

Sistema de remoción de sulfuro de hidrógeno y dióxido de carbono en base a sulfato de cobre, limaduras de hierro y carbón activado de biogás producido a partir de estiércol de cerdo

Artículo largo



Luis Fernando Salazar Del Pozo^{*ID}; Carla Alejandra Apaza Rojas^{ID};
Jaime Hamel Fonseca^{ID}; Ariel Sandoval Rojas^{ID}

Universidad Privada del Valle, Cochabamba, Bolivia.

*sdl0023992@est.univalle.edu

Resumen

El biogás es una fuente de energía renovable capaz de sustituir el gas natural, para garantizar el uso seguro y eficiente de este es necesario eliminar los gases contaminantes presentes, de lo contrario, podría ser un riesgo potencial a la salud y dañar equipos como generadores eléctricos y cocinas. Algunos de los métodos convencionales de purificación tienen costos elevados o generan desechos contaminantes. El presente trabajo propone un sistema de remoción a fin de proveer un biocombustible con un contenido de H₂S menor a 1 ppm y 25 % de CO₂ en una unidad piloto que produce 60 m³ de biogás al mes a partir de estiércol de cerdo. El estudio contempla la metodología necesaria para el diseño, construcción y evaluación experimental de un sistema de filtración utilizando sulfato de cobre, limadura de hierro y carbón activado.

Palabras clave:

Purificación; Limpieza de biogás; Filtración; Contaminantes; Energía renovable; Biomasa.

Hydrogen sulfide and carbon dioxide removal system based on copper sulphate, iron filings and activated carbon from biogas produced from pig manure

Abstract

Biogas is a renewable energy source capable of replacing natural gas, to ensure safe and efficient use it is necessary to eliminate the polluting gases; otherwise, it could be a potential health risk and damage equipment such as electric generators and stoves. Conventional purification methods have excessive costs or generate polluting waste. The present work proposes a removal system to provide biofuel with an H₂S content of less than 1 ppm and 25 % CO₂ in a pilot unit that produces 60 m³ of biogas per month from pig manure. The study contemplates the methodology necessary for the design, construction and experimental evaluation of a filtration system using copper sulfate, iron filings and activated carbon.

Keywords:

Purification; Upgrading; Filtration; Contaminants; Renewable energy; Biomass.

Forma de citar: Salazar del Pozo, L. F., Apaza Rojas, C. A., Fonseca, J. H., & Sandoval Rojas, A. (2023). Sistema de remoción de sulfuro de hidrógeno y dióxido de carbono en base a sulfato de cobre, limaduras de hierro y carbón activado de biogás producido a partir de estiércol de cerdo. RedBioLAC, 7, 12-19.

Introducción

En Bolivia el ministerio de hidrocarburos y energías informó que el 92,5 % del consumo energético primario depende de fuentes de energías no renovables y cerca de un 5,71 % de biomasa (Ministerio de Hidrocarburos y Energías, 2021). La energía generada a partir de biomasa se distribuye en más del 85 % por biomasa seca y residual, un 7 % por biocombustibles líquidos y un 3 % por biogás. Este último pese a ser un porcentaje bajo, ha tenido un crecimiento anual del 10 % a nivel internacional (WBA, 2020). En nuestro país tenemos sistemas de biodigestores para producir biogás, que suelen estar en lugares alejados y aislados de los centros urbanos por su fácil instalación y operación.

El biogás está compuesto mayoritariamente de metano (CH_4) (55 % y 70 %), dióxido de carbono (CO_2) (30-45 %) y sulfuro de hidrógeno (H_2S) (1-3 %) (Ortega *et al.*, 2015) y trazas de hidrógeno, nitrógeno, monóxido de carbono y oxígeno (Cepero *et al.*, 2012). Este tiene un alto potencial como sustituto del gas natural convencional, lo que lo hace importante para garantizar la independencia energética de países en vías de desarrollo (Sawalha *et al.*, 2020).

