

Diseño de planta para la codigestión anaerobia de residuales vinaza-cachaza de la industria azucarera

Designing a plant for anaerobic co-digestion of vinasse-filter cake waste from the sugar industry

Julio César Borrero-Neninger^{1*}, Deny Oliva-Merencio², José Arzola-Ruiz²

¹Universidad de Holguín, Cuba

²Universidad Tecnológica de La Habana, Cuba

*Autor para la correspondencia: jborrero@uho.edu.cu

Resumen

La digestión anaerobia para la obtención de biogás se considera una tecnología para producir energía a partir de una gran variedad de residuos y subproductos de procesos industriales. Esta investigación tuvo el propósito de determinar el potencial de producción de biometano generado mediante la codigestión anaeróbica de la vinaza de la destilería y la cachaza como producto de mezcla para elevar el potencial energético. Se optó por equipos de funcionamiento continuo, para lo cual se seleccionaron los reactores anaeróbicos de flujo ascendente (UASB). Se estableció el pre-tratamiento de la cachaza a partir del empleo simultáneo del tratamiento alcalino y térmico, aspecto sin precedente en la literatura especializada y considerado un aporte de la investigación. Se diseñó una etapa de postratamiento para incrementar la producción específica de biogás, lo que constituye un aporte al diseño de instalaciones de este tipo en el país.

Palabras clave: biogás; digestión anaerobia; diseño; vinaza-cachaza; energía renovable.

Abstract

Anaerobic digestion to obtain biogas is considered a technology for producing energy from a wide variety of waste and byproducts of industrial processes. This research is aim to determine the production potential of biomethane generated through the anaerobic co-digestion of the distillery stillage and filter cake as a mixture product to increase the energy potential. Continuous operating equipment was chosen, for which up flow anaerobic reactors (UASB) were selected. The pre-treatment of the filter cake was established through the simultaneous use of alkaline and thermal treatment, an aspect

without precedent in specialized literature and considered a contribution to research. A post-treatment stage was designed to increase the specific production of biogas, which constitutes a contribution to the design this kind of facilities in the country.

Keywords: biogas; anaerobic digestion; design; vinasse-filter cake; renewable energy.

1. INTRODUCCIÓN

El agotamiento progresivo de las reservas de combustibles fósiles y la acelerada contaminación del medio ambiente, hacen que un cambio de la matriz energética con mayor participación de las fuentes renovables de energía sea un asunto de primera prioridad. Por otro lado, la búsqueda de soluciones que contribuyan al desarrollo sostenible también apunta en esa dirección (Castillo-Álvarez *et al.* 2021).

En Cuba este asunto adquiere mayor significado por lo limitado de los recursos energéticos disponibles y los altos precios del combustible. Por ello se realizan numerosos programas y proyectos, así como un control riguroso, tanto en el sector residencial como empresarial, del uso de los portadores energéticos al tiempo que se impulsa una política dirigida al logro de una transición energética donde se aprovechen todas las fuentes posibles. Determinar los potenciales de producción de energía a través de diferentes fuentes renovables, en el contexto de la Transición Energética Justa, exige integrar todas las variables que puedan incidir en la viabilidad del proyecto o verse incididas por la implementación de este (Vélez-Torres *et al.* 2023).

Una de las variantes mayormente consideradas es el empleo del biogás para la generación directa de energía térmica para diferentes usos o para la generación de electricidad (Barrera-Cardoso *et al.* 2010; Panesso-Andrés *et al.* 2011; Bravo-Hidalgo 2015; Venegas-Venegas, Raj-Aryal y Pinto-Ruíz 2019; Roslee-Mensah *et al.* 2021).

El biogás puede generarse a partir de diferentes sustratos. En la literatura consultada, la mayoría de los reportes acerca de producción de biogás se basan en el empleo de residuos orgánicos provenientes de la actividad agropecuaria y humana (Chiriboga-Novillo 2010; González-Rodríguez *et al.* 2020; Chowdhury *et al.* 2021). Sin embargo, considerar los impactos medioambientales concernientes a su producción juega en estos tiempos un papel fundamental (Scaroni *et al.* 1997; Hijazi, Tappen y Effenberger 2019).

La biomasa camera, entre las que están el bagazo, la paja y la cachaza, es generada durante la producción del azúcar en los centrales azucareros. La vinaza no se obtiene directamente de la producción del azúcar, pero es un residuo indirecto, generado de la destilación alcohólica de la melaza producida en el central. El bagazo y la paja son empleados mundialmente

como combustibles naturales en bioeléctricas para la generación de energía y vapor.

Por otra parte, a la cachaza se le aplica un proceso de compostaje durante el cual pierde su humedad, peso y volumen lo que facilita su transportación y posterior utilización en los campos como fertilizante. Las vinazas, luego de aplicarle un pretratamiento, se utilizan en la producción de levadura torula para el alimento animal, como abono para el suelo, para la producción de biogás y también se adicionan en el compostaje de la cachaza.

