



Fecha de presentación: 29/04/2020

Fecha de aceptación: 30/06/2020

Fecha de publicación: 6/11/2020

**¿Cómo citar este artículo?**

Carbonell Sorí, L., López González, L. M., & Hermida García O. (mayo-agosto, 2020). Diseño de un filtro para la reducción de H<sub>2</sub>S presente en una corriente de biogás. Revista *Márgenes*, 8(2), 1-19.

Recuperado de

<http://revistas.uniss.edu.cu/index.php/margenes/issue/view/1117>

**TÍTULO: DISEÑO DE UN FILTRO PARA LA REDUCCIÓN DE H<sub>2</sub>S PRESENTE EN UNA CORRIENTE DE BIOGÁS**

**TITLE: THE DESIGN OF A FILTER FOR THE REDUCTION OF H<sub>2</sub>S IN A BIOGAS STREAM**

**Autores:** Ing. Lilyana Carbonell-Sorí<sup>1</sup>, Dra. C Lisbet Mailín López-González<sup>2</sup>, MSc. Félix Orestes Hermida-García<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Ingeniera Química. Adiestrada. Universidad de Sancti Spiritus "José Martí Pérez", Centro de Estudios de Energía y Procesos Industriales (CEEPI), Sancti Spiritus, Cuba. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8252-8452> Correo electrónico: [icarbonell@uniss.edu.cu](mailto:icarbonell@uniss.edu.cu)

<sup>2</sup> Ingeniera Química. Doctora en Ciencias Técnicas. Profesora Titular. Universidad de Sancti Spiritus "José Martí Pérez", Centro de Estudios de Energía y Procesos Industriales (CEEPI), Sancti Spiritus, Cuba. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2362-5703> Correo electrónico: [lisbet@uniss.edu.cu](mailto:lisbet@uniss.edu.cu)

<sup>3</sup> Ingeniero Químico. Máster en Eficiencia Energética. Profesor Auxiliar. Universidad de Sancti Spiritus "José Martí Pérez", Centro de Estudios de Energía y Procesos Industriales (CEEPI), Sancti Spiritus, Cuba. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7645-5947> Correo electrónico: [fhermida@uniss.edu.cu](mailto:fhermida@uniss.edu.cu)

**RESUMEN**

El biogás es una de las energías renovables más accesible, dada la facilidad de su obtención. Su uso para la generación de electricidad y la cocción de alimentos, es una alternativa viable al desarrollo energético sostenible. El presente trabajo se lleva a cabo con el objetivo de diseñar un filtro con carbón activado a escala de laboratorio, capaz de reducir las concentraciones hasta 10 ppm de sulfuro de hidrógeno en corrientes de biogás provenientes de residuales ganaderos, de manera que, si este brinda buenos

**Márgenes publica sus artículos bajo una [Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-SinDerivar 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)**



<http://revistas.uniss.edu.cu/index.php/margenes>  
[margenes@uniss.edu.cu](mailto:margenes@uniss.edu.cu)

resultados, pueda ser utilizado en un futuro no muy lejano, para la cocción de alimentos como uso final.

Los métodos empleados para el diseño incluyeron las propiedades del material adsorbente, las características del biogás y los principales parámetros de diseño para torres de carbón activado. El filtro propuesto posee un volumen de  $0,0183 \text{ m}^3$  (18,3 L) para manejar un flujo máximo de biogás de  $20 \text{ m}^3/\text{d}$ , lo cual provocó un valor de pérdidas por caída de presión del fluido a través del lecho, de 0,0597 Pa.

El resultado alcanzado fue satisfactorio, pues se obtuvo un biogás con las características adecuadas para su uso final.

**Palabras clave:** adsorción; carbón activado; filtros.

### ABSTRACT

The path towards a development based on sustainable energy has increasingly maximized the use of renewable energy sources like biogas for the generation of electricity and for cooking food. Biogas composition mainly consists of methane (40-75%), carbon dioxide (15-60%) and trace elements such as water vapor, hydrogen sulfide, ammonia, carbon monoxide and other organic volatile compounds. The analyzed biogas is intended to be used for cooking food, for which the concentration of hydrogen sulfide was reduced to 10 ppm, an established parameter to prevent corrosion in kitchen stoves and avoid damage to human health. Currently, various technological advancements have been developed for the removal of this compound from biogas streams, among which adsorption filters with activated carbon can be mentioned. In this article, a filter was designed to reduce the  $\text{H}_2\text{S}$  concentration in a biogas stream from livestock waste. The applied methods included the properties of the adsorbent material, the characteristics of the biogas and the main parameters for the design of activated carbon towers. The proposed filter has a volume of  $0.0183 \text{ m}^3$  (18.3 L) to handle a maximum flow of biogas of  $20 \text{ m}^3 / \text{d}$ , which caused a loss of 0,0597 Pa due to a drop in



the fluid pressure through the bed. The design's result was satisfactory, since a biogas was obtained with the appropriate characteristics for its final use.

**Keywords:** adsorption; activated carbon; filters.

## INTRODUCCIÓN

El camino hacia el desarrollo energético sostenible ha permitido ampliar cada vez más, el empleo de fuentes de energía renovables para la generación de electricidad y para la cocción de alimentos. En Cuba, en el año 1993, se aprobó el Programa de Desarrollo de las Fuentes Nacionales de Energía, con el cual se ha incentivado la generación y aprovechamiento del biogás, llamado a convertirse en una fuente energética de primera importancia Ortega et al. (2015).

