

Tipo de artículo: Artículo original

Temática: Matemática computacional

Recibido: 10/02/2013 | Aceptado: 21/11/2013 | Publicado: 10/12/2013

Programa informático para la simulación de plantas de separación de gases con membranas de zeolita

Software for the simulation of gases separation instalations with zeolite membranes

Ing. Yoenia M. Martínez Díaz¹, Dr. Carlos R. González González², MSc. Osmar Leyet Fernández¹, Dr. Omar J. Ochoa Rodríguez²

¹Universidad de las Ciencias Informáticas, MES. Autopista de San Antonio de los Baños, Km. 2½, Torrens, Municipio Boyeros, La Habana, Cuba. {[ymartinezd](mailto:ymartinezd@uci.cu), [oleyet](mailto:oleyet@uci.cu)}@uci.cu

² Instituto de Cibernética, Matemática y Física, CITMA. 15 # 551, entre C y D, Vedado, CP 10400, La Habana, Cuba. {[cgonzales.omar](mailto:cgonzales.omar@icimaf.cu)}@icimaf.cu

*Autor para la correspondencia: ymartinezd@uci.cu

Resumen

La simulación de los procesos de separación de gases es un campo muy importante del trabajo científico, ya que tiene una incidencia significativa en las tecnologías químicas relacionadas con la refinación de petróleo, la petroquímica, la química fina, la obtención de combustibles gaseosos (metano, gas sintético e hidrógeno) y la biotecnología, entre otras actividades económicas. En este trabajo se presenta un programa informático que simula el proceso de separación de gases usando membranas de zeolita en varias configuraciones, el mismo está basado en un modelo matemático que describe el procedimiento en cuestión, a través de ecuaciones diferenciales y operaciones algebraicas y de integración, por lo que se hace necesario utilizar un conjunto de métodos numéricos ya sea de integración, de obtención de raíces o de solución de ecuaciones diferenciales de primer orden. Este programa da solución a la modelación matemático-computacional de tres de los esquemas tecnológicos clásicos para la separación de gases con membranas de propiedades adsorptivas.

Palabras clave: algoritmo, membranas, separación de gases, simulación, software.

Abstract

The simulation of gases separation processes is a very important field of the scientific work; it affects directly the chemical technologies related to petroleum refining, petrochemical, fine chemistry, gaseous fuels (methane, synthetic gas and hydrogen) and biotechnology, among other economic activities. This paper, presents an important tool for the simulation of gas separation processes using zeolite membranes in several configurations. The tool is based on a mathematical model using differential equations, algebraic operations and integration processes, so it is necessary to apply numerical methods to solve the mathematical model, which brings a higher complexity level to the general algorithm. This software is the solution for the mathematical model of three of the classic technological schemas for gases separation using membranes with adsorptive properties.

Keywords: *algorithm, gas separation, membrane, simulation, software.*

Introducción

La simulación de procesos tecnológicos permite crear y evaluar nuevas tecnologías en la mesa de trabajo, con lo cual se logra el doble propósito de asegurar una mayor eficiencia y robustez de las instalaciones con un empleo mínimo de recursos. Para simular un ente o una tecnología hay que reducirlos a un modelo físico o lógico que refleje la esencia del funcionamiento y de la estructura del objeto, y posteriormente expresar el comportamiento o las propiedades del objeto mediante un algoritmo matemático.

La simulación de los procesos de separación de gases es un campo muy importante del trabajo científico, ya que tiene una incidencia significativa en las tecnologías químicas relacionadas con la refinación de petróleo, la petroquímica, la química fina, la obtención de combustibles gaseosos (metano, gas sintético e hidrógeno) y la biotecnología, entre otras actividades económicas. (González, González, y otros, 2012)

La simulación de los procesos de separación de gases es provechosa para los diseñadores de plantas, los formadores de personal especializado y los científicos que desarrollan materiales con adsorción selectiva. El disponer de software que permita simular una planta versátil con parámetros variables a voluntad, implica un ahorro considerable de tiempo y de recursos materiales en experimentos de optimización y evita los gastos y riesgos de la formación de operadores directamente en las plantas, los cuales no tienen una idea previa de las situaciones que se les pueden presentar en la práctica.

