

Características funcionales de membranas vítreas empleadas en la purificación de biogás

MsC. Lianys Ortega Viera e-mail: lortega@quimica.cujae.edu.cu
 Dep. Ing. Química, Fac. Ing. Química, Inst. Sup. Politécnico José Antonio Echeverría (Cujae).

Kizzy Diarelys Ponce Abreu
 Dep. Ing. Química, Fac. Ing. Química, Inst. Sup. Politécnico José Antonio Echeverría (Cujae).

Dra. Susana Rodríguez Muñoz e-mail: susana@quimica.cujae.edu.cu
 C. Est. Ing. Procesos, Fac. Ing. Química, Inst. Sup. Politécnico José Antonio Echeverría (Cujae).

Dra. Elina Fernández Santana e-mail: elina@quimica.cujae.edu.cu
 Dep. Ing. Química, Fac. Ing. Química, Inst. Sup. Politécnico José Antonio Echeverría (Cujae).

MsC. Liuver Bárcenas Pérez e-mail: lbarcen@quimica.cujae.edu.cu
 Vicedecano, Fac. Ing. Química, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría (Cujae).

RESUMEN

La remoción de sulfuro de hidrógeno ($H_2S_{(g)}$) presente en el biogás a partir de membranas vítreas, es un método que muestra resultados satisfactorios a escala de laboratorio. Para ello se emplean 10 membranas con diferentes masas de óxido de zinc ($ZnO_{(s)}$) y diámetros de las partículas de carbón vegetal (Dpc). Es por ello que el objetivo del presente trabajo es realizar la caracterización funcional de las membranas vítreas empleadas en la purificación de biogás. Los resultados indican que la permeabilidad y la difusividad efectiva del $H_2S_{(g)}$ en las membranas vítreas varía con respecto a su composición y características estructurales. Además, mediante el diagrama de Pareto se puede afirmar que tanto la masa de $ZnO_{(s)}$ como el Dpc y el flujo de operación (Qop) influyen significativamente en la remoción de $H_2S_{(g)}$.

Palabras clave: biogás, difusividad efectiva, membranas vítreas, permeabilidad, sulfuro de hidrógeno.

Functional characteristics of vitreous membranes used in biogas purification

ABSTRACT

The removal of hydrogen sulfide ($H_2S_{(g)}$) present in the biogas using vitreous membranes, is a method that has satisfactory results at a laboratory scale. To this end 10 membranes with different masses of zinc oxide ($ZnO_{(s)}$) and particle diameters coal (Dpc) are applied. Therefore, the objective of this work is to perform the functional characterization of vitreous membranes used in the purification of biogas. The results indicate that the permeability and effective diffusivity of $H_2S_{(g)}$ in the vitreous membranes varied with respect to its composition and structural features. In addition, by Pareto diagram it can be shown that the mass of $ZnO_{(s)}$ as well as the Dpc and the operation flow (Qop) significantly influence the removal of $H_2S_{(g)}$.

Keywords: biogas, effective diffusivity, vitreous membranes, permeability, hydrogen sulfide.

INTRODUCCIÓN

Se denominan 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. 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 (Bárceñas 2009).

Los procesos de separación con membranas se clasifican en varios tipos: filtración (diámetros de poro de más de 104 nm), microfiltración (entre 102 y 104 nm), ultrafiltración (entre 1 y 102 nm) y ósmosis inversa (con diámetros de poros menores de 1 nm, entre otros (Benito 2004).

Los requisitos que debe cumplir una membrana son una alta permeabilidad y selectividad, resistencia mecánica adecuada, estabilidad química y térmica en las condiciones de trabajo, baja velocidad de obstrucción, un largo y fiable funcionamiento y una relación costo/producción mejor que otros procesos de separación (Benito 2004).

En la tabla 1 se hace referencia al modo de operación de las membranas teniendo en cuenta la fuerza impulsora.

Tabla 1. Clasificación de procesos con membranas

Fuerza impulsora	Factor de separación	Operación
Presión	Tamaño	Filtración
Presión y concentración	Difusividad o tamaño	Ósmosis inversa
Campo eléctrico	Carga	Electrodialisis
Concentración	Carga o tamaño	Diálisis
Otras	Difusividad y solubilidad	Pervaporación y transporte activo
[fuente: Benito (2004)]		

Las membranas pueden clasificarse de acuerdo con diferentes criterios, pero la clasificación más común es según su naturaleza y estructura (Benito 2004). Atendiendo a su naturaleza las membranas se distinguen como biológicas y sintéticas. Las primeras son esenciales para la vida y a su vez, se dividen en vivas y no vivas. Estas membranas resultan de vital importancia en los procesos de separación biotecnológicos, que se desarrollan en la actualidad en los campos médico y farmacéutico.

