

Factores que determinan la factibilidad técnica y económica de la generación de electricidad con biogás

Determining factors in the technical and economic feasibility of electricity generation through biogas

Autores:

M.Sc. Gustavo E. Fernández-Salva¹, <https://orcid.org/0000-0001-7425-8571>

Dr.CT. Luis J. García-Faure², <https://orcid.org/0000-0003-1237-3915>

Dr.CT. Lorenzo Enríquez-García³, <https://orcid.org/0000-0001-7300-8204>

M.Sc. Robuam Peña-Domínguez¹, <https://orcid.org/0000-0002-6348-0123>

M. Sc. Ramon Mustelier-Pardo⁴, <https://orcid.org/0000-0002-9868-7634>

Organismo: ¹Universidad de Guantánamo, Cuba. ²Universidad de Oriente, Santiago de Cuba, Cuba. ³Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Facultad de Ingeniería Eléctrica, Riobamba, Ecuador. ⁴Copextel S. A. Guantánamo. Cuba.

E-mail: gfsalva2021@gmail.com, lorenzeniquez@yahoo.com, robuam@cug.co.cu, lgarcia@uo.edu.cu, rmustelier@elecgtm.une.cu

Fecha de recibido: 18 abr. 2022
Fecha de aprobado: 15 jun. 2022

Resumen

En este trabajo se demuestra que cuando se proyecta generar electricidad con un combustible diferente de aquél para el cual fue diseñado el motor, deben tenerse en cuenta los factores técnicos y económicos que permitan adaptarlo al nuevo combustible, ha sido el resultado de estudios realizados a proyectos que han fracasado por no tomar en cuenta estos factores. Las propiedades físicas y químicas del combustible determinan los cambios que hay que efectuar en el sistema de alimentación, de avance del encendido, el lubricante utilizado y otros. Se demuestra también, que la cantidad de biomasa bruta consumida está en función de la relación de conversión kg de biogás/ton biomasa, esto debe tenerse en cuenta para determinar la disponibilidad del recurso y su costo. Se precisan las variables de sensibilidad que deben ser controladas para aprovechar las oportunidades que ofrece la utilización del biogás y garantizar la sostenibilidad económica de los proyectos.

Palabras clave: Biogás; Valor calórico; Relación de conversión; Factibilidad tecno-económica; Variables de sensibilidad

Abstract

This work demonstrates the need of taking into consideration the technical and economic factors that allow to generate electricity with a fuel different from the one for which the engine was designed. This has been the result of studies carried out on projects which have failed because these factors were forgotten. The physical and chemical properties of the fuel determine the changes to be made in the feeding system, the ignition advance, the lubricant used and others. It is also shown that the amount of raw biomass consumed is a function of the conversion ratio kg biogas/ton biomass, which must be taken into account to determine the availability of the resource and its cost. The sensitivity variables that must be controlled to take advantage of the opportunities offered by the use of biogas and to guarantee the economic sustainability of the projects are specified.

Keywords: Biogas; Calorific value; Conversion ratio; Techno-economic feasibility; Sensitivity variables

Introducción

En reiteradas ocasiones, se ha estudiado la posibilidad de utilizar otros combustibles diferentes de los derivados del petróleo para la explotación de los motores de combustión interna. Las Primera y Segunda Guerras Mundiales fueron testigo de esto. Muchos países importadores de petróleo se vieron en la necesidad de investigar y desarrollar combustibles alternativos; otros han mantenido una línea consecuente con el desarrollo de biocombustibles, como Brasil, que desde finales de la década de los 60 del pasado siglo, ha venido sustituyendo gran parte de la gasolina que utiliza por alcohol de caña y ha desarrollado diseños de motores apropiados para su utilización. En la actualidad, la generalización del uso de los biocombustibles tiene mayor relevancia estratégica por lo inevitable del agotamiento gradual del petróleo, su elevado costo e impacto sobre el medio ambiente.