Merino (2017, pp.1-101) plantea:

Que el biogás es un producto de la digestión anaerobia de desechos orgánicos, su composición consiste principalmente en metano (40-75%), dióxido de carbono (15-60%) y componentes traza como vapor de agua, sulfuro de hidrógeno ( $H_2S$ ), amoníaco, monóxido de carbono y otros compuestos volátiles orgánicos (COV's).

Según Tacuri (2015) y Varnero et al. (2012), el sulfuro de hidrógeno ( $H_2S$ ) es uno de los únicos compuestos dentro del biogás que es altamente recomendable eliminar, indiferentemente de su uso, debido a que es un gas extremadamente tóxico e irritante, produce inconsciencia en los seres humanos, conjuntivitis, dolor de cabeza, entre otros. Además, puede causar daños internos en generadores eléctricos, microturbinas y demás equipos donde se utilice biogás.

En Cuba existen muchas instalaciones donde se genera una gran cantidad de residuales agrícolas y ganaderos, los cuales son fuentes de materia prima para la producción de biogás, sin embargo, presentan altos contenidos de sulfuro de hidrógeno. Esto está corroborado por Fernández (2014) quien indicó un contenido de  $H_2S$  entre 100 y 7000 ppm en el biogás producido en biodigestores alimentados con residuos

---

Márgenes publica sus artículos bajo una [Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-SinDerivar 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)



<http://revistas.uniss.edu.cu/index.php/margenes>  
[margenes@uniss.edu.cu](mailto:margenes@uniss.edu.cu)

agrícolas y ganaderos. En este rango también se encuentra el 0,1% (1000 ppm) reportado por (Araujo et al., 2015).

Uno de los usos más frecuentes que está teniendo el biogás en la actualidad es para la cocción de alimentos. Para ello es importante la remoción previa del H<sub>2</sub>S, ya que según (Rincón et al., 2015) el biogás que se utiliza para esta finalidad, admite una concentración máxima permisible de 10 ppm, pues es el valor tolerado por estufas de cocina para evitar su corrosión.

Según lo abordado anteriormente, sería útil el diseño de un método a escala de laboratorio, capaz de reducir las concentraciones hasta 10 ppm de sulfuro de hidrógeno en corrientes de biogás provenientes de residuales ganaderos, de manera que, si este brinda buenos resultados, pueda ser empleada en un futuro no muy lejano para la cocción de alimentos como uso final.

Entre las diversas tecnologías que se han desarrollado para la remoción de sulfuro de hidrógeno se encuentran las basadas en la adsorción. Estos procesos involucran la transferencia de un componente en la corriente de biogás a la superficie de un material sólido donde se concentra, principalmente, como resultado de fuerzas físicas de tipo Van der Waals. Los materiales adsorbentes que se utilizan habitualmente son carbón activado, gel de sílica, alúmina o zeolitas. Estos materiales se caracterizan por tener una alta superficie específica. En el caso de la etapa de adsorción, se hace recircular la alimentación por el lecho de adsorbente que adsorbe uno o varios componentes de la mezcla a separar, ya sea porque se trate del adsorbato de interés o bien porque se trate de una impureza que se desea eliminar, dejando pasar el resto de componentes de la mezcla. Cuando el lecho alcanza su capacidad máxima de adsorción, la alimentación se envía a otro lecho fresco mientras se procede a la regeneración del primer lecho saturado (Álvarez, 2016).

El carbón activado supone una inversión de capital y alto costo de operación tanto funcionando en sistema a batch como en continuo, principalmente debido a la

---

Márgenes publica sus artículos bajo una [Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-SinDerivar 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)



<http://revistas.uniss.edu.cu/index.php/margenes>  
[margenes@uniss.edu.cu](mailto:margenes@uniss.edu.cu)

necesidad de regeneración. La regeneración del adsorbente consumido es la parte más difícil y cara de la tecnología de adsorción. Conlleva aproximadamente el 75% del costo de operación y mantenimiento de una unidad de filtración en carbón activado granular de lecho fijo (Ures et al. 2014).

La viabilidad económica de la aplicación del carbón activado depende de la existencia de un medio eficaz para su regeneración y recuperación, una vez agotada su capacidad de adsorción. El carbón activo granular se regenera fácilmente por oxidación de la materia orgánica y su posterior eliminación de la superficie del carbón en un horno. En este proceso se destruye parte del carbón, entre un 5 y un 10%, y es necesario reemplazarlo por carbón nuevo o virgen. Es conveniente aclarar que la capacidad de adsorción del carbón regenerado es ligeramente inferior a la del carbón virgen. (Montoya-Delgado y Matute-Sánchez, 2015)

Por este motivo, es necesario realizar un estudio en el laboratorio sobre el tiempo de agotamiento del carbón activado como material adsorbente, de manera que este pueda ser renovado cada vez que lo requiera o reactivado de ser posible, y de esta forma el filtro cumpla con su función de manera eficaz. También es recomendable desarrollar esta misma tecnología para el diseño de un filtro con carbón de madera obtenido del marabú, que por un lado permita reducir los costos de mantenimiento, y por el otro, contribuya a la disminución de esta planta invasora e indeseable de los campos cubanos; aunque para ello es esencial su caracterización previa.

El objetivo del presente artículo es diseñar un filtro para la reducción de la concentración de H<sub>2</sub>S en una corriente de biogás proveniente de residuales ganaderos.

