro del baño, acoplados a la instalación por medio de las válvulas V1 y V2

Los sistemas de refrigeración por adsorción operan en rangos de temperatura variables, y están conformados por dos procesos isostéricos y dos procesos isobáricos que se representan en el diagrama de Clapeyron con coordenadas  $\ln P$  vs  $-1/T$ , donde se pueden obtener las magnitudes de la presión, la temperatura, y la masa de refrigerante por unidad de masa adsorbente. <sup>(7,8)</sup>

Las isósteras presentan un comportamiento lineal y responden a procesos transitorios denominados calentamiento o enfriamiento isostérico, donde la temperatura del sistema aumenta o disminuye, pero la concentración permanece constante. En un ciclo de refrigeración por adsorción estas corresponden a las líneas donde las concentraciones de refrigerante en adsorbente serán máximas y mínimas. <sup>(9,10)</sup>

En la figura 2 se muestra en forma general el ciclo de enfriamiento por adsorción, también conocido como diagrama de Clapeyron.

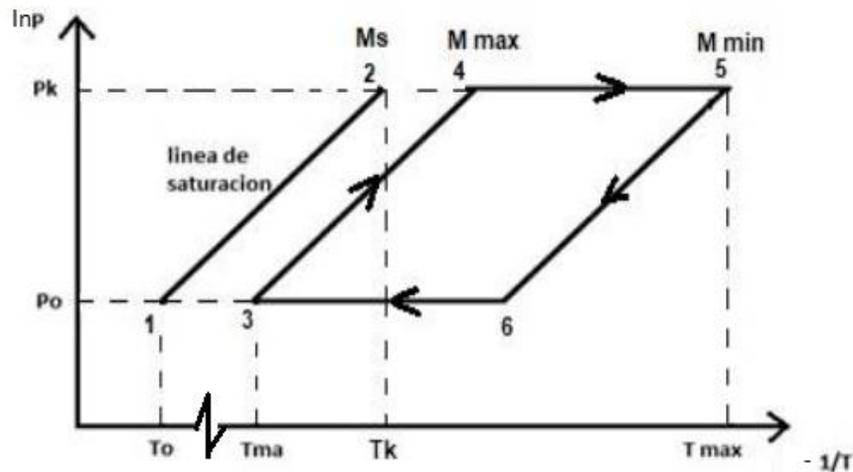


Fig. 2- Ciclo de enfriamiento por adsorción (Diagrama de Clapeyron)

La línea de saturación mostrada en la figura 2 corresponde a una línea guía para el trazado de las isósteras y no a un proceso del ciclo. Para el diseño del sistema y la construcción del diagrama es necesario definir los siguientes parámetros:

$T_0$ : Es la temperatura de ebullición del refrigerante. Dependerá de la finalidad que se le dé al sistema de adsorción, ya sea para aire acondicionado, enfriar o congelar. Si el sistema se diseña para la producción de hielo la temperatura de ebullición del refrigerante deberá alcanzar valores por debajo de  $0^{\circ}\text{C}$ .

$P_0$ : Corresponde a la presión de saturación para la temperatura de ebullición definida. Esta se determina durante el desarrollo del experimento.

$T_{ma}$ : Es la temperatura del medio ambiente, la cual define la presión de condensación.

$T_K$ : Es la temperatura de condensación y se calcula por la ecuación 1.

$$T_K = T_{ma} + \Delta T \quad (1)$$

donde:

$\Delta T$ : Es la diferencia entre la temperatura de condensación y el medio. Esta diferencia depende del fluido de circulación para extraer calor en los procesos de condensación, enfriamiento isostérico y enfriamiento isobárico, oscila entre  $10^{\circ}\text{C}$  y  $12^{\circ}\text{C}$  para el aire, y entre  $5^{\circ}\text{C}$  y  $7^{\circ}\text{C}$  cuando se utiliza agua de circulación.

$P_k$ : Corresponde a la presión de condensación definida por la temperatura de condensación. Se obtiene por tablas de propiedades del refrigerante.

$T_{max}$ : Es la temperatura máxima del ciclo, la cual corresponde a la temperatura que se logra en el desorbedor o generador, para que se produzca el proceso de desorción del refrigerante.

Luego de definida  $T_0$  se determina  $P_0$ , y con estos se sitúa el punto 1. Se determina  $T_K$  y se busca  $P_k$  por tabla, se sitúa el punto 2. Se procede a unir los puntos 1 y 2 obteniéndose la línea de saturación a concentración constante, la cual servirá como guía para la representación del proceso.