Entre los diferentes compuestos que forman parte del biogás, el de mayor interés es el metano, debido a que es el único capaz de generar energía en cantidades significativas, al poseer un poder calorífico superior de 37 706 MJ/m³ (GPA, 1995). El dióxido de carbono, que acompaña al biogás en estos sistemas, no es considerado como una sustancia combustible (Ponce, 2016), es decir que la capacidad calorífica del biogás se ve severamente reducida cuando el contenido de dióxido de carbono es alto (Morero, 2010), aunque se encuentra con frecuencia y en altas concentraciones. Es importante reducir, tanto como sea posible, su contenido ya que eliminar este garantiza la generación eficiente de energía con biogás (Marín De Jesus, 2021). Por otro lado, el sulfuro de hidrógeno es un gas corrosivo y dañino para la salud (Torneró & Ramírez, 2015), por lo que es importante la remoción previa de estos gases contaminantes para su uso (Sawalha *et al.*, 2020).

Si bien el metano del biogás es de gran interés para la industria energética, la presencia de gases contaminantes en su composición limita las aplicaciones potenciales de este como fuente de energía, (Ahmed *et al.*, 2021). Para contrarrestar esto, la investigación de tecnologías de remoción de contaminantes del biogás ha generado métodos para la purificación basadas en distintos procesos físicos y químicos capaces alcanzar un gas con concentraciones de metano superiores al 98 %. Sin embargo, para lograr esto se requiere de insumos que muchas veces son inaccesibles en instalaciones rurales y domésticas, además de su elevado costo (Figueroa *et al.*, 2019).

La unidad de digestión anaeróbica piloto con la que cuenta la Universidad Privada del Valle está en operación desde

el año 2006. A lo largo de este tiempo se ha estudiado el proceso usando estiércol de cerdo recolectado de granjas cercanas a la institución; los filtros usados anteriores al proyecto eran rellenos de tierra vegetal, aserrín y carbón vegetal, los cuales han tenido falencias en la remoción de contaminantes del biogás a caudales elevados, rápida saturación y generación de desechos sólidos contaminantes, lo que reduce la calidad del Biogás (Zabalaga, 2019). Se busca construir y monitorear un sistema de filtración de contaminantes de biogás a fin de garantizar la remoción continua de sulfuro de hidrógeno y reducir el contenido de dióxido de carbono para poder dar uso al biogás en un sistema de cogeneración.

Metodología

Proceso de producción de biogás

El proyecto ha sido desarrollado en la Unidad de Producción Experimental de Biogás (UEPB) de la Universidad Privada del Valle campus Tiquipaya, que fue construido con fines investigativos y académicos. La unidad piloto opera por lotes con una carga de 4 m³ en una relación de 3:1 con agua: estiércol de cerdo proveniente de la granja Escobar ubicada en cercanías del campus. En la siguiente tabla se muestra las características de la materia prima utilizada:

Tabla 1 | Análisis fisicoquímico del estiércol de cerdo.

Parámetros	Unidad	Resultado
pH ¹	Adimensional	6,0
NKj (nitrógeno Kjeldahl) ²	mg/l	253
Carbohidratos ²	%	1,3
Cenizas ²	%	0,19
Humedad ²	%	94,8

Fuentes: ¹Propia (2022), ²CIQ (2019).

Las características fisicoquímicas del agua utilizada en el proceso de producción se detallan en la **Tabla 2**, donde se observa que no existen trazas de cloro y otros metales que lo afectan directamente.

Tabla 2 | Análisis fisicoquímico del agua.

Parámetros	Unidad	Resultado
pH	Adimensional	6,75
Conductividad	μS/cm	241
Cloro Residual	mg/l	<0,1
Manganeso	mg/l	<0,002
Alcalinidad	mg/l	134
Dureza Total	mg/l	104
Hierro Total	mg/l	<0,005

Fuente: CIQ (2019).

Se monitoreó el volumen de biogás producido por lote de producción durante un año (7 lotes), en la **Figura 1** se

muestran los volúmenes de producción diaria obtenidos con relación al tiempo, el descenso o caída del volumen de producción define el tiempo de retención del biodigestor, que resulta en unos 15 días. En este también se evidencian volúmenes de producción pequeños en los primeros lotes de arranque y su estabilización a partir de la segunda carga de producción.

En la **Tabla 3** se resume el comportamiento monitoreado de las variables de producción de UEPB, en esta se muestran los valores promedio de producción de mediciones diarias de volumen, caudal y presión al ingreso del sistema de purificación del biogás.

