

# 07

Fecha de presentación: julio, 2021  
Fecha de aceptación: agosto, 2021  
Fecha de publicación: septiembre, 2021

## PROPUESTA DE DISEÑO

DE UN BIODIGESTOR INDUSTRIAL DE CACHAZA PARA LA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA

### DESIGN PROPOSAL OF AN INDUSTRIAL BIODIGESTER OF FILTER-CAKE FOR THE GENERATION OF ELECTRICAL ENERGY

Yoisdell Castillo Alvarez<sup>1</sup>

E-mail: [c19773@utp.edu.pe](mailto:c19773@utp.edu.pe)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8105-6206>

José Pedro Monteagudo Yanes<sup>2</sup>

E-mail: [jpmynes@ucf.edu.cu](mailto:jpmynes@ucf.edu.cu)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7234-7853>

Reinier Jiménez Borges<sup>2</sup>

E-mail: [rjborges@ucf.edu.cu](mailto:rjborges@ucf.edu.cu)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3430-0322>

Carlos Diego Patiño Vidal<sup>1</sup>

E-mail: [c18191@utp.edu.pe](mailto:c18191@utp.edu.pe)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6841-8222>

<sup>1</sup> Universidad Tecnológica del Perú. Perú.

<sup>2</sup> Universidad de Cienfuegos “Carlos Rafael Rodríguez” Cuba.

#### Cita sugerida (APA, séptima edición)

Castillo Alvarez, Y., Monteagudo Yanes, J. P., Jiménez Borges, R., & 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.

#### RESUMEN

El presente trabajo está enmarcado en el diseño de una planta de biogás que utiliza cachaza como sustrato. El estudio de los diferentes campos de utilización de biogás y su eficiencia en la generación de electricidad mediante grupos electrógenos. Para el diseño de la planta se han propuesto seis biodigestores industriales y seis grupos electrógenos para una capacidad de generación de 24 MW para la venta de energía eléctrica generando un ingreso 1 756 093,11 \$/año. Fueron determinados a partir de la metodología presentada las características constructivas del biodigestor, el volumen de biogás generado, así como la cantidad necesaria para satisfacer la demanda de biogás. El comportamiento a nivel mundial de los principales países productores de biogás ofrece costos de construcción de las plantas por metro cúbico de biogás generado en el orden de 200 \$ a 500 \$. Se determina el potencial de generación de cachaza por la fábrica de azúcar que es de 144 t/d con una capacidad de generación de biogás de 13 038 Nm<sup>3</sup>/d. La planta propuesta tiene una capacidad de generación de 24 MWh/d de energía eléctrica suministrada a la red. La evaluación económica de la planta muestra que la inversión de 4 237 000,00 \$ tiene una Tasa Interna de Retorno (TIR) de un 8% y un Periodo de Recuperación de la Inversión (PRI) de 6 años.

**Palabras clave:** Biodigestor, biogás, cachaza, grupos electrógenos, fábrica de azúcar.

#### ABSTRACT

The present work is framed in the design of a biogas plant that uses filter-cake as a substrate. The study of the different fields of use of biogas and its efficiency in the generation of electricity through generator sets. For the design of the plant, six industrial biodigesters and six generator sets have been proposed for a generation capacity of 24 MW for the sale of electrical energy generating an income of \$1,756,093.11/year. The constructive characteristics of the biodigester, the volume of biogas generated, as well as the amount needed to meet the demand for biogas were determined from the methodology presented. The worldwide performance of the main biogas producing countries offers plant construction costs per cubic meter of biogas generated in the order of \$200 to \$500. The potential for the generation of filter-cake by the sugar factory is determined to be 144 t/d with a biogas generation capacity of 13 038 Nm<sup>3</sup>/d. The proposed plant has a generating capacity of 24 MWh/d of electricity supplied to the grid. The economic evaluation of the plant shows that the investment of \$4,237,000.00 has an Internal Rate of Return (IRR) of 8% and an Investment Recovery Period (PRI) of 6 years.