Con  $T_{ma}$  y  $P_0$  se sitúa el punto 3. A partir de este y paralelo a la línea de saturación se traza una línea hasta la presión  $P_k$ . Esta línea corresponde al proceso 3-4, en el cual se produce un calentamiento isostérico.

Se define  $T_{max}$  y con  $P_k$  se sitúa el punto 5, a partir del cual, y paralelo a la línea de saturación, se traza una línea hasta  $P_0$ , la cual corresponderá al proceso 5-6 el que representa un enfriamiento isostérico.

Uniendo los puntos 4 y 5 y los puntos 6 y 1 se obtendrán las líneas correspondientes a los procesos de desorción y de adsorción respectivamente. Estos dos procesos se desarrollan a presión constante.

El procedimiento para la determinación de las concentraciones de trabajo de los pares adsorbente/refrigerante simula un proceso real de refrigeración por adsorción. Las operaciones se realizan en el orden siguiente:

Se determina el peso  $G_m$  del portamuestra 1 donde se depositará el adsorbente. Se vierte el adsorbente. En el horno se seca el adsorbente hasta que se elimine toda la humedad posible. Se garantiza la hermeticidad y se determina  $G_t$  que es el peso del porta-muestra conteniendo el adsorbente seco, se determina el peso  $G_{as}$  del adsorbente seco que se investiga, por la ecuación 2.

$$G_{as} = G_t - G_m \quad (2)$$

Se vierte el refrigerante en el portamuestra 2, y se comprueba su hermeticidad. Se conectan ambos portamuestras, el del adsorbente y el del refrigerante a la instalación, se

extraen las infiltraciones y se comprueba que el sistema quede completamente hermético, esta comprobación se realiza con apoyo de la bomba de vacío y los manómetros.

Se introducen ambos portamuestras en el baño termostático y se fija la temperatura en  $T_0$ . Luego de alcanzar dicha temperatura se abrirá la válvula del portamuestra con refrigerante y se registrará la presión que indica el manómetro, la cual corresponde a la presión de saturación del refrigerante,  $P_0$  para esa temperatura.

Se abre la válvula del portamuestra con adsorbente para que comience el proceso de adsorción. Durante este proceso el manómetro indicará un pequeño descenso en la presión, y el proceso durará hasta que el adsorbente quede completamente saturado. En este punto la presión habrá retornado al valor de  $P_0$  y se mantendrá invariable cuando se abra y cierre la válvula del portamuestra con adsorbente. Se cierran las válvulas de ambos portamuestras, se desconecta de la instalación el que contiene el adsorbente, y se determina su peso  $G_s$ .

Se conecta nuevamente el portamuestra con adsorbente a la instalación y se introduce con el adsorbente saturado en el baño termostático fijando la temperatura  $T_{ma}$ . Luego de alcanzada dicha temperatura se abre la válvula 3 que permite la entrada de aire al sistema para mantener la presión de saturación  $P_0$  del refrigerante, hasta que expulse todo el refrigerante que no admite, la operación se realiza con la bomba de vacío funcionando. Se cierra la válvula 1, se desconecta el portamuestra 1 de la instalación, y se determina el peso  $G_{max}$  que corresponde al peso del portamuestra1 mas el adsorbente con el refrigerante retenido en el a la presión y temperatura establecidas.

Se vuelve a conectar el portamuestra 1 a la instalación se introduce en el baño termostático fijando la temperatura  $T_{max}$ . Luego de alcanzada dicha temperatura, se abre la válvula 1 y se mantiene la presión de condensación  $P_k$  del refrigerante a través de la válvula 3 hasta que termine de desorber. Se cierra nuevamente la válvula 1, se desconecta de la instalación el portamuestra 1 con el adsorbente, se determina su peso  $G_{min}$  que corresponde al peso del portamuestra 1 con el adosrbente y el refrigerante retenido en la nueva condición de temperatura y presión. Con esta operación termina el procedimiento.

Al determinar el valor de las concentraciones se puede conocer la cantidad de refrigerante adsorbido y desorbido durante el ciclo de refrigeración por adsorción. Esto permite realizar una evaluación cualitativa de los distintos pares refrigerantes que se deseen investigar.

