DETERMINACIÓN DE LA TECNOLOGÍA DE BIODIGESTIÓN ANAEROBIA ADECUADA PARA UN SISTEMA DE PRODUCCIÓN AVÍCOLA

Por Dr. C. **Yanoy Morejón Mesa**, Ms.C. **Geisy Hernández Cuello**,
Ing. **Darielis Vizcay Villafranca**, Ing. **Yordan Oscar Amoros Capdesuñe**

Universidad Agraria de la Habana (UNAH), Cuba.
https://orcid.org//0000-0002-1125-3105
E-mail: ymorejon83@gmail.com, ymm@unah.edu.cu
Universidad Agraria de la Habana (UNAH), Cuba.
https://orcid.org//0000-0002-9049-3341
E-mail: geisyh@unah.edu.cu
Universidad Agraria de la Habana (UNAH), Cuba.
https://orcid.org//0000-0001-9989-7820
E-mail: darielisv@unah.edu.cu
Universidad Agraria de la Habana (UNAH), Cuba.
https://orcid.org//0009-0000-5955-0873
E-mail: yordanoscar@unah.edu.cu

Resumen

Se determinó la tecnología de biodigestión anaerobia adecuada para un sistema de producción avícola establecido en la Granja Universitaria El Guayabal, perteneciente a la Universidad Agraria de la Habana. Con el propósito de establecer el dimensionamiento de la tecnología de biodigestor adecuada y conocer el comportamiento de los parámetros económicos y energéticos se consideró las especies animales existentes que aportarían los residuos orgánicos a emplear y la cantidad de animales considerando el movimiento de rebaño, para determinar la biomasa generada diariamente. Se obtuvo que instalar un biodigestor tubular de polietileno resulta más factible que instalar un biodigestor de cúpula fija, con un ahorro económico de 21 418,1 pesos por concepto de selección de la tecnología. Se pudiera adaptar esta tecnología a otras áreas avícolas, considerando sus especificidades.

Palabras clave: *Energías renovables, biogás, aves, biodigestor.*

DETERMINATION OF THE APPROPRIATE ANAEROBIC BIODIGESTION TECHNOLOGY FOR A POULTRY PRODUCTION SYSTEM

Abstract

The appropriate anaerobic biodigestion technology was determined for a poultry production system established at the El Guayabal University Farm, belonging to the Agrarian University of Havana. In order to establish the sizing of the appropriate biodigester technology and to know the behaviour of the economic and energetic parameters, the existing animal species that would provide the organic waste to be used and the number of animals considering the movement of the flock were considered, in order to determine the biomass generated daily. It was found that installing a tubular polyethylene biodigester is more feasible than installing a fixed dome biodigester, with an economic saving of 21,418.1 pesos for the selection of the technology. This technology could be adapted to other poultry areas, considering their specificities.

Keywords: *Renewable energies, biogas, poultry, biodigester..*

I. Introducción

La energía derivada de la biomasa surge a partir de los seres vivos o sus desechos y resulta potencialmente aprovechable para su conversión en biocombustible, lo que puede mitigar el uso de combustibles fósiles no renovables como el petróleo.

Para tratar residuos con elevada materia orgánica biodegradable, constituye una buena alternativa la digestión anaerobia (Sosa, 2017; Flotats *et al*., 2001), proceso que se ejecuta en biodigestores, instalaciones en las que un residuo orgánico se descompone, en ausencia de oxígeno, por la acción de poblaciones de bacterias anaeróbicas.

Como resultado, se producen gases con alto porcentaje de metano y, por ende, una buena capacidad de generación de energía (Frankiewicz, 2015; Grundey, 1982; Guardado, 2006; Rahayu *et al*., 2015; Santos *et al*., 2011; Suárez *et al*., 2018; Priddle, 1998).

Antropogénicamente (producido por actividad humana) el biodigestor (planta de biogás) es la tecnología a destacar en el proceso biotecnológico de digestión anaeróbica de biomasas para obtener biogás. Está constituido por un reactor hermético con una entrada lateral para la materia orgánica, un escape en la parte superior por donde fluye el biogás y una salida para la obtención de efluentes con propiedades biofertilizantes.

