

Evaluación térmica de grupo electrógeno a biogás BRANCO en la Estación Experimental de Pastos y Forrajes Indio Hatuey

Thermal assessment of a BRANCO stationary engine fuelled with biogas at the Experimental Station of Pastures and Forages Indio Hatuey

Alejandro Denis Gil¹, Fredyc González Cárdenas², Jesús Suárez Hernández^{3,*}

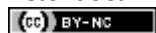
¹ Trabajador por Cuenta Propia.

² Biosoluciones y Ciencia México. Mérida, Yucatán. México.

³ Estación Experimental de Pastos y Forrajes Indio Hatuey. Central España Republicana. Universidad de Matanzas, Cuba.

*Autor de correspondencia: jesus.suarez@ihatuey.cu

Este documento posee una [licencia Creative Commons Reconocimiento/No Comercial 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)



Recibido: 20 septiembre 2021 **Aceptado:** 18 octubre 2021 **Publicado:** 3 enero 2022

Resumen

El presente trabajo tiene como objetivo la evaluación térmica de un grupo electrógeno a biogás de pequeña escala, marca BRANCO, instalado en la Estación Experimental de Pastos y Forrajes Indio Hatuey (EEPFIH), para lograr una operación eficiente en las condiciones cubanas. Para la evaluación se asumió como base la primera y segunda leyes de la termodinámica, determinando la eficiencia térmica, consumo específico de combustible, eficiencia exergética y costo exergético; asimismo, se conformó un banco de pruebas compuesto por una cámara de expansión, para disminuir las presiones del gas hasta lograr niveles cercanos a la atmosférica, un analizador de gases y un contador de gas, así como se incorporaron hornillas eléctricas para imponer las diferentes cargas energéticas. Como resultados destaca que el punto óptimo de trabajo del grupo electrógeno es con una carga de 3,6 kW y alcanza una eficiencia de 12,32%, consumiendo 1,316 m³/kWh, lo cual es favorable con biogás y en un motor ciclo Otto, así como que la sustitución de gasolina por biogás en estos equipos genera un importante ahorro económico; por otra parte, este grupo electrógeno tiene un favorable desempeño para ser utilizado en pequeños biodigestores, comunes en los productores porcinos a pequeña escala.

Palabras clave: biogás, grupo electrógeno, eficiencia, motor

Abstract

The scope of this work is the thermal assessment of a stationary engine for power generation, fuelled by biogas at the Experimental Station of Pastures and Forages Indio Hatuey (EEPFIH), in order to reach efficient working conditions within a Cuban environment. The assessment was based on the first and second law of thermodynamics, estimating thermal efficiency, specific fuel consumption, exergy efficiency and cost. On the other hand, an engine test bench was settled, which was composed by an expansion device for pressure reduction to near atmospheric, a gas analyzer and a counting, likewise electric resistances to establish the engine load. The optimal work condition was obtained for 3.6 kW of engine load with a 12.32% of efficiency, consuming 1.316 m³/kWh, favorable with biogas use in an Otto cycle engine, and the substitution of gasoline to biogas generates important economic benefits. The engine tested showed good performance to be implemented coupled to small biodigesters, such as those found at a local scale farms.

Keywords: biogas, stationary engine, efficiency, engine

1. Introducción

Los biocombustibles gaseosos más difundidos son el gas de gasificación, también conocido como gas de síntesis, y el biogás; este último es un compuesto de gas generado en el proceso de digestión anaerobia de los compuestos orgánicos como el estiércol animal, los cuerpos de animales y otros elementos. El elemento principal de biogás es el metano (CH_4), pero también contiene dióxido de carbono (CO_2) y otros gases. El CH_4 es un gas inflamable y ocupa de 50% a 70% de la mezcla, siendo aprovechable como combustible [1].