## **MATERIALES Y MÉTODOS**

Para el diseño de un filtro de carbón activado se siguió la metodología utilizada por Víquez (2018) y Rosabal Vega y Valle Matos (2006), donde se tuvieron en cuenta las características del carbón activado utilizado y del biogás que se pretende filtrar. Para el cálculo de sus principales parámetros se empleó una Hoja de Excel.

---

Márgenes publica sus artículos bajo una [Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-SinDerivar 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)



<http://revistas.uniss.edu.cu/index.php/margenes>  
[margenes@uniss.edu.cu](mailto:margenes@uniss.edu.cu)

### Bases para el diseño

El biogás que se empleó para el diseño tiene un flujo de 20 m<sup>3</sup>/día, presión 131,7 kPa y temperatura 302,15 K y sus principales características fueron obtenidas a partir de un análisis bibliográfico, donde se tomaron las siguientes consideraciones:

- La concentración de H<sub>2</sub>S a la entrada fue la reportada por (Araujo et al., 2015), la cual está dentro de los intervalos reportados por Fernández (2014) para el biogás producido en biodigestores alimentados con residuales ganaderos.
- El valor del resto de los componentes del biogás fueron el resultado del promedio entre los valores límites de cada uno de ellos, reportados para residuales agrícolas y ganaderos (Fernández, 2014).
- La densidad del biogás  $\rho$  (kg/m<sup>3</sup>) fue determinada teniendo en cuenta las condiciones de temperatura y presión de entrada, a partir de la ecuación de Clapeyron, suponiendo comportamiento ideal:  $\rho = \frac{P \cdot M}{R \cdot T}$  (Ec. 1)

Donde T (K) y P (kPa) corresponden a temperatura y presión en condiciones reales, M es la masa molar del biogás (kg/mol) y R la constante de los gases (m<sup>3</sup>Pa/molK).

Las tablas 1 y 2 recogen estos datos.

**Tabla 1.** Datos de partida del biogás de residuales ganaderos

Parámetros		Referencias
Flujo de biogás a la entrada Q <sub>b</sub> (m <sup>3</sup> /d)	20	
Presión a la entrada P (kPa)	131,7	
Temperatura a la entrada T (K)	302,15	
Masa molar M <sub>b</sub> (kg/mol)	0,0265	Espinal et al. (2016)
Densidad real $\rho_{rb}$ (kg/m <sup>3</sup> )	1,39	
Viscosidad $\mu_b$ (kg/ms)	1,28*10 <sup>-5</sup>	Hernán (2017)

**Fuente:** Elaboración propia

**Tabla 2.** Composición del biogás

Márgenes publica sus artículos bajo una [Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-SinDerivar 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)



<http://revistas.uniss.edu.cu/index.php/margenes>  
[margenes@uniss.edu.cu](mailto:margenes@uniss.edu.cu)

Componentes		Referencias
Concentración de CH <sub>4</sub> (%)	65	Fernández (2014)
Concentración de CO <sub>2</sub> (%)	40	
Concentración de N <sub>2</sub> (%)	0,5	
Concentración de O <sub>2</sub> (%)	0,5	
Concentración de H <sub>2</sub> (%)	1	
Concentración de CO (%)	0,5	
Concentración del H <sub>2</sub> S a la entrada X <sub>ent</sub> (ppm)	1 000	Araujo et al. (2015)
Concentración del H <sub>2</sub> S a la salida X <sub>sal</sub> (ppm)	10	Rincón et al. (2015)
Concentración del H <sub>2</sub> S a eliminar X <sub>e</sub> (ppm)	990	

**Fuente:** Adaptado de Fernández (2014)

El carbón activado presenta una eficiencia de adsorción ( $E_c$ ) de 100 g H<sub>2</sub>S/kg carbón según Díaz (2018). En este caso el adsorbente que se empleará en el filtro es el carbón activado industrial Calgon BPL. Las principales propiedades se recogen a continuación en la siguiente tabla:

**Tabla 3.** Propiedades del carbón Calgon BPL

Calgon BPL			Referencias
Densidad aparente $\rho_{ac}$ (kg/m <sup>3</sup> )	450		Fernández (2014)
Densidad real $\rho_{rc}$ (kg/m <sup>3</sup> )	2 100		
Diámetro de partícula D <sub>p</sub> (m)	4*10 <sup>-3</sup>		Sevillano et al. (2013)

**Fuente:** Elaboración propia

El diámetro de partícula seleccionado fue de 4 mm en forma de pellets, los cuales suelen ser cilíndricos debido a que normalmente se producen por extrusión. El porqué

Márgenes publica sus artículos bajo una [Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-SinDerivar 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)



<http://revistas.uniss.edu.cu/index.php/margenes>  
[margenes@uniss.edu.cu](mailto:margenes@uniss.edu.cu)

de esta selección es que mientras menores son las partículas de carbón, trabajan con una rapidez sustancialmente mayor, aunque también causan una mayor caída de presión. Lo primero se debe a que se acorta y se facilita el acceso del adsorbato a la superficie interna del carbón. Este autor también plantea que la principal ventaja de los pellets consiste en que causan una menor caída de presión que los carbones granulares, lo que los hace muy útiles en la purificación de aire y otros gases en los que existe una baja presión disponible. Según lo que se plantea en ese artículo, comercialmente se encuentran en diámetros de 0,8 a 5 mm, siendo el de 4 mm el más común (Sevillano et al., 2013).