La unidad piloto cuenta con 2 puntos de muestreo, aguas arriba y abajo del sistema de filtración, estas se utilizaron para evaluar el contenido de sulfuro de hidrógeno (H₂S),

dióxido de carbono (CO₂) y otras variables del proceso. El monitoreo fue realizado diariamente, tomando mediciones en la mañana y en la tarde. Las mediciones instrumentales se realizaron con los equipos Geotech, Modelo GA 5000, para evaluar la concentración de metano, dióxido de carbono y oxígeno en el biogás durante los períodos de producción; monitor MSA Modelo Altair, para evaluar la concentración de monóxido de carbono y sulfuro de hidrogeno; Kane, modelo AUTOplus 4-2, capaz de detectar las concentraciones de CO₂, CO, O₂ y NO_x y el ToxiRAE Pro para la medición de sulfuro de hidrogeno en un rango de 1-100 ppm. Para la medición de humedad se utilizó un higrómetro digital PCE-555, estas mediciones se realizaron en ambos puntos de muestreo de la línea de producción (ver **Tabla 5**).

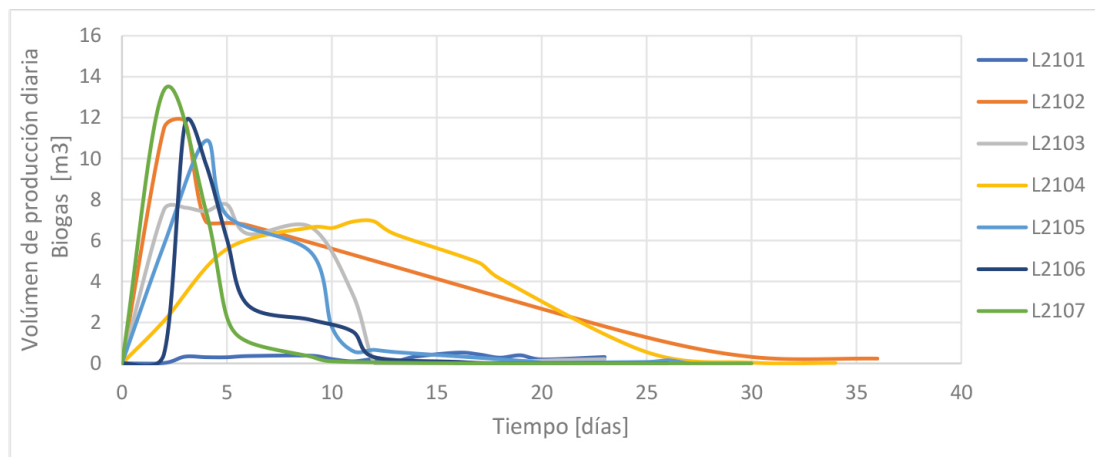


Figura 1 | Tiempo de residencia en la producción de biogás.

Tabla 3 | Variables del proceso de producción del biogás.

Variable	Unidad	Valor
Volumen total producido	[m ³]	63
Caudal	[m ³ /día]	9,6
Presión de entrada	[mbar]	4
Humedad relativa	%	85
Tiempo de residencia	[días]	10

Para la cuantificación de la cantidad de sulfuro de hidrógeno, para valores por encima de los 100 ppm, se recolectó biogás en un contenedor de volumen conocido, al que se inyectó una solución con concentración conocida de sulfato de cobre p.a. El precipitado recolectado se llevó a peso constante a 120 °C, según la siguiente reacción:



Cálculo de la cantidad de sulfuro de hidrógeno a remover por lote de producción

La cantidad de sulfuro de hidrogeno aproximada por lote de producción se calculó asumiendo un incremento en la producción de biogás tras varias cargas consecutivas. El cálculo será realizado mediante la siguiente fórmula:

$$V_{\text{sulfuro}} = V_{\text{gas}} \times \frac{\%_{\text{sulfuro}}}{100} \quad (2)$$

Donde:

V_{sulfuro} : Volumen de sulfuro de hidrógeno en [m³]

V_{gas} : Volumen de gas por lote en [m³]