La concentración máxima  $M_{max}$  corresponde a la concentración al culminar el proceso de adsorción y se determina mediante la ecuación 3:

$$M_{max} = \frac{G_{max} - G_t}{G_{as}} \text{ (kg de adsorbato/kg adsorbente)} \quad (3)$$

La concentración mínima  $M_{min}$  corresponde a la concentración luego de culminado el proceso de desorción y se determina mediante la ecuación 4:

$$M_{min} = \frac{G_{max} - G_t}{G_{as}} \text{ (kg de adsorbato/kg adsorbente)} \quad (4)$$

La concentración de trabajo  $M_{trab.}$  es la que define el mejor par adsorbente/refrigerante, ya que permite obtener la cantidad de refrigerante que se dispone para diseñar el sistema de enfriamiento, y se determina por la diferencia entre las concentraciones máximas y mínimas, ecuación 5.

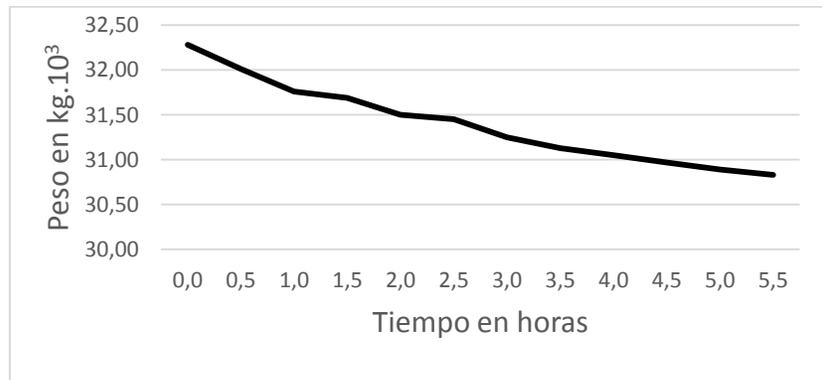
$$M_{trab} = M_{max} - M_{min} \text{ (kg adsorbato /kg adsorbente)}$$

### **Resultados y estudio de caso**

Se reportan investigaciones con diferentes adsorbentes y refrigerantes como el HFC134A cuya fórmula es  $\text{CH}_2\text{FCF}_3$ , el HFC404A constituido por una mezcla zeotrópica de  $\text{CHF}_2\text{CF}_3$  (44%)+ $\text{CH}_2\text{FCF}_3$  (4%)+ $\text{CH}_2\text{FCF}_3$  (52%), metanol y muchos otros, <sup>(11)</sup> en este trabajo se evalúa el comportamiento del refrigerante HFC410A ya que este refrigerante fue recientemente desarrollado, y existe escasa información sobre el mismo para su uso en sistemas de enfriamiento por adsorción.

En este caso se determinará la cantidad de HFC410A que adsorbe y desorbe el carbón activado ACX1 que se importa para filtrado en el proceso de fabricación de ron, del cual se dispone de suficiente cantidad para usarlo en un prototipo de refrigerador solar por adsorción que puede ser utilizado para la fabricación de hielo. Se establece una temperatura del evaporador de  $-3^\circ\text{C}$ , para el HFC410A corresponde una presión de saturación de 0,72 MPa.

Inicialmente se realiza el secado del carbón, colocando el portamuestra con el carbón en el horno a 115°C durante 5,5 horas. En la figura 3 se observa la variación del peso con el tiempo, lo que denota la pérdida de humedad.



**Fig. 3-** Curva experimental de secado del carbón

El peso del adsorbente seco se calcula aplicando la ecuación 2, para el estudio de caso se tiene:

$$G_t = 0,59805 \text{ kg} \quad \text{y} \quad G_m = 0,56722 \text{ kg}$$

$$G_{as} = 0,59805 \text{ kg} - 0,56722 \text{ kg}$$

$$G_{as} = 0,03083 \text{ kg de adsorbente seco}$$

Cálculo de la temperatura de condensación. Considerando  $T_{ma} = 30^\circ\text{C}$  y  $\Delta T = 10^\circ\text{C}$ , se tiene:

$$T_k = 30^\circ\text{C} + 10^\circ\text{C} = 40^\circ\text{C}$$

Para determinar la concentración de saturación  $M_s$ , primeramente se calcula el HFC410A adsorbido, que resulta de la diferencia de peso entre el portamuestra con el adsorbente saturado que resultó ser  $G_s = 0,62947\text{kg}$ , y el peso del portamuestra con el adsorbente seco ya calculado, que para el caso que se investiga es:

$$G_s - G_t = 0,62947\text{kg} - 0,59805 \text{ kg} = 0,03142 \text{ kg de adsorbato}$$