En particular, los procesos de separación de gases por vaivén de presión de tipo PSA¹ y VSA², han tenido un gran desarrollo en las últimas décadas porque presentan ventajas indudables frente a los métodos basados en la destilación a medianas y pequeñas escalas (González, 2012). Sin embargo, al desarrollarse las membranas nanoporosas y zeolíticas, se abrió una nueva perspectiva a las tecnologías de separación, porque se hacía posible compactar en alto grado las voluminosas instalaciones basadas en columnas cargadas de zeolita, en baterías de membranas con igual eficacia. (González, González, y otros, 2012)

En el contexto de la presente investigación, se denomina “membranas” a las barreras delgadas entre dos fases, a través de las cuales, bajo la acción de una fuerza (normalmente una diferencia de presión o de concentración), tiene lugar un transporte (Benito, 2004). Los procesos capilares, fenómenos de adsorción y la carga superficial de estas membranas juegan un papel importante en las retenciones y separaciones. Estos dispositivos se introdujeron en procesos de separación hace más de 40 años y desde entonces han experimentado grandes avances (Bhave, 1990).

Son muchos los sistemas informáticos desarrollados que implementan algoritmos de separación de gases a escala internacional, no obstante, teniendo en cuenta la situación económica por la cual atraviesa el país, en lugar de invertir en un sistema para este tipo de menesteres, se quiere contar con un sistema de producción nacional, considerando que se cuenta con los materiales necesarios para ello.

El presente trabajo tiene como objetivo dar a conocer un algoritmo matemático-computacional que permite la simulación de los procesos de separación de mezclas de dos gases usando diversas configuraciones de membranas de zeolita.

¹ PSA (Pressure Swing Adsorption). Adsorción por vaivén de presión.

² VSA (Vacuum Swing Adsorption). Adsorción por vaivén de vacío.

Metodología computacional

Para el establecimiento del algoritmo se partió de un modelo de gas ideal, isotérmico, con dos componentes, donde ocurren los procesos sin una gran magnitud de los efectos térmicos ni cambios de fase. La descripción matemática es determinista y continua, por lo cual se plantea la solución completamente en base a ecuaciones diferenciales.

El flujo de las especies contenidas en la mezcla a la salida de la membrana dependerá de las presiones parciales, de sus derivadas respecto al tiempo y del tiempo a la entrada de las membranas. También dependerá de la temperatura.

En el modelo de planta diseñado no se tienen en consideración las caídas de presión y las elevaciones de temperatura que pudieran ocurrir en el proceso. Tampoco se admite la ocurrencia de fugas de gas o las reacciones químicas entre los gases y las partes componentes.

Se tuvieron en cuenta las tres configuraciones de PSA con membranas planteadas por (Bhave, 1990): la de producción de gas refinado puro, la de producción de gas permeado puro y la de producción de gas con recuperación de permeado.

A los efectos de la simulación, se subdividieron estos esquemas en niveles y etapas; y se incluyeron depósitos que sirven de reservorios de productos intermedios para simplificar las ecuaciones diferenciales. En todo caso, es posible llegar a una configuración sin depósitos haciendo tender su volumen a cero (González, 2012).

Las configuraciones se simularon basadas en 12 procesos elementales de producción de gas enriquecido o de purga, mediante expresiones algebraicas o de integración numérica que se obtienen como soluciones de las ecuaciones diferenciales de estos procesos. Las ligaduras entre los procesos elementales serán las cantidades de sustancia en cada depósito y las presiones totales en los mismos.

Teniendo en cuenta que los esquemas tecnológicos para la separación de gases por PSA-VSA en instalaciones con membranas pueden considerarse, a los efectos de la simulación, compuestos por un cierto número de procesos relativamente independientes entre sí aunque ocurren en la práctica de manera simultánea, debido al pequeño espacio de tiempo en que ocurren, al ser conectados sucesivamente producen el efecto deseado (González, 2012).

Se han agrupado en cada proceso, acciones específicas que tienen lugar durante el paso de los gases a través de las diferentes membranas. Del balance de masa se desprenden ecuaciones diferenciales básicas como las que se muestran a continuación referidas al proceso E:

En este proceso se parte de una mezcla gaseosa de fracción molar μ_1 en el depósito D1 que se comprime hasta una presión p_1 y que alimenta a la membrana M. El gas retenido se deja pasar de forma regulada (lineal) hacia el depósito DA y el gas permeado se conduce hacia el depósito D2 elevando su presión desde p_5 hasta p_6 .

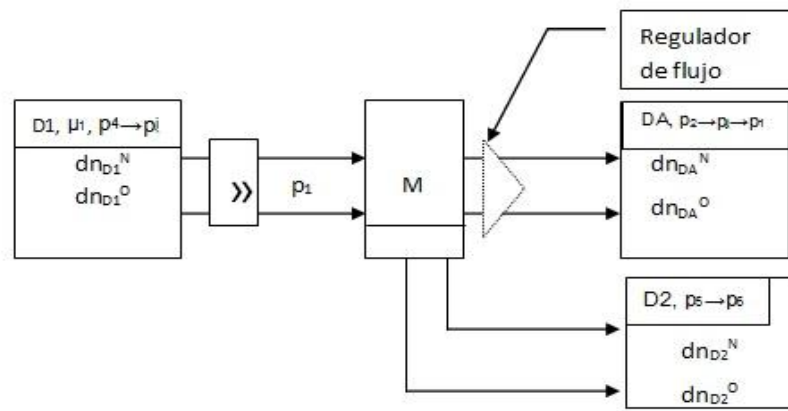


Figura 1 Esquema de transferencias de masa del proceso E.