En Cuba, en la década de los 80 del pasado siglo, la aplicación de tecnologías de digestión anaerobia se enfocó fundamentalmente a residuales de ingenios azucareros y fábricas de derivados de la caña de azúcar [2] y en instalaciones pecuarias de gran tamaño, aunque se expandió al sector campesino. A partir de la mitad de la década pasada (2000-2010), la aplicación de tecnologías de digestión anaerobia se ha fomentado en Cuba, principalmente en los sistemas de producción animal y con énfasis en la cría porcina [3,4]; las últimas dos décadas en Cuba se han caracterizado por:

- Incremento en la construcción de digestores, asociada al fomento de convenios entre productores individuales y las empresas porcinas, pero fundamentalmente de pequeña y mediana capacidad de digestión-inferior a 100 m^3 y con predominio del modelo de cúpula fija o sus variantes.
- El apoyo de proyectos internacionales para la difusión y construcción de numerosos biodigestores, así como el inicio del desarrollo y fabricación de equipos y componentes para sistema de biogás [5].
- La introducción de nuevas tecnologías en los últimos años que incrementan las capacidades de digestión, como los biodigestores de laguna cubierta, que en el municipio Martí (Matanzas) llegan a $4\,000 \text{ m}^3$ de digestión y 120 kWh de generación eléctrica.

En el caso de un biocombustible gaseoso, como el biogás, todas las aplicaciones se basan en aprovechar la energía química contenida en el mismo mediante la combustión. Entre tantas se destacan la cocción humana y animal, la iluminación, la refrigeración, las motobombas y los grupos electrógenos; estas últimas refieren la utilización del biogás en motores de combustión interna.

Aunque no es igual que la experiencia alcanzada con el bioetanol y el biodiesel [6-10], diversos autores han abordado los usos del biogás en motores de combustión interna, tanto para la generación de electricidad como en vehículos [11-13], en muchos casos a partir de la adaptación de motores para diesel y gasolina.

Teniendo en consideración las experiencias nacionales e internacionales y el potencial ya existente en Cuba sobre la producción y uso del biogás, el proyecto Biomasa-Cuba, liderado por la Estación Experimental Indio Hatuey (EEPFIH), con su concepción agroenergética, introdujo diferentes tecnologías para el mejor uso del biogás integrado con la producción de alimentos, entre ellas, grupos electrógenos a biogás. El objetivo del presente trabajo es diseñar una metodología para la evaluación térmica de grupos electrógenos a biogás de pequeña escala, que se valida en una marca BRANCO, de fabricación brasileña, instalado en la EEPFIH.

2. Materiales y Métodos

La instalación de generación de energía eléctrica estaba compuesta por un grupo electrógeno (motogenerador) a biogás fabricado por la empresa brasileña BRANCO, desarrollado a partir de la adaptación de un motor a gasolina, e instalado en la EEIH, ubicada en la localidad Central España Republicana, del municipio Perico, provincia de Matanzas, Cuba. El motor de combustión interna es de encendido provocado; tiene dos cilindros y una potencia de 6 kW (8 HP), a 1 800 min⁻¹ (1 800 rpm), mientras que el generador posee una capacidad de 5 kW. El motor fue alimentado con biogás desde un biodigestor de cúpula fija modelo vietnamita de 15 m³. El biogás generado en dicho reactor fue sometido a un proceso de filtrado y posteriormente, almacenado en un reservorio del mismo material de los biodigestores plásticos. Dicho reservorio consistía en una bolsa de plástico de 1,25 m de diámetro y 1,5 m de largo, con una capacidad de 1,8 m³, aproximadamente, la cual alimentaba el motor, mediante una tubería de 12 mm de diámetro. Se realizaron los ajustes necesarios para que el biogás ingresara al interior del filtro de aire del motor, de tal manera que el mismo al aspirar el aire que requiere para la combustión de la gasolina, reciba una mezcla adecuada de biogás-aire.

Para realizar los cálculos termodinámicos correspondiente a la evaluación térmica se asumió como base la primera y segunda leyes de la termodinámica, obteniendo los valores de eficiencia térmica, consumo específico de combustible, eficiencia exergética y costo exergético. La exergía permite analizar el desperdicio de los recursos en las actividades, cuantificando el máximo trabajo que puede obtenerse de un desequilibrio entre un sistema y el ambiente que lo rodea, estableciendo pautas cuantitativas para su ahorro y uso eficiente.

