



EDITORES

OSCAR DE JESÚS MAY TZUC

Doctor en Ingeniería opción Energías Renovables
Facultad de Ingeniería - Universidad Autónoma de Campeche
Editor Responsable, Revista Ciencias de la Ingeniería
<https://orcid.org/0000-0001-7681-8210>
oscajmay@uacam.mx

ROMÁN ALEJANDRO CANUL TURRIZA

Doctor en Ingeniería Civil opción en Puertos y Costas
Facultad de Ingeniería - Universidad Autónoma de Campeche
Editor Responsable, Revista Ciencias de la Ingeniería
<https://orcid.org/0000-0001-7681-8210>
roacanul@uacam.mx

MARIO ANTONIO JIMÉNEZ TORRES

Doctor en Ingeniería opción Energías Renovables
Centro de Investigaciones Jurídicas - Universidad Autónoma de Campeche
Editor Responsable, Revista Ciencias de la Ingeniería
<https://orcid.org/0000-0001-7681-8210>
majimene@uacam.mx



Recibido 03/12/2025
Aceptado 14/09/2026

REMOCIÓN DE H_2S Y SILOXANOS DEL BIOGÁS MEDIANTE UN LECHO EMPACADO

REMOVAL OF H_2S AND SILOXANES FROM BIOGAS USING A PACKED BED

Leo-Avelino, G.¹, Ramos Valencia, J. J.², Castañeda Castañeda, C.B.²

¹ CIATEQ A.C Laboratorio Biocombustibles. Av. Nodo Servidor Público 165, Col. Anexo Club de Golf Las Lomas, Zapopan, Jal.

² CIATEQ A.C.- Av. Del Retablo 150, Col. Constituyentes FOVISSSTE, Querétaro, Qro.

RESUMEN

En México la producción de biogás se ha incrementado debido a la alta disponibilidad de sustratos residuales orgánicos de actividades ganaderas, fabricas alimenticias, residuos sólidos urbanos RSU y de plantas de tratamientos de agua PTAR. Sin embargo, para su uso eficiente como biocombustible se requiere de su purificación, eliminando el CO_2 , H_2S y Siloxanos, para así obtener Biometano puro. En el presente trabajo se evaluó el uso de una columna empacada evaluando el desempeño del carbón activado en pellets como material adsorbente. Para la alimentación de la columna se usó un flujo de $3\text{ m}^3/\text{h}$ de biogás con una composición de Metano 64.6%, CO_2 33.47%, y 1758 ppm de H_2S y 2200 ppm de Siloxanos. Con los datos obtenidos usando el carbón activado, se construyó una curva de ruptura mediante la cual se determinó que el tiempo de saturación (cuando el H_2S alcanza 50 ppm) fué de 110 minutos, parámetro que es determinado como tiempo total de proceso. Se realizó el cálculo de la capacidad de adsorción del carbón activado, obteniéndose un valor de $W_{break} = 0.359\text{ kg } H_2S/\text{Kg de carbón}$. Para los siloxanos se alcanzó una remoción 93.2% en el mismo tiempo. Por lo que, el uso del carbón activado en pellets es viable tanto económica como técnicamente como parte del proceso de purificación de Biogás.

PALABRAS CLAVE

Biogás, Lechos empacados, Siloxanos, ácido sulfhídrico

ABSTRACT

In Mexico, biogas production has increased due to the high availability of organic waste substrates from livestock farming, food processing plants, municipal solid waste (MSW), and wastewater treatment plants (WWTPs). However, for its efficient use as a biofuel, purification is required to remove CO_2 , H_2S , and siloxanes, thus obtaining pure biomethane. This study evaluated the use of a packed column, assessing the performance of pelleted activated carbon as an adsorbent material. The column feed consisted of a $3\text{ m}^3/\text{h}$ biogas flow with a composition of 64.6% methane, 33.47% CO_2 , 1758 ppm H_2S , and 2200 ppm siloxanes. Using the data obtained with activated carbon, a breakthrough curve was constructed, which determined that the saturation time (when H_2S reaches 50 ppm) was 110 minutes, a parameter considered the total process time. The adsorption capacity of the activated carbon was calculated, yielding a W_{break} value of $0.359\text{ kg } H_2S/\text{kg of carbon}$. For siloxanes, a removal rate of 93.2% was achieved in the same time. Therefore, the use of activated carbon pellets is both economically and technically viable as part of the biogas purification process.