Una alternativa estudiada en Cuba es la producción de biogás y biofertilizante a partir de la cachaza, lo que constituye además una alternativa de diversificación de la industria azucarera nacional. De acuerdo con Delgado (2015) es factible la producción de electricidad a razón de 1,8-2,0 kWh/m³ de biogás, llegándose a producir bajo tratamiento anaerobio alrededor de 130-155 m³ de biogás por tonelada de cachaza (Castillo-Álvarez *et al.* 2021).

Suárez y otros investigadores (2011) realizan un análisis de los biodigestores existentes en Cuba y las materias orgánicas utilizadas para la producción de biogás mencionando entre ellas la cachaza proveniente de la producción azucarera, pero se limitan a dar información general que permita elaborar una metodología de cálculo para el diseño de un biodigestor industrial. Otros autores como Villarrubia-López y Villarrubia (2001); Martínez-Lozano, (2015); Suárez-Hernández *et al.* (2018) y Martínez-Figueroa (2020) realizan un estudio bibliográfico sobre la situación de producción de biogás en el mundo y en Cuba, haciendo énfasis en algunos aspectos relacionados con el biogás y ofrecen una metodología para calcular una planta de biogás que puede ser utilizada en comunidades de poca densidad poblacional para la cocción de alimentos, pero no consideran el empleo de la cachaza sino de residuos de cosecha y estiércol.

Hernández-López y demás colaboradores (2023) realizan un estudio del bagazo y vinazas de agave que se recolecta en las instalaciones de una fábrica de mezcal; evalúan el uso de bagazo y vinazas para la producción de hidrógeno y metano, mediante un proceso de digestión anaerobia húmeda y seca en dos etapas. El proceso de digestión supone una serie de fases sucesivas que incluyen hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis.

Partiendo de la investigación desarrollada por López-González (2016) sobre cómo lograr el pre-tratamiento de la cachaza para la digestión anaerobia a partir del empleo simultáneo del tratamiento alcalino y térmico, se complementa con el diseño de una planta de biogás para aprovechar los residuales vinaza-cachaza. El máximo rendimiento de metano obtenido a 150°C y 20 minutos (logRo=2,77), representó un incremento en un 63 % sobre la cachaza sin pre-tratar. Para una temperatura de 175 °C, tiempos

superiores a 2 minutos llevaron a una reducción de un 11% en el rendimiento de metano, lo cual sugiere la formación de sustancias recalcitrantes complejas y/o compuestos tóxicos para las condiciones de tratamiento más severas. Dicho comportamiento fue más crítico a altas severidades (3,64; 4,25 y 4,35), las cuales se corresponden con 200 °C por 5 minutos, 200 °C por 20 minutos y 210 °C por 12,5 minutos, respectivamente (López-González 2016).

Se demostró la efectividad del pre-tratamiento termo-alcálico y por agua caliente presurizada en la mejora del porcentaje de solubilización de la Demanda Química de oxígeno (DQO), lográndose valores de hasta 43 %, lo cual resulta novedoso para el caso de la cachaza.

Se detectó la presencia de HMF, furfural y de ácidos fenólicos en el hidrolizado de la cachaza pre-tratada por LHW, pero a concentraciones por debajo a las inhibitorias a la digestión anaerobia.

Las vinazas, en general, poseen un alto contenido de materia orgánica que varía según la materia prima empleada y la eficiencia de los procesos de fermentación-destilación, lo que expresado en DQO oscila entre 50 kgDQO/m³ y 150 kgDQO/m³ y DBO entre 25 kgDQO/m³ y 80 kgDQO/m³ (Jiménez *et al.* 2006).

Resultados de investigaciones llevadas a cabo a escala de laboratorio (López-González, Pereda-Reyes y Romero-Romero 2017), muestran que las vinazas de destilerías, por su elevada carga orgánica, son buenos sustratos para la digestión anaeróbica, reportándose un promedio de metano de las vinazas de 240 mL CH₄/g DQO

La cachaza, residuo que se elimina en el proceso de clarificación del jugo de la caña, posee un alto contenido (85 %) de materia orgánica insoluble (López-González, Pereda-Reyes y Romero-Romero 2017). El uso más generalizado de la cachaza es como fertilizador sólido, aplicado en las plantaciones de caña luego de un proceso de compostaje, el cual es una técnica que ha sido aplicada durante años a residuos fibrosos y secos, y consiste en la descomposición biológica aerobia y la estabilización de estos residuos orgánicos. Mediante este proceso de compostaje la cachaza es capaz de disminuir su humedad, volumen y peso, y en consecuencia reducir sus costes de transportes y aplicación (Conil 2018).