En la naturaleza existen innumerables sustancias que por acción natural, por efecto del trabajo del hombre, o por los residuos de sus producciones, pueden ser utilizadas para la obtención de biocombustibles líquidos o gaseosos, tales como los biodiesel, obtenidos a partir de mezclas de alcoholes con aceites vegetales o animales; los gases de la pirolisis de los residuos de maderas, carbón vegetal y otros; el biogás, que se obtiene por la descomposición anaeróbica de diferentes sustancias orgánicas, etcétera [Cuesta, Villa, 2015].

Cuando se proyectan los motores de combustión interna, un parámetro determinante en el tipo de combustible a utilizar es la relación de compresión, ya que de ella depende la forma y efectividad con que se produce la combustión. En los motores diésel, se exigen altos valores de relación de compresión (12-20), porque el combustible sólo debe comenzar la combustión cuando se alcanza la temperatura requerida al final de la compresión. En los motores de carburación la combustión debe comenzar mediante una chispa, por lo que el combustible puede tener menor temperatura de inflamación. Existen otros factores, como el ángulo de avance de la inyección, el número de revoluciones del motor, el diseño de la cámara de combustión y otros, que ejercen una notable influencia en las propiedades físico-química del combustible utilizado.

Utilización de combustibles gaseosos en motores Diésel

De estudios previos realizados, se ha podido precisar, que en general, las propiedades de los combustibles gaseosos permiten que éstos puedan ser utilizados como sustitutos del combustible en los motores diésel y de carburación mediante el adecuado ajuste del ángulo de avance de la inyección], sin embargo para llevar a cabo la sustitución hay que tener presente determinadas propiedades del combustible y del proceso de combustión que determinan ciertas restricciones desde el punto de vista de la alimentación que influyen en la potencia y eficiencia del motor.

Materiales y métodos

Se aplican los fundamentos teóricos de los sistemas de alimentación y combustión de los motores cuando son alimentados con gas, se presenta la metodología para el cálculo del consumo de biomasa y el costo total para sustituir el combustible original, se plantean las oportunidades que ofrece el biogás que deben ser aprovechadas para garantizar la sostenibilidad de los proyectos. Fue desarrollado un software para facilitar la toma de decisiones.

Relación de sustitución del combustible

En general, los combustibles gaseosos con excepción de algunos derivados del petróleo y el Hidrógeno, poseen menor poder calórico que el combustible diésel, como se muestra en la

tabla 1. Luego, la masa de gas que debe introducirse al motor para que sustituya al combustible diésel y equivalente energía generada, está dada por:

$$kg\ de\ gas = kg\ de\ diesel \frac{poder\ calórico\ del\ diesel}{poder\ calórico\ del\ gas} \quad (1)$$

Si se toma como ejemplo, un combustible diésel con poder calórico promedio de 45 MJ/kg, y el combustible gaseoso a utilizar es biogás con valor calórico de 20 MJ/kg, la relación de sustitución está dada por:

$$\frac{kg\ de\ biogás}{kg\ de\ diesel} = \frac{45}{20} = 2,5$$

Debe sustituirse cada kg de combustible diésel por 2,5 kg de biogás.

En la **tabla 1** se relacionan los poderes calóricos medio de los principales combustibles gaseosos, obtenidos a partir de su composición molecular mediante la ecuación de Mendeléiev. [Maslo, Jovav, 2002]

$$VCB = 3384C + 12534H - 1086(O - S) - 251 \cdot (9H + W) \text{ MJ/kg} \quad (2)$$

Tabla 1 Poder calórico de los gases combustibles

Gases	V.C.B. MJ/kg	Kg gas/kg Diesel
Diésel	42-45	1
Hidrógeno	125	0.36
Monóxido de Carbono	6	7
Metano	51	0,82
Propano	50	0,84
Butano	49	1,17
Bio gas 40% CO ₂	14-16	3
Bio gas 60 % CO ₂	18-22	2.25