$$\mu_1 = \frac{n_{D1}^N}{n_{D1}^A} \quad (I)$$

$$-dn_{D1}^N = dn_{DA}^N + dn_{D2}^N \quad (II)$$

$$-dn_{D1}^O = dn_{DA}^O + dn_{D2}^O \quad (III)$$

$$dn_{D2}^N = f^N(p_M^N, p_M^O, t)dt = f_{\mu_1 p_M}^N(t)dt \quad (IV)$$

$$dn_{D2}^O = f^O(p_M^N, p_M^O, t)dt = f_{\mu_1 p_M}^O(t)dt \quad (V)$$

$$\tau = \frac{p_j - p_2}{|p'|} \quad (VI)$$

$$p_M^N = \mu_1 p_1 - \mu_2 (p_5 + (p_6 - p_5) \frac{t}{\tau}) \quad (VII)$$

$$p_M^O = (1 - \mu_1) p_1 - (1 - \mu_2) (p_5 + (p_6 - p_5) \frac{t}{\tau}) \quad (VIII)$$

Donde f^N y f^O , son las funciones parciales de flujo del gas a través de la membrana, que dependen de las presiones parciales de cada uno de los gases al atravesar la misma, así como el tiempo transcurrido en ese proceso.

Para calcular p_6 se parte de las expresiones (IV) y (V) en forma integral, y usando también las ecuaciones (II) y (III) se obtiene:

$$\frac{(p_6 - p_5)V_{D2}}{RT} - \int_0^{\tau} (f_{\mu_1 p_M}^N(t) + f_{\mu_1 p_M}^O(t))dt = 0 \quad (IX)$$

De manera que la presión final de dicho proceso (p_6), se obtiene calculando el cero de la expresión (IX), teniendo en cuenta la dependencia de p_M con respecto a p_6 como evidencian las expresiones (VII) y (VIII), pues p_M se refiere a las presiones parciales a través de la membrana determinadas por p_M^N y p_M^O

Para dar solución a las integrales que se obtienen de estos procesos como solución a las ecuaciones diferenciales, se valoraron varias opciones entre los métodos de integración numérica (Álvarez, y otros, 2007), tratando de obtener un balance entre el error de truncamiento de dichos métodos y la complejidad temporal del algoritmo para su ejecución, atendiendo a ello se seleccionó el método de Simpson.

Para trabajar con las expresiones algebraicas donde se hace necesaria la obtención de raíces, como en la expresión (IX), se valoraron varios métodos (Álvarez, y otros, 2007). El factor que más influyó en la decisión final, fue el hecho de que la mayoría de los métodos valorados hacen uso de las derivadas de la función en cuestión, como los datos de las funciones de flujo f^O y f^N (que son las que generalmente estarán involucradas en este proceso de obtención de raíces) se obtienen de forma tabulada, se hace muy difícil obtener sus derivadas, por lo que se decidió utilizar el método de Bisección, pues aunque converge lentamente al resultado, siempre encuentra la raíz. (Álvarez, y otros, 2007)

Para el trabajo con las ecuaciones diferenciales de primer orden que se obtienen en 3 de los procesos de separación, se decidió utilizar el método de Runge-Kutta de orden 4. (Álvarez, y otros, 2007)

Las funciones de flujo f^O y f^N , a las cuales se ha hecho referencia con anterioridad, son obtenidas a partir de la ejecución de un programa independiente denominado TRANSMOL (González González, y otros, 1999). Este programa ofrece como salida un conjunto de funciones que describen el comportamiento de los gases en el interior de las membranas. Estas funciones son almacenadas en una base de datos en forma de 4 tablas independientes. Se valoró que el algoritmo que se presenta en este trabajo, accediera a dichas tablas cada vez que fuera necesario obtener los valores de estas funciones, ya que la complejidad temporal de este procedimiento, en teoría, no debía ser muy elevada. Sin embargo, la práctica demostró lo contrario. Por tanto se decidió que al inicio de dicho algoritmo, los valores de estas funciones fueran cargadas en memoria en un cubo de datos que recogiera la información referente a las 4 funciones de flujo (f^O y f^N para los procesos de producción y f^{Oinv} y f^{Ninv} para los procesos de purga o limpieza de las membranas).

En general el flujo de los procesos por cada variante tecnológica en cada membrana, se ha organizado de la manera que se muestra en las Figuras 2, 3 y 4.