Investigaciones realizadas en la última década reportan que la producción de metano de la cachaza presenta un promedio de 221 mL CH₄/g DQO (López-González, Pereda-Reyes y Romero-Romero 2017), un valor bajo con respecto a la vinaza. También se ha demostrado que, mediante la aplicación de un pretratamiento a la cachaza se le puede favorecer y aumentar la biodegradabilidad para incrementar el rendimiento de producción de metano.

Una vez demostrada la efectividad del uso de la vinaza-cachaza con pre-tratamientos termoalcalino en la presente investigación se procedió al diseño de una planta de biogás para la producción de energía. Se optó por equipos de funcionamiento continuo, para lo cual se seleccionaron los reactores anaeróbicos de flujo ascendente (*Upflow Anaerobic Sludge Blanket*) -en lo adelante UASB, por sus siglas en inglés- partiendo de que el biogás procedente de la digestión anaeróbica (DA) puede generar electricidad según demanda. Los reactores metanogénicos de alta velocidad, como el UASB, pueden reaccionar más rápido a las variaciones en la alimentación en comparación con los sistemas de AD tradicionales (Shinde *et al.* 2023).

Los sistemas aeróbicos de tratamiento de aguas residuales son conocidos por explotar en gran medida los recursos energéticos e hídricos, desperdiciar materiales residuales y depender de productos químicos comercializados para el tratamiento de aguas residuales de las bodegas (WWWT). En comparación, la DA y los bioprocesos anaeróbicos acelerados, como el biorreactor UASB, tienen el potencial de ahorrar kWh eléctricos (kWh-e), agua, desechos de lodos y residuos químicos generados durante la WWWT (Ngwenya, Gaszyński y Ikumi 2022).

Los UASB son los reactores más implementados para el tratamiento anaeróbico de residuales líquidos, pertenecen a la clasificación de reactores que operan con un flujo continuo de carga, y además con flujo ascendente, es decir, el afluente entra por el extremo inferior del biodigestor, sube a través del perfil longitudinal, y sale por el extremo superior. Básicamente presentan tres zonas que se representan en la Figura 1.

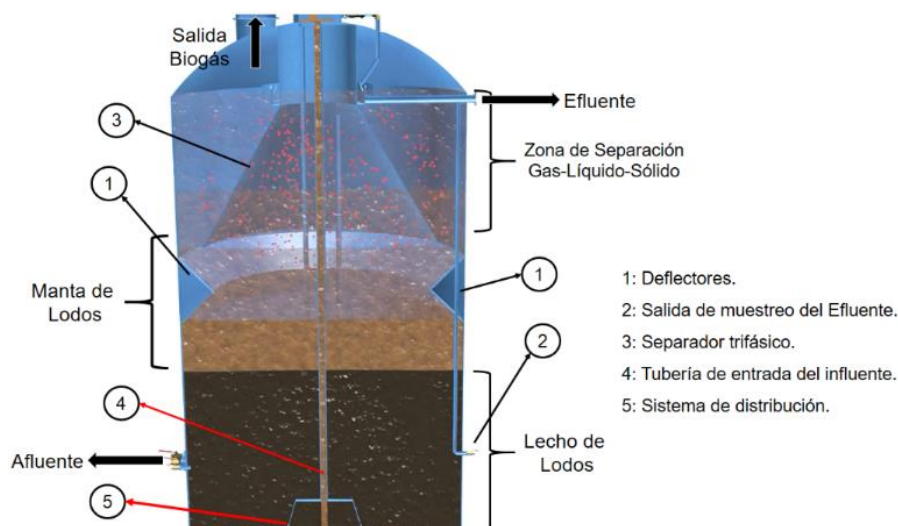


Figura 1. Esquema general de un reactor UASB. Fuente: Adaptado de (<http://www.eea.eng.br>).

Los últimos 20 años han sido fructíferos en cuanto a descubrimientos sobre el funcionamiento del proceso microbiológico y bioquímico gracias al nuevo

material de laboratorio que permitió el estudio de los microorganismos que intervienen en el proceso de la degradación de la materia orgánica en condiciones anaeróbicas. Los países generadores de tecnología anaeróbica en la actualidad son: China, India, Holanda, Francia, Alemania, Gran Bretaña, Suiza, Italia, Estados Unidos y Filipinas, cuyas plantas de tratamiento de desechos industriales han tenido una importante evolución.

La biomasa es cualquier tipo de materia o residuos orgánicos de origen animal o vegetal, la cual puede convertirse en energía, considerada como una energía renovable inagotable.

En esta investigación se parte de estudios realizados con los residuales de la producción de azúcar (cachaza) y de alcohol (vinaza) que tienen un alto potencial energético y resultan ser altos contaminantes medioambientales. El objetivo fue realizar el diseño de una planta de biogás con reactores anaeróbicos tipo UASB a partir de la codigestión de la mezcla de los residuales vinaza-cachaza de la empresa azucarera Urbano Noris con una producción de cachaza promedio de 163 867 t y la destilería 8 de marzo con una capacidad de producción de alcohol de 500 hL, que genera entre 800-900 m³/d de vinaza.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

En este trabajo los sustratos que se utilizarán para la alimentación del biodigestor son la cachaza y la vinaza, residuos procedentes de la empresa azucarera Urbano Noris y la destilería 8 de marzo, respectivamente.

