

SIMULACIÓN NUMÉRICA DE UN REFRIGERADOR POR ADSORCIÓN DE METANOL EN CARBÓN ACTIVO

Farid B. Cortés^{1,*}, Farid Chejne Janna² y Benjamin Rojano³

¹ Grupo de Política y Gestión Tecnológica, Facultad de Ingeniería, Universidad Pontificia Bolivariana, Circular 1 No. 70 – 01, Medellín (Colombia).

² Grupo de Termodinámica Aplicada y Energías Alternativas, Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Minas, Carrera 80 No. 65 - 223, Medellín (Colombia).

³ Laboratorio de ciencia de los Alimentos, Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ciencias, Medellín.

* Autor al que debe dirigirse la correspondencia: fbcortes@gmail.com

RESUMEN

Un modelo matemático no estacionario fue utilizado para describir el proceso de adsorción y desorción de metanol en carbón activado. Este modelo de carácter fenomenológico conformado por los balances de materia, energía y cantidad de movimiento en coordenadas cilíndricas se discretizó en el espacio por el método de volúmenes finitos, utilizando la aproximación de un esquema de diferencia central y upwind de primer orden para los términos difusivos y convectivos, respectivamente, bajo un plataforma FORTRAN 90. Los resultados obtenidos de la simulación fueron validados satisfactoriamente con información experimental obtenida de datos de pruebas de campo y con datos reportados en la literatura, presentando errores inferiores al 1.6% para cada ciclo. El modelo permite obtener los perfiles de temperatura, presión, densidad y velocidad del gas en dirección radial como también la temperatura del sólido y la cantidad adsorbida (o desorbida) de metanol en el lecho de carbón activado, durante las etapas de adsorción / evaporación y desorción / condensación.

Palabras Clave: Carbón activo, Metanol, Refrigeración por adsorción, Modelamiento matemático.

1. INTRODUCCIÓN

Los sistemas de refrigeración se desarrollaron a partir del siglo XVIII para la preparación y conservación de alimentos, como carnes, bebidas y confituras; el almacenamiento y la distribución de alimentos; el uso en procesos industriales, y en el acondicionamiento de aire para lograr una temperatura agradable. Para suplir las necesidades de refrigeración en zonas sin electrificación se propone una tecnología limpia basada en el aprovechamiento de la energía solar y en la utilización de sustancias que no generan impacto ambiental. Se trata de la refrigeración por adsorción en carbón activado la cual es un tipo particular de refrigeración que presenta ciclos similares a los sistemas convencionales, siendo reemplazada la compresión por una etapa adicional de adsorción-desorción (adsorbedor),

en donde se reemplazan las partes mecánicas (compresor) de los refrigeradores convencionales [1].

Una gran cantidad de estudios acerca de modelos matemáticos de sistemas de refrigeración por adsorción de metanol en carbón activo a presión constante en el lecho han sido reportados por Li et al. [2], Luo et al. [2]. Estos modelos matemáticos constan de balances de materia y energía acoplados.

En este artículo, un modelo matemático de presión no uniforme de base fenomenológica fue desarrollado, en el cual las ecuaciones de materia, energía, y cantidad de movimiento en coordenadas cilíndricas. Los resultados obtenidos en el ciclo de adsorción y desorción fueron validados satisfactoriamente con datos reportados en la literatura [3] y obtenidos experimentalmente. Los errores obtenidos fueron inferiores al 1.6% en cada ciclo. El principal objetivo de este trabajo es analizar, explicar y predecir la transferencia y transporte de calor, materia y transporte en el refrigerador por adsorción de metanol en carbón activo.

2. MODELAMIENTO DEL REFRIGERADOR

El generador está constituido por tres cilindros concéntricos. En el cilindro interior de radio ($r = a$) fluye un líquido térmico el cual transfiere al lecho la energía necesaria para la desorción, en el cilindro intermedio ($r = b$) se encuentra confinado el lecho de carbón activado. Por último en el conducto exterior ($r = c$) fluye el adsorbato del generador al condensador para la etapa de desorción y del evaporador al generador en la etapa de adsorción [4] (ver Figura1).