### Cálculo de los parámetros de diseño del filtro

Para el diseño del filtro se siguieron dos metodologías: la expuesta por Rosabal Vega y Valle Matos (2006) en el capítulo 4 sobre flujo a través de medios porosos, y la presentada por Víquez (2018) en la revista *RedBioLac*.

Se partió de la estimación de la cantidad de H<sub>2</sub>S a eliminar  $q_{H_2S}$  (kg/h):

$$q_{H_2S} = Q_b * X_e \quad (\text{Ec. 2})$$

Siendo  $Q_b$  el flujo de biogás a la entrada (m<sup>3</sup>/h) y  $X_e$  Concentración del H<sub>2</sub>S a eliminar (kg/m<sup>3</sup>)

Luego se estimó la cantidad de carbón requerido  $W_c$  (kg) para remover el H<sub>2</sub>S calculado en la ecuación 2:

$$W_c = \frac{q_{H_2S}}{E_c} \quad (\text{Ec. 3})$$

Donde  $E_c$  es la eficiencia del carbono (kg H<sub>2</sub>S/kg carbón)

Para el caso de la determinación del volumen real del biogás dentro del relleno  $V_b$  (m<sup>3</sup>), se calculó primeramente el volumen de la cama  $V_c$  (m<sup>3</sup>), que corresponde al volumen que ocupa la cantidad de carbón determinado en la ecuación 3. En el cálculo se tuvo en cuenta la porosidad del carbón  $\varepsilon$ , pues el biogás solo se conduce por el espacio poroso del mismo.

$$V_c = \frac{W_c}{\rho_{ac}} \quad (\text{Ec. 4})$$

$$\varepsilon = 1 - \frac{\rho_{ac}}{\rho_{rc}} \quad (\text{Ec. 5})$$

$$V_b = V_c * \varepsilon \quad (\text{Ec. 6})$$

**Márgenes publica sus artículos bajo una [Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-SinDerivar 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)**



<http://revistas.uniss.edu.cu/index.php/margenes>  
[margenes@uniss.edu.cu](mailto:margenes@uniss.edu.cu)



Siendo  $\rho_{ac}$  ( $\text{kg/m}^3$ ) y  $\rho_{rc}$  ( $\text{kg/m}^3$ ) las densidades aparente y real del carbón respectivamente.

También fue determinado el tiempo de residencia del biogás  $t_c$  (s) a través del carbón a partir de la siguiente ecuación:

$$t_c = \frac{V_b}{Q_b} \quad (\text{Ec. 7})$$

Con respecto al volumen del filtro  $V_f$  ( $\text{m}^3$ ) se consideró para el cálculo, que este es igual al volumen que ocupa el material adsorbente ( $V_c$ ). Conociendo que La relación de esbeltez entre la altura de la columna y el diámetro de la columna según (Perry, 2008), es  $\frac{L}{D} = 3$ , se procede al cálculo del diámetro  $D_f$  (m) y altura de la columna  $H_f$  (m). Para facilitar la construcción y aumentar la resistencia de la misma, generalmente, son circulares en la sección transversal, así lo plantea (Acosta, 2005), por lo que el volumen de la columna corresponde al volumen de un cilindro:

$$V_f = \frac{\pi * D_f^2}{4} * H_f \quad (\text{Ec.8})$$

De esta forma se realiza un sistema de 2 ecuaciones con dos incógnitas y se obtienen los valores de  $H_f$  y  $D_f$ .

Se determinó además la velocidad ficticia del biogás dentro del relleno  $V_0$  (m/s) y el área del flujo aparente del lecho  $A$  ( $\text{m}^2$ ), que es el área del lecho perpendicular al flujo y se identifica con el área del recipiente que contiene al lecho:

$$V_0 = \frac{Q_b}{A} \quad (\text{Ec.9})$$

$$A = \frac{\pi * D_f^2}{4} \quad (\text{Ec.10})$$

La velocidad real del biogás dentro del relleno  $U$  (m/s) se puede determinar por dos formas: la ecuación 11, que está determinada por la velocidad ficticia y la porosidad del carbón; y la ecuación 12, que incluye la longitud recorrida por el gas (equivale a la altura de la columna  $H_f$ ) y el tiempo recorrido (corresponde al tiempo de contacto del gas con el adsorbente  $t_c$ ). Con ambas ecuaciones se obtienen los mismos resultados:

$$U = \frac{V_0}{\varepsilon} \quad (\text{Ec.11})$$

$$U = \frac{H_f}{t_c} \quad (\text{Ec.12})$$



La superficie específica volumétrica del lecho  $a_p$  ( $m^2/m^3$ ), el volumen de partícula  $V_p$  ( $m^3$ ) y la superficie de la partícula  $S_p$  ( $m^2$ ) fueron calculados a través de las ecuaciones 13, 14 y 15 respectivamente:

$$a_p = \frac{6*(1-\varepsilon)}{D_p} \quad (\text{Ec.13})$$

$$V_p = \frac{\pi*D_p^3}{6} \quad (\text{Ec.14})$$

$$S_p = \frac{a_p*V_p}{1-\varepsilon} \quad (\text{Ec.15})$$

Siendo  $D_p$  el diámetro de partícula del carbón (m).