Para realizar la propuesta de diseño del reactor anaeróbico tipo UASB se utilizaron como datos de entrada los que se exponen en la Tabla 1.

Tabla 1. Datos de entrada obtenidos de la destilería 8 de marzo

Indicador	Vinaza
Producción de vinaza (m ³ /d)	900
Brix (° Bx)	6 – 9
SDT (% w/v)	5 – 7
SST (% v/v)	1 – 2
DQO_v (kg/m ³)	60 – 80
DBO_v (kg/m ³)	20 – 30
COV (kg/m ³ * d)	20
pH	4,5 – 5,0
Temperatura (° C)	80 – 100
Salinidad (kg/m ³)	15 – 25

Para un correcto diseño deben considerarse los principales parámetros operacionales del reactor:

- Flujo diario del Afluente
- Concentración del Afluente
- Carga Orgánica Volumétrica (COV)

La COV se expresa en $kgDQO/m^3d$ y se calcula:

$$COV = \frac{Q_T * C}{V_T} = \frac{C}{TRH} \quad (1)$$

Donde:

C : concentración ($kgDQO/m^3$).

TRH : tiempo de retención hidráulica (d).

V_T : Volumen Total del reactor (m^3).

Q_T : Caudal Total (m^3/d).

- Tiempo de Retención Hidráulico (TRH)

$$TRH = \frac{V_T}{Q_T} \quad (2)$$

- Tiempo de Retención de Sólidos (TRS)

El TRS es otro de los parámetros fundamentales para diseñar un biodigestor. Es el tiempo que va a permanecer en el interior del reactor la materia orgánica y este varía con la temperatura ambiente, según la región en que ocurra el proceso mesofílica, termofílica y psicofílica (Varnero 2011).

- Altura del Reactor

En el tratamiento de aguas residuales parcialmente solubles, la altura admisible puede ser de tres a cinco metros, mientras que cuando la concentración de DQO excede los 3 kg/L se recomienda una altura del reactor de cinco a siete metros (Fernández y Seghezzi 2015).

Teniendo en cuenta los principales parámetros operacionales se realizaron los cálculos pertinentes para determinar los principales parámetros de diseño del reactor UASB y de sus componentes. Para realizar la propuesta de diseño del reactor anaeróbico tipo UASB, primeramente, se partió de los datos recogidos de la destilería y de la empresa azucarera del municipio Urbano Noris. Como

se observa en la Figura 2 y 3, aquí se refleja una novedad en el diseño de estos tipos de reactores al contar con un compartimiento de recolección de biogás (Figura 2) y contar con una cogeneración con cachaza que se introduce por el fondo del reactor aumentando la producción de biogás durante el proceso (Figura 3).

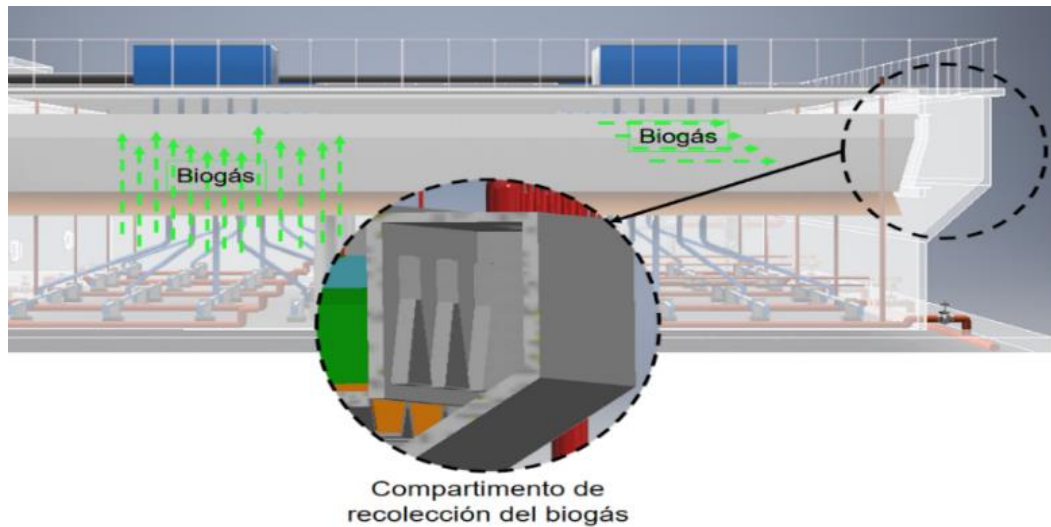


Figura 2. Vista del compartimento de recolección frontal del biogás. Fuente: Autor.