Las membranas sintéticas se clasifican en inorgánicas, poliméricas, líquidas y compuestas. Una característica que distingue a las membranas inorgánicas es que son muy estables química y térmicamente (Sotto 2008).

Las membranas inorgánicas de vidrio se caracterizan por su elevada resistencia a pH bajos, dado que el ataque de las sustancias ácidas crea una capa protectora de gel, que minimiza los efectos negativos de corrosión que provocan las mismas sobre la estructura de otros materiales.

Por lo anterior expuesto se afirma que las membranas cerámicas y vítreas poseen ventajas por encima de las poliméricas como son: bajo costo de mantenimiento, amplia resistencia al pH, alta resistencia a la temperatura, elevadas limitaciones de presión, elevado caudal, resistencia al ensuciamiento y elevada selectividad(Sotto 2008).

La caracterización estructural de las membranas consiste en la obtención de datos que expresen la porosidad o el tanto por ciento de volumen poroso, el tamaño y distribución de los poros, la tortuosidad, los espesores de capa y la rugosidad superficial.

Los métodos que comúnmente se usan, emplean fluidos que son capaces de desplazar a otro fluido que se encuentra ya introducido en los poros. Otros métodos se basan en técnicas de microscopía. Sin embargo, esta información solo muestra propiedades estructurales de la membrana y no la predicción de otras propiedades relacionadas con el funcionamiento (Benito 2004).

Por otro lado, la caracterización funcional de las membranas estudia la permeabilidad, los coeficientes de retención y factores de separación, los coeficientes de difusión efectiva, las características de adsorción, así como diversas pruebas de compatibilidad química, mecánica y física.

Para determinar todos estos parámetros existen técnicas experimentales, algunas de ellas complejas, que permiten evaluar las diversas propiedades de las membranas (Hernández et al. 1999).

En la actualidad, el desarrollo de membranas cerámicas va orientado a satisfacer los procesos de filtración de muchas industrias, principalmente la industria alimentaria, tratamiento de aguas y líquidos provenientes de fermentaciones y tratamientos de efluentes gaseosos, aunque es necesario mucho más esfuerzo para un total aprovechamiento de sus posibilidades (Benito 2004).

Los trabajos más recientes sobre membranas en el Instituto Superior Politécnico “José Antonio Echeverría”, reflejan la síntesis de las mismas a partir de materiales vítreos con variedad en el tamaño de sus poros, de manera tal que estas dejen pasar o retengan las sustancias según su tamaño (Bárcenas 2009).

El colectivo de investigadores, desde el año 2013, ha obtenido resultados que permiten confirmar la remoción de sulfuro de hidrógeno ($H_2S_{(g)}$) presente en el biogás sin eliminar de su composición al metano ($CH_4_{(g)}$).

En las membranas se varía la masa de óxido de zinc ($ZnO_{(s)}$) y se emplean dos diámetros de partículas de carbón vegetal y en todos los casos, se reducen las cantidades de $H_2S_{(g)}$ hasta un 92% (Ortega et al. 2015a), logrando valores inferiores a 0,1%, de manera que se cumple con la norma internacional de referencia vigente (NOM-137-SEMARNAT-2003 2003).

Hasta el 2015 se desconocían la permeabilidad, la difusividad efectiva del $H_2S_{(g)}$ en el medio poroso y las propiedades mecánicas de las membranas vítreas obtenidas a escala de laboratorio, siendo el objetivo de este trabajo realizar la caracterización funcional de las membranas vítreas empleadas en la purificación de biogás.

CARACTERIZACIÓN FUNCIONAL DE LAS MEMBRANAS VÍTREAS

La caracterización funcional de las membranas estudia la permeabilidad, los coeficientes de difusión efectiva, así como diversas pruebas de compatibilidad química, mecánica y física, entre otros (Benito 2004).

Síntesis de las membranas

En la presente investigación se realiza la síntesis de 10 membranas vítreas, empleando como materias primas vidrio de borosilicato, $ZnO_{(s)}$, carbón vegetal y etilenglicol como aglutinante.