La evaluación económica se basó en los costos del kilowatt-hora, cuando son generados utilizando como combustibles biogás y gasolina, respectivamente, y destaca un 100% de la sustitución de la gasolina por biogás. Estos costos se comparan con el de la generación eléctrica en Cuba, 0,27 USD/kW-h [14]. En este análisis no se considera el costo inicial del grupo electrógeno ni los costos de mantenimiento y operación, ya que son los mismos al utilizar cualquiera de los combustibles mencionados. El consumo específico de gasolina es un dato del fabricante del motor, mientras que el del biogás se calcula en este análisis. El costo de la gasolina regular en Cuba es 25 pesos cubanos por litro (2019).

Para la generación de electricidad con biogás a pequeña escala se debe disponer de un biodigestor de 64 m³ de volumen, como mínimo, el cual genera 20 m³/día de biogás; aunque la prueba se realizó con un biodigestor de 15 m³, se sugiere utilizar de dicha capacidad, para también aprovechar el biogás en diversos equipos domésticos. El costo total del biodigestor se divide entre el tiempo de vida útil (30 años); para este estudio se asumen solo 20 años y se obtendrá el costo anual (ecuación 10). Para calcular el costo de un metro cúbico de biogás, se divide el costo diario del biodigestor mas el costo de operación del mismo (10% del salario del obrero-porcentaje del tiempo que dedica a operarlo-, en este estudio el salario es \$114,83/día), entre la producción diaria de biogás (20 m³/día).

Después de obtener los costos del kilowatt para cada uno de los combustibles utilizados se prosigue a calcular la tasa de ahorro del biogás respecto a la gasolina; con este valor se calcula el ahorro anual, considerando una explotación de tres horas diarias por 365 días al año y un consumo máximo de 3,6 kW; definido por la Ecuación 1.

$$A_{\text{anual}} = C_e^m \cdot t_{\text{trab}}^{\text{dia}} \cdot \text{dias}_{\text{trab}} (C_{\text{kwh}}^{\text{gasolina}} - C_{\text{kwh}}^{\text{biogas}}) \quad (1)$$

Donde:

A_{anual} : Ahorro anual [\$/año]

C_{em} : Consumo de energía máximo [kW]

$t_{trab}^{día}$: Tiempo de trabajo diario [h]

$d_{ast_{rab}}$: Días de trabajo [días]

$C_{kWh}^{gasolina}$: Costo del kWh utilizando gasolina

$C_{kWh}^{biogás}$: Costo del kWh utilizando biogás

Para dicha evaluación se diseñó e instaló un banco de pruebas compuesto por la cámara de expansión de PVC, un analizador de gases LANTEC modelo GEM 2000, un metro-contador de gas y el grupo electrógeno BRANCO; asimismo, para imponer diferentes cargas eléctricas en la evaluación a diversos regímenes de trabajo se utilizaron hornillas eléctricas convencionales de 1 200 W previamente calibradas.

3. Resultados y Discusión

En la Tabla 1 se muestra la composición del gas en las distintas pruebas realizadas, mediante el analizador de gases, para determinar, mediante cálculos, el poder calórico inferior del biogás en los distintos ensayos. Una vez que se tiene la composición del biogás y se calcula su densidad, entonces se obtiene su poder calórico inferior (PCI), que no cambia considerablemente. En la Tabla 2 se aprecian los valores de eficiencia térmica y el consumo específico del biogás en las distintas cargas impuestas.

Tabla 1. Composición del biogás

Ítem	UM	Carga [kW]			
		1,2	2,4	3,6	4,25
CH₄	[%]	62,6	62,2	61,8	61,9
CO₂	[%]	33,4	34,1	34,4	33,8
O₂	[%]	1	0,8	1,1	0,9
PCI	[kJ/m ³]	22 473,4	22 329,8	22 186,2	22 222,1
PCI	[kJ/kg]	21 856,1	21 561,1	21 284,2	21 583,9
pb	[kg/m ³]	1,03	1,04	1,04	1,03

pb: Densidad volumétrica del biogás

En este sentido, considerando que el rendimiento medio de un motor ciclo Otto (motor de gasolina) es de un 25-30%, que el biogás es el combustible de trabajo y que la eficiencia calculada es del conjunto motor-generador (que componen el grupo electrógeno), se puede considerar que el mismo posee un buen rendimiento.