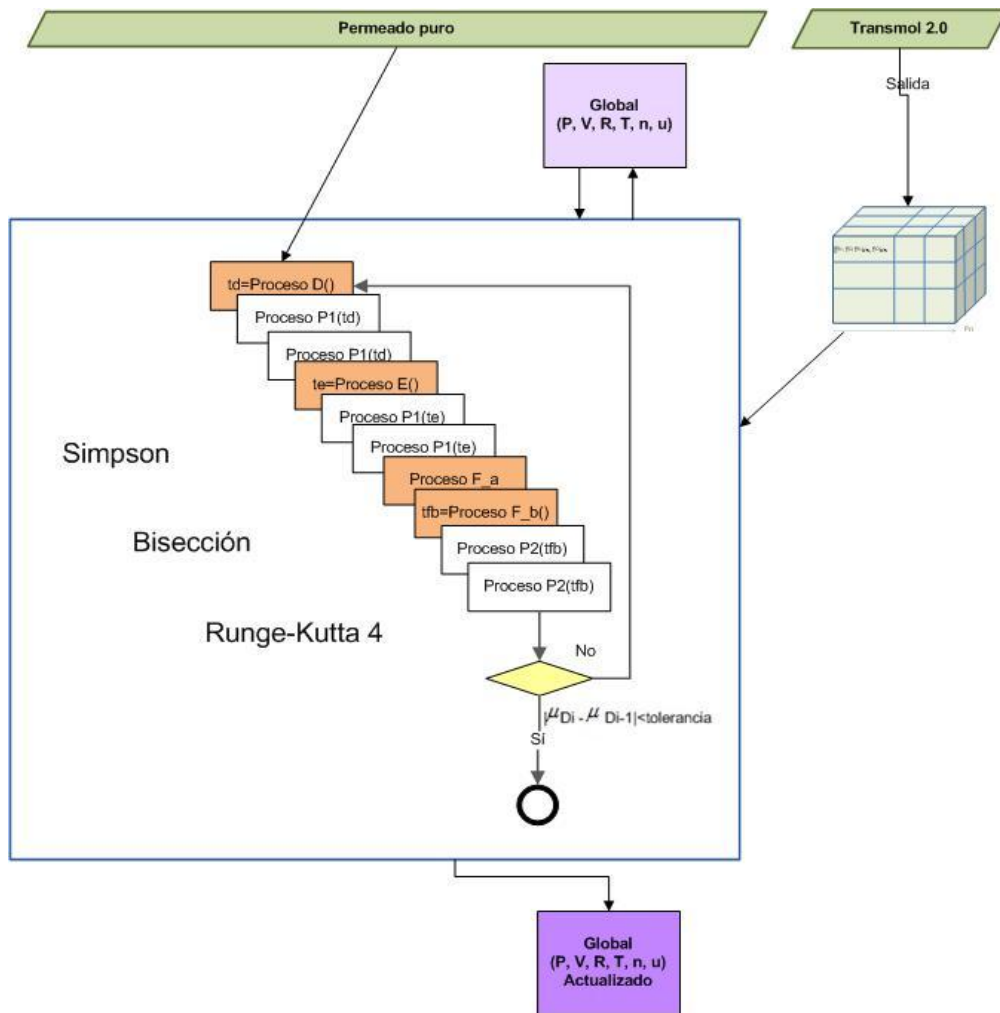


Figura 2 Diagrama de producción de gas "Permeado puro".

