

Propuesta para el establecimiento de la tecnología de biodigestión anaerobia adecuada en la Finca Robeba

Proposal for the Establishment of Appropriate Anaerobic Biodigestion Technology at the Robeba Farm

 Darielis Vizcay-Villafranca*,  Yanoy Morejón-Mesa,
 Geisy Hernández-Cuello and  Yordan Oscar Amoros-Capdesuñer

Universidad Agraria de La Habana, Facultad de Ciencias Técnicas, San José de las Lajas,
Mayabeque, Cuba. E-mail: ymorejon83@gmail.com, o ymm@unah.edu.cu, geisyh@unah.edu.cu, yordanoscar@unah.edu.cu

*Autora para correspondencia: Darielis Vizcay-Villafranca, e-mail: darielisv@unah.edu.cu o darielisvizcayvillafranca@gmail.com

RESUMEN: La presente investigación se desarrolló en la finca “Robeba”, el objetivo de la misma consistió en establecer la tecnología de biodigestión anaerobia adecuada a introducir en la finca, transformando los desechos en biogás y biofertilizante. Para ello se determinan las especies animales existentes en el escenario (vacas y cerdos), pues estas especies aportarán los residuos orgánicos hacia el biodigestor; considerándose el movimiento de rebaño, se determina la cantidad de animales, lo cual posibilitaría determinar la biomasa generada diariamente con el propósito de establecer el dimensionamiento de la tecnología de biodigestor adecuada y conocer el comportamiento de los parámetros económicos y energéticos. Entre los resultados mas destacados, se observó que la implementación de un biodigestor tubular de polietileno es más viable en comparación con la instalación de un biodigestor de cúpula fija, representando un ahorro económico de 19 796 peso por concepto de selección de la tecnología; el volumen necesario de esta tecnología debe ser de 20 m³, siendo posible producir 201,3 kg/día de biofertilizantes, que representan un aporte económico diario de 2 516 peso/día (100,65 USD/día) constituyendo un valor agregado, además de los beneficios energéticos y económicos a obtener. Por otra parte, con la instalación de la tecnología de biodigestión anaerobia seleccionada se puede producir energía eléctrica para la vivienda y las luminarias., lo cual requiere de la obtención de un generador de biogás de 1 kW de potencia.

Palabras clave: instalación, digestión, biomasa, ahorro económico.

ABSTRACT: The present research was developed on the “Robeba” farm; its objective was to establish the appropriate anaerobic biodigestion technology to be introduced into the farm, transforming waste into biogas and biofertilizer. To do this, the animal species existing in the scenario (cows and pigs) are determined, since these species will contribute the organic waste to the biodigester; Considering the herd movement, the number of animals is determined, which would make it possible to determine the biomass generated daily with the purpose of establishing the sizing of the appropriate biodigester technology and knowing the behavior of the economic and energy parameters. Among the most notable results, it was observed that the implementation of a tubular polyethylene biodigester is more viable compared to the installation of a fixed dome biodigester, representing an economic saving of 19,796 pesos due to technology selection; The necessary volume of this technology must be 20 m³, making it possible to produce 201.3 kg/day of biofertilizers, which represent a daily economic contribution of 2,516 pesos/day (100.65 USD/day), constituting added value, in addition to the energy and economic benefits to be obtained. On the other hand, with the installation of the selected anaerobic biodigestion technology, electrical energy can be produced for the home and the lights, which requires obtaining a 1 kW biogas generator.

Keywords: Installation, Anaerobic Digestion, biomass, economic savings.

Recibido: 03/01/2025

Aceptado: 20/06/2025

Los autores de este trabajo declaran no presentar conflicto de intereses.

Author contributions: **Conceptualization:** D. Vizcay Villafranca. Y. Morejón Mesa. G. Hernández Cuello. **Data curation:** D. Vizcay Villafranca. Y. Morejón Mesa. **Formal Analysis:** D. Vizcay Villafranca. G. Hernández Cuello; Y. Morejón Mesa. **Investigation:** D. Vizcay Villafranca. Y. Morejón Mesa. Y. Amoros Capdesuñer. **Methodology:** D. Vizcay Villafranca. Y. Morejón Mesa. **Supervision:** D. Vizcay Villafranca. Y. Morejón Mesa. G. Hernández Cuello. **Validation:** D. Vizcay Villafranca. Y. Morejón Mesa. Y. Amoros Capdesuñer. **Writing - original draft:** D. Vizcay Villafranca. Y. Morejón Mesa. Y. Amoros Capdesuñer. **Writing - review & editing:** D. Vizcay Villafranca. Y. Morejón Mesa; G. Hernández Cuello.

La mención de marcas comerciales de equipos, instrumentos o materiales específicos obedece a propósitos de identificación, no existiendo ningún compromiso promocional con relación a los mismos, ni por los autores ni por el editor.