Tabla 2. Valores de eficiencia térmica y el consumo específico en las distintas cargas impuestas.

ITEM	UM	Carga [kW]			
		1,2	2,4	3,6	4,25
η term.	[%]	7,135	10,676	12,323	11,850
β biogás	[m ³ /kWh]	2,245	1,510	1,316	1,367
β biogás	[kg/kWh]	2,308	1,563	1,372	1,407

En la Tabla 3 se muestra los valores de la eficiencia exergética y el costo energético, obtenidos en las distintas pruebas realizadas. Luego del análisis energético y exergético, el punto de mejores

prestaciones de dicho grupo electrógeno es a los 3,6 kW de carga, con eficiencias térmica y exergética del 12,3%, un consumo específico de $1,3 \text{ m}^3/\text{kW}\cdot\text{h}$ y un costo exergético de 8,11 unidades de exergía por cada unidad de exergía útil que sale del sistema. Ello permite considerar que este grupo electrógeno posee un favorable desempeño para ser utilizado en pequeños biodigestores, comunes en los productores porcinos a pequeña escala. Al respecto, Mantilla et al. [15] consideran que la eficiencia térmica, en general, es menor para los combustibles gaseosos por efecto directo de la disminución de potencia, y determinaron un 12% en biogás, muy similar a los resultados de este trabajo, a diferencia del valor de eficiencia con gasolina (17%).

Tabla 3. Valores de eficiencia exergética y costo exergético a distintas cargas

ITEM	UM	Carga [kW]			
		1,2	2,4	3,6	4,25
η exerg	[%]	7,135	10,676	12,323	11,850
K	U	14,014	9,366	8,114	8,438

Con respecto al cálculo económico, el costo del kilowatt utilizando como combustible gasolina y con un consumo específico según normas técnicas del fabricante de $0,56 \text{ L/kWh}$ [16], dio como resultado \$1,01, empleando como combustible biogás y con un consumo específico calculado de $1,316 \text{ m}^3/\text{kWh}$, con $1,33 \text{ $/kWh}$. El valor obtenido de $1,33/\text{kWh}$ (equivalente a $0,06 \text{ USD/kWh}$) representa el 22% del costo del kilowatt-hora para Cuba ($0,27 \text{ USD/kWh}$). Por concepto de utilizar como combustible biogás se tiene un ahorro de $12,67/\text{kWh}$, en lugar de gasolina, y asumiendo una explotación de tres horas diarias durante 365 días al año y un consumo máximo de 3,6 kW.

4. Conclusiones

Al no existir en Cuba experiencias con grupos electrógenos BRANCO diseñados para operar con biogás, su evaluación térmica es clave para lograr una operación eficiente en las condiciones del país. El punto óptimo de trabajo del grupo electrógeno BRANCO es con una carga de 3,6 kW, donde es capaz de alcanzar una eficiencia de 12,32%, consumiendo $1,316 \text{ m}^3/\text{kWh}$. Este resultado destaca que el funcionamiento recomendable de los grupos electrógenos a pequeña escala de este fabricante, por lo general, es a media carga. Este resultado es favorable, considerando, tanto que el rendimiento medio de un motor Otto es de un 25-30%, que el biogás es el combustible de trabajo, como que la eficiencia calculada es del conjunto motor-generador. La sustitución de gasolina por biogás en estos equipos genera un importante ahorro económico, de \$49 945/año. Este grupo electrógeno posee un favorable desempeño para ser utilizado en pequeños biodigestores, comunes en los productores porcinos a pequeña escala.