**Keywords:** Biodigester, biogas, filter-cake, generator sets, sugar factory.

## 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. En Cuba, este tema cobra mayor significado por lo limitado de los recursos energéticos disponibles y los altos precios del combustible. Por estas razones, se llevan a cabo numerosos programas y proyectos, así como un control riguroso, tanto en el sector residencial como empresarial, del uso de los portadores energéticos. Una de las variantes más consideradas es el empleo del biogás para la generación directamente de energía térmica para diferentes usos o para la generación de electricidad (Barrera, et al., 2010; Panesso, et al., 2011; Bravo, 2015; Venegas, et al., 2019; Roslee, 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, 2010; González, 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, et al., 2019). Otra posibilidad es el empleo de residuos biodegradables procedentes de instalaciones industriales sometidos a digestión anaeróbica. 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/m<sup>3</sup> de biogás, llegando a producir bajo tratamiento anaerobio alrededor de 130-155 m<sup>3</sup> de biogás por tonelada de cachaza.

Suárez, et al. (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 limita a dar información general que permitan elaborar una metodología de cálculo para el diseño de un biodigestor industrial. Otros autores como López & Villarrubia (2001); Martínez (2015); Suárez, et al., (2018); y Martínez (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. Por otro lado, García, et al. (2016), realizaron un trabajo sobre las potencialidades de la cachaza como biogás para la cocción y bioabono en una fábrica de azúcar crudo en pequeña escala. El objetivo del presente estudio es evaluar las potencialidades de la cachaza para la producción de biogás y electricidad mediante biodigestores industriales.

## MATERIALES Y MÉTODOS

En la mayoría de los centrales azucareros del país se realiza el proceso de obtención de azúcar en un tiempo de cinco meses aproximadamente. En este proceso existe muchos desechos que no son aprovechados y que su vertimiento en las zonas cercas a la industria afectan el ecosistema del lugar. Dentro de estos residuos de la fábrica se encuentran las aguas residuales que no son tratadas como está establecido en ocasiones, y que pueden aprovecharse al igual que la cachaza para ser tratadas en un biodigestor industrial, una vez que su dimensionamiento depende de muchos factores.

### Cálculo del volumen de digestión.

El biodigestor se compone de dos zonas, la parte gaseosa donde se acumulará el biogás generado por la biodigestión y la parte líquida que corresponde a la biomasa o sustrato, estas dos secciones que componen el volumen total del biodigestor se determina por la ecuación 1 (Botero & Preston, 1987; Guardado, 2007; Campos, 2011).

$$V_d = \frac{(k_{gCachaza} + k_{gagua}) * \text{tiempo retención}_{TR}}{\rho_{mezcla}}$$

### Ecuación 1. Cálculo del volumen de digestión

Donde  $V_d$ .-Volumen de digestión (m<sup>3</sup>); TR. - Tiempo de retención (día);  $\rho$  mezcla- Densidad de la mezcla (kg/m<sup>3</sup>)

### Determinación del volumen de construcción del digestor.

El volumen de construcción del biodigestor es un 30% más del volumen de digestión y se determinar por la ecuación 2 (Guardado, 2007; Ildefonso, 2018).

$$V_{cd} = V_d + 0.3 * V_d = 1.3 * V_d$$

### Ecuación 2. Determinación del volumen de construcción del digestor

Donde  $V_{cd}$ - Volumen de Construcción del Digestor (m<sup>3</sup>);  $V_d$ .-Volumen de digestión (m<sup>3</sup>)

El volumen total de un biodigestor puede ser determinado mediante la ecuación 3 (Guardado, 2007).

$$V_{Tk} = \frac{\pi * D^2 * h}{4}$$

**Ecuación 3.** Volumen total de un biodigestor.

Donde  $V_{Tk}$  - Volumen total del biodigestor ( $m^3$ ); D-Diámetro del biodigestor (m); h-Altura del biodigestor (m)

El número total de biodigestores se determina mediante la ecuación 4 (Guardado, 2007).

$$N^{\circ} = \frac{V_{cd}}{V_{Tk}}$$

**Ecuación 4.** Cálculo del número total de biodigestores.

Donde  $N^{\circ}$ -número total de biodegestores;  $V_{Tk}$  - Volumen total del biodigestor ( $Nm^3$ );  $V_{cd}$  - Volumen de Construcción del Digestor ( $Nm^3$ )

#### Calculo del volumen del biogás generado.

Se determina el volumen del biogás generado mediante la ecuación 5 (Guardado, 2007).

$$V_{tb} = 0.09m^3 \text{ biogás} * 1k_g \text{ de cachaza}$$

**Ecuación 5.** Cálculo del volumen de biogás generado.

Donde  $V_{tb}$ -Volumen de biogás generado. ( $Nm^3/d$ )