Luego la concentración de saturación se calcula por la ecuación 6:

$$M_s = \frac{G_s - G_t}{G_{as}} \text{ kg de adsorbato/kg de adsorbente} \quad (6)$$

$$M_s = \frac{0,03142}{0,03083} \text{ kg de adsorbato/ kg de adsorbente}$$

$$M_s = 1,01914 \text{ kg de adsorbato/ kg de adsorbente}$$

La concentración máxima a temperatura ambiente que se alcanza durante el proceso de adsorción en las condiciones impuestas al ciclo de refrigeración, se calcula por la ecuación 7, para lo cual se requiere determinar el refrigerante retenido en esas condiciones, para ello se determina el peso del adsorbente más el adsorbato retenido en él más el peso del portamuestra, que resultó ser  $G_{max} = 0,062864 \text{ kg}$  de modo que el adsorbato retenido se calcula por:

$$G_{max} - G_t = 0,62864 \text{ kg} - 0,59805 \text{ kg} = 0,03059 \text{ kg de adsorbato}$$

Lo cual significa que  $0,03059 \text{ kg}$  de refrigerante quedan retenidos en el carbón activado.

La concentración máxima se calcula por la ecuación 7.

$$M_{max} = \frac{G_{max} - G_t}{G_{as}} \text{ kg de adsorbato/kg de adsorbente} \quad (7)$$

Sustituyendo los valores se obtiene:

$$M_{max} = \frac{0,03059}{0,03083} \text{ kg de adsorbato/ kg de adsorbente}$$

$$M_{max} = 0,99221 \text{ kg de adsorbato/ kg de adsorbente}$$

La concentración mínima a la temperatura del generador que se obtiene al final de la desorción se calcula por la ecuación 8, para determinarla se fija la presión de condensación  $P_k = 2,32 \text{ MPa}$  que se define previamente para el ciclo de refrigeración, y se marca en el manómetro. El peso del adsorbente más el refrigerante retenido para estas condiciones más el peso del portamuestra, resultó ser  $G_{min} = 0,60874 \text{ kg}$ , luego el refrigerante retenido para estas condiciones se calcula por:

$$G_{min} - G_t = 0,60874 \text{ kg} - 0,59805 \text{ kg} = 0,01069 \text{ kg de adsorbato}$$

La concentración mínima entonces se calcula por:

$$M_{min} = \frac{G_{min} - G_t}{G_{as}} \text{ kg de adsorbato/kg de adsorbente} \quad (8)$$

Sustituyendo los valores se obtiene:

$$M_{min} = \frac{0,01069}{0,03083} \text{ kg de adsorbato/kg de adsorbente}$$

$$M_{min} = 0.34674 \text{ kg de adsorbato/ kg de adsorbente}$$

Finalmente se obtiene que la cantidad de refrigerante HFC410A que se puede disponer para producir efecto de enfriamiento, se puede determinar por la diferencia entre la concentración máxima y la mínima bajo las condiciones establecidas para el ciclo.

$$M_{max} - M_{min} = 0,99221 - 0,34674 = 0,64545 \text{ kg de adsorbato/kg de adsorbente}$$

Bajo las condiciones impuestas al ciclo de  $t_0 = -3^\circ\text{C}$ ,  $t_k = 40^\circ\text{C}$  y  $t_p = 90^\circ\text{C}$ , el valor de  $M_{max} - M_{min}$  obtenido fue 0,64545 kg de HFC410A/kg de carbón activado. De modo que para un sistema de refrigeración por adsorción lo más importante no es la cantidad de refrigerante que adsorbe el sólido adsorbente, ni la cantidad que se libera al calentarlo. Lo más importante es la diferencia entre lo que adsorbe y desorbe, ya que esa es la cantidad de refrigerante de la cual se puede disponer para extraer calor en el evaporador del sistema de enfriamiento, ello se explica porque el refrigerante que se mantiene retenido en el adsorbente, no participa en extraer calor del fluido o elemento que se desea enfriar. Para diferentes pares adsorbentes/refrigerantes la literatura reporta escasos pares que logran valores similares de  $M_{max} - M_{min}$  alcanzado en este estudio.

Los resultados de este trabajo se pueden aplicar para el diseño de instalaciones de refrigeración por adsorción, los valores de temperatura que se utilizaron para la fuente fría, la condensación y la generación son los que se usan frecuentemente para este sistema con fuentes renovables de energía, en particular la solar térmica con el empleo de captadores solares planos con una o dos cubiertas de cristal.