Sus productos contribuyen a resolver las necesidades de los productores y al fomento de la agricultura orgánica, como una alternativa económicamente factible y ecológicamente sustentable (Zheng *et al*., 2012). En algunas granjas avícolas también se emplea la digestión anaerobia para aprovechar la biomasa (residuos como el estiércol y las sobras de alimento) como fuente de energía renovable para calentar las instalaciones y proporcionar electricidad a través de la generación de energía térmica. También pueden ser utilizados como biomasa para la generación de energía.

Como consecuencia, se reduce la dependencia de los combustibles fósiles, las emisiones de gases de efecto invernadero y, a largo plazo, los costos de energía de dichas granjas avícolas, así como, mejora su sostenibilidad (Cadena Avícola, 2023). Estos aportes resultan altamente significativos si se consideran los impactos negativos, los elevados precios de los combustibles fósiles y las elevadas tarifas locales de la energía eléctrica.

Sus ventajas deben considerarse para acelerar la introducción de biodigestores que posibiliten la producción de energía a partir del uso de los desechos de la producción agropecuaria (Parra *et al*., 2019). Por tanto, en la Granja Universitaria El Guayabal perteneciente a la Universidad Agraria de la Habana (UNAH), localizada en San José de las Lajas, provincia Mayabeque, Cuba, se realizó el estudio de la factibilidad de la tecnología de biodigestión anaerobia adecuada a introducir en un sistema de producción avícola, con el objetivo de producir biogás y biofertilizantes.

II. Materiales y métodos

La Granja Universitaria El Guayabal, perteneciente a la Universidad Agraria de La Habana (UNAH), se encuentra ubicada a los 23°00'12.5" latitud norte, y 82°09'57.9" longitud oeste en el municipio San José de Las Lajas, provincia Mayabeque, Cuba. Su suelo se clasifica como ferralítico rojo típico (Hernández *et al*., 2015), posee un relieve llano, altura de 120 m sobre el nivel del mar e insolación anual de 1825 kWh/m^2.

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 ºC entre los meses de junio a septiembre y las más frías descendieron, como promedio, hasta 21,1 ºC 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 producción avícola, así que dentro de sus instalaciones se creó un sistema de producción avícola conformado por tres áreas productivas. Una de estas áreas cuenta con gallinas ponedoras de la raza White Leghorn para la producción de huevos con el empleo, su capacidad máxima es de 2872 animales.

La otra área está destinada a la producción de pavos y su capacidad varía en función de la época del año: 1500 animales (verano) y 3000 animales (invierno), y la tercera se dedica a la cría de gallinas camperas para la producción de huevos, su capacidad es de 700 animales.

En la tabla 1 se muestran los datos sobre el movimiento de la masa animal en el sistema de producción avícola, durante el periodo de observación.

Tabla 1. Movimiento del sistema avícola en el periodo de investigación en la Granja El Guayabal

Mov. de Rebaño	Existencia Inicial	Existencia Final	Animales/día	Masa Promedio, kg
Gallinas ponedoras Leghorn White	2872	2872	2872	1,4
Pavos blancos de pecho ancho	3000	1500	2250	6,5
Gallinas camperas	700	700	700	2,2

Para su operatividad, el sistema de producción avícola objeto de estudio, emplea un grupo de portadores energéticos que se relacionan en la tabla 2.

Tabla 2. Portadores energéticos instalados en el sistema de producción

avícola

Portadores energéticos (Cantidad)	Potencia, kW	Tiempo de Operación, h	Energía consumida/ día, kWh/día
Sistema de producción de gallinas White Leghorn			
Tubos LED 20W (10)	0,2	14	2,8
Tubos LED 40W (18)	0,72	14	10,08
Sistema de producción de pavos de pecho ancho			
Tubos LED 20W (79)	1,58	14	22,12
Extractor I (1)	0,01	24	0,24
Extractor II (1)	0,02	24	0,48
Calentador I (1)	0,01	24	0,24
Calentador II (1)	0,03	24	0,72
Calentador III (1)	0,06	24	1,44
Calentador IV (1)	0,03	24	0,72
Calentador V (1)	0,15	24	3,6
Sistema de producción de gallinas camperas			
Tubos LED 40W (10)	0,4	14	5,6

En 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, es necesario conocer los datos de entrada y los que deben ser determinados (tabla 3).