#### Selección del motor para el grupo electrógeno a biogás.

En la selección del motor para la generación de electricidad mediante el biogás se considera la carga instalada de la planta de biodigestor que alimentará dicho equipo, también debe seleccionarse el nivel de tensión al que se genera la potencia de energía eléctrica ya que este estará conectado a las líneas de distribución para alimentar zonas urbanizadas o rurales cercanas a la planta o entregarla al sistema eléctrico nacional (SEN). Otro parámetro que debe considerarse es el volumen de producción de biogás al día, de tal manera que el motogenerador pueda operar las 24 horas. En general el funcionamiento es el mismo que usan los motores Diésel, la diferencia es que estos motores pueden operar compartiendo simultáneamente el combustible gaseoso con líquido sin afectar a la potencia de salida del motor. Esta versatilidad que presentan estos motores ha hecho que sea de gran aplicabilidad en la industria petrolera para operar usando como combustible gas asociado y petróleo, sin que las variaciones del suministro de gas sea un problema. El sistema de combustible compartido permite operar al motor con combustible gaseoso y líquido en diferentes proporciones de acuerdo a la disponibilidad de los mismos, siempre

que se encuentren dentro de la ventana de operación específica de cada motor (Mago, et al., 2012; Arango, et al., 2014).

#### Determinación del número de motores necesarios

La generación de electricidad del motogenerador seleccionado en 1 día, se determinará por la ecuación 6 (Guardado, 2007; Novillo, 2010).

$$P_t = P_{nm} * N^{\circ}_{h/d} \quad P_t = P_{nm} * N^{\circ}_{h/d}$$

**Ecuación 6.** Determinación del número de motores necesarios.

Donde  $P_t$ -Potencia total generada en un día ( $kWh/d$ );  $P_{nm}$  - Potencia nominal del motor ( $kW$ );  $N^{\circ}_{h/día}$  - Número de horas que hay en un día ( $h/d$ )

#### Determinación del consumo de biogás por el motogenerador.

El consumo de biogás del motogenerador puede ser determinado por la ecuación 7 (Guardado, 2007; Novillo, 2010).

$$C_{bm} = P_t * C_{atf}$$

**Ecuación 7.** Consumo de biogás por el motogenerador.

Donde  $C_{bm}$ .Consumo de biogás por un motor en 1 día. ( $Nm^3/d$ );  $P_t$ -Potencia total generada en un día ( $kWh/d$ );  $C_{atf}$ -Consumo del fabricante para generar ( $m^3/kWh$ ).

#### Cantidad de motogeneradores necesarios.

Para determinar el número de motogeneradores se tiene en cuenta la cantidad de biogás generado por el biodigestor en 1 día, en la ecuación 8 se muestra la expresión para este caso (Guardado, 2007; Novillo, 2010).

$$N^{\circ}_m = \frac{V_{tb}}{C_{bm}}$$

**Ecuación 8.** Número de motogeneradores necesarios.

Donde  $N^{\circ}_m$ -Número de motores necesarios;  $V_{tb}$ -Volumen de biogás generado ( $Nm^3/d$ );  $C_{bm}$ -Consumo de biogás por un motor en 1 día. ( $Nm^3/d$ ). El principio fundamental dentro del proceso tecnológico en una fábrica de azúcar crudo es la producción de este renglón exportable, dicha producción genera una gran cantidad de residuos que emiten mal olor al medio que lo rodea, entre ellos está la cachaza que en muchos casos esta se desecha dándole la menor importancia como fuente de energía, una solución viable sería la descomposición anaeróbica de este

residuo en grandes digestores para la producción de biogás y abono orgánico. La tabla 1 presenta la producción de caña y cachaza en la fábrica para las últimas cinco zafas.

Tabla 1. Caña molida y producción de cachaza del central en las últimas 5 zafas.

Años de Zafas	t de Caña molida	t de cachaza producida	% de cachaza en caña
2013	428012,92	12033,025	3,76
2014	386331,13	12533,542	3,24
2015	421039,46	16257,757	3,86
2016	395520,81	12807,350	3,28
2017	432554,32	21730,674	5,02

La cachaza es un residuo del proceso de clarificación del guarapo, que incluye materias terrosas e impurezas orgánicas. Su composición es variable, en dependencia de las características del lugar, del tiempo de producción, de las sustancias empleadas en la fabricación del azúcar y de otros muchos factores. En la tabla 2 se presentan algunos equipos que utilizan biogás conjuntamente a su consumo medio.

Tabla 2. Consumo medio de biogás por diferentes equipos.