La composición de las mismas se muestra en la tabla 2. Las membranas con 2,37 g y 3,16 g de ZnO se obtienen por primera vez, desde el inicio de las investigaciones empleando membranas para la purificación de biogás.

De manera similar a los resultados obtenidos con anterioridad (Ortega et al. 2015b), las membranas vítreas tienen, como promedio, diámetros de 50,4 ($\pm 0,4$) mm y espesor de 6,8 ($\pm 0,2$) mm.

Tabla 2. Composición de las membranas vítreas

(Dpc < 0,067) mm				
Muestras	Masa de vidrio (g)	Masa de ZnO(s) (g)	Masa de carbón (g)	Etilenglicol (mL)
1	15,00	0,00	5,00	2,50
2	14,41	0,79	4,80	2,50
3	13,82	1,58	4,60	2,50
4	13,23	2,37	4,40	2,50
5	12,63	3,16	4,21	2,50
(0,067 < Dpc < 0,13) mm				
6	15,00	0,00	5,00	2,50
7	14,41	0,79	4,80	2,50
8	13,82	1,58	4,60	2,50
9	13,23	2,37	4,40	2,50
10	12,63	3,16	4,21	2,50
Dpc: diámetro de las partículas del carbón vegetal				

Teniendo en cuenta que las características estructurales de las membranas determinan el comportamiento de las mismas, es importante realizar la caracterización funcional partiendo del conocimiento de la estructura de las membranas empleadas. Al variar su composición, es de esperar que varíen las características funcionales.

Permeabilidad

La ecuación fundamental para representar el movimiento de un fluido a través de un medio poroso es la ley de Darcy, la cual ha sido ampliamente utilizada como ecuación de transferencia de cantidad de movimiento para describir al medio poroso con flujo unidireccional (López 2005). Esta ley revela una proporcionalidad entre la velocidad de flujo y la diferencia de presión aplicada y queda expresada mediante la ecuación (1).

$$u = -\frac{k}{\mu_{\beta}} \frac{\partial p_{\omega}}{\partial x} \quad (1)$$

Donde el coeficiente k se conoce como permeabilidad específica o permeabilidad intrínseca del medio poroso, el cual es independiente de la naturaleza del fluido pero dependiente de la geometría del medio y tiene unidades de longitud al cuadrado. El término (dp_{ω}/dx) es el gradiente de presión en la dirección del flujo y μ_{β} es la viscosidad cinemática del fluido. En el caso de flujo en una fase k simplemente se conoce como permeabilidad.

Sobre la postulación de la ley de Darcy se han hecho varias consideraciones tales como: ignorar los efectos inerciales, las pérdidas por fricción y se han considerado solamente la caída de presión y las fuerzas volumétricas.

Por lo tanto, esta ley es válida solamente para pequeñas velocidades de flujo. Esto se verifica mediante el cálculo de número de Reynolds (Rep) de partícula (Martín y Font 2011) a partir de la ecuación (2).

$$Rep = \frac{\rho u^+ d_p}{\mu} \quad (2)$$

Donde: μ (Pa·s) y ρ (kg/m³) son la viscosidad y densidad del fluido, respectivamente; d_p (m) el tamaño medio de las partículas y u^+ la velocidad superficial definida como caudal Q (m³/s), dividido por el área de la sección S del cuerpo geométrico calculada como $\pi D^2/4$ siendo D el diámetro de la membrana. Luego, si $Rep < 10$ es régimen laminar y si $Rep > 1000$ es régimen turbulento.

Cuando el fluido atraviesa un lecho poroso en régimen exclusivamente laminar, se emplea la ecuación Blake-Kozeny (Martín y Font 2011) y para describir el comportamiento de la pérdida de presión se emplea la ecuación (3).

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{150(1 - \varepsilon)^2 \mu u^+}{\varepsilon^3 (d_p \phi_s)^2} \quad (3)$$

Siendo: $\phi_s(-)$ el factor de forma o esfericidad de las partículas; $d_p(m)$ el tamaño medio de la partícula; $\varepsilon(-)$ la porosidad de las membranas; $\mu(\text{Pa}\cdot\text{s})$ la viscosidad del biogás; $u^+(\text{m/s})$ la velocidad superficial del biogás y $L(m)$ la altura de la membrana.