Este artículo se encuentra bajo los términos de la licencia Creative Commons Attribution-NonCommercial (CC BY-NC 4.0).
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>



INTRODUCCIÓN

El constante crecimiento de la población mundial y el desarrollo económico y social son los principales motores de la creciente demanda mundial de energía que actualmente está respaldada por combustibles fósiles, lo que impide la sostenibilidad a largo plazo (Bilandzija et al., 2018; González et al., 2020; León et al., 2021). Estos combustibles (por ejemplo, carbón, gas natural y petróleo) siguen siendo la fuente de energía dominante en la economía mundial. Sin embargo, si su consumo continúa al ritmo actual, los recursos se agotarán dentro de varias décadas debido a su suministro limitado (Asakereh et al., 2017; Al-Shetwi, 2022). Además, hay muchas consecuencias negativas del uso de combustibles fósiles, como la emisión de gases de efecto invernadero y otros contaminantes. Para evitar el rápido aumento de gases de efecto invernadero, la clave está en la eficiencia energética y/o cambiar a fuentes de energías renovables (Huang et al., 2017).

El consumo de energía global ha aumentado seriamente la presión sobre los combustibles fósiles, lo que ha provocado un aumento de los efectos del calentamiento global y los problemas del cambio climático. En consecuencia, se espera que la temperatura ambiente global aumente aproximadamente 2°C para 2050 debido a las emisiones contaminantes provocadas por los recursos energéticos no renovables (Bastida et al., 2019; Al-Shetwi, 2022).

En la actualidad las energías renovables son una opción sostenible y técnicamente viable de producir energía y aportan una parte significativa de la producción eléctrica en varios países (Muñoz et al., 2018; González et al., 2020; León et al., 2021). Las energías renovables son una alternativa prometedora para aliviar las complicaciones ambientales, económicas y energéticas asociadas a la cada vez mayor demanda de energía para satisfacer las necesidades de desarrollo y crecimiento de la población humana. Sin embargo, a pesar de todos los esfuerzos para implementar y aprovechar eficientemente fuentes de energía renovable, se requiere de una mayor confianza pública, de políticas, legislación, incentivos económicos y educación para promover el crecimiento, el desarrollo y la implementación de estas tecnologías (Zuñiga y Valenzuela, 2020).

Como objetivo de la Agenda de Desarrollo Sostenible hasta 2030 se encuentra el garantizar el acceso a una energía asequible, segura, sostenible y moderna para todos, en el que se valora la necesidad de aumentar sustancialmente el porcentaje de la energía renovable, mejorar la eficiencia energética y promover inversiones en infraestructuras y tecnologías no contaminantes, entre otros aspectos (Casimiro et al., 2021).

En Cuba la producción de energía eléctrica depende, en gran medida, de los combustibles fósiles, por lo que es de prioridad nacional elevar la sostenibilidad medioambiental,

a través del cambio de la matriz energética y el uso de fuentes renovables de energía. Por tanto, es una alternativa viable para transformar la economía cubana y disminuir la carga contaminante que genera la producción de electricidad a partir de fuentes de energía fósil (Lorenzo, 2017).

En la actualidad no existe una propuesta de utilización de fuentes de energías renovables de manera integral para sustituir las fuentes convencionales que se emplean en pequeñas fincas dedicadas a la producción agropecuaria. Tal es el caso de la finca Robeba, por tal motivo se realizó el estudio de la factibilidad de la tecnología de biodigestión anaerobia adecuada a introducir en dicha finca.

MATERIALES Y MÉTODOS

La finca Robeba perteneciente a la CCS Orlando Cuellar, se encuentra ubicada a los 22°59'58.86" latitud Norte, y 82°08'11.75" longitud Oeste en el municipio San José de Las Lajas, provincia Mayabeque. El área total es de 47 ha, con suelo Ferralítico Rojo típico en toda su extensión (Hernández et al., 2015). Tiene un relieve llano, altura sobre el nivel del mar de 80 m.

Las variables meteorológicas registradas en la Estación Meteorológica Tapaste, San José de las Lajas, durante el periodo enero-septiembre/2023, mostraron que las temperaturas máximas alcanzadas en la región superaron los 32 °C entre los meses de junio a septiembre y las más frías descendieron como promedio hasta 21,1 °C en enero. Las precipitaciones manifestaron incrementos a partir de junio, e indicaron los valores medios más elevados en mayo y agosto con 72 y 77 mm, respectivamente. La humedad relativa varió entre 47% (mínimo, en marzo) y 84% (máximo, en septiembre), mientras que la velocidad del viento alcanzó un valor máximo de 3,6 km/h durante el mes de agosto. El comportamiento de estas variables climáticas permite desarrollar satisfactoriamente a producción agropecuaria.

La finca dispone de 10 vacas en ordeño las cuales permanecen estabuladas el 25% del día, estas alcanzaron una producción promedio de leche diaria durante el 2023, de 6,9 L/vaca, por lo que diariamente esta finca posee un potencial productivo de 69 L/día.