Para modelar el sistema del generador se hicieron las siguientes suposiciones:

- El vapor está distribuido uniformemente a lo largo del generador
- El adsorbato se comporta idealmente en la fase gaseosa.
- Toda partícula adsorbida permanece fija, no existe migración.
- El equilibrio térmico es asumido entre la fase adsorbida y el adsorbente (no hay resistencia a la transferencia de calor entre las dos fases) “esta fase es llamada fase sólida”.
- El adsorbente tiene un tamaño de partícula definido y uniforme para el lecho.

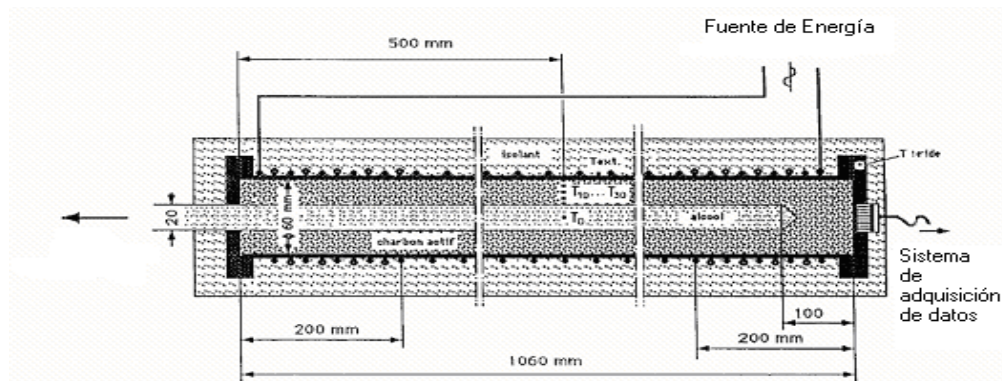


Figura 1. Diagrama del generador

2.1 BALANCE DE MATERIA

El modelo matemático desarrollado para predecir el comportamiento de la adsorción de metanol en un lecho de carbón activado se realizó en dirección radial para el cilindro interno (ver Figura1). El balance de materia está constituido por tres términos: la acumulación de materia en los espacios porosos (fase gaseosa), más la acumulación de metanol en el sólido (material adsorbido o desorbido) y el termino de transporte por convección en dirección radial [4].

$$\varepsilon \frac{\partial C_g}{\partial t} + (1-\varepsilon) \rho_s \frac{\partial C_g^*}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial r} (C_g v r) = 0 \quad (1)$$

Dado a que en el balance de materia se ve involucrada la cantidad de materia adsorbida o desorbida en cada instante “ q ” para la sorción, se debe involucrar la dinámica para la pareja adsorbato/adsorbente. Para esto se plantea una cinética de adsorción [2] gobernada por una fuerza impulsora lineal entre la cantidad adsorbida en el equilibrio (ecuación de Dubinin-Asthakov) a temperatura, presión del sistema y cantidad de la fase adsorbida:

$$\frac{dq}{dt} = \left[(15 D_0 / r^2) \exp(-E_a / RT) \right] (C_{geq}^* - q) \quad (2)$$

Los términos que aparecen en la ecuación (2) son llamados coeficientes de transferencia de masa, alguno parámetros tales como $15 D_0 / r^2$, $-E_a / RT$ son obtenidos por validación experimental [2].

La relación existente a una temperatura y presión dada y entre la cantidad de gas adsorbido C_{geq}^* es la cantidad adsorbida en equilibrio y se obtiene por medio de la ecuación Dubinin-Asthakov (D-A),

$$C_{geq}^* = C_{g \max}^* \exp \left[b_1 \left(\frac{T_c}{T_{sat}} - 1 \right)^a \right] \quad (3)$$

Donde, $C_{g \max}^*$ es la cantidad máxima adsorbida por el carbón a unas condiciones de presión y temperatura del sistema, b_1 y a son parámetros dados por propiedades intrínsecas del carbón del carbón llamadas constantes estructurales del carbón activado junto con su pareja adsortiva.