La cantidad diaria de material (Bmd) 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.

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

Parámetros	Unidad
Datos de entrada	
Cantidad de biomasa diaria generada (Bmd)	kg día^{-1}
Proporción excreta-agua (N)	kg L^{-1}
Rendimiento de biogás (Y)	m3 kg^{-1}
Tiempo de retención hidráulica (TRH)	día
Datos de salida	
Volumen diario de material (mezcla estiércol y agua) (Vdm)	kg día^{-1}
Volumen del biodigestor, (Vbiodig)	m^3
Volumen diario de biogás producido (G)	m3 día^{-1}
Volumen de contención del biogás ()	m^3
Volumen del tanque de compensación (Vtc)	m^3

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

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

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.

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

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) (Vdm), no es más que la suma del residual y la dilución de la biomasa (residual y agua).

$$\text{Vdm} = (1 + N) \cdot Bmd, m^3.día^{-1} \quad (3)$$

donde:
N: Proporción excreta-agua, kg L -1, se requiere conocer que la densidad del agua es: 1000 kg/m^3.

Mientras, el volumen del biodigestor (Vbiodig) se calcula teniendo en cuenta el valor del volumen de material (mezcla

estiércol y agua) Vdm que entra al biodigestor y el tiempo de retención TRH.

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

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

$$G = Y \times B_{md}, m^3.día^{-1} \ (5)$$

donde: Y- Rendimiento de biogás, m^3. kg-1

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

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

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, m^3/día.

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

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:

- Se calcula el volumen total del biodigestor (), 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).

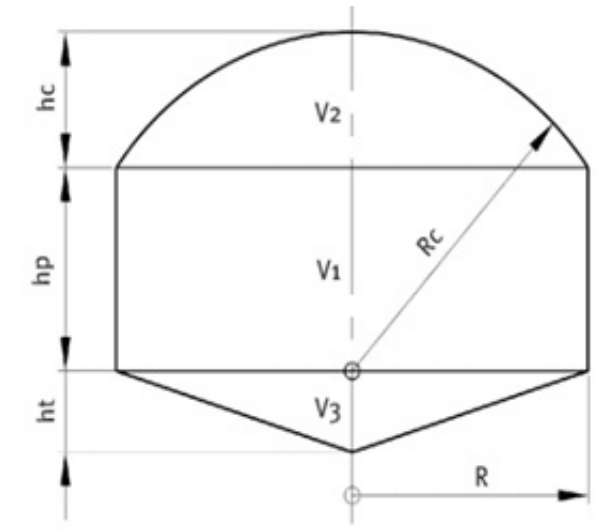


Fig. 1. Principales partes en las que se divide un biodigestor de cúpula fija. Fuente: Guardado, 2007.

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

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

donde: Radio básico, m

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

donde: Unidad proporcional

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

Rc = 5 × U (8)
D = 8 × U (9)
hc = 2 × U (10)
hp = 3. × U (11)
ht = 0.15 × D (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:

$$V_1 = Volumencilindro = R^2 \times hp \times \pi \ (13)$$

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

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

III. Resultados y discusión

Valoración técnico-económica de la introducción de un biodigestor en las condiciones del sistema de producción avícola de la Granja Universitaria El Guayabal

Para la determinación de la tecnología de biodigestor adecuada a instalar en las condiciones del sistema de producción avícola perteneciente a la Granja Universitaria El Guayabal, se tuvo en consideración el dimensionamiento y costo constructivo de las tecnologías de biodigestores 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 de materiales en el mercado.