En los lechos d rellenos se acostumbra a identificar las pérdidas de energía con las pérdidas o caídas de presión del fluido a través del lecho  $\Delta P$  (Pa) Rosabal Vega y Valle Matos (2006). Para el cálculo de  $\Delta P$ , primeramente se debe determinar las pérdidas por fricción  $\Sigma F$  (J/kg). Para ello se emplea la ecuación de Ergun (Ecuación 18), la cual aplica para flujo laminar y turbulento. Esta ecuación está influenciada por la esfericidad  $\psi$ , el valor de Reynold modificado  $Re_o$ , así como otras variables determinadas anteriormente. Las ecuaciones 16 y 17 facilitan su cálculo.

$$\psi * D_p = \frac{6*V_p}{S_p} \quad (\text{Ec.16})$$

$$\psi * Re_o = \psi * \frac{D_p*V_o*\rho_b}{\mu_b} \quad (\text{Ec.17})$$

$$\Sigma F = \frac{(1-\varepsilon)*V_o^2}{\varepsilon*\psi*D_p} * \left( \frac{150*(1-\varepsilon)}{\psi*Re_o} + 1,75 \right) * H_f \quad (\text{Ec.18})$$

Donde  $\mu_b$  (kg/ms) y  $\rho_b$  ( $kg/m^3$ ) son la viscosidad y la densidad del biogás respectivamente.

Finalmente se determina el valor de ( $\Delta P$ ), para el cual se emplea la ecuación 19:

$$\Delta P = \rho_b * \Sigma F \quad (\text{Ec.19})$$

### Diseño del sistema de tuberías

El biogás debe ser conducido por un sistema de tuberías para su transporte de una etapa de acondicionamiento a otra. Puesto que el biogás es una mezcla corrosiva se utilizan tuberías de PVC.

El parámetro principal que caracteriza a una tubería es su diámetro interior. El diámetro interior  $D_{int}$  (m) es función del caudal y de la velocidad del fluido que circula por su interior  $v_{tub}$  (m/s), según se muestra en la siguiente ecuación:

Márgenes publica sus artículos bajo una [Licencia CreativeCommons Atribución-NoComercial-SinDerivar 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)



<http://revistas.uniss.edu.cu/index.php/margenes>  
[margenes@uniss.edu.cu](mailto:margenes@uniss.edu.cu)

$$Q_b = \frac{\pi * D_{int}^2}{4} * v_{tub} \quad (\text{Ec. 20})$$

Para llevar a cabo el diseño se han realizado las siguientes suposiciones:

1. El caudal del biogás no varía a través del sistema.
2. La velocidad del biogás en la tubería ( $v_{tub}$ ) se toma como 5 m/s, valor máximo recomendable por la experiencia del equipo experto del curso de Formación Especializada en Biogás para Profesionales (EBP) (Hernán, 2017).

Sustituyendo el diámetro de la ecuación 20 se obtiene la siguiente expresión:

$$D_{int} = \sqrt{\frac{4 * Q_b}{\pi * v_{tub}}} \quad (\text{Ec. 21})$$

A partir del valor de diámetro obtenido se selecciona una tubería de PVC con características específicas para el transporte de gas (Anón s/f (c)).

Con el diámetro interior de la tubería seleccionada se recalcula la velocidad real del biogás en la misma.

$$v_{real\ tub} = \frac{4 * Q_b}{\pi * D_{int}^2} \quad (\text{Ec. 22})$$

### **Análisis económico y ambiental**

Para lograr la explotación eficaz de un proceso Químico Tecnológico no es suficiente solo diseñar los equipos, sino que además resulta imprescindible velar por su economía. La identificación de los gastos en una instalación tecnológica es de suma importancia para establecer prioridades en el esquema de evaluación y control.

#### Costo total de inversión:

El costo total de inversión depende del valor del material con el que se fabricará el filtro y las tuberías que transportan el biogás. La ecuación que permite su determinación de muestra a continuación:

$$CTI = CF + CT \quad (\text{Ec. 23})$$

Donde CTI es el costo total de inversión (\$), CF es el costo del filtro (\$) y CT (\$) es el costo de las tuberías.

Márgenes publica sus artículos bajo una [Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-SinDerivar 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)



<http://revistas.uniss.edu.cu/index.php/margenes>  
[margenes@uniss.edu.cu](mailto:margenes@uniss.edu.cu)

En el caso del costo de las tuberías, este depende de la longitud de las mismas, por lo cual se consideró para el cálculo un valor de 3 m, suficiente para el transporte del biogás.

#### Costo total de producción:

Con respecto al costo total de producción, se determinó que, en este caso, solo depende del costo de operacional, el cual a su vez depende del costo del material adsorbente. En el caso del carbón empleado en el diseño, no se dispone de su precio por lo que se ha dispuesto el del carbón activo de la compañía Norit con las propiedades más similares ( $\rho_a=4,60 \text{ kg/m}^3$  y área superficial total= $1100 \text{ m}^2/\text{g}$ ). Con respecto al periodo de agotamiento del carbón no fue analizado en este artículo, por lo que el cálculo quedara en función del mismo. Se tiene entonces que:

$$CTP = CO \quad (\text{Ec. 24})$$

$$CO = \frac{Wc}{\text{periodo de agotamiento}} * Pc \quad (\text{Ec. 25})$$

Donde CTP (\$/periodo de agotamiento) es el costo total de producción, CO es el costo operacional (\$/periodo de agotamiento), Wc es la cantidad de carbón requerido (kg), Pc (\$/kg) precio del carbón.

#### Análisis ambiental:

La instalación de un filtro con carbón activado para la desulfuración del biogás destinado a la cocción de alimentos, produce un impacto importante en el medio ambiente, por lo que es necesario analizar las posibles consecuencias que se puedan generar desde el punto de vista ambiental.