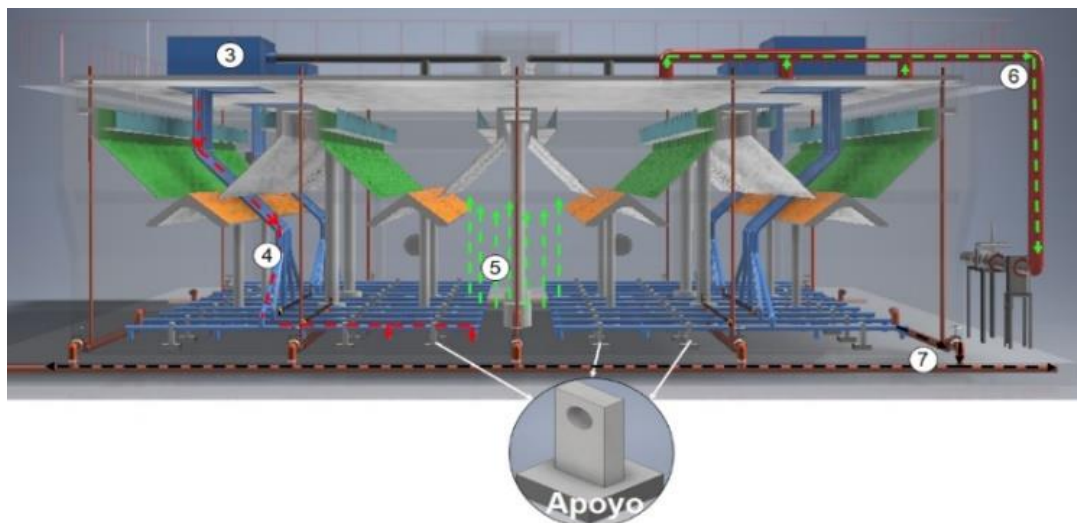


Figura 3. Flujo de la vinaza y el biogás en el interior del Reactor UASB. Fuente: Autor.

Los separadores trifásicos en conjunto con los deflectores impiden que los gránulos de cachaza que suben (debido a que las burbujas de biogás se adhieren a estas y por el flujo ascendente del afluente) sean lavados al exterior del reactor, o sea, que se vayan con el efluente.

La producción de biogás puede ser determinada a partir de la estimación de la cantidad de DQO que se convierte en metano (3) en el interior del reactor.

$$DQO_{CH_4} = Q_{inf} * (DQO_v - DQO_{final}) - Y * Q_{inf} * DQO_v \quad (3)$$

Donde:

DQO_{CH_4} : es la cantidad de DQO convertida en metano (kg/d).

Y : es el coeficiente de producción de sólidos en el sistema, (0,11 – 0,23) $kg DQO_{sludge}/kg DQO_{appl}$. (Chernicharo 2007)

$$DQO_{CH_4} = 900 \text{ m}^3/d * (70 - 10) \text{ kgDQO/m}^3 - 0,21 \frac{\text{kgDQO}}{\text{kgDQO}_{appl}} * 900 \text{ m}^3/d * 70 \text{ kgDQO/m}^3$$

$$DQO_{CH_4} = 40\ 770 \text{ kg/d}$$

Luego de calcular la carga de DQO que se convierte en metano, se determina la producción de metano (4).

$$Q_{CH_4} = \frac{DQO_{CH_4}}{K_T} \quad (4)$$

Donde:

Q_{CH_4} : es la producción volumétrica de metano (m^3/d).

K_T : es el factor de corrección (5) de la temperatura operacional del reactor ($kg DQO/m^3$).

$$K_T = \frac{P_0 * K_{DQO}}{R * T} \quad (5)$$

Donde:

P_0 : es la presión atmosférica.

T : es la temperatura operacional del reactor (K).

K_{DQO} : es el DQO correspondiente a 1 mol de metano ($0,064 \text{ kg DQO/mol}$).

R : Constante de los gases ($0,08206 \text{ atm} * L/mol * K$).

$$K_T = \frac{1 \text{ atm} * 0,064 \text{ kg DQO/mol}}{0,08206 \text{ atm} * L/mol * K * 310 \text{ K}}$$

$$K_T = 2,516 \text{ kg DQO/m}^3$$

Sustituyendo el resultado de (5) en (4):

$$Q_{CH_4} = \frac{40\ 770 \text{ kg/d}}{2,516 \text{ kg DQO/m}^3}$$

$$Q_{CH_4} = 16\ 205 \text{ m}^3/d$$

Una vez obtenida la producción volumétrica de metano puede calcularse la producción de biogas (6) indicando que el biogás obtenido de la vinaza contiene aproximadamente un 60 % de metano.

$$Q_{biogás} = \frac{Q_{CH_4}}{0,6} \quad (6)$$

Donde:

$Q_{biogás}$: es la cantidad de biogás que se produce diariamente (m^3/d).

$$Q_{biogás} = \frac{16\,205\,m^3/d}{0,6}$$

$$Q_{biogás} = 27\,000\,m^3/d$$

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los reactores anaeróbicos funcionarán con la mezcla vinaza-cachaza, estarán distribuidos de manera que se puedan operar con eficiencia (Figura 4). Los reactores UASB R1, R2 y R3 son los principales o reactores de tratamiento, donde se realizará el proceso anaeróbico. Posterior a ello se dirige el efluente a los reactores de postratamiento (RP1 y RP2).