%sulfuro: Porcentaje de sulfuro de hidrógeno por volumen de gas

Los moles se calculan con la siguiente relación:

$$n = \frac{PV}{RT} \quad (3)$$

Y finalmente se halla la masa de sulfuro de hidrógeno a remover mediante la siguiente fórmula donde n y M son los moles y peso molecular del sulfuro de hidrógeno:

$$m_{sulfuro} = n_{sulfuro} \times M_{sulfuro} \quad (4)$$

Diseño del filtro de sulfato de cobre

El sistema de remoción inicia con el filtro de sulfato de cobre, donde el biogás burbujea en una solución saturada de sulfato de cobre al 96 % de pureza, este requiere de una presión de 4 mbar para su funcionamiento (ver [Tabla 3](#)),

este filtro servirá únicamente para los primeros 5 días de producción donde el caudal y la presión alcanzan sus valores más altos.

El sulfato de cobre reacciona con el sulfuro de hidrógeno para formar sulfuro de cobre CuS, que tiene una solubilidad en agua muy baja (K_{ps} de 8×10^{-37}) (Skoog & West, 2015). La reacción que se da entre el sulfuro de hidrógeno y el sulfato de cobre se muestra en la ecuación 1.

Una de las principales ventajas de este método es la disponibilidad del sulfato de cobre a nivel comercial. El filtro fue fabricado con material de PVC, en su interior cuenta con un burbujeador horizontal que mejora el contacto del gas con la solución de sulfato de cobre. La [Figura 2](#) muestra el esquema de funcionamiento de este.

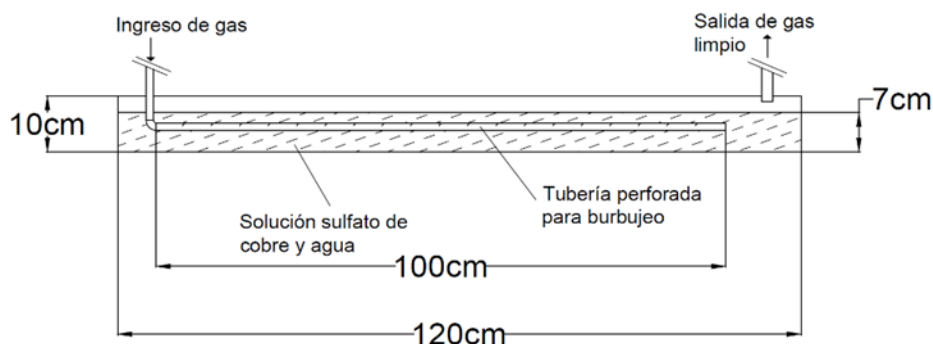


Figura 2 | Filtro de remoción de H₂S.

Conociendo el peso molecular de sulfato de cobre y la cantidad de sulfuro de hidrógeno en moles a remover por la reacción anterior, se determinó la cantidad en masa de sulfato de cobre a utilizar:

$$m_{CuSO_4} = mol_{CuSO_4} \times M_{CuSO_4} \quad (5)$$

Finalmente se calculó el volumen de agua requerida para disolver el sulfato de cobre, considerando su solubilidad en agua (σ_{CuSO_4}) de 20,3 g/100 ml a 20 °C de acuerdo con lo estimado por [Brown \(2000\)](#), en este volumen la solución no debe ser mayor que la presión del sistema o no podrá burbujear.

Diseño del filtro de limadura de hierro

Se debe emplear lana o limadura de hierro para la absorción de H₂S, este material es capaz de lograr una remoción efectiva del sulfuro de hidrógeno, especialmente en forma de óxidos de hierro mediante las siguientes reacciones ([Gomez & Roa, 2020](#)):



Una vez determinada la cantidad de sulfuro de hidrógeno a remover, se calculó el requerimiento en masa de limadura de hierro utilizando la siguiente relación:

$$m_{hierro} = \frac{m_{sulfuro}}{X_{H_2S}} \quad (8)$$

X_{H_2S} será el valor real de remoción de sulfuro de hidrógeno que se utilizará para el requerimiento real de material del filtro, el cual corresponde a una remoción de 0,221 kg de sulfuro de hidrógeno por kilogramo de limadura de hierro humedecido de acuerdo con datos experimentales obtenidos anteriormente. La propuesta contempla el uso de un filtro de limadura de hierro humedecido para la remoción de sulfuro de hidrógeno en los días de producción, a partir del 5 día donde los caudales de producción son pequeños,

estos caudales y la estructura del filtro combinan tierra vegetal que mantiene la humedad del filtro hasta un 40 %, el aserrín facilita la difusión del biogás y brinda mayor tiempo de contacto con hierro. El diseño considera un exceso de material del 20 % para incrementar la superficie de contacto y la eficiencia de remoción, la siguiente tabla muestra los materiales contenidos en este filtro.