En este estudio solamente se considera el sistema tecnológico destinado a la producción de huevos con gallinas White Leghorn, dado que es el único de los sistemas establecidos en el sistema productivo, pues posibilita la obtención directa de las excretas, mientras que las otras especies se desarrollan y producen en piso con camadas de zeolita y cabecilla de arroz, lo que impide el uso de sus excretas en biodigestores.

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

- 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 parámetros siguientes:

- 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, el cual se refleja en la tabla 4.

Tabla 4. Movimiento del sistema avícola en el periodo de investigación en la Granja El Guayabal

Mov. de Rebaño	Existencia Inicial	Existencia Final	Animales/ día	Masa Promedio, kg
Gallinas ponedoras Leghorn White	2872	2872	2872	1,4

Los resultados de cada uno de estos parámetros de dimensionamiento se representan en la tabla 5, estos valores se obtienen a partir del movimiento del lote de aves, concebido por la dirección de la granja durante el periodo enero-septiembre/2023 y representados en la tabla anterior. A su vez, se representan las principales dimensiones del biodigestor, las que se reflejan en la figura 2.

Tomando en consideración los fundamentos establecidos por Morejón *et al*. (2022), por cada 1,4 kg de ave, se obtienen 0,18 kg de excreta y se generan 0,11 m3 biogás/día, con una proporción de 1:1-8 de excreta-agua (en una proporción de 1:1) y con un tiempo de retención recomendable de 30 días, es posible determinar el dimensionamiento del biodigestor de cúpula fija para esa especie y cantidad de animales.

Tabla 5. Dimensionamiento del biodigestor de cúpula fija

Fuente de materia prima	Animal / día	Masa Promedio, kg	Bm, kg/día	Vdm, m^3/día	Vbiodig, m^3	V1, m^3	V2, m^3	V3, m^3	Vcf, m^3	Vtc, m^3
Gallinas ponedoras Leghorn White	2 872	1,4	361,872	0,7	22	14,7	7	0,2	7	7

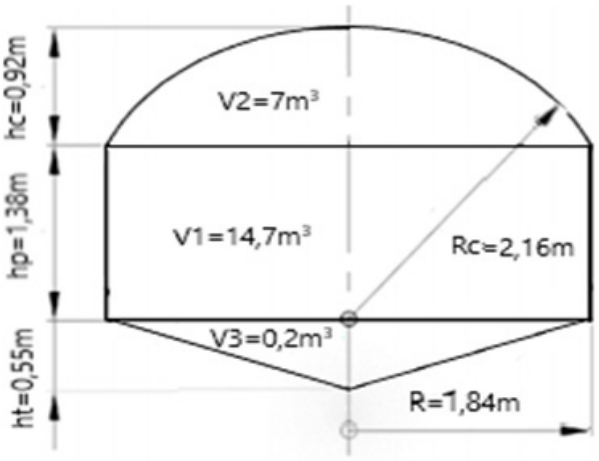


Fig. 2. Principales dimensiones del biodigestor de cúpula fija propuesto.

A partir de los valores obtenidos en el dimensionamiento del biodigestor de cúpula fija, se propone que posea un volumen de 22 m3, para 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 su volumen diario (tabla 6).

Tabla 6. 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
Gallinas ponedoras Leghorn White	2 872	1,4	361,9	0,61	220,76

Como se representa en la tabla 6, el rendimiento de biogás a obtener, según la especie, es de 0,61 m^3/kg y para

esa cantidad de animales estabulados es posible obtener un volumen diario de biogás de 220,76 m³/día.

Para estimar el costo del proceso constructivo y de instalación del sistema de biodigestor de cúpula fija (sin considerar la mano de obra), en la tabla 7, se relacionan los materiales requeridos para la construcción e instalación de la tecnología.

En la tabla 8 se relacionan los materiales requeridos para la construcción e instalación de la variante del biodigestor tubular de polietileno. En la estimación 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 22 m³, estas se reflejan en la figura 3.

Como se puede apreciar en las tablas 7 y 8, el costo de estas tecnologías no resulta elevado, aunque se aprecian diferencias entre ambas. En la tabla 9, se resumen valores tanto de diseño, como energéticos, para lograr una mejor comprensión de los aspectos relacionados con el dimensionamiento de ambas, así como el aporte energético a obtener con el biogás producido por la introducción de estas variantes tecnológicas.