Para su correcta evaluación es importante destacar que el uso del biogás como combustible es una forma de reducir el empleo de combustibles fósiles, lo cual contribuye a evitar emisiones de gases al medio y provoca un ahorro de energía y dinero al país. Un análisis más detallado revela que el sulfuro de hidrógeno en combinación con el vapor de agua en el biogás crudo, puede formar ácido sulfúrico ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) el cual es muy corrosivo para los motores y sus componentes según Tacuri

Márgenes publica sus artículos bajo una [Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-SinDerivar 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)



<http://revistas.uniss.edu.cu/index.php/margenes>  
[margenes@uniss.edu.cu](mailto:margenes@uniss.edu.cu)

(2015), por lo que en cuanto a este aspecto, un filtro con carbón activado diseñado para tratar el biogás, es una tecnología que permite reducir las concentraciones de este componente evitando la corrosión en estufas de cocina y a su vez la contaminación atmosférica. Por otra parte, el carbón utilizado como adsorbente se puede reactivar a través de la oxidación térmica, lo que permite ser utilizado hasta 30 veces o más sin pérdida apreciable del poder de adsorción. (Julián-Valero, 2011). El reciclaje del carbón permite prevenir el desuso de materiales potencialmente útiles, reducir el consumo del material virgen, además de reducir el uso de energía. El reciclaje es bueno para el medio ambiente y el principio de una economía circular, que implica reducir los desperdicios a un mínimo, así como reutilizar, reparar, restaurar y reciclar materiales y productos existentes. (Anón, 2018)

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Con el desarrollo de las metodologías empleadas en este trabajo, se logró dar cumplimiento a los objetivos propuestos al inicio. Los resultados obtenidos de los principales parámetros del filtro, se muestran por medio de la siguiente tabla:

**Tabla 4.** Parámetros de diseño del filtro de carbón activado

Parámetros	Valores
Cantidad de H <sub>2</sub> S filtrada $q_{H_2S}$ (gH <sub>2</sub> S/h)	825
Cantidad de carbón requerido $W_c$ (kg)	8,25
Volumen real del biogás dentro del relleno $V_b$ (m <sup>3</sup> )	0,0144 (14,4 dm <sup>3</sup> )
Volumen de la cama $V_c$ (m <sup>3</sup> )	0,0183 (18,3 dm <sup>3</sup> )
Porosidad $\epsilon$	0,7857
Volumen del filtro (m <sup>3</sup> )	0,0183 (18,3 L)
Diámetro del filtro (m)	0,198 (198 mm)
Altura del filtro (m)	0,595 (595 mm)
Tiempo de residencia del biogás $t_c$ (s)	62,23
Velocidad ficticia del biogás dentro del relleno $V_o$	0,0075

Márgenes publica sus artículos bajo una [Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-SinDerivar 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)



<http://revistas.uniss.edu.cu/index.php/margenes>  
[margenes@uniss.edu.cu](mailto:margenes@uniss.edu.cu)

(m/s)	
Área del flujo aparente del lecho A (m <sup>2</sup> )	0,0308
Velocidad real del biogás dentro del relleno U (m/s)	0,0096
Superficie específica volumétrica del lecho a <sub>p</sub> (m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup> )	321,43
Volumen de partícula V <sub>p</sub> (m <sup>3</sup> )	3,3493E-08 (33,493 mm <sup>3</sup> )
Superficie de la partícula S <sub>p</sub> (m <sup>2</sup> )	50,24E-06 (50,24 mm <sup>2</sup> )
Pérdidas por fricción ΣF (J/kg)	0,0429
Caída de presión a través del lecho ΔP (Pa)	0,0597

Fuente: Elaboración propia

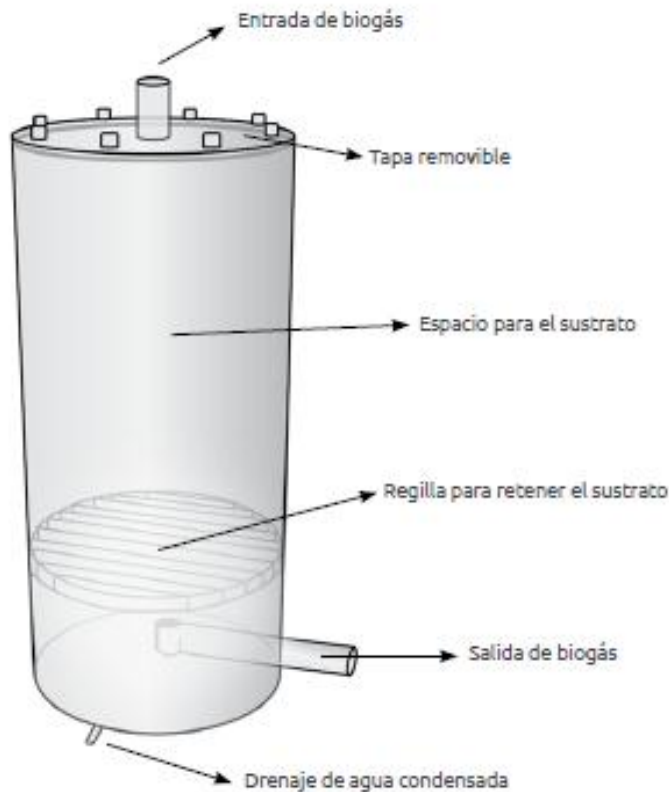
Tabla 5. Parámetros de diseño del sistema de tuberías

Parámetros	Descripción / Valor
Material	Tubería PVC (manguera)
Diámetro Interior (m)	0,0085 (8,5 mm)
Espesor (m)	0,0075 (2,75 mm)
Velocidad real del biogás en tuberías (m/s)	4,08

Fuente: Elaboración propia

La siguiente figura representa de forma general el diseño básico del filtro propuesto.