También disponen de 100 cerdos para ceba estabulados todo el día. Estos permanecen solo tres meses para luego su comercialización en convenio con el estado teniendo un precio de 180 peso/lb.

El movimiento de rebaño en el escenario objeto de estudio, se refleja en la [Tabla 1](#).

Tabla 1. Movimiento de rebaño en la finca Robeba

| Mov. De Rebaño | Existencia Inicial | Existencia Final | Animales/día | Masa Promedio, kg |
|----------------|--------------------|------------------|--------------|-------------------|
| Vacas | 10 | 10 | 10 | 400 |
| Cerdos | 100 | 100 | 100 | 45 |

Como resultado del estudio, se analizó el consumo de energía eléctrica en la finca Robeba durante el año 2022, pudiéndose constatar que se obtiene un consumo promedio mensual equivalente a 3767 kW.

Los medios y equipos existentes en el escenario objeto de estudio, así como el tiempo de operación de los mismos, lo que posibilita conocer el consumo de energía por operación, así como el porcentaje de representación de cada fuente energética, estos resultados se reflejan en la [Tabla 2](#).

En esta finca se consumen diariamente 125,58 kWh de energía eléctrica, elemento que demuestra el consumo de este escenario productivo, es válido señalar que solo por concepto de bombeo de agua se consume el 51,57% de la energía consumida diaria.

Para el establecimiento de las metodologías específicas para el dimensionamiento de los diferentes sistemas de biodigestión anaerobia, se consideran los fundamentos planteados por [Morejón et al. \(2022\)](#).

Metodología para el dimensionamiento e instalación de biodigestores anaerobios

Para el cálculo de los parámetros de diseño de un biodigestor anaerobio, según Guardado (2007) y [Morejón et al. \(2022\)](#), es necesario conocer los datos de entrada, y los que deben ser determinados ([Tabla 3](#)).

Tabla 3. Datos de entrada y salida requeridos para el diseño de un biodigestor anaerobio

| Parámetros Datos de entrada | Unidad |
|---|----------------------------------|
| Cantidad de biomasa diaria generada (Bm_d) | kg día ⁻¹ |
| Proporción excreta-agua (N) | kg L ⁻¹ |
| Rendimiento de biogás (Y) | m ³ kg ⁻¹ |
| Tiempo de retención hidráulica (TRH) | día |
| Datos de salida | |
| Volumen diario de material (mezcla estiércol y agua) (V_{dm}) | kg día ⁻¹ |
| Volumen del biodigestor, (V_{biodig}) | m ³ |
| Volumen diario de biogás producido (G) | m ³ día ⁻¹ |
| Volumen de contención del biogás (V_2) | m ³ |
| Volumen del tanque de compensación (V_{tc}) | m ³ |

La cantidad diaria de material (Bm_d) está en función directa con la cantidad de biomasa que se genera, ya sean residuos domésticos, agrícolas o de origen animal. Además, se debe tomar en cuenta la cantidad máxima que se obtiene y los planes de incrementos productivos.

La cantidad de biomasa diaria generada (Bm_d), se determina a través de la siguiente expresión:

$$Bm_d = Ca \times Ce \times Rp \times Rt, \text{ kg} \cdot \text{día}^{-1} \quad (1)$$

donde: Ca - Cantidad de animales; Ce -Cantidad de excreta por animal, kg/día; Rp - Relación entre el peso vivo promedio de la población animal y el peso vivo equivalente tabulado; Rt - Fracción entre el tiempo de estabulación respecto a la duración del día, h/día

$$Bm_d = Ca \times Ce \times \left(\frac{PVp}{PVe} \right) \times \left(\frac{Te}{24h} \right), \text{ kg} \cdot \text{día}^{-1} \quad (2)$$

donde: PVp -Peso vivo promedio de la población animal, kg; PVe - Peso vivo equivalente tabulado; Te -Horas del día que el animal permanece estabulado, h/día

El volumen diario de material (mezcla estiércol y agua) (V_{dm}), no es más que la suma del residual y la dilución de la biomasa (residual y agua).

$$V_{dm} = (1 + N) \cdot Bm_d, \text{ m}^3 \cdot \text{día}^{-1} \quad (3)$$

donde: N: Proporción excreta-agua, kg L⁻¹, se requiere conocer que la densidad del agua es: 1000 kg/m³.

Mientras, el volumen del biodigestor (V_{biodig}) se calcula teniendo en cuenta el valor del volumen de material (mezcla estiércol y agua) V_{dm} que entra al biodigestor y el tiempo de retención TRH.

$$V_{biodig} = V_{dm} \cdot TRH, \text{ m}^3 \quad (4)$$

Posteriormente se procede al cálculo del volumen diario de biogás (G) producido:

$$G = Y \times Bm_d, \text{ m}^3 \cdot \text{día}^{-1} \quad (5)$$

donde: Y- Rendimiento de biogás, m³ · kg⁻¹

El rendimiento de biogás (Y), se determina mediante la expresión:

$$Y = \frac{X}{C_e}, \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \quad (6)$$

donde: X- coeficiente de conversión energética de la excreta producida diariamente o sea la producción diaria de biogás en función del tipo de residuo orgánico, m³/día.