2.2 BALANCE DE ENERGÍA

Los balances de energía resultantes para cada una de las fases son:

Fase vapor

El balance de energía está conformado por la acumulación de energía en la los espacios porosos presentes en el lecho empacado de carbón activado, el segundo término del lado izquierdo es el transporte convectivo de energía por flujo de metanol en dirección radial. En el lado derecho del balance se presenta el transporte de energía por conducción de la fase analizada en dirección radial, más la transferencia de calor existente entre las fases sólida y vapor, respectivamente [4]. Se

completa el balance de energía sumando el término de expansión de la fase de vapor en el lado derecho de la ecuación, el cual en ningún trabajo de modelado del generador lo han considerado.

(4)

Fase Sólida

El balance de energía para la fase sólida está conformado por el término de acumulación de energía presente en el carbón activado y en la fase condensada de metanol (material adsorbido). Los términos del lado derecho de la ecuación presentan el transporte de calor por conducción en dirección radial y la transferencia de calor entre las dos fases coexistentes dentro del lecho, respectivamente [4].

$$\rho_s \frac{\partial (u_c + qu_{ga})}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(K_2 r \frac{\partial T_c}{\partial r} \right) - ha (T_c - T_g) \quad (5)$$

2.3 BALANCE DE CANTIDAD DE MOVIMIENTO

El transporte de gas al interior del lecho se origina por gradientes de presión [5] durante las etapas de adsorción y desorción. Por lo tanto este transporte convectivo puede ser descrito por la ley de Darcy.

$$v = - \frac{K_D}{\mu} \left(\frac{\partial P}{\partial r} \right) \quad (6)$$

Donde K_D es la constante de permeabilidad del lecho y está definida mediante una relación entre la porosidad y diámetro medio de los poros.

3. RESULTADOS DEL MODELO MATEMATICO Y ANALISIS

El modelo matemático de adsorción y desorción de metanol en carbón activado se discretizó en el espacio por el método de volúmenes finitos [6], utilizando la aproximación de un esquema de diferencia central para representar la conducción térmica del gas y del sólido, y para los términos convectivos masicos y energéticos se utilizó el esquema upwind de primer orden para computar los valores para cada una de las caras para el volumen de control analizado.

Al discretizar los balances de materia y energía en el espacio, se origina un sistema de ecuaciones diferenciales ordinarias no lineales. Este conjunto de ecuaciones diferenciales se solucionaron usando la subrutina "DIVPAG". Esta subrutina utiliza el método de Adams–Moulton o el método de Gear, para solucionar problemas de valores iniciales para ecuaciones diferenciales ordinarias. Para tener un sistema totalmente definido se hace uso de una serie de ecuaciones complementarias para el cálculo de propiedades físicas del material adsorbente y del adsorbato, isoterma de adsorción, entre otros.

3.1 RESULTADOS

En la Figura 2 se observa la evolución en el tiempo de la densidad del gas, la temperatura de la fase sólida y en la Figura 3 la cantidad absorbida y la velocidad del gas. La densidad del gas en el lecho disminuye rápidamente debido a que la velocidad de adsorción es mucho mayor que el flujo de metanol que entra al lecho de carbón activado precedente del evaporador (Ver Figura 2a). A medida que transcurre el tiempo, el carbón va perdiendo la capacidad de adsorción, por lo tanto la densidad del gas en el lecho va incrementando, hasta lograr el valor las condiciones del evaporador.

En la Figura 2b se presenta la evolución de la temperatura para la fase sólida dentro del lecho. La temperatura se incrementa inicialmente, debido a que la velocidad de adsorción es mayor que la transferencia de calor o pérdidas de energía del sistema, pero a medida que transcurre el tiempo los mecanismos involucrados en el transporte y transferencia de energía en cada una de las fases van tomando un papel importante, dejando en un segundo plano a la velocidad de adsorción, debido a que el carbón activado va perdiendo la capacidad de adsorción.