KEYWORDS

Biogas, packed bed, Siloxane, Sulphide acid

INTRODUCCIÓN

El biogás está compuesto principalmente de metano y dióxido de carbono con trazas de otros compuestos que deben ser eliminados para su valorización, tales como agua, sulfuro de hidrógeno, siloxanos, hidrocarburos halogenados, amoníaco, oxígeno, monóxido de carbono y nitrógeno. El biogás suele salir del digestor saturado de agua y es necesario eliminarlo para la mayoría de las aplicaciones, a causa de la corrosión que genera en equipos y tuberías cuando se combina con ácidos (H_2S , CO_2). Una de las técnicas más utilizada es la adsorción mediante agentes desecantes como son la alúmina, sílice y los tamices de zeolitas o, por medio de la absorción con glicoles habitualmente. El ácido sulfhídrico es un compuesto corrosivo y tóxico y que además genera SO_2 tras su combustión [1].

La desulfuración es una técnica madura, sobre todo en la industria petroquímica, con una variedad de tecnologías para conseguir la eliminación del H_2S que se exponen a continuación [1].

- Se puede eliminar en el propio digestor mediante la adición de sales férricas que reaccionan con el ácido formando sulfuro de hierro, una sal que precipita en el fondo del reactor.
- Mediante la desulfuración biológica, un proceso de degradación del H_2S a través de bacterias sulfo-oxidantes capaces de transformarlo en azufre elemental o sulfatos.
- Por medio de la absorción física con agua a presión o, por absorción química con compuestos como las aminas o las sales inorgánicas.
- Empleando adsorbentes tales como la alúmina, el carbón activo o la zeolita para conseguir la adherencia del H_2S sobre la superficie.
- Otra de las técnicas es el uso de membranas semipermeables que retienen selectivamente el H_2S .

Por otro lado, la eliminación de siloxanos es necesaria sobre todo cuando el biogás procede de vertederos ya que está presente en diversos productos como los cosméticos, los fármacos, desodorantes, algunos jabones, etc. Son compuestos de silicio en forma de vapor que, si no se eliminan, pueden cristalizar en forma de SiO_2 cuando se



produce la combustión del biogás, causando desgastes y fallos en los equipos. Las técnicas más empleadas para la reducción de siloxanos es la adsorción con carbón activo o silicagel, la absorción con hidrocarburos y ácidos/bases fuertes, y la cri condensación (enfriamiento a $4^{\circ}C$ y subenfriamiento a $-25^{\circ}C$) [2].

La presencia de Oxígeno y Nitrógeno suele darse por la introducción de aire en el digestor, por lo que es importante un buen control del nivel de oxígeno en el interior del reactor. Se pueden eliminar por adsorción en carbón activo o a través del empleo de membranas selectivas, aunque su extracción es difícil y costosa [1].

El amoníaco y los compuestos halogenados suelen eliminarse por adsorción con carbón activo o membranas, habitualmente se eliminan conjuntamente con otros contaminantes anteriormente descritos. Para la eliminación de partículas que puedan quedar en el biogás, se hace pasar la corriente a través de filtros mecánicos.

Como se ha comentado anteriormente, la eliminación del CO_2 es parte fundamental del proceso de purificación para obtener un gas de alto valor energético. En la industria, son varias las técnicas que se han empleado a lo largo de la historia para el lavado de gases ácidos como es el dióxido de carbono, algunas más maduras y perfeccionadas que otras.

1. ABSORCIÓN POR OSCILACIÓN DE PRESIÓN

La adsorción por oscilación de presión (PSA, Pressure Swing Adsorption) es un proceso que separa gases individuales de una mezcla de gases, empleando un adsorbente selectivo y variando la presión y la temperatura. Normalmente se emplea en los procesos químicos y petroquímicos para eliminar los gases ácidos como es el H_2S o el CO_2 del gas natural, así como en la industria siderúrgica, para recuperar el hidrógeno (H_2) de los gases de coque o de conversión, o para separar el oxígeno (O_2) y el nitrógeno (N_2) del aire [5].

El proceso se basa en la unión física de las moléculas de gas (adsorbato) a un material adsorbente específico por fuerzas de Van der Waals, con el objetivo de separar solamente el gas necesario sin que los demás gases de la mezcla interactúen con el lecho, como se indica en la Figura 1. Normalmente se utilizan adsorbentes que contienen carbono, como carbón activado y adsorbentes de óxido como la zeolita.