Tabla 4 | Filtro de limadura de hierro.

Material	
CAPA 1	Aserrín
	Tierra vegetal
CAPA 2	Limadura de Hierro
CAPA 3	Aserrín
	Tierra vegetal
CAPA 4	Limadura de Hierro

El filtro será fabricado relleno un contenedor plástico de 160 L con el material, cuenta con anillas de plástico recubiertas con malla milimétrica y tela como separación entre las capas de distintos materiales que a su vez favorecen la difusión del flujo. La limadura de hierro se oxidó previamente, lo cual mejoró la eficiencia de la reacción con el sulfuro de hidrógeno.

Diseño del filtro de carbón activado

El uso de carbón activado es indicado para biogás con concentraciones medias de sulfuro de hidrógeno, en este caso, el contenido de sulfuro se aproxima al límite menor del rango esperado (Tabla 5). Para el proyecto se utilizó carbón activado de malla 8x30 (1,5 a 2,5 mm), este asegura que se mantengan valores de aproximadamente 1 ppm a lo largo de toda la producción. La eficiencia de remoción puede ser incrementada en presencia de oxígeno y agua de acuerdo con la siguiente reacción (Varnero *et al.*, 2012):



Para determinar el requerimiento de carbón activado para el sistema se efectuaron cálculos de acuerdo con la metodología encontrada en un artículo de Carbone-Sori *et al.* (2020). De acuerdo con datos teóricos, el carbón activado tiene una capacidad de remoción (E_c) de 100 g H_2S por kilogramo de carbón (Carbonel-Sori *et al.*, 2020):

$$m_c = \frac{m_{\text{H}_2\text{S}}}{E_c} \quad (10)$$

Si bien se consideró el cálculo del requerimiento de carbón activado para la remoción del sulfuro de hidrógeno, este material también es capaz de remover un porcentaje del CO_2 presente en el gas por lo que se consideró el nivel más alto monitoreado.

El contenido promedio de CO_2 en el biogás producido es de 32,5 %, por lo que la composición en promedio de metano será de 67,5 %. De acuerdo con la bibliografía, el valor del poder calorífico inferior del metano puro es de 35,8 MJ/m^3 (The Engineering ToolBox, 2003), con este dato se determinó que el poder calorífico inferior promedio del biogás producido es de aproximadamente 27 MJ/m^3 . Estos datos se insertaron también en la herramienta de simulación Aspen HYSYS, donde se obtuvo un valor de 24 MJ/m^3 .

Resultados y discusión

El monitoreo diario de composición y parámetros de producción de biogás en la UEPB permitió identificar rangos de concentración de los gases contaminantes a remover, así también la presión y caudal de sistema para su tratamiento. Los resultados de la medición de sulfuro de hidrógeno previo al sistema de filtración muestran valores entre 0,16 y 0,18 % H_2S , se encontraron valores cercanos al límite inferior del rango esperado teóricamente entre 0,1 y 0,2 % (Turco *et al.*, 2016) y las mediciones de CO_2 varían entre 30 % y 38 %, resultados similares a los de Huertas *et al.* (2019).

El proceso de remoción de contaminantes inicia con una expansión $\frac{3}{4}$ " a 1" con una válvula (VLV-001) que permite drenar el agua para que se pueda condensar antes de ingresar a los filtros (Tabla 3), de manera más sencilla garantizando un funcionamiento continuo del sistema (Figura 3).

El filtro FR-100 de sulfato de cobre se instala a continuación, este permite remover el sulfuro de hidrógeno durante los picos de producción a altos caudales de producción, demostró ser capaz de reducir el contenido de H_2S hasta valores de 100 ppm en comparación con el sistema anterior, que permitía el paso de biogás con más de 1500 ppm de sulfuro en esta etapa.