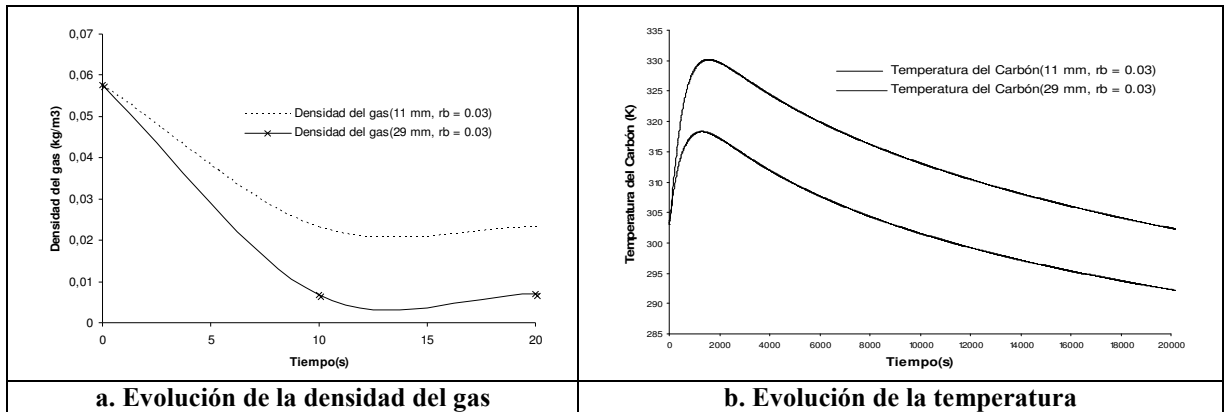


Figura 2. Evolución en el tiempo de la densidad del gas y la temperatura de la fase sólida.

En la Figura 3a se observa como varía la cantidad de metanol adsorbido en el carbón activado en función del tiempo. Se evidencia una mayor cantidad adsorbida de metanol en carbón activado a unas condiciones de temperatura y presión definidas para el nodo inicial (radio 11 mm) que para el nodo final (radio 29 mm), puesto que para la posición radial de 11 mm la temperatura es menor que el resto del generador, además de ser el que entra en contacto directo con una mayor cantidad de metanol procedente del evaporador.

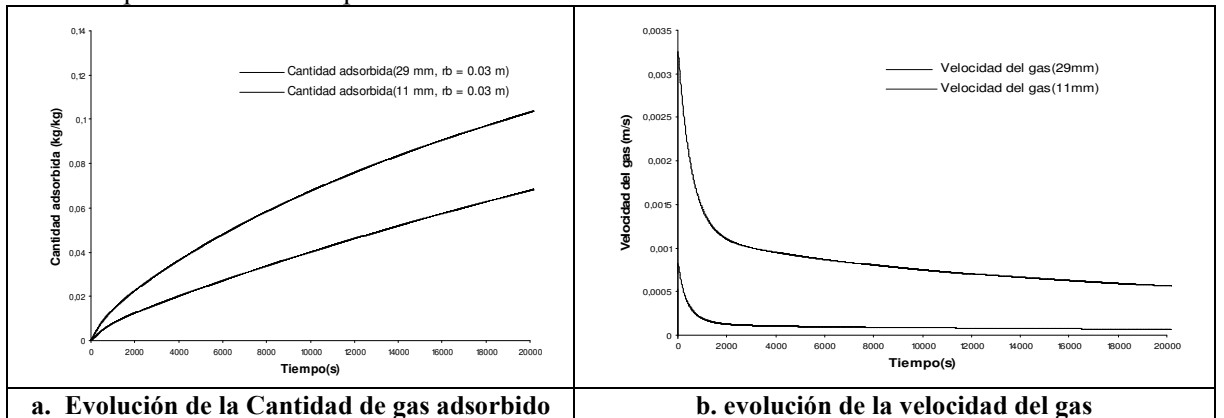


Figura 3. Evolución en el tiempo de la cantidad absorbida y la velocidad del gas

Según la Figura 3b la velocidad del gas dentro del lecho disminuye conforme avanza la posición radial, dado a la dependencia del perfil de presión dentro del lecho. La velocidad inicialmente se incrementa debido a que el gradiente de presión es muy elevado (fuerza impulsora para el transporte de material), a medida que transcurre el tiempo dentro del proceso de adsorción los gradientes de presión van disminuyendo, para lo cual el transporte o la velocidad dentro del lecho se ve afectada.