Se propone que antes de dirigir el efluente de los reactores principales hacia los de postratamiento, se sitúe un tanque de recepción y distribución (TRD), el cual cumple la función de recibir el efluente procedente de los reactores R1, R2 y R3, y luego distribuirlo hacia los reactores RP1 y RP2. Debido a la diferencia entre los tiempos de retención hidráulico entre los reactores principales y los de postratamiento (3, 5 días y 12 horas, respectivamente), se garantiza de esta forma que estos últimos cumplan con su TRH.

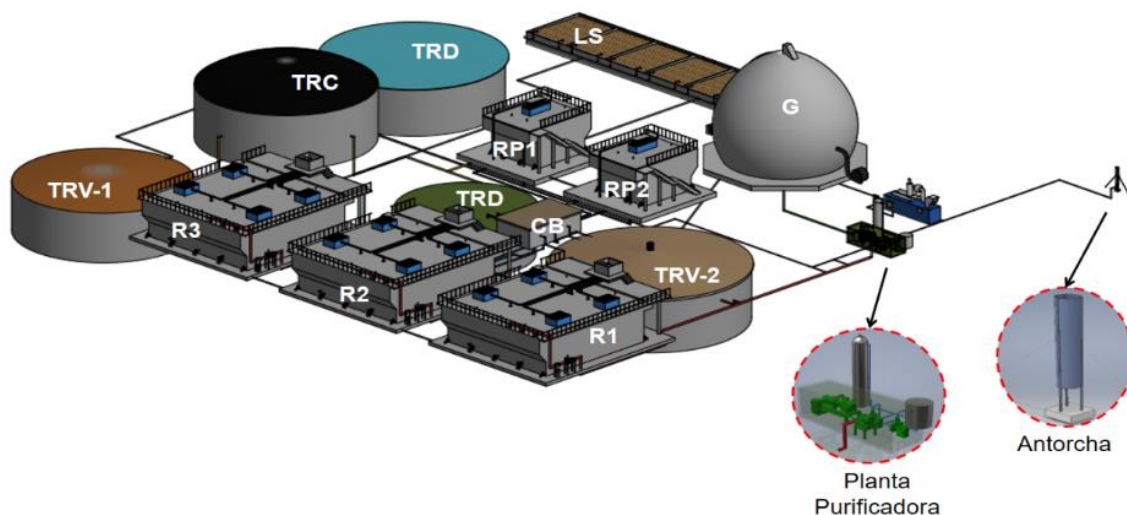


Figura 4. Ubicación de los reactores en la Planta de Biogás. Fuente: Autor.

El digestato que sale de los reactores RP1 y RP2 intercambia calor con la vinaza proveniente de la destilería 8 de marzo y pasa al tanque de recepción del digestato (TRD), el cual puede ser directamente implementado en el

fertirriego de las plantaciones de caña. En cuanto a la cachaza, originaria de la empresa azucarera Urbano Noris, se almacena en el tanque de recepción de la cachaza (TRC), se mezcla con agua y se distribuye a los cinco reactores de la planta de biogás, luego de pasado su tiempo de retención en el interior de los reactores, se transporta al lecho de secado (LS), el cual recircula al tanque de recepción de vinaza (TRV-2) la parte líquida con que sale la cachaza de los reactores.

Una vez tenidos en cuenta los parámetros operacionales fundamentales y haberse realizado los cálculos pertinentes para determinar los principales parámetros de diseño del reactor UASB y de sus componentes, se calcula la producción final de biogás, biofertilizantes y generación eléctrica según volumen de biogás producido y se realiza un análisis económico para valorar la factibilidad de poder realizar el diseño de una planta para la digestión anaerobia de residuales de la industria azucarera en el municipio Urbano Noris de la provincia de Holguín.