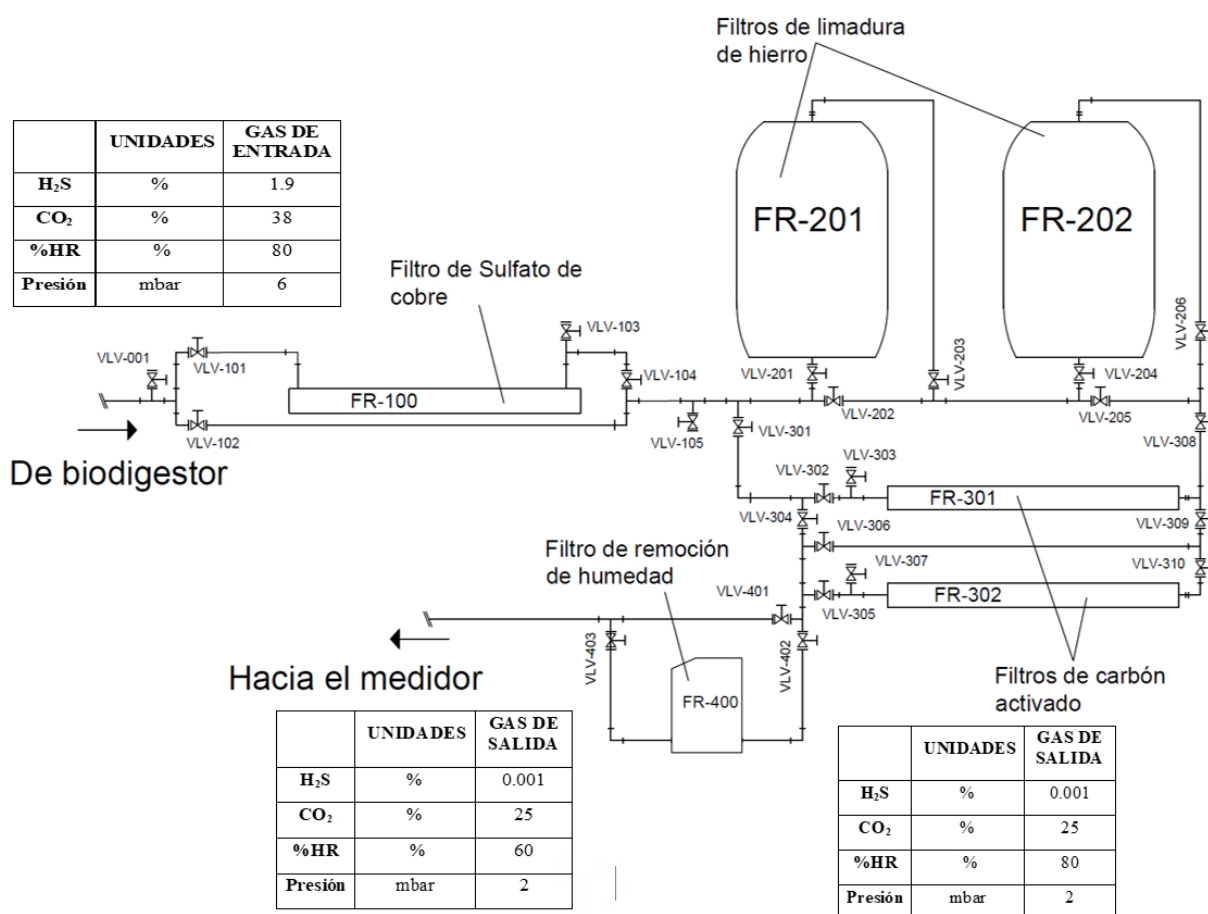


Figura 3 | Diagrama del sistema de remoción propuesto.

Los filtros FR-201 y FR-202 de limadura de hierro se instalan a continuación del filtro de sulfato de cobre tras una válvula de toma de muestra, estos trabajarán de forma intermitente para facilitar el mantenimiento del sistema y asegurar el funcionamiento continuo o en serie, en caso de ser necesario. Se determinó mantener este tipo de filtros debido a que el filtro de burbujeo no es capaz de funcionar tras el descenso de la presión del gas en la línea, lo que generaría taponamiento y reflujo hacia el biodigestor. Estos filtros extienden su tiempo de saturación a 200 m³ de biogás dado que ya no removerán el grueso del contenido de H₂S durante el pico de la producción, reduciendo la cantidad de desechos generada. Este filtro redujo el contenido de sulfato hasta 1 ppm.