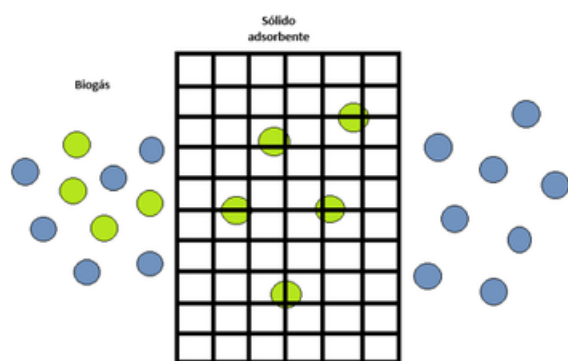


Figura 1. Mecanismo de adsorción gas - sólido

El proceso PSA consta de tres etapas, las cuales se describen a continuación [7]:

Adsorción. La columna de adsorción debe estar presurizada

(hasta 40 bares) para facilitar la adherencia del gas a la superficie del empaque. El gas de alimentación (gas impuro) se introduce por la parte inferior de la columna, pasa a través del lecho donde se adsorben las moléculas que se quieren separar de la corriente, y el gas puro sale por la parte superior de la columna. El lecho de la columna va adsorbiendo el gas hasta que se satura.

2.Despresurización. La columna se despresuriza para recuperar el gas retenido en el adsorbente y una vez recuperado se vierte en la línea de offgas.

3.Represurización. La columna de adsorción se vuelve a presurizar con la mezcla de gases o con el gas purgado, de tal forma que se consigue la presión de la etapa 1 y el proceso vuelve al inicio.

1.1 CURVAS DE RUPTURA

Las curvas de ruptura son una representación gráfica de la saturación de una columna de adsorción. Estas curvas son características de cada proceso y pueden considerarse como una huella de cada columna a ciertas condiciones [3]. El tiempo de saturación de una columna se basa en la longitud y diámetro de la columna, capacidad máxima de adsorción, el tipo de adsorción y la velocidad del gas. Estas curvas estudian el comportamiento de la concentración de la salida con respecto a la de entrada (C_s/C_o), en el tiempo. En la Figura 2 se observa el aspecto típico de una curva de ruptura.

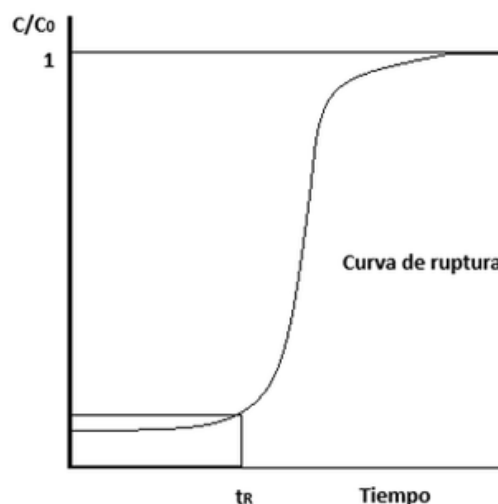


Figura 2. Curva típica de ruptura para adsorción

En la Figura 2 se encuentran puntos importantes para su representación, cuando se requiere que en el proceso la concentración de salida se encuentre por debajo de un umbral permitido, se debe de conocer el tiempo a partir del cual la concentración rebasa el umbral, a esto se le llama tiempo de ruptura. Este tiempo se obtiene en base a los requerimientos individuales del proceso a la salida. La zona de agotamiento es cuando el filtro se encuentra totalmente saturado, en esta sección ya no existe un proceso de adsorción ocurriendo dentro de la columna, es decir, $C_s/C_o=1$. La zona de transferencia de masa (MTZ), explica la posible adsorción del fluido con el adsorbente, desplazándose con respecto al tiempo [6].

2. PROCEDIMIENTO

Se utilizó el flujo de biogás procedente de un Biodigestor, con una mezcla alimentada de biolodo 40%, lactosuero 40% y excretas de ganado porcino 20%, la cual genera una corriente con la siguiente composición: metano (64.6%), CO_2 (33.47%) y H_2S (1758 ppm). Las



dimensiones de la columna empleada (Figura 3) para las pruebas son 1 m de longitud y 6 cm de diámetro interno. Primeramente, se evaluará la eliminación de H_2S mediante una columna empacada con carbón activado con un peso de 1.624 kg del material, previamente deshidratado a 180 °C por 4 horas.