Al comparar (3) con la ley de Darcy ($\Delta p^+ / L \approx -(dp_w/dx)$) (Martín y Font 2011), se obtiene la ecuación (4) para el cálculo de la permeabilidad de las membranas vítreas.

$$k = \frac{\varepsilon^3 (d_p \cdot \phi)^2}{150(1 - \varepsilon)^2} \quad (4)$$

En la tabla 3 se muestran los valores promedio de permeabilidad para las membranas vítreas, considerando que la esfericidad de las partículas es 0,7 (Levenspiel 1993) y después de calcular el Rep , siendo el régimen laminar.

Los valores de diámetro de las partículas y porosidad de las membranas considerados son el resultado de la caracterización estructural de las membranas que se realiza por el grupo de investigación (Crespo 2015).

Tabla 3. Permeabilidad en las membranas vítreas

Membranas vítreas	m(ZnO) _(s) (g)	D _{pc} (mm)	ε (-)	$dp \cdot 10^5$ (m)	$k_v \cdot 10^{12}$ (m ²)
1	0	< 0,067	0,4721	6,79	5,686
2	0,79	< 0,067	0,4552	6,79	4,786
3	1,58	< 0,067	0,3783	6,79	2,110
4	2,37	< 0,067	0,3658	6,79	1,833
5	3,16	< 0,067	0,3482	6,79	1,497
6	0	0,067-0,13	0,6211	6,16	20,687
7	0,79	0,067-0,13	0,5589	6,16	11,122
8	1,58	0,067-0,13	0,4704	6,16	4,600
9	2,37	0,067-0,13	0,4288	6,16	2,995
10	3,16	0,067-0,13	0,3783	6,16	1,736

Como se muestra en la tabla 3 la permeabilidad disminuye al aumentar la masa de ZnO_(s) y disminuir la porosidad. Este comportamiento coincide con lo reportado en la literatura consultada, la cual plantea que la porosidad es una de las vías para la caracterización de los medios porosos y que, a su vez, esta condiciona la permeabilidad.

El hecho de que la permeabilidad aumente en la medida que aumenta la porosidad, es un comportamiento lógico ya que es menor la masa de ZnO_(s) que se emplea en la síntesis de las membranas (tabla 2) y por tanto, es mayor la masa de carbón vegetal que se quema durante el tratamiento térmico.

También se observa que cuanto mayor es el diámetro de las partículas de carbón vegetal en las membranas, mayor es la permeabilidad, resultado adecuado teniendo en cuenta que al quemarse el carbón vegetal con un mayor diámetro de partículas, se obtiene mayor radio de poros en las membranas (Crespo 2015).

Difusividad efectiva del $H_2S_{(g)}$ en el medio poroso

Uno de los parámetros más importantes en la caracterización funcional de las membranas es la difusividad efectiva del medio poroso. En la literatura consultada, diversos autores coinciden en que se obtiene a partir de la ecuación (5) (Levenspiel 1993), (Bear 2006).

$$D_{Aef} = \frac{\varepsilon}{\tau} \cdot D_{AB} \quad (5)$$

Donde: D_{Aef} (m^2/s) es la difusividad efectiva del $H_2S_{(g)}$ en el medio poroso; ε (-) y τ (-), son la porosidad y tortuosidad del medio poroso, respectivamente y D_{AB} (m^2/s) es la difusividad del $H_2S_{(g)}$ en la mezcla gaseosa y tiene un valor de $1,94 \cdot 10^{-5} m^2/s$ (Crespo 2015).

En la tabla 4 se muestran los valores promedio de tortuosidad y difusividad efectiva del $H_2S_{(g)}$ en el medio poroso, para cada tipo de membrana. Los valores de tortuosidad son el resultado de la caracterización estructural de las membranas que se realiza por el grupo de investigación (Crespo 2015).

Tabla 4. Difusividad efectiva del $H_2S_{(g)}$ en el medio poroso

m(ZnO) (g)	Dp(carbón) (mm)	τ (-)	$D_{ef} \cdot 10^6$ (m^2/s)
0	<0,067	2,12	4,324
0,79	<0,067	2,20	4,020
1,58	<0,067	2,64	2,776
2,37	<0,067	2,73	2,596
3,16	<0,067	2,87	2,352
0	0,067-0,13	1,61	7,484
0,79	0,067-0,13	1,79	6,060
1,58	0,067-0,13	2,13	4,293
2,37	0,067-0,13	2,33	3,567
3,16	0,067-0,13	2,64	2,776

La difusividad efectiva disminuye en la medida en que la masa de $ZnO_{(s)}$ aumenta y, para un mismo valor, es mayor cuando el diámetro de las partículas de carbón aumenta.