Para todos los tipos de biodigestores, el volumen del tanque de compensación (V_{tc}) es equivalente al volumen de gas producido o sea oscila entre el 25...30% del volumen del biodigestor.

Tabla 2. Características energéticas de los medios y equipos eléctricos existentes en la finca Robeba

| Medios y equipos eléctricos | Potencia, kW | Cantidad | Tiempo de operación, h | Energía consumida por día, kWh/día | Porcentaje, % |
|-----------------------------|--------------|----------|------------------------|------------------------------------|---------------|
| Bomba de agua | 18,5 | 1 | 3,5 | 64,75 | 51,57 |
| Luminarias | 0,4 | 10 | 12,0 | 48,00 | 38,22 |
| Consumo del hogar | 0,53 | 1 | 24,0 | 12,83 | 10,21 |
| Total | | | | 125,58 | |

En el caso específico de los cálculos para el dimensionamiento de un biodigestor de cúpula fija (caracterizado por sus tres partes: cónica, cilíndrica y casquete esférico, representado en la **Figura 1**), se plantean a continuación.

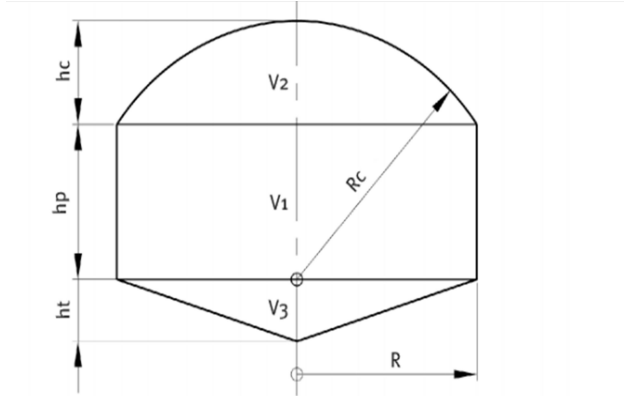


Figura 1. Principales partes en las que se divide un biodigestor de cúpula fija. Fuente: Guardado (2007).

Los pasos que se deben seguir para su empleo son los siguientes:

- Se calcula el volumen total del biodigestor (V_{biodig}), sobre la base del volumen de la mezcla agua-estiércol y el tiempo de retención, tal como se muestra en la **expresión 4**.
- Se calcula el radio del volumen predefinido (R).

Para calcular el radio del volumen predefinido (R), se plantea la expresión:

$$R = \sqrt[3]{\frac{V_{biodig}}{\pi \times 1.121}} \quad (7)$$

donde: R—Radio básico, m

Teniéndose el radio del volumen predefinido (R), se procede a determinar la unidad en metros ($U = R/4$).

donde: U — Unidad proporcional

Esta unidad proporcional permite determinar el resto de las denominaciones, sustituyendo U en las proporciones siguientes:

$$Rc = 5 \times U \quad (8)$$

$$D = 8 \times U \quad (9)$$

$$hc = 2 \times U \quad (10)$$

$$hp = 3 \times U \quad (11)$$

$$ht = 0.15 \times D \quad (12)$$

donde: Rc —Radio de la cúpula, m; D —Diámetro, m; hc =Altura de la cúpula, m; hp = Altura del cilindro, m; ht =Altura del cono base, m

A partir de la determinación de los principales parámetros geométricos se procede a determinar los volúmenes correspondientes al cono base, cilindro y segmento esférico de la cúpula:

$$V_1 = \text{Volumencilindro} = R^2 \times hp \times \pi \quad (13)$$

$$V_2 = \text{Volumencúpula} = \frac{\pi \times hc^2}{3} (3R - hc) \quad (14)$$

$$V_3 = V_{cono} = R^2 \times \pi \times \left(\frac{ht}{3}\right) \quad (15)$$

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Valoración técnico-económica de la introducción de un biodigestor en las condiciones de la finca Robeba

Para la determinación de la tecnología de biodigestor adecuada a instalar en las condiciones de la finca Robeba, perteneciente a la CCS Orlando Cuellar, se tuvo en consideración el dimensionamiento y costo constructivo de las tecnologías de biodigestor de cúpula fija y tubular de polietileno, para a partir de ese análisis determinar cuál de las dos tecnologías resultaría de mayor factibilidad sobre la base de los costos constructivos o de adquisición en el mercado.

Para el correcto dimensionamiento del biodigestor de cúpula fija se requiere la determinación de los siguientes parámetros:

- Cantidad de biomasa diaria generada (Bmd);
- Volumen diario de material (mezcla estiércol y agua) (Vdm);
- Volumen del biodigestor (Vbiodig);
- Volumen de la cámara de fermentación (Vcf);
- Volumen del cilindro (V1);
- Volumen de contención del biogás (V2);
- Volumen del cono base (V3);
- Volumen del tanque de compensación (Vtc).