Se observa, que los combustibles de menor valor calórico requieren mayor masa para compensar el valor calórico del combustible sustituido y viceversa

Relación aire/combustible

Si el combustible líquido se sustituye por uno gaseoso como el biogás, el problema presenta mayor grado de complejidad; se demuestra que para generar la misma energía, la relación entre la masa (y el volumen) del nuevo combustible con respecto al que se va a sustituir está en relación inversa de los valores calóricos de estos, lo cual trae como consecuencia que el volumen de la mezcla aire-biogás sea mucho mayor que el volumen de aire solo que succiona el motor de inyección y de la mezcla aire-gasolina en el de carburación; y como a revoluciones constantes el volumen de desplazamiento del motor es fijo, el biogás debe entrar sobrealimentado.

Para que se produzca la combustión, el combustible debe reaccionar con una proporción definida de oxígeno. El oxígeno para la combustión se toma del aire, del cual le corresponde el 23%, por lo que la relación se establece entre la masa de aire requerida y la masa de combustible (kg de aire/kg de combustible). Siempre es conveniente, que exista un exceso de aire para garantizar que todas las moléculas de combustible se puedan combinar con el oxígeno del aire. En los motores diésel trabajando a plena carga, se suele tomar de un 20 a 30% de exceso de aire. Si el combustible posee en su composición oxígeno, éste hace disminuir la cantidad de aire necesario para la combustión, lo cual es una ventaja de algunos gases desde el punto de vista de la alimentación. Tomando como referencia un combustible diésel cuya composición elemental es: 87 % de C, 12,6 % de H y 0,4 % de O, la relación de aire/combustible teórica es de: 14,45 kg de aire/kg de combustible. En la **tabla 2** se presenta la relación aire-combustible con un coeficiente de exceso de aire del 30 % para los principales gases combustibles.

Tabla 2. Relación aire combustible

Combustible	Kg de aire/kg de comb. $\alpha=1,3$
Diesel	≈ 19
Hidrógeno	≈ 45
Monóxido de carbono	3,21
Metano	22,61
Propano	20,54
Butano	20,28
Biogás 40 % de metano	≈ 9
Biogás 60 % de metano	≈ 14

Se puede observar, que el monóxido de carbono (CO), es el que menos aire requiere para la combustión porque contiene oxígeno en su composición, lo cual es una ventaja, pues es el que menor poder calórico posee y por tanto, debe entrar mayor masa de gas al motor. El hidrógeno, por el contrario, es el de mayor poder calórico, pero para su combustión debe agregarse una mayor masa de aire.

Volumen de mezcla succionada por el motor diésel

En el motor diésel no existen dispositivos para alterar la cantidad de aire admitido al cilindro. Por consiguiente, a revoluciones constantes, las resistencias en el sistema de admisión permanecen invariables y la variación de la carga se obtiene mediante el enriquecimiento o empobrecimiento de la mezcla por la cantidad de combustible inyectado al final de la compresión. La masa de aire que entra al cilindro para determinada potencia y número de revoluciones está dada por el volumen de desplazamiento efectivo del émbolo y la densidad del aire dentro del cilindro.

$$masa\ de\ aire\ succionada = Volumen\ de\ desplazamiento\ efectivo \cdot \rho_{aire} \quad kg/m^3 \quad (3)$$

A la presión atmosférica, las densidades del aire y del biogás son muy próximas, de alrededor de 1,2 kg/m³, por tanto, si el motor diésel succiona 19 kg de aire para combustionar 1 kg de diésel, para generar la misma energía con la mezcla de aire-biogás de valor calórico de 20 MJ/kg, la masa de mezcla para una relación de conversión de 2,25 será de:

masa de mezcla succionada = 2,25 x (14 kg de biogás + 1kg de aire) = 33,75 kg

Resultados y discusión

Resumen parcial 1

Para generar la misma energía con la mezcla aire-biogás que, con el combustible diésel, la masa de la mezcla (y por tanto del volumen) debe ser 1,78 veces superior. Como el volumen de desplazamiento del motor es fijo para un número de revoluciones dadas, si la succión se produce a la presión atmosférica, el motor experimenta una reducción de potencia de aproximadamente el 43%.