**Figura 1.** Esquema básico del filtro

**Fuente:** Viquez (2018)

La caída de presión obtenida dentro de la torre (0,0597 Pa) fue baja, ya que el porcentaje que representa con respecto a la presión inicial resultó ser ínfimo (0,000045 %).

El cálculo del mismo se muestra a continuación:  $\frac{0,0597 Pa}{131722,5 Pa} * 100 = 0,000045 \%$

Para completar el diseño se dejó un espacio abierto en el tope de la torre para asegurar la buena distribución del gas en el relleno, en este caso que el flujo será descendente. También se incluyó una rejilla lo suficientemente fuerte para sostener el peso del material adsorbente (8,25 kg). Al filtro se le colocó una tapa removible, por la cual será cambiado el medio filtrante una vez agotado, y con cierre hermético para que no le entre aire y tampoco se salga el biogás. En la parte inferior se dejó un espacio para

---

Márgenes publica sus artículos bajo una [Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-SinDerivar 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)



<http://revistas.uniss.edu.cu/index.php/margenes>  
[margenes@uniss.edu.cu](mailto:margenes@uniss.edu.cu)

acumular el agua condensada durante el proceso de adsorción y se incluyó una entrada y una salida para el biogás. El filtro fue construido de tubería PVC por la alta disponibilidad de este en el mercado, su bajo costo comparado con otros materiales y porque así se evita la corrosión por sulfuro de hidrógeno.

El análisis económico realizado indicó que el factor de mayor incidencia sobre el costo de producción lo marcó el costo operacional, debido a que el uso del carbón activado industrial incurre en grandes gastos, pues la capacidad de adsorción del carbón, a pesar de no haber sido analizado en este trabajo, se deteriora gradualmente con el uso. Cuando la calidad del efluente alcanza el nivel mínimo establecido en los estándares de calidad, el carbón agotado debe ser regenerado o extraído (Ures et al., 2014). Las tablas que se muestra a continuación muestra los resultados obtenidos sobre el costo total de inversión y el costo total de operación.

**Tabla 6.** Costo total de inversión

Aspecto	Cantidad	Costo (Unidad)	Referencia
Costo del filtro CF	1	25 (€)	(Anón s. f.(a))
Costo de las tuberías CT	2	1 (€/m)	(Anón s. f. (b))
<b>Costo total de inversión CTI</b>		<b>31 (€)</b>	

**Fuente:** Elaboración propia

**Tabla 7.** Costo total de producción

Aspecto	Costo (Unidad)
Costo del carbón activado	3,5 €/kg
<b>Costo total de producción CTP</b>	26 €/period de agotamiento

**Fuente:** Elaboración propia

En relación al análisis ambiental realizado, reveló que la construcción de un filtro con las características ya mencionadas constituye un paso de avance para un desarrollo

**Márgenes** publica sus artículos bajo una [Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-SinDerivar 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)



<http://revistas.uniss.edu.cu/index.php/margenes>  
[margenes@uniss.edu.cu](mailto:margenes@uniss.edu.cu)



sostenible, pues por un lado permite reducir las concentraciones de sulfuro de hidrógeno a la atmósfera y por otra parte contribuye a minimizar el consumo de energía eléctrica, evitando la corrosión de los equipos y aumentando así su vida útil. Además, el carbón una vez reactivado, puede ser reutilizado, lo que aporta beneficios al medio ambiente y favorece la economía circular.

## CONCLUSIONES

A partir de las metodologías empleadas en este artículo, se diseñó un filtro con carbón activado para tratar una corriente de biogás de 20 m<sup>3</sup>/d proveniente de residuales ganaderos. El filtro propuesto posee un volumen equivalente a 0,0183 m<sup>3</sup> (18,3 L), un diámetro de 0,198 m y una altura de 0,595 m. En cuanto a las tuberías que transportan el biogás, poseen un diámetro de 0,0085 m (8,5 mm) y espesor de 0,00275 m (2,75 mm).

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Acosta-Moreno, F. (2005). *Desodorización de las emisiones de una estación depuradora de aguas residuales mediante adsorción química*. Tesis de Grado. Cádiz, España. Universidad de Cádiz.
- Álvarez-Gutiérrez, N. (2016). *Proceso de adsorción para la captura de CO<sub>2</sub> en corrientes de biogás*. Tesis Doctoral. Oviedo, España, Universidad de Oviedo.
- Anón.s.f Ferretería online. Reciclaje: el uso inteligente de las materias primas - Fundación Bioplanet. *Bioplanet*. Recuperado de <https://paris2015cop21.org/reciclaje-uso-inteligente-materias-primas>
- Anón. s. f. ⇒Ferretería online .Tubería pvc serie b 200 barra de 1 metro ▷ Precio. Las Mejores Ofertas 2020-2021. Recuperado de [https://www.modregohogar.com/material-fontaneria/accesorios-pvc/tuberias-de-pvc/tuberia-pvc-serie-b-200-barra-de1metro.html?search\\_query=tuberia+de+198+mm+de+diámetro&results=2501](https://www.modregohogar.com/material-fontaneria/accesorios-pvc/tuberias-de-pvc/tuberia-pvc-serie-b-200-barra-de1metro.html?search_query=tuberia+de+198+mm+de+diámetro&results=2501)
- Anón. s. f. Ferretería Online. Naranja Pvc De Gas Glp Manguera Natural Flexible Manguera De Gas Para La Estufa - Buy Manguera De Gas Para Horno De Pvc Naranja, Manguera De Gas Natural Flexible Para Estufa, Tubería De Gas Glp Reforzado Con Fibra De Pvc Product on Alibaba.com». Recuperado de <https://spanish.alibaba.com/product-detail/Orange-PVC-LPG-Gas-Hose-Flexible-541773091.html?spm=a2700.galleryofferlist.2017127.10.1ea38277JsqcII&s=p>