Los filtros de carbón activado (FR-301 y FR-302) y los de limadura de hierro podrán trabajar intermitente o en serie, se deben instalar a continuación del filtro de sulfato de cobre y garantizarán que el contenido de sulfato se mantenga por debajo de 10 ppm durante la curva de producción, además de reducir el contenido de CO₂, que se redujo de un máximo de 38 % a 25 %, lo que significa un incremento en el poder calorífico inferior de 23 a 27 MJ/m³. Finalmente, la trampa de agua FR-400 servirá para la condensación del agua en el flujo de biogás antes del ingreso al medidor y posteriormente al sistema de almacenamiento.

Tabla 5 | Resultados del sistema de remoción.

	UNIDADES	GAS DE ENTRADA	GAS DE SALIDA
H ₂ S	%	1,9	0,001
CO ₂	%	38	25
%HR	%	80	60
Presión	mbar	6	2
Poder calorífico	MJ/m ³	23	27

La tabla 5 muestra las condiciones del biogás en entrada y salida promedio, la caída de presión del sistema de filtración es de 4 mbar y el poder calorífico indica que es el adecuado para poder alimentar un sistema de cogeneración.

Conclusiones

La combinación de métodos de absorción de sulfuro de hidrógeno por limadura de hierro humedecida, precipitación de H₂S por reacción con una solución de sulfato de cobre, adsorción mediante carbón activado y la reducción de humedad por condensación en dos diferentes puntos alcanzó concentraciones de sulfuro de hidrógeno de 1 ppm. A lo largo de la producción, mediante la remoción de dióxido de carbono el poder calorífico superior se incrementó

hasta 27 Mj/m³. El sistema logró mantener la humedad relativa del biogás cerca del 60 %, lo suficiente para evitar su condensación en la línea. Grupos electrógenos pueden utilizar concentraciones alcanzadas de dióxido de carbono seguramente, asegurando un suministro continuo de energía renovable.

La alta variabilidad del caudal de producción del biogás repercute en el tiempo y la eficiencia de remoción, en caudales altos no se tenía una remoción constante, lo que provocaba daños en la estructura de la campana de almacenamiento y accesorios en general, la propuesta diseñada asegura una remoción continua de H₂S en caudales mayores a 0,4 m³/h.

El uso discontinuo del biodigestor provoca bajos volúmenes iniciales de producción de biogás, tras observar una tendencia creciente, se proyecta por encima de los 100 m³ por carga de 1m³ de estiércol de cerdo. Se determinó que el tiempo de residencia de cada lote es de unos 15 días, por lo que se podría superar los 200 m³ mensuales manteniendo un régimen semicontinuo de producción.

Agradecimientos

A la Universidad Privada del Valle por otorgar el financiamiento necesario para la realización de este estudio a través de su Dirección de Investigación. Al laboratorio de Petróleo, Gas y Energías por su colaboración y prestar sus instalaciones para el desarrollo del proyecto.

Referencias

- Ahmed, S. F., Mofijur, M., Tarannum, K., Chowdhury, A. T., Rafa, N., Nuzhat, S., . . . Mahlia, T. M. (2021). Biogas upgrading, economy and utilization: a review. *Environmental Chemistry Letters*, 19(6), 4137-4164. <https://doi.org/10.1007/s10311-021-01292-x>
- Brown, P. (2000). Docbrown. School Chemistry Notes: Solubility of gases or salts in water - using solubility curves: Available at: <https://www.docbrown.info/page01/AqueousChem/AqueousChem4.htm> [Accessed 13/08/2022].
- Carbonel-Sori, L., López-González, L., & Orestes, F. (2020). Diseño de un filtro para la reducción de h₂s presente en una corriente de biogás. *Márgenes*, 8.
- Cepero, L., Savran, V., Blanco, D., Piñón, M. D., Suárez, J., & Palacios, A. (2012). Producción de biogás y bioabonos a partir de efluentes de biodigestores Production of biogas and biofertilizers from biodigester effluents. *Pastos y Forrajes*, 35(2), 219-226.