Referencias

1. Rwigema, A., *Source of energy and solution to the environment problems in Rwanda*. Applied Mechanics and Materials, 2015. **705**: p. 268-272. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.705.2.68>.
2. Betancourt, S.M., Domínguez, M., Almeida, M.P., *Estudio de los principales sistemas de tratamiento anaeróbico de residuales*. ICIDCA, 1990. **24**(2-3): p. 24-27.
3. Hermida, F.O., Barrera, E.L., Alba, Y., López, L., Pedraza, J., Álvarez, M.A., *Impacto de la producción de biogás en la matriz energética de la Granja Porcina Guayos*. Revista Universidad y Sociedad, 2020. **12**(5): p. 254-262.

4. Suárez, V.D., Morales, M., Díaz, I., Álvarez, M., *Modelo integrador para el diseño de una planta de producción de biogás a partir del residual porcino*. Afinidad, 2021. **78**(53): p. 165-173.
5. Suárez-Hernández, J., *Producción integrada de alimentos y energía a escala local en Cuba: bases para un desarrollo sostenible*. Pastos y Forrajes, 2015. **38**(1): p. 3-10.
6. Sakai, S., Rotharmer, D., *Impact of ethanol blending on particulate emissions from a spark-ignition direct-injection engine*. Fuel, 2019. **236**: p. 1548-1558.
7. Piloto-Rodríguez, R., Tobío, I., Suárez-Hernández, J., *Diesel engine fuelled with blends of Jatropha curcas oil and diesel fuel*. Revista Cubana de Ingeniería, 2020. **11**(2): p. 12-19.
8. Piloto-Rodríguez, R., Ortiz, M., Suárez-Hernández, J., Tobío, I., Melo, E.A., Díaz, Y., Sotolongo, J.A., *Data on combustion chamber measurements of a diesel engine fuelled with biodiesel of Jatropha curcas and fatty acid distillates*. Data in Brief, 2020. **31**: 105799. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.dib.2020.105799>
9. Semakula, M., Inambao, F., *Waste to Energy feedstock sources for the production of biodiesel as fuel energy in diesel engine: A review*. Advances in Science, Technology and Engineering Systems Journal, 2021. **6**(1): p. 409-446. DOI: <https://doi.org/10.25046/aj060147>.
10. Colectivo de Autores, *Biocombustibles para su uso en motores diesel*, 2014. Ed. IDICT: La Habana. ISBN: 978-959-234-095-4.
11. Gómez, J. P., Amell, A.A., Olsen, D.B., Amador, G.J., *Strategies to improve the performance of a spark ignition engine using fuel blends of biogas with natural gas, propane and hydrogen*. Int. J. Hydrogen Energy, 2018. **43**: p. 21592-21602. DOI: <https://10.1016/j.ijhydene.2018.10.009>.
12. Cardona, A. J., Jaramillo, J.S., Amell, A.A., *Evaluación del comportamiento mecánico y ambiental de un motor diésel modo encendido provocado con biogás enriquecido con CH₄ e hidrógeno*. Scientia et Technica, 2020. **25**(1): p. 67-77.
13. Neto, J.V.S., Gallo, W.L.R., *Potential impacts of vinasse biogas replacing fossil oil for power generation, natural gas, and increasing sugarcane energy in Brazil*. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2020. **135**: 110281. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110281>
14. MINEM. *Desarrollo de Fuentes Renovables de Energía. Presentación de la Dirección de Energía Renovable del Ministerio de Energía y Minas en el PNUD*, 2015. La Habana, Cuba.
15. Mantilla, J.M., Aguirre, B.J., Sarmiento, L.A., *Evaluación experimental de un motor encendido por chispa que utiliza biogás como combustible*, 2008. Revista Ingeniería e Investigación. **28**(2): p. 131-141.
16. BRANCO, *Manual para a gestão e operação de geradores de biogás*, 2012. Cia. Caetano Branco, São José dos Pinhais, Paraná, Brasil.

Conflicto de Intereses

Los autores consideran que no existen conflictos de intereses.

Contribución de los autores

Alejandro Denis Gil. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6793-6979>

Diseño y desarrollo de los experimentos. Redacción del manuscrito.

Fredyc González Cárdenas. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2171-1536>

Diseño y desarrollo de los experimentos. Redacción del manuscrito.

Jesús Suárez Hernández. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6232-1251>

Diseño de los experimentos, gestión del proyecto y revisión del manuscrito.