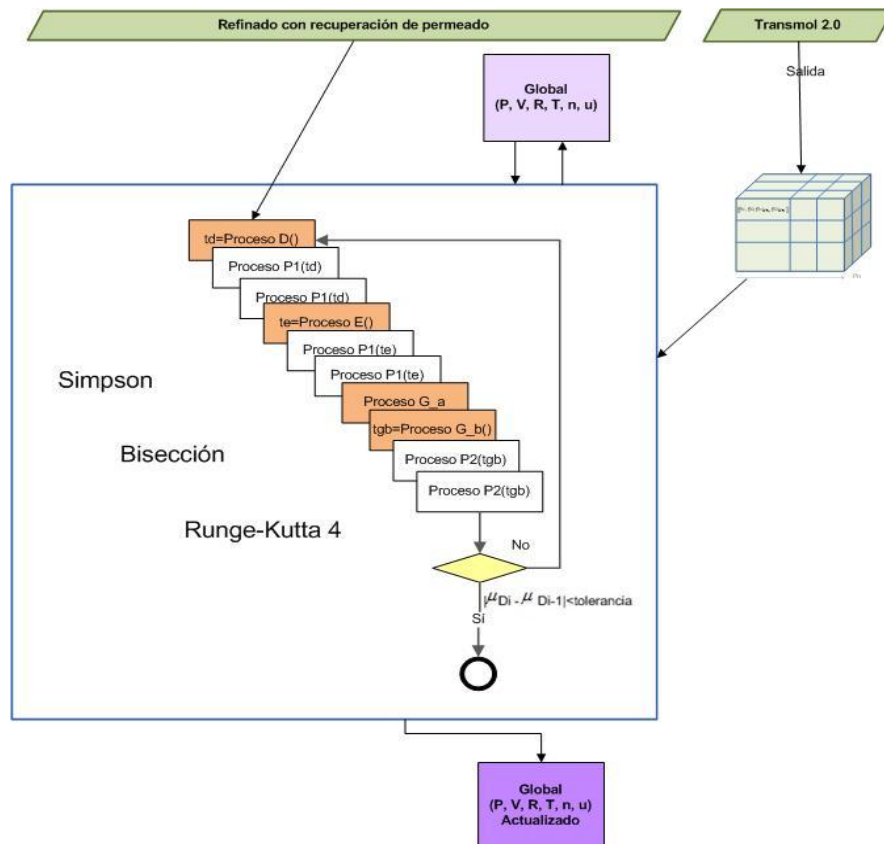


Figura 3 Diagrama de producción de gas "Refinado con recuperación de permeado".

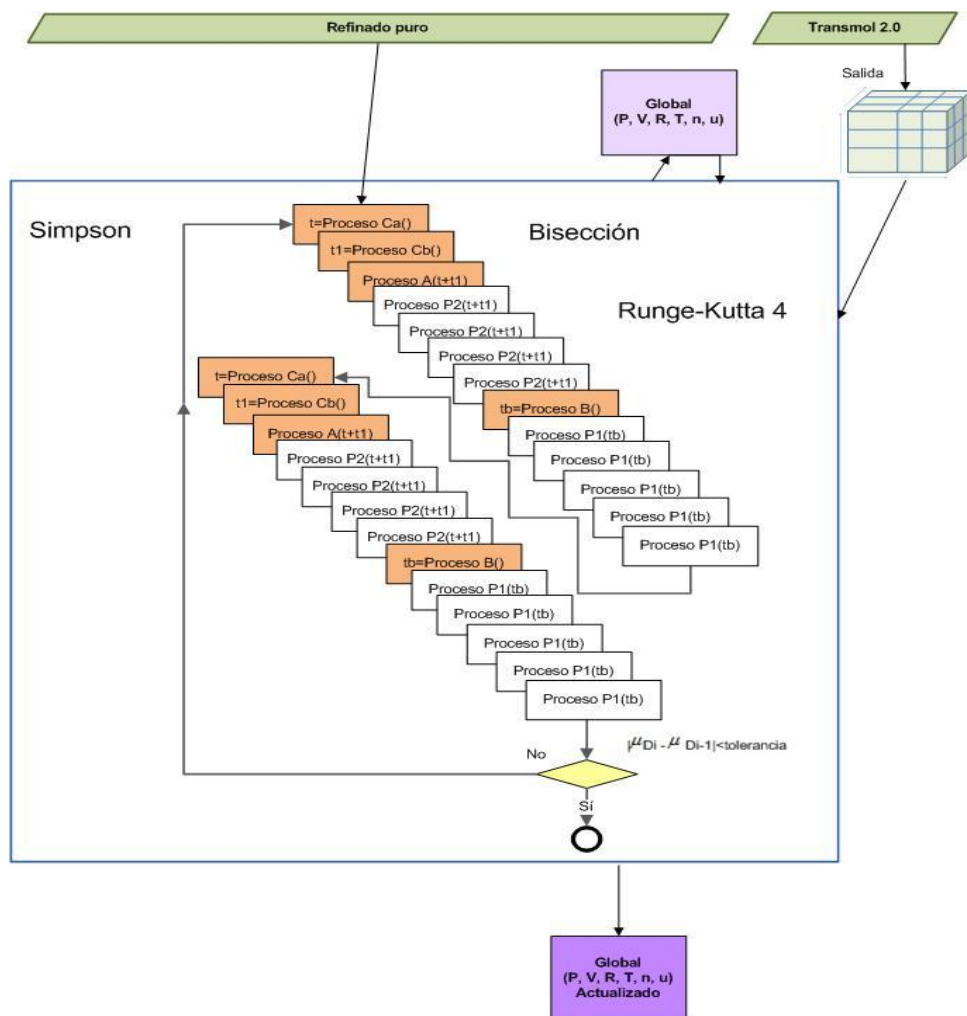


Figura 4 Diagrama de producción de gas "Refinado puro".

El ciclo de ejecución para cada variante se mantendrá activo mientras que la variación de la fracción molar μ_{Di} obtenida por ciclo sea menor que un valor de tolerancia determinado por el usuario.