Se concluye, que para lograr obtener la misma potencia que con el diésel, la masa de aire-biogás debe entrar sobre alimentada con una relación de presiones de $R_p=1,78$

En la **figura 1** se presenta el dispositivo diseñado para la alimentación de la mezcla a presión en el proyecto Magueyal del municipio San Luis, provincia Santiago de Cuba.



Figura 1. Dispositivo para la alimentación de la mezcla aire-biogás a presión (Fuente de los autores)

Factor económico

Este es un importante factor que en ocasiones no se le presta la atención que merece porque se piensa que la biomasa es gratis por ser un residuo, sin embargo, tiene gran incidencia en la sostenibilidad del proyecto y su rentabilidad económica.

Aunque existen muchos residuos de biomasa con las que se puede obtener biogás, las más utilizadas por su rendimiento son las excretas de algunos animales, algunos residuos de cosechas en descomposición y las aguas residuales. El biogás es un combustible gaseoso que se obtiene como resultado de las reacciones anaeróbicas de la biomasa con el agua en determinadas condiciones de concentración, temperatura y PH. El tiempo de conversión total puede oscilar entre 28 y 32 días, el cual puede ser acelerado por la presencia de algunos catalizadores.

La relación de conversión de la biomasa bruta en biogás está en dependencia del tipo de biomasa, siendo las de mayor rendimiento las que se presentan en la **tabla 3** junto con las relaciones de conversión y la disponibilidad diaria por animal [FAO, PNUD, 2011]

Tabla 3. Relación de conversión de las biomosas

Tipo de residuo de biomasa	Relación de conversión (kg de biogás/Ton. de biomasa)	Disponibilidad diaria (Kg/día)
Excreta vacuna	40	10
Excreta porcina	60	2,25
Excreta avícola	80	0,18
Excreta equina	40	10
Excreta caprina	50	2
Excreta humana	60	0,4

Mediante un cálculo elemental se puede determinar la cantidad de biomasa y su costo para sustituir el combustible diésel, Si se toma como referencia la biomasa vacuna para producir biogás con valor calórico de 20 MJ/kg.

1 ton de biomasa = 40 kg de biogás

Como el factor de conversión kg de biogás/kg de diésel es de 2,25

Entonces, con una tonelada de excreta ovina se pueden sustituir:

$$kg \text{ de diésel equivalente} = \frac{40 \text{ kg de biogás} / \text{Ton biomasa}}{2,25 \text{ kg de biogás} / \text{kg de diésel}} \approx 18 \frac{\text{kg de diesel}}{\text{Ton biomasa}}$$

Abundando en el ejemplo del biogás de 20 MJ/kg de valor calórico, para producir 80 kWh/día con un motor diésel cuyo consumo específico es de 200 g/kWh, El consumo específico con biogás sería de:

Consumo específico con biogás= 2,25*200= 450 g/kWh

Que para los 80 kWh/días representa un consumo de biogás de:

80 kWh/día*0,450 kg/kWh =36 kg/día de biogás, es decir casi una tonelada de biomasa bruta

Resumen parcial 2

De lo anterior se puede concluir que: para sustituir 18 kg de diésel de valor calórico 45 MJ/kg, son necesarios 40 kg de biogás con valor calórico de 20 MJ/kg que se obtienen con una tonelada de biomasa de excreta vacuna.

Si cada animal del ganado vacuno produce como promedio diario 10 kg de excreta, entonces serán necesarios 100 animales para producir 18 kg equivalentes de diésel [Vera y otros, 2014,2015].