Equipos	Consumo (l/h)
Cocina	150-200
Lámpara de Iluminación	120-200
Refrigeración Doméstico	50-100
Motor de Combustión	500
Cocina Industrial	2000-3000

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para el cálculo del diseño de un biodigestor es de vital importancia conocer las características de la materia orgánica pues de ella parte la cantidad de biogás a generar y las características del tipo de planta posible a diseñar. En la tabla 3 se muestran las características de las diferentes materias orgánicas.

Tabla 3. Características de las materias orgánicas presentes.

Materia Orgánica	U/M	Cant.	Eq. en Biogás m <sup>3</sup>	Dilución E/A	Tr. Días
Excreta porcina	kg	1	0.031	1 :3-10	16
Excreta vacuna	kg	1	0.035	1 :1-3	14
Excreta de pollos	kg	1	0.045	1 :3	20
Excreta de carnero	kg	1	0.04	1 :3	30
Cachaza	kg	1	0.09	1 :3	25
Excreta humana	kg	1	0.05	:1-3	16

Fuente: Martínez, et al. (2014).

La tabla 4 presenta los resultados de las características constructiva del biodigestor, cantidad, así como el volumen de biogás generado.

Tabla 4. Resultados de las características constructiva del biodigestor, cantidad, así como el volumen de biogás generado.

$V_d$	17 384,4 Nm <sup>3</sup> /d
$V_{cd}$	22 600 Nm <sup>3</sup> /d
$V_{tk}$	4 239 Nm <sup>3</sup> /d

N°	6 u
V <sub>to</sub>	543,26 Nm <sup>3</sup> /h

El modelo que se propone de motogenerador es el AQL220. Está formado por un motor de combustión interna de marca Cummins convertido de diésel a biogás de consumo de combustible 0,542 Nm<sup>3</sup>/kWh este modelo tiene una capacidad de generar una potencia eléctrica continua de 180 kW. En la tabla 5 se muestran los datos técnicos de este motor.

Tabla 5. Características técnicas del motor a biogás AQL220 Cummins.

Datos	Valores
Potencia primaria	220kW
Potencia continua	180kW
Frecuencia	60 Hz
Factor de potencia	0.8
Combustible	biogás
Consumo de combustible	0,542 Nm <sup>3</sup> /kWh

La generación de electricidad del motogenerador seleccionado en 1 día, a partir de la ecuación 6 fue de 4 320 kWh/d. Por otro lado, el consumo de biogás en el motogenerador siguiendo la ecuación 7 es de 2 341,44 Nm<sup>3</sup>/d. Para determinar el número de motogeneradores se tiene en cuenta la cantidad de biogás generador por el biodigestor en 1 día y fue determinado mediante la ecuación 8, dando como resultado un total de 6 teniendo una capacidad de generación eléctrica de 24 056,07 kWh/d lo que es lo mismo 24 MW.

#### Características operativas del proceso de digestión

El diseño de la planta contara con un total de 6 biodigestores, se realizarán dos digestiones con el fin de optimizar la producción de biogás y así reducir al máximo los residuos de materia orgánica que puedan ser obtenidos. En una primera fase, la materia orgánica se someterá a una digestión anaerobia en dos digestores (digestores 1 y 2) conectados en paralelo. La temperatura del proceso será

en esta primera digestión de 30°C, es decir, la digestión se llevará a cabo en un régimen mesofílico durante 29 días. Tras la digestión primaria, se procederá a realizar una segunda digestión en (4 digestores) conectado en serie con los dos primeros. Esta segunda digestión se realizará a 60°C, es decir, en régimen mesofílico durante 21 días.

Generalmente los proyectos de biogás pueden estar asociados a múltiples fuentes de sustratos, tales como residuos líquidos y sólidos de la agroindustria, plantas de tratamiento de aguas servidas que incluyan digestión anaerobia en su sistema, directamente de cultivos energéticos de la agricultura o de la captación del biogás producido en rellenos sanitarios. Debido a esa diversidad y a la naturaleza compleja del proceso de producción de biogás, es difícil entregar valores concretos para los parámetros relevantes en la evaluación económica en este trabajo lo cual los rangos de valores aquí entregados pueden ser considerados sólo para una primera aproximación en dicha evaluación. Solo un análisis riguroso, que tome en cuenta las particularidades del proyecto, será concluyente respecto de su viabilidad técnica y económica.