4. CONCLUSIONES

- Con cinco reactores UASB donde se tratan $900 \text{ m}^3/\text{d}$ aplicando un tratamiento anaeróbico, se generan tres productos que pueden ser explotados como una fuente de ingreso (biogás, biol líquido y biol sólido). Se producen $29\,988 \text{ m}^3/\text{d}$ de biogás, $900 \text{ m}^3/\text{d}$ de biol líquido con una concentración de $2,8 \text{ kg DQO}/\text{m}^3$ que puede ser utilizados para el fertirriego de las plantaciones cañeras y biol sólido.
- El biogás que se genera puede venderse a la línea directa de gas natural o puede ser sustituido como combustible, pues 1 m^3 de biogás equivale a $0,55 \text{ L}$ de fuel oil, lo que significa que se ahorrarían aproximadamente $16\,500 \text{ L}/\text{d}$ de combustible fuel oil y se sustituyen importaciones.
- La generación eléctrica de la planta diseñada ($67\,711 \text{ kWh}/\text{día}$) significaría dejar de emitir $260\,000 \text{ t}/\text{día}$ de CO_2 , lo que mitigaría los efectos contaminantes de los residuales vinaza-cachaza a partir de su procesamiento como combustible alternativo y elevaría la eficiencia energética de la producción de alcohol en la destilería 8 de marzo.
- El costo total de la inversión en equipamiento asciende a $1\,403\,330,07 \text{ USD}$, lo que evidencia la viabilidad económica de esta tecnología, unido a que su implementación genera un positivo impacto ambiental y social.

5. REFERENCIAS

- Barrera-Cardoso, E. L.; López-González, L.; Romero-Romero, O. y Hermidas-García, F. O. 2010: La producción de biogás como una vía para potenciar la entrega de energía eléctrica al SEN en la industria azucarera espirituana. *Centro Azúcar*, 37(3): 27-32.
- Bravo-Hidalgo, D. 2015: Energía y desarrollo sostenible en Cuba. *Centro azúcar*, 42(4): 14-25.
- Castillo-Álvarez, Y.; Monteagudo-Yanes, J. P.; Jiménez-Borges, R. y Patiño-Vidal, C. D. 2021: Propuesta de diseño de un biodigestor industrial de cachaza para la generación de energía eléctrica. *Revista Universidad y Sociedad*, 13(5): 74-80.
- Chernicharo, C. A. 2007: *Biological Wastewater Treatment Series*. Brasil.
- Chiriboga-Novillo, O. G. 2010: *Desarrollo del proceso de producción de biogás y fertilizante orgánico a partir de mezclas de desechos de procesadoras de frutas*. Quito: USFQ.
- Chowdhury, H.; Chowdhury, T.; Miskat, M. I.; Hossain, N.; Chowdhury, P.; and Sait, S. M. 2021: Potential of biogas and bioelectricity production from Rohingya camp in Bangladesh: A case study. *Energy*, 214.
- Conil, P. 2018: El biogas. Gas natural renovable para el desarrollo rural. Potencial para Colombia. BIOTEC. The biogas experts.
- Delgado, A. V. 2015: Residuos azucareros como fuente de combustible para la generación eléctrica. (Ponencia). Congreso Iberoamericano. Guanacaste, Costa Rica.
- Fernández, F. y Seghezzi, L. 2015: *Diseño de Reactores UASB*. INTI. Buenos Aires, Argentina: Metclaf & Eddy.
- González-Rodríguez, S.; González-Curbelo, G.; González-Silva, G. y Árias-Lafargue, T. 2020: Aprovechamiento de la potencialidad de la vinaza para la producción de biogás como energía renovable. *Tecnología Química*, 40(2): 269-287.
- Hernández-López, M.; Barragán-Huerta, B. E.; Moreno-Andrade, I.; Viguera-Cortés, J. M.; Garzón-Zúñiga, M. A. 2023: Evaluación de la producción sustentable de biocombustibles a partir de los residuos sólidos y líquidos generados en la fabricación del mezcal. *Revista Frontera Biotecnológica*, 11(26): 49-50. ISSN: 2448-8461.
- Hijazi, O.; Tappen, S. and Effenberger, M. 2019: Environmental impacts concerning flexible power generation in a biogas production. *Carbon Resources Conversion*, 2(2): 117-125.