El hecho de que la difusividad efectiva disminuya cuando decrece la porosidad y aumenta la tortuosidad, es un comportamiento lógico ya que es mayor la masa de $ZnO_{(s)}$ que se emplea en la

síntesis de las membranas (tabla 2) y por tanto, es menor la masa de carbón vegetal que se quema durante el tratamiento térmico.

Propiedades mecánicas

Los ensayos de resistencia mecánica de las membranas vítreas se realizan utilizando una prensa marca CONTROLS modelo AUTOMAX 5 digital. Las pruebas se desarrollan en un canal con 1,5 kN de capacidad y para la ejecución de las mismas se miden el diámetro y el espesor de cada membrana.

La prueba de tracción indirecta se lleva a cabo utilizando un gradiente de fuerza de 30 N/s. El ensayo de flexión se realiza colocando las membranas sobre una superficie con una ranura de 20 mm y, con un gradiente de fuerza de 25 N/s, se someten a un momento flector. En el estudio de compresión se procede sometiendo las membranas a una carga axial, con un gradiente de fuerza de 25 N/s.

En el ensayo de tracción el valor más alto es de 2,47 MPa, siendo esta la resistencia del material al oponerse a la rotura, con una carga de 0,478 kN. Para el ensayo de flexión es de 1,63 MPa, con una carga de 0,07 kN y para el ensayo de compresión es de 8,44 MPa.

Todos estos resultados son referidos a una membrana de 6,45 mm de espesor y 48,2 mm de diámetro, que se corresponde con la que no tiene $ZnO_{(s)}$ y por tanto, es cuando se emplea la mayor masa de vidrio borosilicato y carbón vegetal en la síntesis de las membranas vítreas (tabla 2).

REMOCIÓN DE SULFURO DE HIDRÓGENO

La operación del sistema se realiza partiendo de los criterios que se muestran en la tabla 5 y se toman como variables independientes la masa de $ZnO_{(s)}$, flujo de operación (Q_{op}) y diámetro de las partículas de carbón vegetal (D_{pc}), con el objetivo de conocer la influencia de las mismas sobre la remoción de $H_2S_{(g)}$.

Tabla 5. Factores y niveles del diseño de experimento

Factores	Niveles		
	Bajo	Medio	Alto
Masa de ZnO (g)	0	1,58	3,16
Diámetro de las partículas de carbón (mm)	< 0,067	--	0,067-0,13
Flujo de operación (L/h)	5	10	15

Como se muestra en la figura 1, en las 30 muestras hay remoción de $H_2S_{(g)}$, aunque solo en 15 ocasiones se logra que la concentración final de $H_2S_{(g)}$ presente en el biogás, esté por debajo del valor normado (< 0,1%)(NOM-137-SEMARNAT-2003 2003), tal y como se muestra mediante la línea continua de color rojo.

Por tanto el biogás está apto para ser utilizado, correspondiendo el menor valor con el mayor porcentaje de remoción de $H_2S_{(g)}$ (92%). La diferencia entre los valores se debe a la influencia de la masa de $ZnO_{(s)}$, el diámetro de las partículas de carbón vegetal y el flujo de operación.

Por otro lado, se indican por encima de la línea discontinua, aquellas muestras en las que la concentración final de $H_2S_{(g)}$ tiene un valor mayor que 0,02% y no cumplen con las restricciones de la Conferencia de Higienistas Industriales Gubernamentales de Estados Unidos (ACGIH), para un período corto de exposición (Ortega et al. 2015a).