Como se ha señalado previamente, el biogás puede destinarse para la producción de energía eléctrica y/o térmica mediante equipos integrados en las plantas de biogás, o para la sustitución de otros combustibles mediante tratamiento y posterior transporte hasta los centros de consumo de dichos combustibles. En ambas situaciones, la demanda puede estar asociada a consumos propios del productor de biogás (autoconsumo) o bien a la de terceros. Adicionalmente, el digestato generado en las plantas de biogás también puede ser una fuente de ingresos para el proyecto, por su comercialización o autoconsumo como fertilizante orgánico. Similar situación ocurre con el tratamiento y manejo de los residuos usados como sustrato, más aún si se adicionan a los residuos propios, los de terceros. En la tabla 6 se presentan los costos aproximados de construcción por m<sup>3</sup> de biogás generado en las plantas de diferentes países.

Tabla 6. Costo de construcción por m<sup>3</sup> en diferentes plantas a nivel internacional.

Plantas de biogás	Costo de la inversión €	Biogás generado en m <sup>3</sup> /días	Costo de construcción en € por Nm <sup>3</sup> generado
Central Loma Los Colorados, Chile	40 600 000	194 400	209
Planta de biogás Los Ángeles, Chile	2 800 000	9 905	282
Planta de biogás Werlte, Alemania	6 600 000	22 904	288
Planta de biogás Niederbayern, Alemania	845 500	2 600	325
Provincia de Castellón, España	6 892 000	13 072	527

El equipamiento de tecnológico de las plantas de biogás en general viene dado por diferentes equipos que la componen. El valor de todos estos equipos está representado por el precio de construcción para generar un Nm<sup>3</sup> de biogás, en nuestro caso se tomó 325 \$, de ahí que se incluya todo el equipamiento necesario para la construcción de la planta. El costo de la inversión de la planta viene dado por la cantidad de metro cúbicos días que produce y aproximadamente está en el orden de 13 038 Nm<sup>3</sup>/d que, multiplicado por el valor de construcción, estos representan un total de 4 237 350 \$ para satisfacer la instalación de la planta en su totalidad.

Los ingresos por generación de electricidad con la tecnología implementada en la fábrica vienen dados por la capacidad instalada en la planta de biogás, que cuenta con una generación de 24 056,07 kWh/d para una generación anual de 8 780 465,55 kWh/año lo que genera un ingreso por venta de energía eléctrica de 1 756 093,11 \$/año. En la figura 1 se muestra el Van y PRI de la inversión de la planta de biogás para dicha fábrica.

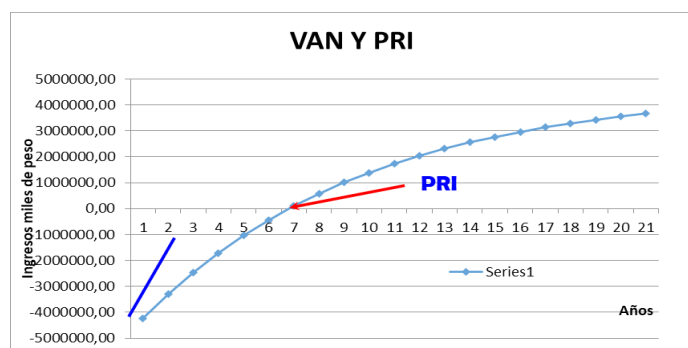


Figura 1. Período de Recuperación de la Inversión (PRI).

En la figura 1 se muestra que la inversión tendrá un período de recuperación de 6 años, este período de recuperación hace que sea muy factible económicamente la inversión ya que la planta diseñada tiene una vida útil de 20 años, sin considerar los ingresos que se pueden obtener por la venta de bioabono, combustible dejado de quemar en las centrales termoeléctricas y los beneficios por no emisión de CO<sub>2</sub> a la atmósfera.

## CONCLUSIONES

A partir de la metodología propuesta fueron determinadas las características constructivas del biodigestor, la cantidad de estos necesarios para satisfacer la demanda de biogás, así como el volumen generado de este. El volumen de construcción del digestor fue determinado en 22 600 Nm<sup>3</sup>/d, siendo necesario un total de 6 biodigestores para satisfacer la demanda de biogás. El volumen total de biogás generado por la instalación es de 543,26 Nm<sup>3</sup>/d

Se propone para la generación de energía eléctrica un motogenerador de la marca Cummins modelo AQL 220 con una potencia continua de 180 kW, y un consumo de combustible de 0,542 Nm<sup>3</sup>/kWh. Fue determinada la generación de electricidad del motogenerador en 4 320 kWh/d, con un consumo de biogás de 2 341,44 Nm<sup>3</sup>/d. Considerando que se utilizarán 6 motogeneradores de acuerdo con la cantidad de biogás generado en un día, ello permitirá una capacidad de generación de 24 056,07 kWh/d.