---

Márgenes publica sus artículos bajo una [Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-SinDerivar 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)



<http://revistas.uniss.edu.cu/index.php/margenes>  
[margenes@uniss.edu.cu](mailto:margenes@uniss.edu.cu)

- Anón. s. f. Ferretería online «PVC Tubo De Alta Presión Para El Petróleo, El Gas Y El Transporte - Buy Tubería De Alta Presión, Tubería Para Aceite Y Gas, Tubería De Gas De Pvc Product on Alibaba.Com». *Www.Alibaba.Com*. Recuperado de [https://www.alibaba.com/product-detail/PVC-high-pressure-pipe-for-oil\\_60833373228.html](https://www.alibaba.com/product-detail/PVC-high-pressure-pipe-for-oil_60833373228.html))
- Araujo, A. G. T., y Ramírez Vázquez. A. (2015). Técnicas para la disminución en la concentración de ácido sulfhídrico en el biogás. *Jóvenes en la ciencia*, 1(2), 1449-53.
- Díaz, M. (2018). *Ecuaciones y cálculos para el tratamiento de aguas*. Madrid, España. Ediciones Paraninfo.
- Espinal-Arellano, J., Olivera-García. O., Hernández-Gómez, V. y Morillón-Gálvez, D. (2016). Potencial de generación de biogás de un rancho ganadero en la comunidad de San Bartolo Cautlalpan. *Revista de Sistemas Experimentales* 36(52).
- Fernández-Prado, B. (2014). *Ingeniería básica de una planta de acondicionamiento de biogás para uso en pilas de combustible de carbonatos fundidos (MCFC)*. Tesis de Grado, Sevilla, España. Universidad de Sevilla.
- Hernán-Quiroz, M. y de la Cerda, C. (2017). *Diseño de Plantas Medianas y Grandes*. Recuperado de <http://4echile.cl/4echile/wp-content/uploads/2017/11/Biogas-modulo4-Diseño-de-Plantas-Medianas-y-Grandes-11-2017.pdf>
- Julián-Valero, S. 2011. *Tratamiento de aguas residuales industriales con materia orgánica no biodegradable*. Tesis de Grado, Zaragoza, España. Escuela Universitaria Técnica Industrial de Zaragoza.
- Merino-Rodarte, M. A. (2017). *Ecodiseño de un sistema de remoción de sulfuro de hidrógeno en un biodigestor pecuario*. Tesis de Maestría. Nuevo León, México. Universidad Autónoma de Nuevo León, México.
- Montoya-Delgado, O. E. y Matute-Sánchez, R. H. (2015). *Evaluación del carbón activado obtenido a partir de la vaina de Malinche para adsorción de fenol del agua residual de laboratorio CIDEA-UCA*. Tesis de Grado, Managua, Nicaragua. Universidad Nacional de Ingeniería, Managua, Nicaragua.
- Ortega-Viera, L. Rodríguez, S., Fernández-Santana, E. y Pérez, L. (2015). Principales métodos para la desulfuración del biogás. *Revista Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, (36), 45-56.
- Perry, Robert H. (2008). Sección 16 Adsorption and Ion Exchange. *Chemical Engineers' Handbook*. Estados Unidos: McGraw-Hill. p 69



- Rincón-Martínez, J. M. y Electo Eduardo Silva-Lora, E. E. (2015). *Bioenergía: Fuentes: conversión y sustentabilidad*. 1. Edic. Bogotá, Colombia: Corporación Ema.
- Rosabal-Vega, J. M., y Valle-Matos, M. (2006). *Hidrodinámica y Separaciones Mecánicas*, Vol. 2, 3ra ed. La Habana, Cuba: Editorial Félix Varela.
- Sevillano, A. S., y Torres, P. B. (2013). Obtención de carbón activado a partir de madera. Recuperado de <https://www.redalyc.org/pdf/3236/323652916007.pdf>
- Tacuri-Ayala, F. J. (2015). *Mejoramiento del proceso de endulzamiento de un gas utilizado como combustible*. Tesis de Maestría, Quito, Ecuador. Univesidad Central del Ecuador.
- Ures-Rodríguez, P., Jácome-Burgos, A. y Suárez-López, J. (2014). Adsorción en carbón activo (ft-ter-002). Recuperado de <https://www.wateractionplan.com/documents/177327/558161/Adsorci%C3%B3n+en+carb%C3%B3n+activo.pdf/29bfa658-fbd1-c98b-1606-8eb1252fc1b9>
- Varnero, M. T., Carú, M., Galleguillos, K. y Achondo, P. (2012). Tecnologías disponibles para la Purificación de Biogás usado en la Generación Eléctrica. *Información tecnológica*, 23(2), 31-40.
- Viquez-Arias, J. (2018). ¿Cómo diseñar un filtro para biogás? *Revista RedBioLac*, (2), 1-76.