Resultados y discusión

Basado en el algoritmo de funcionamiento al que se ha hecho referencia anteriormente, se implementó una aplicación de escritorio para la simulación de los procesos de separación de gases en plantas con diversas configuraciones de membranas de zeolita. El programa, que se ha denominado PSAMemb, ha sido elaborado mediante el lenguaje de programación C++, utilizando el entorno de desarrollo QtCreator 2.5, basado en Qt 4.8.2, que puede ser ejecutado sobre sistema operativo LINUX. Para el almacenamiento de los datos persistentes se utiliza el gestor de base de datos PostgreSQL 9.1.

Se decidió hacer uso de Qt para C++, debido a la necesidad de realizar un gran número de cálculos de cierta complejidad, que requieren de determinada precisión en las aproximaciones, sobre todo al aplicar los métodos numéricos que se han presentado anteriormente, teniendo en cuenta que esta combinación de tecnologías ofrece un gran número de librerías especializadas para este propósito. También desde el punto de vista de la interfaz de usuario, ofrece una serie de componentes (por ejemplo, para graficar), que simplifican el trabajo de diseño de las partes del sistema dedicadas al análisis de resultados.

Se realizó un análisis de la complejidad temporal del algoritmo desarrollado y se concluyó que la misma es del orden de $O(n^3)$. Las subrutinas de integración utilizadas tienen complejidad temporal del orden de $O(n)$, las de obtención de raíces también tienen complejidad temporal del orden de $O(n)$, pero en aquellas donde se hace necesario integrar en

medio de un proceso de obtención de raíces, se eleva el tiempo de ejecución de dicho algoritmo a $O(n^2)$. De cualquier forma con el orden de complejidad mencionado se concluyó que el algoritmo es computacionalmente factible.

El programa realiza los cálculos en ciclos sucesivos que simulan secuencialmente los procesos que ocurren en el equipo o planta de membranas, aunque algunos de estos procesos ocurren en realidad de forma paralela, sin embargo los tiempos de ejecución del programa en las pruebas realizadas fueron satisfactorios.

El segmento de programa más consumidor de tiempo es la carga de los datos de las funciones de flujo de la base de datos, lo cual debe ser motivo de optimización en versiones posteriores del algoritmo y programa.

Por último, el examen minucioso de los resultados obtenidos mediante los cálculos con PSAMemb1.1 permitió comprobar que su lógica se ajustaba completamente de forma cualitativa a lo esperado por la aplicación tecnológica de esos procesos. Para estos cálculos se utilizó un juego de funciones analíticas de flujo, variable según el tiempo y las presiones parciales trans-membrana de ambos componentes (también dependientes del tiempo), basadas en la tangente hiperbólica, cuyo comportamiento es similar al esperado en las membranas reales de zeolita.

A continuación se muestra el ejemplo de un experimento realizado con un solo ciclo de ejecución para la variante tecnológica “Permeado Puro”, del cual se refieren los datos iniciales así como los principales resultados obtenidos.

Mezcla: Oxígeno-Nitrógeno

Tipo de experimento: Producción de Permeado puro.

Tabla 1 Relación de presiones por depósito y de procesos por membranas.

Niveles	Etapas	Depósitos / Presiones				Membranas/Procesos en producción o purga		
		DA	D1	D2	D	M1	M2	M3
1	1.1	p_1-p_2	p_3-p_4	p_5	p_D-p_7	D	P1	P1
2	2.1	p_2-p_1	p_4-p_j	p_5-p_6	p_7-p_8	P1	E	P1
3	3.1	p_1	p_j-p_{ii}	p_6-p_9	p_8-p_D	---	---	F(a)
	3.2	p_1	$p_{ii}-p_3$	p_9-p_5	p_D	P2	P2	F(b)

Tabla 2 Datos asociados a un experimento realizado utilizando PSAMemb, basado en el algoritmo descrito, en un solo ciclo de ejecución.

PSAMemb 1.1 - Basado en un algoritmo para simulación de procesos de separación de gases con membranas de zeolita.		
Datos de entrada		
T	203	K
R	8,3145	J/mol
P'	100000	Pa/s
μ_{00}	0,5	%
μ_0	0,5	%
μ_1	0,5	%
μ_2	0,5	%
μ_D	0,5	%
P1	1000000	Pa
P2	800000	Pa
P3	300000	Pa
P5	300000	Pa

Pd	800000	Pa
Pj	900000	Pa
V _{DA}	1	m ³
V _{D1}	1	m ³
V _{D2}	1	m ³
V _D	1	m ³
Resultados		
P4	320439	Pa
P6	311984	Pa
P7	798981	Pa
P8	789475	Pa
P9	311978	Pa
Pi	210255	Pa
Pii	208736	Pa
n liberada a la atmósfera (Oxígeno)	31,2939	Moles
n liberada a la atmósfera (Nitrógeno)	30,6034	Moles
n final de Oxígeno	122,382	Moles
n final de Nitrógeno	195,167	Moles
μD(Nitrógeno)	0,61	%
μD(Oxígeno)	0,38	%
Tiempo de ejecución por ciclo	0,3498	s

De la tabla 2 se pueden obtener varias conclusiones sobre el experimento y sobre el algoritmo en general.