Tabla 7. Listado de materiales para la construcción e instalación del biodigestor de cúpula fija de 22 m³ propuesto a instalar y su costo

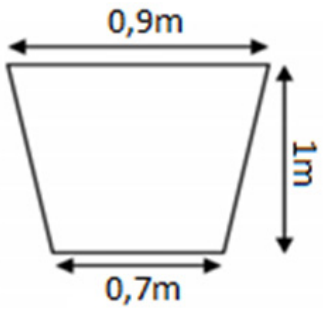
Materiales	UM	Cantidad	Precio unitario**, peso/u	Costo, peso*
Cemento	Bolsas	99	183	18 117
Arena	m³	6,6	160	1056
Gravilla (38 mm)	m³	7,7	200	1540
Bloque 15 cm	u	528	10	5280
Ladrillos macizos	u	715	8	5720
Acero 3/8	kg	178,2	10	1782
Acero ¼	kg	26,4	12,5	330
Puntillas	kg	3,3	50	165
Alambre de amarrar cabillas	kg	5,5	25	137,5
Madera para encofrar	m³	0,33	120	39,6
Excavación	m³	41,8	25	1045
Relleno	m³	19,8	20	396
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	300	
Total				37 458,1

*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.

*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.

Tabla 8. Lista de costos de la instalación del biodigestor tubular de polietileno

Materiales	UM	Cantidad	Precio unitario, peso/u	Costo, peso
Módulo de polietileno	m³	22	6 250 (por cada 10 m³)	13 750
Excavación	m³	5,6	25	140
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)		1550	1550
Tuberías para suministro de excreta	Tubos de 110 mm (4") (2): 5m/cu		300	600
Total				16 040



Dimensiones/ Ancho del rollo (AR), m	2
a, m	0,9
b, m	1
p, m	0,7
Largo biodigestor, m	7

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

Tabla 9. 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
Vbiodig, m³	22	22
Vcf, m³	7	-
Vtc, m³	7	7
Vgas, m³	7	7
Ancho del rollo (polietileno) , m	-	2,0
Largo del rollo (polietileno), m	-	7
Base superior zanja, m	-	0,9
Base inferior zanja, m	-	0,7
Altura de la Zanja, m	-	1,0
Parámetros energéticos		
Y, m³/kg	0,61	
G, m³/día	220,76	
Ahorro energético potencial		
Energía eléctrica, kWh	397,36	
Gas Natural, m³	132,45	
Carbón vegetal, kg	66,22	
Madera, kg	596,05	
Gasolina, L	176,60	
Alcohol combustible, L	264,91	
Aceite combustible, L	154,53	
Producción de biofertilizantes kg/día	11,60	

En el caso del biodigestor de cúpula fija, si se considera la inversión requerida por concepto de materiales de la construcción (37 458,1 pesos) y si se analiza este valor en función del ahorro energético a obtenerse por concepto de gasolina (producción diaria equivalente de 176,60 L, a partir de su precio que equivale a 25 pesos), diariamente se ahorrarían 4415,2 pesos.

En un año (considerando 365 días) este ahorro equivaldría a 1 611 548 pesos, lo que evidencia que en tan solo 8,5 días de funcionamiento, se recupera la inversión por concepto de materiales requeridos para la construcción y se obtiene una ganancia de 1 574 018,8 pesos en lo que resta de año.

De igual forma, si se realiza el mismo análisis, pero considerando el ahorro de energía eléctrica, a partir de la generación potencial a obtener empleando biogás (397,36 kWh diariamente) y tomando como referencia 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 37 170 pesos y, por tanto, un ahorro anual equivalente a 446 400 pesos, se evidencia que, aproximadamente, en tan solo un mes y medio de funcionamiento se recupera la inversión por concepto de materiales requeridos para la construcción, de modo que se tendrían 19,8 años de ganancia, teniendo en cuenta que la vida útil de un biodigestor de cúpula fija se aproxima a los 20 años. Estos valores demuestran la factibilidad económica de la propuesta analizada.