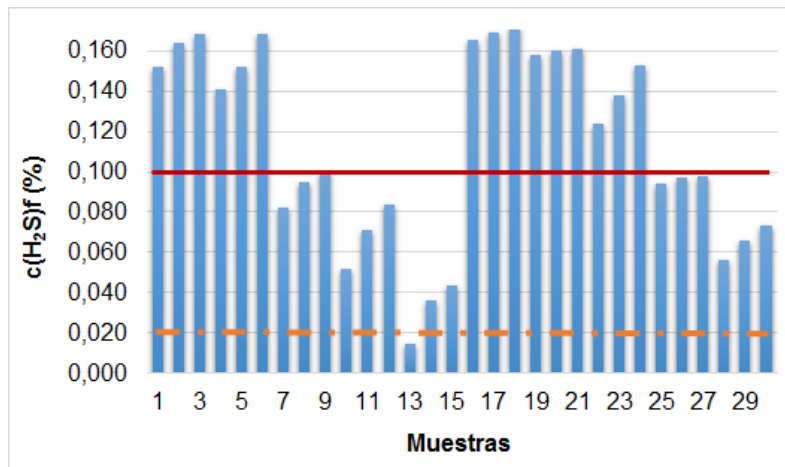


Figura 1. Concentración final de $H_2S_{(g)}$ en la purificación de biogás empleando membranas vítreas

A partir de estos resultados y los factores y niveles que se indican en la tabla 5, se obtiene el diagrama de Pareto para la remoción de $H_2S_{(g)}$ del biogás empleando membranas vítreas (figura 2).

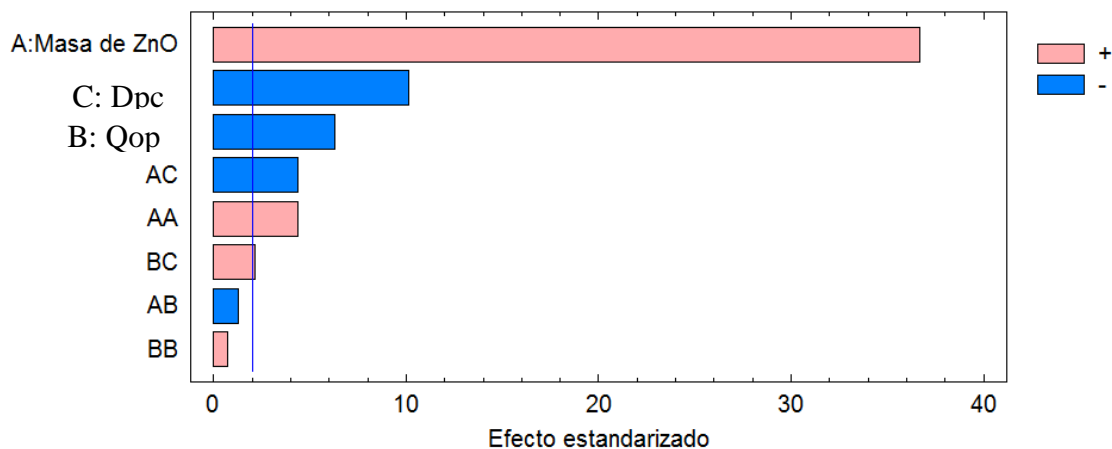


Figura 2. Diagrama de Pareto para la remoción de $H_2S_{(g)}$ del biogás empleando membranas vítreas

Como se observa en la figura 2, todos los factores considerados influyen significativamente en la remoción de $H_2S_{(g)}$, así como varias de las interacciones entre los factores.

Estos resultados difieren con respecto a los de experiencias anteriores (Ortega et al. 2015a), ya que en esta oportunidad se efectúan corridas experimentales con mayor número de muestras y se ampliaron los niveles de los factores considerados.

Una vez empleada la membrana para la desulfuración del biogás, se realiza la caracterización del mismo y se obtiene el porcentaje de remoción de $\text{CH}_4(\text{g})$ y dióxido de carbono ($\text{CO}_2(\text{g})$). En la tabla 6 se muestran los valores promedio.

Tabla 6. Remoción de otros componentes presentes en el biogás

Componentes	Remoción promedio (%)
$\text{CH}_4(\text{g})$	0,02
$\text{CO}_2(\text{g})$	18,10

Los resultados indican que prácticamente no se remueve $\text{CH}_4(\text{g})$ al tratar el biogás con las membranas obtenidas, aspecto muy favorable pues este componente es el que aporta el valor calórico que posee dicha fuente de energía.

Por otro lado, los valores que se observan para la remoción de $\text{CO}_2(\text{g})$, no sorprenden a los autores de este trabajo pues, prácticamente, todos los métodos de purificación de biogás que se conocen, no solo remueven $\text{H}_2\text{S}(\text{g})$, sino también $\text{CO}_2(\text{g})$ según se establece en la literatura (Ortega et al. 2015a). De esta forma se logra también disminuir los efectos no deseados que provoca la presencia de $\text{CO}_2(\text{g})$ en el medio ambiente o al almacenar el biogás.