Partiendo de considerar como referencia los costos de construcción por m<sup>3</sup> de biogás en diferentes plantas a nivel internacional, fue fijado un costo de 325 \$, para un costo total aproximado de la inversión de 4 237 350 \$. Los ingresos por concepto de venta de energía eléctrica fueron de 1 756 093,11 \$/año, para un período de recuperación de la inversión de 6 años, evidenciándose la factibilidad económica.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Arango Gómez, J. E., Sierra Vargas, F. E., & Silva Leal, V. (2014). Análisis exploratorio de investigaciones sobre los motores de combustión interna que trabajan con biogás. *Tecnura*, *18*(39), 152-164.
- Barrera Cardoso, E. L., López González, L., Romero Romero, O., & 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 espiritana. *Centro Azúcar*, *37*(3), 27-32.
- Botero, R., & Preston, T. (1987). Biodigestor de bajo costo para la producción de combustible y fertilizante a partir de excretas. *Manual para su instalación, operación y utilización*. Centro Internacional de Agricultura Tropical.
- Bravo Hidalgo, D. (2015). Energía y desarrollo sostenible en Cuba. *Centro azúcar*, *42*(4), 14-25.
- Campos Cuní, B. (2011). Metodología para determinar los parámetros de diseño y construcción de biodigestores para el sector cooperativo y campesino. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, *20*(2), 37-41.
- 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, 2010].
- Chowdhury, H., Chowdhury, T., Miskat, M. I., Hossain, N., Chowdhury, P., & Sait, S. M. (2021). Potential of biogas and bioelectricity production from Rohingya camp in Bangladesh: A case study. *Energy*, *214*.

- Delgado, A. V. (2015). Residuos azucareros como fuente de combustible para la generación eléctrica. (Ponencia). Congreso Iberoamericano. Guanacaste, Costa Rica.
- García-Alvarez, E., Monteagudo-Yanes, J. P., & Gómez-Sarduy, J. R. (2015). Modelo con algoritmo genético para el diseño óptimo de una planta de producción de biogás a partir de cachaza. *ICIDCA. Sobre los Derivados de la Caña de Azúcar*, 49(3), 51-54.
- González Rodríguez, S., González Curbelo, G., González Silva, G., & 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.
- Guardado, J. A. (2007). Diseño y construcción de plantas de biogás sencillas. Editorial CUBASOLAR.
- Hijazi, O., Tappen, S., & Effenberger, M. (2019). Environmental impacts concerning flexible power generation in a biogas production. *Carbon Resources Conversion*, 2(2), 117-125.
- Ildefonso Sánchez, A. F. (2018). Procedimiento de cálculo para el dimensionamiento y análisis térmico de biodigestores del tipo bolsa tubular y domo fijo. Pontificia Universidad Católica del Perú.
- López, M. V., & 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.
- Mago, M. G., Flores, B., & Tovar, L. (2012). Modelación y simulación de un sistema electrógeno funcionado con biogás. *Revista INGENIERÍA UC*, 19(3), 91-101.
- 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 Hernández, C. M., Oechsner, H., Brulé, M., & Marañón Maison, E. (2014). Estudio de algunas propiedades físico-mecánicas y químicas de residuos orgánicos a utilizar en la producción de biogás en Cuba. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 23(2), 63-69.
- Martínez Lozano, M. (2015). Producción potencial de biogás empleando excretas de ganado porcino en el estado de Guanajuato. *Nova scientia*, 7(15), 96-115.
- Panesso, A. F., Cadena, J. A., Mora, J. J., & 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., & 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., & Plaza, G. (1997). Tratamiento biológico de lixiviados de residuos sólidos urbanos con estiércol porcino. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 1.
- Suárez, J., Martín, G., Sotolongo, J., Rodríguez, E., Savran, V., Cepero, L., Funes-Monzote, F., Rivero, J., Blanco, D., & 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., & Cepero-Casas, L. (2018). Evaluación del potencial de producción del biogás en Cuba. *Pastos y Forrajes*, 41(2), 85-92.
- Venegas Venegas, J. A., Raj Aryal, D., & 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.