Costo máximo de la biomasa

La biomasa bruta debe ser recolectada, transportada y preparada, por tanto tiene un costo, Si el único interés del uso de la biomasa fuera sustituir el combustible diésel, entonces el costo máximo permitido a la biomasa sería el costo del combustible a sustituir, por ejemplo, si el costo del diésel es de 1 \$/kg (un kg de diesel≈1,1 litro), con una tonelada de biomasa se pueden sustituir 18 kg de diésel, entonces el costo total máximo de la biomasa no puede ser superior a \$18, que al cambio oficial de 24x1 serían unos 432 cup. En la **figura 2** se presentan los costos máximos de la biomasa bruta para tres valores calóricos diferentes del biogás en dependencia del costo del diésel.

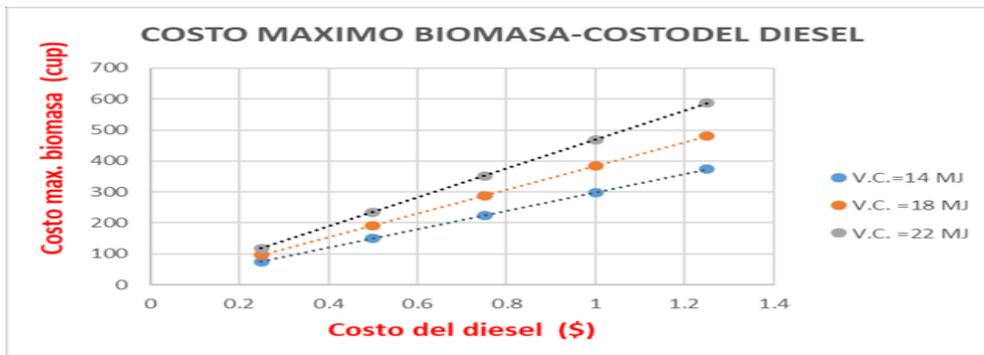


Figura 2. Costo del biogás relativo al diésel

(Elaborada por los autores)

Otros factores adversos a considerar

Además del costo de la biomasa, en la rentabilidad económica del proyecto hay otros factores económicos adversos, tales como el costo inicial de la inversión, el cual además del grupo electrógeno lleva necesariamente la construcción de los digestores, que en el caso de la generación de electricidad deben tener grandes volúmenes de almacenamiento, luego la compresión, filtrado y almacenamiento del biogás. En la **figura 3** se presentan los elementos utilizados en el proyecto de Magueyal.



Figura 3. Otros componentes del proyecto de electrificación con biogás

Oportunidades que deben aprovecharse

A pesar de las dificultades anteriores que presenta la generación de electricidad con biogás y que hay que tomar muy en serio, este posee muchas oportunidades que deben ser aprovechadas para hacer rentable el proyecto.

1. Mediante la digestión anaeróbica los microorganismos transforman el carbono, el hidrógeno y el oxígeno de la biomasa en metano, monóxido de carbono e Hidrógeno libre que son los componentes energéticos de la biomasa, pero quedan los componentes ricos en minerales como los compuestos de fósforo y nitrógeno, que son muy apreciados como abonos orgánicos [Cepero y otros, 2012]. La venta de estos abonos puede disminuir el costo de la biomasa bruta.
2. El metano que se forma por la descomposición natural en los campos tiene una gran incidencia en el calentamiento global, su poder es 21 a 23 veces superior al del CO₂ por lo que su utilización en forma de biogás constituye un notable aporte a la protección del medio ambiente; también disminuye la emisión de óxidos de nitrógeno [Pino y otros, 2012] . Esto puede argumentarse para lograr proyectos financiados con bajas tasas de interés y para obtener bonificaciones de organismos internacionales por la disminución de emanaciones de gases a la atmósfera.
3. Es importante también destacar, que mediante la recolección de las excretas o la utilización de las aguas residuales, sobre todo de la industria cárnica, lagunas de oxidación y otras, se hace un importante aporte a la higiene, que también tiene un costo y debe ser contabilizado [].