CONCLUSIONES

Por primera vez se logra la caracterización funcional de las membranas vítreas obtenidas a escala de laboratorio empleadas en la desulfuración de biogás, demostrándose que varía con respecto a la composición y las características estructurales de las mismas.

Los tres factores considerados: masa de $\text{ZnO}(\text{s})$, Dpc y Qop, influyen significativamente en la remoción de $\text{H}_2\text{S}(\text{g})$ sin afectar la masa de $\text{CH}_4(\text{g})$ presente en el biogás. Además se logra que el biogás cumpla con las restricciones de las normas internacionales vigentes para su uso.

RECONOCIMIENTO

Los autores desean agradecer la colaboración del grupo de estudiantes de la Facultad de Ingeniería Química, que han apoyado el trabajo experimental para obtener los resultados que se exponen y a José Gandón, profesor del Departamento de Ingeniería Química, por su ayuda.

REFERENCIAS

Bárceñas L. (2009). “Obtención de placas vítreas filtrantes bactericidas”, Trabajo de diploma, Facultad de Ingeniería Química, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría (Cujae), Habana, Cuba.

- Bear J.** (2006). “Gas transport in porous media”. ISBN 13978-1-4020-3962-1, Ed. Springer, Holanda.
- Benito J.** (2004). “Membranas cerámicas. Tipos, métodos de obtención y caracterización”, Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio, vol.43, no.5, pp. 829 – 842, ISSN: 0366-3175, Elsevier, España.
- Crespo A.** (2015). “Modelos fenomenológicos que describen la purificación del biogás empleando membranas vítreas y de zeolita natural”, Trabajo de diploma, Facultad de Ingeniería Química, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría (Cujae), Habana, Cuba.
- Hernández A., Prádanos P. y Palacio L.** (1999). “Membranas cerámicas y su utilidad en procesos de separación”. Bol. Soc. Esp. Cerám. Vidrio, vol. 38, no. 3, pp. 185-192. ISSN: 0366-3175, Dpto. Termodinámica y Física Aplicada, Facultad de Ciencias, Universidad de Valladolid, Elsevier, España.
- Levenspiel O.** (1993). “Ingeniería de las Reacciones Químicas”. ISBN 84-291-7325-0, Ed. Reverté S.A., España.
- López J.J.V.** (2005). “Estudio de la transferencia de energía, masa y cantidad de movimiento en sistemas fluido-medio poroso”. Tesis de doctorado, División de Ciencias Básicas e Ingeniería, Universidad Autónoma Metropolitana unidad Iztapalapa, Iztapalapa, México.
- Martín I. y Font R.** (2011). “Mecánica de fluidos, Tema 4. Transporte y cantidad movimiento sólido-fluido”. Universidad de Alicante, Alicante, España.
- NOM-137-SEMARNAT-2003.** (2003). “Contaminación atmosférica. –plantas desulfuradoras de gas y condensados amargos-. Control de emisiones de compuestos de azufre”. Norma Oficial Mexicana, México.
- Ortega L., Rodríguez S., Fernández E. y Bárcenas L.** (2015a). “Principales métodos para la desulfuración del biogás”. Ingeniería Hidráulica y Ambiental, vol. 36, no. 1, pp. 45–56. ISSN 1815–591X. Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría (Cujae), Habana, Cuba.
- Ortega L., Rodríguez S., Fernández E., Martínez Y., Crespo A. y Viera Y.** (2015b). “Membranas vítreas empleadas en la purificación de biogás”. Bol. Soc. Esp. Cer. Vidr., ISSN: 0366-3175, Elsevier, España, extraído de: <http://dx.doi.org/10.1016/j.bsecv.2015.09.005> en octubre 2015.
- Sotto A.** (2008). “Aplicación de la tecnología de membrana de nanofiltración y ósmosis inversa para el tratamiento de disoluciones acuosas de compuestos fenólicos y ácidos carboxilos”. Tesis de Doctorado, Universidad Rey Juan Carlos, España. extraído de: <https://www.eciencia.urjc.es/bitstream/10115/4605/3/Tesis.pdf.txt> en octubre 2015.