- Figueroa, C., Alegría, C., Meza, V., & Quipuzco, L. (2019). Eficiencia de la desulfuración del biogás mediante biofiltración empleando soportes orgánicos. *Agroindustrial Science*, 9(1), 29-37. <https://doi.org/10.17268/agroind.sci.2019.01.04>
- Gomez, E. N., & Roa, N. (2020). Desarrollo de una herramienta para el diseño de un sistema de remoción de sulfuro de hidrógeno presente en el biogás empleando lana de acero [Tesis, Fundación Universidad de América]. <https://hdl.handle.net/20.500.11839/8115>.
- GPA. (1995). GPA 2145 Propiedades de los hidrocarburos del gas natural.
- Huertas, J. (2019). Evaluación de la remoción del sulfuro de hidrógeno en el biogás mediante el método de la aireación [Tesis, Universidad Nacional Agraria La Molina]. <https://hdl.handle.net/20.500.12996/4042>
- Marín De Jesus, D. F. (2021). Innovative technologies for biogas upgrading [PhD Tesis, Universidad de Valladolid]. <https://www.educacion.gob.es/teseo/imprimirFicheroTesis.do?idFichero=whku6JIHQnk%3D>
- Ministerio de Hidrocarburos y Energías (MHE). (2021). Balance Energetico Nacional. Bolivia: Ministerio de Hidrocarburos y Energia. <https://www.mhe.gob.bo/balance-energetico-nacional-2006-2021/>
- Morero, B., Gropelli, E., & Campanella, E. (2010). Revisión de las principales tecnologías de purificación de biogás. *Ciencia y Tecnología*, 10. <https://doi.org/10.18682/cyt.v1i1.767>
- Mwacharo, F., Bhandari, S., Othman, A., & Anne-Riikka, R. (2020). Biogas drying and purification methods. *Kokkola, Finlandia: Centria University of Applied Sciences*. <https://www.theseus.fi/handle/10024/356234>
- Ortega, L., Bárcenas, L., Fernández, E., & Rodríguez, S. (2015). Principales métodos para la desulfuración del biogás. *Ingeniería Hidraulica y Ambiental*, 36(1), 45 - 56.
- Ponce, E. (2016). Métodos sencillos en obtención de biogás rural y su conversión en electricidad. *IDESIA*. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-34292016005000011>
- Sawalha, H., Maghalseh, M., Qutaina, J., Junaidi, K., & Rene, E. R. (2020). Removal of hydrogen sulfide from biogas using activated carbon synthesized from different locally available biomass wastes - a case study from Palestine. *Bioengineered*, 11(1), 607-618. <https://doi.org/10.1080/21655979.2020.1768736>

- Skoog, D., & West, D. (2015). *Química Analítica*. 9 ed. Cengage Learning. https://www.surcosistemas.com.ar/virtual/ebooks/QUIMICA_ANALITICA_Novena_edicion.pdf
- The Engineering ToolBox. (2003). Fuels - Higher and Lower Calorific Values. [online] Available at: https://www.engineeringtoolbox.com/fuels-higher-calorific-values-d_169.html [13/08/2022].
- Tornero Araujo A. G., & Ramírez Vázquez, J. A. (2015). Técnicas para la disminución en la concentración de ácido sulfhídrico en el biogás. *Jóvenes en la Ciencia*, 1(2), 1449-1453.
- Turco, M., Ausielo, A., & Micoli, L. (2016). *Treatment of biogas for feeding high temperature fuel cells*. Suiza: Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-03215-3>
- Varnero, M., Caru, M., Galleguillos, K., & Achondo, P. (2012). Tecnologías disponibles para la Purificación de Biogás usado en la Generación Eléctrica. *Información tecnológica*, 23(2), 31-40. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642012000200005>
- WBA. (2020). *Global Bioenergy Statistics 2020*. Available at: <https://www.worldbioenergy.org/uploads/201210%20WBA%20GBS%202020.pdf>
- Zabalaga Lobo, D. (2019). *Diseño de un sistema de cogeneración, para su implementación en la unidad experimental de producción de biogás de la universidad del valle*. Cochabamba, Bolivia: Universidad del Valle.