En todos los casos, debe hacerse el estudio integral de factibilidad económica mediante los criterios de evaluación financiera más conocidos tales como el VAN, el COE, el TIR u otros [Blank, L, 2002]. Por ejemplo, el VAN:

$$VAN = -C_C + C_R + \frac{\sum_1^n I_{VE} + O_I - (C_{Comb} + C_{om} + C_{Remp})}{(1+i)^n}$$

El proyectista puede incidir en el costo del combustible (C_{comb}) haciendo bajar el costo de la biomasa como se dijo anteriormente, también puede aumentar la rentabilidad mediante otros ingresos (O_I) por la venta de fertilizantes, el cobro de tasas internacionales por la disminución de emisiones de CH_4 y NO_x a la atmósfera, puede también negociar tasas de interés que hagan rentable el proyecto.

Conclusiones

Resulta imposible hacer un cálculo económico de resultados, pues cada caso debe analizarse por separado. El objetivo de este trabajo es dar a conocer los factores que deben tenerse en cuenta para lograr que el proyecto sea factible técnicamente y tenga sostenibilidad económica. No existe nada de magia en el biogás, pero debe tenerse presente que **para el caso de la generación de electricidad** debe hacerse el cálculo del consumo y la disponibilidad de la biomasa.

Recomendaciones

No se tiene información exacta sobre el rendimiento y composición del “lodo” que queda al final del proceso anaeróbico para la producción de biogás, solo se conoce que es rico en compuestos de fósforo, nitrógeno y azufre. Por la importancia que representa para su uso como abono orgánico y con ello disminuir los gastos de producción, se recomienda que se realicen las investigaciones correspondientes en este sentido.

Referencias bibliográficas

- Blank, L; Tarquin, Y. A. (2002). Ingeniería Económica. 6ta Edic. Mc Graw Hill, Bogotá, Colombia.
- Cepero, L, V. Savran et al. (2012). Producción de biogás y bio abonos a partir de efluentes de bio digestores. Pastos y Forrajes vol.35 no.2 Matanzas.
- Cuesta, J., J. Villa. (2015). Obtención de biogás a partir de Residuos Sólidos Urbanos para su inyección a Red. Tesis de grado. Dpto. Ingeniería Térmica y de Fluidos. Universidad Carlos 3ro de Madrid, España.
- FAO, PNUD et al. (2011). Manual de biogás. Editado por Proyecto CHI/00/G32. ISBN 978-95-306892-0. Chile.
- Lambert, T. (2012). Micropower Optimization. HOMER Energy, LLC, V. B-2.68 beta, U.S.A.
- Marcio Y. et al. (2018). Dairy Cattle Biogas Usage In Microturbines For Energy Generation And Thermal Exploitation. Eng. Agríc. vol.38 no.4 Jaboticabal.
- Maslo-Jovav. Motores de Combustión Interna. Editora Mir, Moscú, Edic. MES
- Pino, Juan M. et al. (2002). Impactos y regulaciones ambientales del estiércol generado por los sistemas ganaderos de algunos países de América. Agro ciencia, vol.46 no.4 México may./jun. (2012)
- Sridhar, H.V et al. Development of Producer Gas Engines. Combustion Gasification and Propulsion Laboratory. Department of Aerospace Engineering Indian Institute of Science, Bangalore, India.
- Vera, I et al. (2014). Potencial de generación de biogás y energía eléctrica. Parte I: excretas de ganado bovino y porcino. Ing. Investigación y Desarrollo Tecnológico. vol.15 no.3 México.

Vera-Romero, I et al. (2015). Potencial de generación de biogás y energía eléctrica. Parte II: residuos sólidos urbano. Elsevier, Vol. 16. Núm. 3. 317-478.