Por otro lado, para la determinación del aporte energético potencial a obtener en función de la cantidad de animales disponibles se requiere la determinación de los siguientes parámetros:

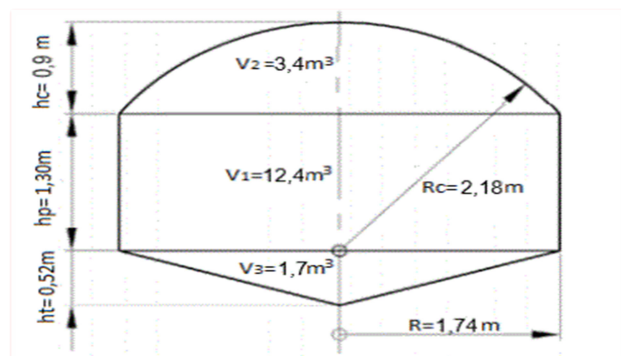
- Productividad de biogás (Y);
- Volumen diario de biogás (G).

Antes de proceder a las determinaciones antes mencionadas, se debe conocer el movimiento de rebaño en el escenario objeto de estudio, tal como se relaciona en la **Tabla 1**.

Los resultados obtenidos de cada uno de estos parámetros de dimensionamiento, se representan en la **Tabla 4**, y **Figura 2**, estos valores se obtienen a partir del movimiento de rebaño concebido por Nidio Pérez dueño de la finca Robeba durante el periodo 2022-2023, representados en la tabla anterior.

Tabla 4. Dimensionamiento del biodigestor de cúpula fija

| Fuente de materia prima | Animal / día | Masa kg | Promedio, Bm, kg/día | Vdm, m ³ /día | V _{biodig} , m ³ | V ₁ , m ³ | V ₂ , m ³ | V ₃ , m ³ | V _{cp} , m ³ | V _{tc} , m ³ |
|-------------------------|--------------|---------|----------------------|--------------------------|--------------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|
| Vacas | 10 | 400 | 28,5 | 0,462 | 18,5 | 12,41 | 3,44 | 1,65 | 4,5 | 5,5 |
| Cerdos | 100 | 45 | 202,5 | | | | | | | |

**Figura 2.** Principales dimensiones del biodigestor de cúpula fija propuesto

Tomándose en consideración los fundamentos establecidos por Morejón *et al.* (2022), que, por cada 350 kg de ganado bovino, se obtienen 10 kg de excreta, generándose 0,36 m³ biogás/día, con una proporción de 1:1-3 de excreta-agua (tomándose una proporción de 1:1) y con un tiempo de retención recomendable de 40 días.

Para el ganado porcino es posible considerar que por cada 50 kg se obtienen 2,25 kg de excreta, generándose 0,10 m³ biogás/día, con una proporción de 1:1-3 de excreta-agua (tomándose una proporción de 1:1) y con un tiempo

de retención recomendable de 40 días lo cual permite determinar el dimensionamiento del biodigestor tubular de polietileno para estas especies y cantidades de animales.

A partir de los valores obtenidos en el dimensionamiento del biodigestor de cúpula fija se propone que este biodigestor posea un volumen de 20 m³, con el propósito de facilitar el proceso de instalación y adquisición de los materiales necesarios. Para la determinación del aporte energético, se considera la cantidad de biomasa generada diariamente, el rendimiento de biogás y el volumen diario de biogás (Tabla 5).

Tabla 5. Aporte energético de la población animal

| Fuente de materia prima | Animal / día | Masa Promedio, kg | Bmd, kg/día | Y, m ³ /kg | G, m ³ /día |
|-------------------------|--------------|-------------------|-------------|-----------------------|------------------------|
| Vacas | 10 | 400 | 28,5 | 0,080 | 18,5 |
| Cerdos | 100 | 45 | 202,5 | | |

Para tener un estimado del costo del proceso constructivo y de instalación del sistema de biodigestor de cúpula fija (sin considerar la mano de obra), en la Tabla 6. se relacionan los materiales requeridos para la construcción e instalación de la tecnología.