VALIDACIÓN

En la Figura 4 se comparan los datos teóricos obtenidos con el modelo matemático desarrollado para el proceso de adsorción y los datos experimentales reportados por Luo et al. [3]

Los datos requeridos por el simulador son reportados por Luo et al. [3], aunque la información es limitada. Por tal motivo existen diferencias entre los datos teóricos y experimentales. Sin embargo el modelo desarrollado en este artículo presenta errores inferiores al 1.6% y es mucho más preciso que los reportados en la literatura [1-3].

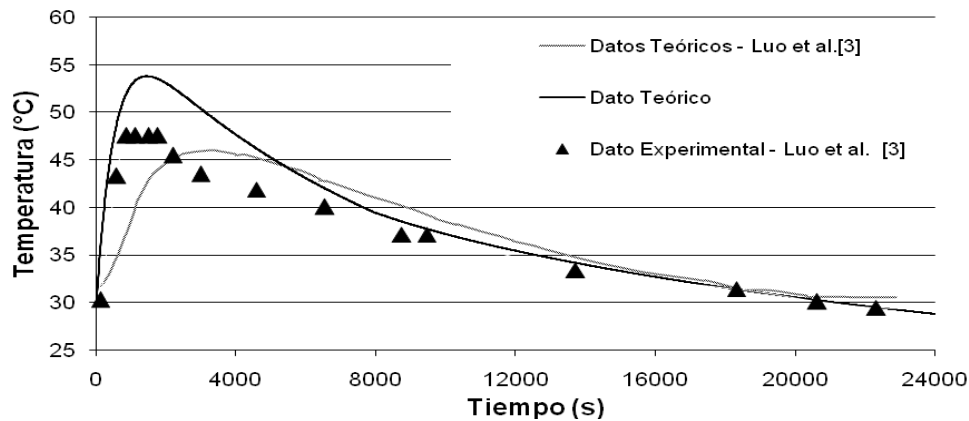


Figura 4. Validación de los datos teóricos y experimentales [3].

CONCLUSIONES

Se ha desarrollado un modelo matemático no estacionario bifásico de carácter fenomenológico en el cual se encuentran acopladas las ecuaciones de balance de materia, energía y cantidad de movimiento en coordenadas cilíndricas para el lecho de carbón activado contenido en el generador, que utiliza como pareja adsorbtiva el par metanol/carbón activado.

El modelo al ser de base fenomenológica permite analizar diferentes parejas adsorbtivas, configuraciones y formas de operación bajo la misma estructura matemática y algorítmica, lo que imparte características de robustez y versatilidad

BIBLIOGRAFIA

1. Anyanwu E. E. Review of solid adsorption solar refrigerator I: an overview of the refrigeration cycle. *Energy Conver. Manag.* 2003. 44: 301.
2. Li M. et al. Development of no valve solar ice maker. *Appl. Therm. Eng.* 2004. 24 (5): 865-872.

3. Luo L.; Tondeur D. Transient thermal study of an adsorption refrigerator machine. *Adsorption*. (2000) 6: 93-104.
4. Cortés F.B. et al. Mathematical model of the sorption phenomenon of methanol in activated coal. *Energy Conver. Manag.* 2009. 50: 1295-1303.
5. Kasta, W., Hohenthanner, C-R. Mass Transfer Within the Gas-Phase of Porous Media. *Int. J. Heat Mass Transf.* (2000) 43: 807-823
6. Versteeg, H. K.; Malalasekera, W. (1995) An Introduction to Computational Fluid Dynamics, The Finite Volume Method. 1st edition. New York : Longman Scientific & Technical.