- ✓ En un solo ciclo de ejecución se obtuvo un nivel de pureza de una de las 2 sustancias superior al inicial en un 11%.
- ✓ La configuración de membranas (o variante tecnológica escogida), combinada con las funciones de flujo en dichas membranas seleccionadas en este experimento, favorecen la obtención de nitrógeno con un mayor nivel de pureza.
- ✓ Al conocer la cantidad de moles (n) de cada componente de la mezcla inicial que se obtiene en el depósito final, se hace posible planificar la cantidad de mezcla inicial necesaria para obtener una cantidad específica de un componente determinado.
- ✓ El tiempo de ejecución del algoritmo en un ciclo es de 0,3498 s, lo cual es un resultado favorable teniendo en cuenta el cúmulo de información que se maneja.

Conclusiones

El algoritmo planteado permite la simulación de las instalaciones típicas de PSA con membranas, así como permite sentar las bases para la simulación de plantas versátiles de separación de gases. Aunque se continúa perfeccionando tanto el algoritmo como el sistema que lo implementa, constituye una herramienta útil por la posibilidad de variar los parámetros a voluntad. Su uso implicaría un ahorro considerable de tiempo y de recursos materiales en experimentos de optimización y evitaría los gastos y riesgos de la formación de operadores directamente en las plantas, los cuales no tienen una idea previa de las situaciones que se les pueden presentar en

la práctica. Debido a estas características, el software en elaboración deberá tener interés tanto para tecnólogos como para científicos, lo cual permitirá su comercialización o intercambio mutuamente beneficioso.

Listado de símbolos

T: temperatura del sistema

R: Constante universal de los gases

P': Velocidad de variación de las presiones en el sistema

μ_{00} : Fracción molar de uno de los gases que componen la mezcla en el gas de alimentación.

μ_0 : Fracción molar de uno de los gases que componen la mezcla en el depósito DA.

μ_1 : Fracción molar de uno de los gases que componen la mezcla en el depósito D1.

μ_2 : Fracción molar de uno de los gases que componen la mezcla en el depósito D2.

μ_D : Fracción molar de uno de los gases que componen la mezcla en el depósito D.

P1: Presión inicial en DA.

P2: Presión final en DA.

P3: Presión inicial en D1.

P4: Presión final en D1.

P5: Presión inicial en D2.

Pd: Presión en D.

P6: Valor intermedio o auxiliar de la presión en D2.

P7: Valor intermedio o auxiliar de la presión en D.

P8: Valor intermedio o auxiliar de la presión en D.

P9: Valor intermedio o auxiliar de la presión en D2.

Pi: Valor auxiliar de la presión en D1

Pii: Valor auxiliar de la presión en D1.

P_M: Presión transmembrana.

p_M^N : Presión parcial del gas 1 a la salida de la membrana.

p_M^O : Presión parcial del gas 2 a la salida de la membrana.

V_{DA}: Volumen del depósito DA.

V_{D1}: Volumen del depósito D1.

V_{D2}: Volumen del depósito D2.

V_D: Volumen del depósito D.

f^N : Función de flujo del gas 1 a través de la membrana.

f^O : Función de flujo del gas 2 a través de la membrana.

n: Cantidad de sustancia

dn: Variación de la cantidad de sustancia.

Superíndices: Componente de la mezcla inicial al cual se hace referencia (Gas 1: N, gas 2: O)

Subíndices: Depósito al que se hace referencia (DA, D1, D2, D)

Referencias

- Álvarez, Manuel, Guerra, Alfredo y Lau, Rogelio. 2007. *Matemática numérica*. La Habana : Félix Varela, 2007. 987-959-07-0570-0.