Tabla 6. Listado de materiales para la construcción e instalación del biodigestor de cúpula fija de 20 m³ propuesto a instalar y costo

| Materiales | UM | Cantidad | Precio unitario**, peso/u | Costo, peso* |
|--|--|----------|---------------------------|---------------|
| Cemento | Bolsas | 90 | 183 | 16 470 |
| Arena | m ³ | 6 | 160 | 960 |
| Gravilla (38 mm) | m ³ | 7 | 200 | 1 400 |
| Bloque 15 cm | u | 480 | 10 | 4 800 |
| Ladrillos macizos | u | 650 | 8 | 5 200 |
| Acero 3/8 | kg | 162 | 10 | 1 620 |
| Acero 1/4 | kg | 24 | 12,5 | 300 |
| Puntillas | kg | 3 | 50 | 150 |
| Alambre de amarrar cabillas | kg | 5 | 25 | 125 |
| Madera para encofrar | m ³ | 0,3 | 120 | 36 |
| Excavación | m ³ | 38 | 25 | 950 |
| Relleno | m ³ | 18 | 20 | 360 |
| Tuberías para captación y conducción de biogás | Accesorios: Uniones, codos, limpiador y pegamento PVC, válvulas de cierre (la cantidad varía en función de la distancia hasta las naves) | | 1 550 | 1 550 |
| Tuberías para suministro de excreta | Tubos de 110 mm (4") (2): 5m/cu | | 300 | 600 |
| Total | | | | 34 871 |

*peso: se refiere a la moneda nacional (MN), se considera la tasa de cambio 25 MN = 1 USD

** Precios de los materiales de la construcción establecidos por el Ministerio de Comercio Interior (MINCIN) en Cuba.

En el caso de la variante del biodigestor tubular de polietileno se relacionan los materiales requeridos para la construcción e instalación de la tecnología, en la **Tabla 7**, para tener un estimado del costo del proceso constructivo y de instalación (sin considerar la mano de obra), para tener mayor exactitud en los valores económicos, se determinaron las principales dimensiones para un biodigestor de 20 m³, estas se reflejan en la **Figura 3**.

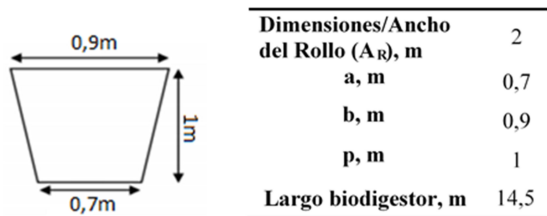


Figura 3. Principales dimensiones de la zanja y el biodigestor de tubular de polietileno propuesto.

Como se puede apreciar en las **Tablas 6 y 7**, el costo de estas tecnologías no resulta elevado, aunque se aprecian diferencia entre ambas, para lograr una mejor comprensión de los aspectos relacionados con el dimensionamiento de ambas tecnologías, así como el aporte energético a obtener con el biogás producido por la introducción de estas variantes tecnológicas, en la **Tabla 8**, se resumen estos valores tanto de diseño, como energéticos.

En el caso del biodigestor de cúpula fija, si se considera la inversión requerida por concepto de materiales de la construcción, la cual asciende a un costo de 34 871 peso y si se analiza este en función del ahorro energético a obtenerse, por concepto de gasolina con una producción equivalente diaria de 14,8 L, a partir del precio de este combustible que equivale a 25 peso, diariamente se tendría un ahorro de 370 peso, por tanto en un año (considerándose 365 días) este ahorro equivaldría a 135 050 peso, lo que evidencia que en tan solo tres meses de funcionamiento se recupera la inversión por concepto de materiales requeridos para la construcción y se obtiene una ganancia de 100 179 peso en lo que resta de año.

Tabla 7. Lista de costos de la instalación del biodigestor tubular de polietileno

| Materiales | UM | Cantidad | Precio unitario, peso/u | Costo, peso |
|--|---|----------|-------------------------------------|---------------|
| Módulo de polietileno | m ³ | 20 | 6 250 (por cada 10 m ³) | 12 500 |
| Excavación | m ³ | 17 | 25 | 425 |
| Tuberías para captación y conducción de biogás | Accesorios: Uniones, codos, limpiador y pegamento PVC, válvulas de cierre (la cantidad varía en función de la distancia hasta las naves) | | 1 550 | 1 550 |
| Tuberías para suministro de excreta | Tubos de 110 mm (4") (2): 5m/cu | | 300 | 600 |
| Total | | | | 15 075 |

Tabla 8. Dimensionamiento y aporte energético del biogás a obtener con la instalación de la tecnología de biodigestión

| Parámetros de dimensionamiento | Biodigestor Cúpula Fija | Biodigestor Tubular de Polietileno |
|---------------------------------------|-------------------------|------------------------------------|
| V _{biodig} , m ³ | 18,5 | 18,5 |
| V _{cfs} , m ³ | 4,5 | - |
| V _{te} , m ³ | 5,5 | 5,5 |
| V _{gas} , m ³ | 5,5 | 5,5 |
| Ancho del rollo (polietileno) , m | - | 2,0 |
| Largo del rollo (polietileno), m | - | 14,5 |
| Base superior zanja, m | - | 0,9 |
| Base inferior zanja, m | - | 0,7 |
| Altura de la Zanja, m | - | 1,0 |
| Parámetros de energéticos | | |
| Y, m ³ /kg | | 0,080 |
| G, m ³ /día | | 18,5 |
| Ahorro Energético Potencial | | |
| Energía eléctrica, kWh | | 33,3 |
| Gas Natural, m ³ | | 11,1 |
| Carbón vegetal, kg | | 5,55 |
| Madera, kg | | 49,95 |
| Gasolina, L | | 14,8 |
| Alcohol combustible, L | | 22,2 |
| Aceite combustible, L | | 12,95 |
| Producción de biofertilizantes kg/día | 201.3 | |