- Jiménez, A.; Borja, R.; Martín, A. and Rasposo, F. 2006: Kinetic analysis of the anaerobic digestion of untreated vinasses and vinasses previously treated with *Penicillium decumbens*. *Journal of Environmental Management*, 80(4): 303-310. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2005.09.011>
- López-González, L. M.; Pereda-Reyes, I. and Romero-Romero, O. 2017: Anaerobic Co-digestion of sugarcane press mud with vinasse on methane yield. *Waste Management*, 68: 139-145.
- López-González, L. M. 2016: *Análisis de alternativas de producción más limpia (PML) para la producción de biogás con fines energéticos en una empresa azucarera diversificada*. Tesis doctoral. (Pereda-Reyes, I. y Romero-Romero, O., Tutores) Universidad de Sancti Spíritus. 142 p.
- Martínez-Figueroa, K. M. 2020: *Producción de biogás a partir de los residuos orgánicos generados por el estiércol de ganado en una finca ubicada en el municipio de Ipala, departamento de Chiquimula*. Tesis de maestría. Universidad de San Carlos de Guatemala.
- Martínez-Lozano, M. 2015: Producción potencial de biogás empleando excretas de ganado porcino en el estado de Guanajuato. *Nova scientia*, 7(15): 96-115.
- Ngwenya, N.; Gaszyński, C. y Ikumi, D. 2022: Una revisión del tratamiento de aguas residuales de las bodegas: un enfoque en las estrategias de optimización y recuperación de la biotecnología de la UASB. *Revista de Ingeniería Química Ambiental*, 10(4): 108-172. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2022.108172>
- Panesso-Andrés, F.; Cadena-Juan, A.; Mora-Flores, J. A. y Ordoñez, M. C. 2011: Análisis del biogás captado en un relleno sanitario como combustible primario para la generación de energía eléctrica. *Scientia et Technica*, 17(47): 23-28.
- Roslee-Mensah, J. H.; Lima-Silva, A. T. Y.; Silva dos Santos, I. F.; De Souza-Ribeiro, N.; Gbedjinou, M. J.; Nago, V. G.; Tiago Filho, G. L. and Barros, R. M. 2021: Assessment of electricity generation from biogas in Benin from energy and economic viability perspectives. *Renewable Energy*, 163: 613-624.
- Scaroni, E.; Martearena, M.; Camacho, S. y Plaza, G. 1997: Tratamiento biológico de lixiviados de residuos sólidos urbanos con estiércol porcino. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 1.
- Shinde, R.; Hackula, A.; O'Shea, R.; Barth, S.; Murphy, J. D. y Pared, D. M. 2023: Producción de biogás impulsada por la demanda a partir de reactores de manta de lodo anaeróbico de flujo ascendente (UASB) para equilibrar la red eléctrica. *Revista Tecnología Bioambiental*, 385: 129364. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2023.129364>, ISSN: 09608524

- Suárez, J.; Martín, G.; Sotolongo, J.; Rodríguez, E.; Savran, V.; Cepero, L.; Funes-Monzote, F.; Rivero, J.; Blanco, D. y Machado, R. 2011: Experiencias del proyecto BIOMAS-CUBA. Alternativas energéticas a partir de la biomasa en el medio rural cubano. *Pastos y Forrajes*, 34(4): 473-496.
- Suárez-Hernández, J.; Sosa-Cáceres, R.; Martínez-Labrada, Y.; Curbelo-Alonso, A.; Figueredo-Rodríguez, T. y Cepero-Casas, L. 2018: Evaluación del potencial de producción del biogás en Cuba. *Pastos y Forrajes*, 41(2): 85-92.
- Varnero Moreno, M. T. 2011: Manual del biogás. Santiago, Chile.
- Vélez-Torres, I.; Díaz-Durán, C. A.; Rocha-Gómez, K. J.; González-Penagos, F. y Fajardo-Benítez, P. Y. 2023: Potencial energético subnacional y oportunidades de descarbonización en usos de energía final. Consultado: 15/12/2022. Disponible en: https://www.minenergia.gov.co/documents/10443/4. Potencial_energ%C3%A9tico_subnacional_y_oportunidades_de_descarbonizaci%C3%B3n_en_uso_zIqm9dM.pdf
- Venegas-Venegas, J. A.; Raj-Aryal, D. y Pinto-Ruíz, R. 2019: Biogás, la energía renovable para el desarrollo de granjas porcícolas en el estado de Chiapas. *Análisis económico*, 34(85): 169-187.
- Villarrubia-López, M. y Villarrubia, J. 2001: Producción de biogás en vertederos de Residuos Sólidos Urbanos (RSU). Montajes e instalaciones: *Revista técnica sobre la construcción e ingeniería de las instalaciones*, 31(355): 95-104.

Información adicional

Conflicto de intereses

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses.

Contribución de autores

JCBN: búsqueda bibliografía sobre la temática, selección y cálculos de los principales parámetros operacionales de diseño, propuesta y diseño del reactor anaeróbico tipo UASB y sus componentes, metodología de cálculo para el diseño, introduce novedad en el diseño de estos tipos de reactores al contar con un compartimiento de recolección de biogás e introduce una cogeneración con cachaza. Conceptualización, investigación, análisis e interpretación de resultados, redacción del original, aprobación de la versión final. DOM: participó en la búsqueda bibliográfica sobre la temática, la realización de los ensayos de laboratorio, interpretación de resultados y la revisión del informe final. JAR: participó en la realización

de la búsqueda bibliografía sobre la temática y en la escritura y revisión del documento final, análisis formal, supervisión y visualización.

ORCIDs

JCBN, <https://orcid.org/0000-0001-9648-772X>

DOM, <https://orcid.org/0000-0001-8117-3605>

JAR, <https://orcid.org/0000-0002-4101-878X>

Recibido: 21/08/2023

Aceptado: 30/11/2023