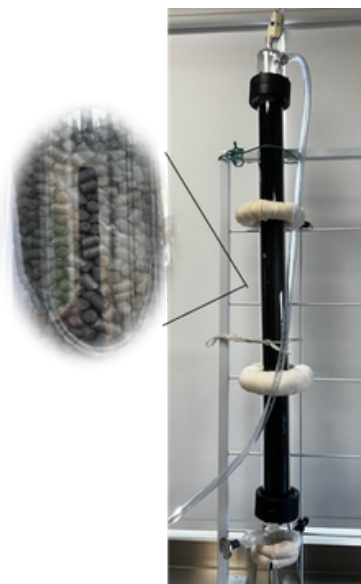


Figura 3. Columna de adsorción

El flujo de biogás de alimentación proveniente de un compresor con un valor de 2 m³/h y 75 mbar. Para el monitoreo de los cambios de la composición de los flujos se conectó un medidor portátil a la salida de la columna, las mediciones se realizarán cada 10 – 15 min. Para determinar el tiempo de saturación o de ruptura se considera que la máxima concentración de H_2S permitida es de 50 ppm.

Para el cálculo de la cantidad adsorbida de H_2S por el lecho empacado se utiliza la siguiente ecuación:

$$W_{\text{break}} = \frac{u_0 C_0 t_{\text{break}}}{L_T \rho_L} \quad \text{Ec. 1}$$

donde:

u_0 es la velocidad lineal del gas

C_0 es la concentración del adsorbato en la alimentación

ρ_L es la densidad del lecho

L_T es la longitud total del lecho

t_{break} es el tiempo de ruptura calculada mediante la Ec. 2

$$t_{\text{break}} = \int_0^{t_f} \left(1 - \frac{C}{C_0}\right) dt \quad \text{Ec. 2}$$

donde:

C es la concentración del adsorbato a la salida

t_f es el tiempo de operación finalizada

Para la determinación de siloxanos se cuenta con la columna cromatográfica VF-5ms con un detector FID y como gas acarreador Nitrógeno, con una temperatura del horno de 50°C con rampas a 160°C y 220 °C, en el cual se

160°C y 220 °C, en el cual se determina hexamethyldisiloxane apareciendo en el minuto 3.6, hexamethylcyclotrisiloxane en el minuto 6.4, octamethyltrisiloxane en el minuto 8, octamethylcyclotetrasiloxane en el minuto 10.7, decamethyltetrasiloxane en el minuto 12.2 y decamethylcyclopentasiloxane en el minuto 13.8.

Debido a que en el análisis cromatográfico para siloxanos sólo se identifica los componentes presentes en la muestra, para definir su composición en porcentaje se utilizó una curva de calibración desarrollada por [4], específicamente para el octamethylcyclotetrasiloxano debido a que genera mayores efectos negativos en equipos mecánicos. La curva de calibración (Figura 3) requiere conocer el % área (con un rango entre 0 y 2%) el cual es proporcionado en el cromatograma, el rango de identificación es de 0.031 %V/V – 1.0 %V/V.

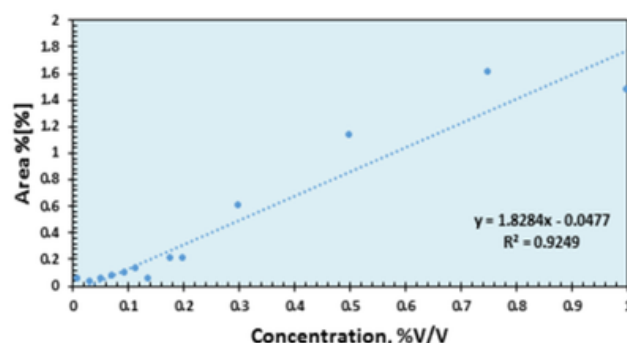


Figura 4. Curva de calibración composición Octamethylcyclotetrasiloxanos (Mbwebwe et al., 2018)

Para la caracterización de la muestra se tomarán muestras del biogás proveniente de la columna empacada cada 15 min hasta finalizar la prueba, estas se almacenan de bolsas Tedlar de 1 L.

3. RESULTADOS

Se realizó la primera prueba en la columna empacada con carbón activado en pellets para la reducción de H_2S de la corriente de biogás, la cuál contenía 1758 ppm. En la Figura 5 se presenta la curva de ruptura generada por el experimento con de la cuál se tomó lectura en el medidor portátil cada 15 min.



Figura 5. Curva de ruptura de H_2S empleando carbón activado

Se puede observar que el tiempo de saturación con H_2S en la columna con carbón activado fue de 110 min, esto quiere decir que la composición del biogás iguala su concentración de H_2S a la entrada y a la salida. Para confirmar los resultados obtenidos se realizó una