Para el biodigestor tubular de polietileno, la inversión requerida por concepto de materiales de la construcción alcanza un costo de 16 040 pesos y si se analiza este valor en función del ahorro energético a obtenerse, solo por concepto de gasolina (producción diaria equivalente de 176,60 L, a partir del precio de este combustible que equivale a 25 pesos), diariamente se tendría un ahorro de 4 415,2 pesos; por tanto, en un año (considerando 365 días) este ahorro equivaldría a 1 611 548 pesos, lo que evidencia que en tan solo cuatro días de funcionamiento se recupera la inversión por concepto de materiales requeridos para la construcción y se obtiene una ganancia de 1 595 508 pesos en lo que resta de año. Este valor demuestra la factibilidad económica de la propuesta.

Del mismo modo, si se realiza el mismo análisis, pero considerando el ahorro de energía eléctrica a partir de la generación potencial a obtener empleando biogás (397,36 kWh diariamente) y tomando como referencia la tarifa establecida por la Empresa Eléctrica en Cuba y citada anteriormente, entonces se tendría un ahorro promedio mensual de 37 200 pesos, lo que significa un ahorro anual equivalente a 446 400 pesos.

Esta cifra evidencia que en tan solo dos semanas de funcionamiento se recupera la inversión por concepto de materiales requeridos para la construcción, de modo que se tendrían aproximadamente cinco años de ganancia, teniendo en cuenta que la vida útil de un biodigestor tubular de polietileno se aproxima los cinco años. Estos valores 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 9, la instalación de biodigestores en unidades avícolas constituye una opción energéticamente viable, a lo cual habría que añadir la contribución al cuidado y conservación del medioambiente.

De modo que para adoptar la tecnología de biodigestión en el sistema avícola 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 suministro y accionamiento de luminarias, calefacción y extracción de aire húmedo. Para ello se requiere la adquisición de un generador de biogás con 2 kW de potencia. Según la empresa China Shenzhen Teenwin Environment Co., el precio de estos generadores de biogás oscila entre 550 y 1250 USD (13 750 y 31 250 pesos MN).

Además, es posible obtener 11,6 kg/día de biofertilizantes, que representan un aporte económico diario de 145 pesos/día (5,8 USD/día), a partir del precio de los biofertilizantes en el mercado internacional que alcanza un valor de 500 USD/t (12 500 pesos/t).

IV. Conclusiones

El análisis de los valores económicos, energéticos y ambientales obtenidos posibilitaron determinar que, en las condiciones del sistema de producción avícola establecido en la Granja Universitaria El Guayabal, instalar un biodigestor tubular de polietileno resulta más factible que instalar un biodigestor de cúpula fija, con un ahorro económico de 21 418,1 pesos por concepto de selección de la tecnología.

Con la instalación de un biodigestor tubular de polietileno de 22 m3 es posible producir 11,6 kg/día de biofertilizantes, lo que representa un aporte económico diario de 145 pesos/día (5,8 USD/día) 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, calefacción y extracción de aire húmedo. Para ello se requiere la adquisición de un generador de biogás de 2 kW de potencia.

V. Referencias bibliográficas

Cadena Avícola. (2023). Implementación de energías renovables en granjas avícolas: una solución sostenible y económica. *Cadena Avícola y Porcina* [en línea]. Argentina. https://cadenaavicola.com/implementacion-de-energias-renovables-en-granjas-avicolas-una-solucion-sostenible-y-economica/

Flotats, X., Campos, E., Palatsi, J., Bonmatí, A. (2001). Digestión anaerobia de purines de cerdo y codigestión con residuos de la industria alimentaria. Porci (65), pp 51-65. www.pcommons.upc.edu

Frankiewicz, T. (2015). *People's Republic of China Urban Municipal Waste and Wastewater Program. Proceeding of "Technology, Process and Evaluation Best Practices for Utilizing Organic and "Kitchen" Waste from the Municipal Solid Waste Stream" Workshop. Global Methane Initiative Ningbo.* China. p. 16. http://communitybysesign.co.uk/.2015

Grundey, K. (1982). *El tratamiento de los residuos agrícolas y ganaderos*. Barcelona: Ediciones GEA, pp.278-280.