## Conclusiones

En procedimiento desarrollado en este trabajo permite de forma satisfactoria, evaluar diferentes pares de adsorbente/refrigerante para obtener las cantidades de refrigerantes

que se adsorbe y desorbe en condiciones de temperaturas en la que operan frecuentemente los sistemas de enfriamiento por adsorción.

El par de trabajo carbón activado ACX1/HFC410A operando en un ciclo de enfriamiento por adsorción con temperatura del evaporador de  $-3^{\circ}\text{C}$ , y temperatura del generador de  $90^{\circ}\text{C}$ , libera  $0,64545\text{ kg}$  de refrigerante por cada  $\text{kg}$  de carbón que se utilice, lo que representa un excelente par para el propósito de producción de hielo y enfriamiento de sustancias a bajas temperaturas para refrigeración o climatización.

## Referencias bibliográficas

1. HASSAN, H. Z. A Solar Powered Adsorption Freezer: A Case Study for Egypt's Climate. *International Journal of Energy Engineering*. 2013. **3**(1), pp 21-29. DOI: 10.5923/j.ijee.20130301.04.
2. YOUNES, Mohamed M., El-Sharkawy Ibrahim I., Kabeeld Abdelnaby., Sahaa Bidyut Baran. A review on adsorbent/adsorbate pairs for cooling applications. *Applied Thermal Engineering*. 2016, **11**(138), pp 1-90. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2016.11.138
3. ELSHENITI, Ahmoud B., Elsamni Osama A., Al-dadah Raya K., Mahmoud Saad., slayed Eman; Saleh Khaled. Clarivate Ananalytis. Book citation idex. *Adsorption Refrigeration Technologies*.2018. pp 72-94. DOI.org/10.5772/intechopen.73167
4. SARTARELLI, Andres; Cyrulies Ernesto; Echarri Rodolfo; Vera Sergio; SansonInna. Método para la determinación de parámetros de adsorción del par metanol-carbón activado utilizado en sistemas de refrigeración solar. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*.2012. **16**. Impreso en la Argentina. ISSN 03 29-5184
5. WU, Jun W.; Madani S. Hadi; BiggsMark; Pendleton Phillip; Chen Lei; Eric J. Hu. Characterizations of Activated Carbon–Methanol Adsorption Pair Including the Heat of Adsorptions. *J. Chem. Eng. Data*. 2015, **60**, pp 1727–1731. DOI: 10.1021/je501113y
6. RUBIO Guerra M. *Diseño y construcción de una instalación para determinar las isóteras de pares de trabajo para sistemas de enfriamiento por adsorción*. Trabajo de

Diploma. Facultad de Ingeniería Mecánica e Industrial. Universidad de Oriente.Cuba.2018.

7. MAJD, Ali. *Thermodynamic Optimaztion and Electromagnetic Control of the Adsorption Prosses in the Refrigeration Technology*. Dissertation Doktoringenieur. Fakultatat fur Maschinenbau der TecnischenUniversitatvllmenau. Germany. 2018.

8. SHMROUKH, Ahmed N., Hamza Ahmed Ali; Shinichi Okawara. Adsorption working pairs for adsorption cooling chillers: A review based on adsorption capacity and environmental impact. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*.2015. **50**, pp 445–456

9. ELSAYED, A. M., Ahmed A. Askalanyc, Andrew D. Sheaa, Hassan J. Dakkamad, Saad Mahmoudd, Raya Al-Dadahd, WaseemKaialyf A.; State of the art of required techniques for employing activated carbon in renewable energy powered adsorption applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017. **79**, pp. 503-519.

10. ALLOUHI, A. Kousksou, T. Jamil, A. Agrouaz, Y. Bouhal, T. Saidur, R. Benbassou, A. Performance evaluation of solar adsorption cooling systems for vaccine preservation in Sub-Saharan Africa. *Applied Energy*. 2016. **170**, pp. 232-241.

11. KILIÇ, M., Gönül E., Adsorption characteristics evaluation of R134A and R404A on different adsorbents. *Bulgarian Chemical Communications*.2016. **48**, Special Issue E, pp. 306 – 311.

### **Conflicto de intereses**

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses.

Contribución de los autores:

*Celso Bayardo Bohorquez Escobar*. Realizó los experimentos y el procesamiento matemático de los datos. Confeccionó el informe.

*Reinaldo Guillén Gordín*: Construyó la instalación experimental, describió el método y revisó el informe final.