- Aspen Technology, Inc. Aspen Technology. [En línea] <http://www.aspentech.com/products/aspen-adsim.aspx>.
- Baker, Richard W. 2002. *Future Directions of Membranes Gas Separation Technology*. s.l. : America Chemical Society, 2002.
- Benito, J. M., Conesa, A. y Rodríguez, M. A. 2004. *Membranas cerámicas. Tipos, métodos de obtención y caracterización*. s.l. : Boletín de la Sociedad española de Cerámica y Vidrio, 2004. 829-842.
- Benito, J.M., Conesa, A. y Rodríguez, M. A. *Membranas cerámicas. Tipos, métodos de obtención y caracterización*. Madrid : CSIC.
- Bhave, R R. 1990. *Inorganic Membrane Synthesis, Characteristics and Applications*. s.l. : Van Nostrand Reinhold, 1990.
- CiberCuba. 2013. CiberCuba. [En línea] 2013. [Citado el: 30 de Agosto de 2013.] <http://noticias.cibercuba.com/node/4711>.
- Clavería Vila, Pedro Luis, Lozano Serrano, Miguel Angel y Hombrados Sánchez, Andrés. 2001. *Modelización y simulación de plantas criogénicas de separación de aire con HYSYS*. Valencia : I Encuentro Universitario sobre Simulación de Procesos, 2001.
- Coker, David, Prabhakar, Rajeev y Freeman, Benny. 2003. *Tools for teaching gas separation using polymers*. s.l. : Research Triangle Institute, 2003.
- EcuRed. 2013. EcuRed. [En línea] 2013. [Citado el: 30 de Agosto de 2013.] <http://www.ecured.cu/index.php/Zeolita>.
- González González, Carlos R., y otros. *Equipo de producción de aire enriquecido empleando zeolitas naturales*. Ciudad de la Habana : CIPIMM.
- González González, Carlos Ricardo, Bravo López, Yrelis y Navas Conyedo, Edisel. 1999. *Modelo, algoritmo y programa para la simulación de la difusión de mezclas de gases a través de membranas de zeolita*. TRANSMOL. Ciudad de la Habana : ICIMAF-UCI, 1999.
- González González, Carlos Ricardo, Martínez Díaz, Yoenia María y Guevara Tamayo, Islandy. 2012. *Programa de computación para la simulación de una planta industrial de separación de gases en base a membranas de zeolita. Parte II. PROGRAMA PSAMemb 1.1*. Ciudad de la Habana : ICIMAF, 2012. 2012-704.
- González González, Carlos Ricardo, y otros. 2001. *Desarrollo de prototipo para el enriquecimiento de aire en oxígeno in situ por vaiven de presión a partir de las zeolitas naturales*. La Habana : CIPIMM, 2001.
- González González, Carlos Ricardo, y otros. 2012. *Programa de computación para la simulación de una planta industrial de separación de gases en base a membranas de zeolita. parte I. Algoritmo general del programa*. Ciudad de la Habana : ICIMAF, 2012. 2012-652.
- González González, Carlos Ricardo, y otros. 2012. *Programa de computación para la simulación de una planta industrial de separación de gases en base a membranas de zeolita. Parte II. Programa PSAMemb 0.0*. Ciudad de la Habana : ICIMAF, 2012. 2012-656.
- Kaldis, S.P, Kapantaidakis, G.C. y Sakellaropoulos, G.P. 2008. *Simulation of multicomponent gas separation in a hollow fiber membrane by orthogonal collocation — hydrogen recovery from refinery gases*. s.l. : Journal of Membrane Science, 2008.
- Kooijman, Harry, Taylor, Ross y van Baten, Jasper. *The ChemSep/COCO Casebook: Air Separation Unit*.
- Pan-Echeverría, Geovanny, Gaumer-Araujo, Teddy y Pacho-Carrillo, Daniel. 2009. *Simulación y optimización de una planta de separación y estabilización de gas y condensados*. México : s.n., 2009.
- *Practical aspects of dynamic simulation in plant engineering*. Gabriele, Engl, Kroner, Andreas y Pottmann, Martin. 2010. [ed.] S. Pierucci y G Buzzi Ferraris. Germany : Elsevier B. V., 2010. 20th European Symposium on Computer Aided Process Engineering.
- Ruthven, D. M., Farooq, S. y Knaebel, K. S. 1994. *Pressure Swing Adsorption*. New York : VCH Publ., 1994.

- Savéliev, I. V. 1984. *Curso de Física General*. Moscú : Editorial MIR, 1984.
- Scenna, Nicolás J. y otros. 1999. *Modelado, Simulación y Optimización de Procesos Químicos*. 1999. 950-42-0022-2.
- Taylor, Ross, Kooijman, Harry y Walker, Brett. 2011. *Modelling Luyben's Chemical Processes with COCO+ChemSep*. 2011.
- *Using ChemSep, COCO and other modeling tools for versatility in custom process modeling*. van Baten, Jasper, Taylor, Ross y Kooijman, Harry.
- Velázquez Garrido, Martha, González González, Carlos Ricardo y Delgado Diez, Blasa. 2000. *Establecimiento de un método de separación de oxígeno nitrógeno por un sistema VSA*. Ciudad de la Habana : Edición en CD, 2000.