Guardado Chacón J. A. (2006). *Manual del Biogás*. La Habana: Editorial Cubasolar.

Guardado Chacón J. A. (2007). D*iseño y construcción de plantas de biogás sencillas*. La Habana: Editorial Cubasolar.

Hernández, A.J., Pérez, J.M., Bosch, D., Castro, N. (2015). *Clasificación de los suelos de Cuba*. Instituto Nacional de Ciencias Agrícolas, 93p.

Morejón Mesa, Y., Torrico Albino, J.C.; Moreno Melo, V., Abril Herrera, D.A. (2022). *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*. Instituto Agrario Bolivia. La Paz-Bolivia: editorial CienciAgro.

Parra D., Botero, M., Botero, J. (2019). Biomasa residual pecuaria: revisión sobre la digestión anaerobia como método de producción de energía y otros subproductos, Revista UIS Ingeniería.18 (1), pp. 149-160. https://doi.org/10.18273/revuln.v18n2-2019013

Priddle R. (1998, noviembre). *Energía y Desarrollo Sostenible* [Adaptación del discurso pronunciado por el Sr. Priddle].Conferencia Nacional Italiana sobre la Energía y el Medio Ambiente

Rahayu, A. S.; Karsiwulan, D.; Yuwono, H.; Trisnawa, I.; Mulyasari, S.; Rahardjo, S. *et al*. (2015). *Handbook Pome-to-Biogas. Project development in Indonesia*. Jakarta: Winrock International.

Santos, Abreu, I., Medina Morales, N., Machado Muro, Y. y Martín Santos, T. M. (2011). *La educación agropecuaria en la escuela cubana actual*. Centro de Estudio de la Educación Ambiental. Villa Clara, Cuba: Editorial Félix Valera Morales.

Sosa, R. (2017). *Indicadores ambientales de la producción porcina y ganadera*. VII Seminario Internacional de Porcicultura Tropical. La Habana, Instituto de Investigaciones Porcinas.

Suárez, J.; Sosa, R.; Martínez, Y.; Curbelo, A.; Figueredo, T.; Cepero, L. (2018). Evaluación del potencial de producción del biogás en Cuba. *Pastos y Forrajes*, *41* (2), pp. 85-92. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0864-03942018000200001&lng=es&tlng=es

Zheng, Y.H., Wei, J.G. Li, Feng, S.F., Li, Z.F.., Jiang, G.M., Lucas, M, Wu, M., Ning,. T.Y. Anaerobic fermentation technology increases biomass energy use efficiency in crop residue utilization and biogas production. R*enewable and Sustainable Energy Reviews. 16* (7), pp. 4588-4596. https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.03.061.2012

Conflicto de intereses: Los autores no declaran conflicto de intereses vinculados con la investigación presentada.

Contribucion de los autores:

Conceptualización: Y. Morejón Mesa, G. Hernández Cuello.

Curación de Datos: Y. Morejón Mesa, G. Hernández Cuello, D. Vizcay Villafranca.

Análisis Formal: Y. Morejón Mesa, G. Hernández Cuello, D. Vizcay Villafranca.

Investigación: Y. Morejón Mesa, G. Hernández Cuello, D. Vizcay Villafranca, Y.O. Amoros Capdesuñer.

Metodología: Y. Morejón Mesa, G. Hernández Cuello.

Supervisión: Y. Morejón Mesa.

Validación: Y. Morejón Mesa, G. Hernández Cuello.

Redacción-borrador original: Y. Morejón Mesa, G. Hernández Cuello, D. Vizcay Villafranca, Y.O. Amoros Capdesuñer.

Redacción-revisión y edición: Y. Morejón Mesa, G. Hernández Cuello, D. Vizcay Villafranca, Y.O. Amoros Capdesuñer.

Recibido: 15 de julio de 2024

Aceptado: 10 de agosto de 2024