De igual forma si se realiza el mismo análisis, pero considerándose el ahorro de energía eléctrica, a partir de generación potencial a obtener con el empleo del biogás, que asciende a 14,86 kWh diariamente y tomándose la tarifa establecida por la Empresa Eléctrica en Cuba:

- Desde 0 kWh hasta 100 kWh: 0,33;
- Desde 101 kWh hasta 150 kWh: 1,07;
- Desde 151 kWh hasta 200 kWh: 1,43;
- Desde 201 kWh hasta 250 kWh: 2,46;
- Más de 250 kWh: 3,12 por cada kWh.

Entonces se tendría un ahorro promedio mensual de 890 peso, lo que significa un ahorro anual equivalente a 10 680 peso, evidenciándose que en tan solo 3,4 años de funcionamiento se recupera la inversión por concepto de materiales requeridos para la construcción, de modo que se tendrían 16,6 años de ganancia, teniéndose en cuenta que la vida útil de un biodigestor de cúpula fija asciende a los 20 años. Estos elementos demuestran la factibilidad económica de la propuesta analizada.

Para el biodigestor tubular de polietileno, la inversión requerida por concepto de materiales de la construcción, esta asciende a un costo de 15 075 peso y si se analiza este en función del ahorro energético a obtenerse, solo por concepto de gasolina con una producción equivalente diaria de 6,60 L, a partir del precio de este combustible que equivale a 25 peso, diariamente se tendría un ahorro de 165 peso, por tanto en un año (considerándose 365 días) este ahorro equivaldría a 60 225 peso, lo que evidencia que en tan solo tres meses de funcionamiento se recupera la inversión por concepto de materiales requeridos para la construcción y se obtiene una ganancia de 45 150 peso en lo que resta de año; este elemento demuestra la factibilidad económica de la propuesta.

De igual forma si se realiza el mismo análisis, pero considerándose el ahorro de energía eléctrica, a partir de generación potencial a obtener con el empleo del biogás, que asciende a 33,3 kWh diariamente y tomándose la tarifa establecida por la Empresa Eléctrica en Cuba:

- Desde 0 kWh hasta 100 kWh: 0,33;
- Desde 101 kWh hasta 150 kWh: 1,07;
- Desde 151 kWh hasta 200 kWh: 1,43
- Desde 201 kWh hasta 250 kWh: 2,46;
- Más de 250 kWh: 3,12 por cada kWh.

Entonces se tendría un ahorro promedio mensual de 2721 pesos, lo que significa un ahorro anual equivalente a 32652 pesos, evidenciándose que en tan solo 1,1 año y de funcionamiento se recupera la inversión por concepto de materiales requeridos para la construcción, de modo que se tendrían 3,9 años de ganancia, teniéndose en cuenta que la vida útil de un biodigestor tubular de polietileno asciende a los 5 años. Estos elementos demuestran la factibilidad económica de la propuesta analizada.

Resulta válido señalar que el correcto dimensionamiento de este tipo de tecnologías, propicia el aprovechamiento máximo de los desechos obtenidos en los escenarios productivos.

Como se evidencia en la [Tabla 8](#), la instalación de biodigestores en unidades de producción agropecuaria constituye una opción energéticamente viable, a lo cual habría que añadir la contribución a la conservación y cuidado del medio ambiente. De modo que para adoptar la tecnología de biodigestión en la finca objeto de estudio es recomendable desde el punto de vista económico la introducción de un biodigestor tubular de polietileno.

Con la introducción de esta tecnología sería posible:

- Generar energía eléctrica para el accionamiento de: bomba de agua, luminarias y la vivienda para lo que se requiere un generador de biogás de 20 kW de potencia, considerándose todas las fuentes energéticas, si se excluye el bombeo de agua, entonces se requeriría de un generador de biogás de 1 kW de potencia. Según la empresa China Shenzhen Teenwin Environment Co, el precio de estos generadores de biogás oscila entre 550... 1250 USD (13 750...31 250 peso MN)
- Además, es posible obtener 201,3 kg/día de biofertilizantes, que representan un aporte económico de 2516 peso (100,65 USD), a partir del precio de los biofertilizantes en el mercado internacional que alcanza un valor de 500 USD/t (12 500 peso/t).

CONCLUSIONES

- Para satisfacer la demanda energética de la finca, se sugiere la instalación de un biodigestor tubular de polietileno, dado que sus costos de instalación son bajos.
- Con la instalación de un biodigestor tubular de polietileno de 20 m³ es posible producir 201,3 kg/día de biofertilizantes, que representan un aporte económico diario de 2516 peso (100,65 USD), que constituyen un valor agregado, además de los beneficios energéticos y económicos a obtener.
- Con la introducción de la tecnología de biodigestión anaerobia es posible generar energía eléctrica para el suministro y accionamiento de: luminarias y consumo de la vivienda, para lo que se requiere de la adquisición de un generador de biogás de 1 kW de potencia.

RECOMENDACIONES

- Continuar implementando los fundamentos teórico-metodológicos empleados en la investigación en otros escenarios productivos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AL-SHETWI, A.Q.: "Sustainable development of renewable energy integrated power sector: Trends, environmental impacts, and recent challenges", *Science of The Total Environment*, 822: 153-645, 2022, ISSN: 0048-9697.
- ASAKEREH, A.; SOLEYMANI, M.; SHEIKHDAVOODI, M.J.: "A GIS-based Fuzzy-AHP method for the evaluation of solar farms locations: Case study in Khuzestan province, Iran", *Solar Energy*, 155: 342-353, 2017, ISSN: 0038-092X.
- BASTIDA, L.; COHEN, J.J.; KOLLMANN, A.; MOYA, A.; REICHL, J.: "Exploring the role of ICT on household behavioural energy efficiency to mitigate global warming", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 103: 455-462, 2019, ISSN: 1364-0321.
- BILANDZIJA, N.; VOCA, N.; JELCIC, B.; JURISIC, V.; MATIN, A.; GRUBOR, M.; KRICKA, T.: "Evaluation of Croatian agricultural solid biomass energy potential", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 93: 225-230, 2018, ISSN: 1364-0321.
- CASIMIRO, R.L.; RAMÍREZ, H.G.; MARTÍN, M.G.: "Uso de las energías renovables en las fincas familiares, sus potencialidades y desafíos en la transición de la matriz energética local", *Eco Solar*, (78): 19-27, 2021, ISSN: 1028-6004.
- GONZÁLEZ, L.Z.; TORRES, G.A.P.; GONZÁLEZ, A.V.: "Educación en energías renovables desde el enfoque CTS", *Libro de Actas*, 843, 2020.
- HERNÁNDEZ, J.A.; PÉREZ, P.; BOSCH, I.D.; CASTRO, S.N.: *Clasificación de los suelos de Cuba*. Instituto Nacional de Ciencias Agrícolas, San José de las Lajas, Cuba, 91 p, Ed. Instituto Nacional de Ciencias Agrícolas, Instituto Nacional de Ciencias Agrícolas, ed., San José de las Lajas, Mayabeque, Cuba, 91 p., 2015, ISBN: 959-7023-77-6.
- HUANG, A.W.K.; CHEN, W.; ANANDARAJAH, G.: "The role of technology diffusion in a decarbonizing world to limit global warming to well below 2 C: An assessment with application of Global TIMES model", *Applied energy*, 208: 291-301, 2017, ISSN: 0306-2619.
- LEÓN, M.J.A.; MOREJÓN, M.Y.; MELCHOR, O.G.C.; ROSABAL, P.L.M.; QUINTANA, A.R.; HERNÁNDEZ, C.G.: "Dimensionamiento de un parque solar fotovoltaico para el Centro de Mecanización Agropecuaria (CEMA)", *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 30(4), 2021, ISSN: 2071-0054.
- LORENZO, A.J.A.: "Cálculo de instalación. Manual para instalaciones fotovoltaicas autónomas", *Era solar: Energías renovables*, (197): 6-15, 2017, ISSN: 0212-4157.
- MOREJÓN, M.; TORRICO, A.; MORENO, M.V.; ABRIL, H.D.A.: *Fundamentos para la introducción de las fuentes de energía renovables en sistemas agropecuarios. Caso de estudio: Introducción de biodigestores en fincas pertenecientes al departamento Cundinamarca, Colombia*, Ed. CienciAgro., Cundinamarca, Colombia, Depósito Legal: 4-1- 4299-2022. Publicado en: La Paz-Bolivia, por el Instituto Agrario Bolivia, con el sello editorial CienciAgro., 2022, ISBN: 978-9917-9928-0-6.
- MOREJÓN, M.Y.; HERNÁNDEZ, C.G.; VIZCAY, V.D.; AMOROS, C.Y.O.: "Determination of Appropriate Anaerobia the Technology of Biodigestion for a System of Poultry Production", *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 33(4): cu-id, 2024, ISSN: 2071-0054.
- MUÑOZ, A.Y.; RUBIO, G.A.; MENTADO, D.C.I.: "Los incentivos económico-financieros por el empleo de las fuentes renovables de energía. Marco jurídico en Cuba y Ecuador", *Revista Universidad y Sociedad*, 10(2): 53-60, 2018, ISSN: 2218-3620.
- ZUÑIGA, L.Y.; VALENZUELA, G.A.: "Educación en energías renovables desde el enfoque CTS", *Pensamiento y Acción*, 28: 47-59, 2020.