

Evaluación de la eficiencia térmica en estufas fabricadas y modificadas a biogás

Joaquín Viquez Arias / Mukhtaar Caydiid / Phenny Adhiambo Omondi

Universidad EARTH

jviquez@earth.ac.cr ✉

RESUMEN

El biogás es probablemente el beneficio más directo y tangible que ofrece un biodigestor. Puede ser aprovechado de diferentes formas, siendo el uso térmico, uno de los más utilizados (ej. cocción de alimentos). Una estufa puede ser calificada por su eficiencia térmica. Varias investigaciones han reportado eficiencias térmicas entre 48% y 55% funcionando con biogás, sin embargo, se desconoce la eficiencia de estufas tradicionales sin aire primario. Esta investigación, realizada en la Universidad EARTH, evaluó la eficiencia térmica de 4 estufas fabricadas, modificadas o adaptas a biogás.

Se determinó, que en el consumo de biogás, el tamaño o color de la flama, no son indicadores para conocer qué tan eficiente y apropiada es una estufa a biogás. Una estufa con una buena eficiencia térmica, puede representar la mitad de consumo de biogás con respecto a la misma estufa con menos eficiencia térmica. La estufa fabricada a biogás, mostró una de las mejores eficiencias térmicas, además, se demostró que una modificación correcta, puede llevar a eficiencias similares e inclusive superiores. También se concluyó, que una estufa mal adaptada, puede tener una baja eficiencia.

PALABRAS CLAVE:

PRUEBA DE
EBULLICIÓN DE AGUA;
EFICIENCIA TÉRMICA;
ESTUFAS A BIOGÁS.

KEYWORDS:

WATER BOILING TEST;
THERMAL EFFICIENCY;
BIOGAS STOVES.

INTRODUCCIÓN

El biogás es probablemente el beneficio más directo y tangible que ofrece un biodigestor. Se produce por la descomposición anaeróbica de materia orgánica, y está compuesto principalmente por metano y dióxido de carbono. Sus usos se pueden clasificar en cuatro grandes categorías:

- 1. Térmico**, donde se utiliza la combustión del biogás para aprovechamiento directo del calor o del frío (Ej. estufar, calentar agua, calentar aire, entre otros).
- 2. Mecánico**, donde el biogás es usado como combustible para un motor (Ej. mono cilíndrico, 4 tiempos de combustión interna), y este acciona otro implemento (bombeo de agua, ordeñadora, picadora de pasto, entre otros).
- 3. Eléctrico** (o Cogeneración), donde el biogás acciona un motor y este acciona un generador para la producción de electricidad (y potencialmente calor).

4. Biometano, que es la purificación y compresión del biogás para su uso en transporte vehicular o interconexión a redes de gas.

El uso térmico, es la forma de aprovechamiento más utilizada para biodigestores de pequeña escala (o escala doméstica), siendo la cocción uno de los principales usos. La cocción se realiza con una estufa que funciona con biogás. Fulford, D. (2015), presenta una excelente guía para entender cómo funciona una estufa a detalle. En resumen, el gas combustible (gas licuado de propano, GLP; gas natural, GN; o biogás, B), ingresa a la estufa por medio de un inyector (con un diámetro conocido). El gas, al pasar por este inyector aumenta su velocidad, la cual es inmediatamente reducida al ingresar a la "garganta", creando una presión negativa (efecto venturi). Esta presión negativa, permite la succión de aire atmosférico. Este aire, conocido como aire primario, se mezcla con el gas, previo a su combustión en la hornilla. La proporción entre biogás y aire primario debe ser tal, de modo que concuerde con la relación estequiométrica de la combustión en-

tre CH₄ y O₂, y esto se logra definiendo el diámetro del inyector y el diámetro de la garganta, tomando como base la presión del biogás a la entrada. La Figura 1, muestra un diagrama de una estufa con las ecuaciones involucradas en su diseño.

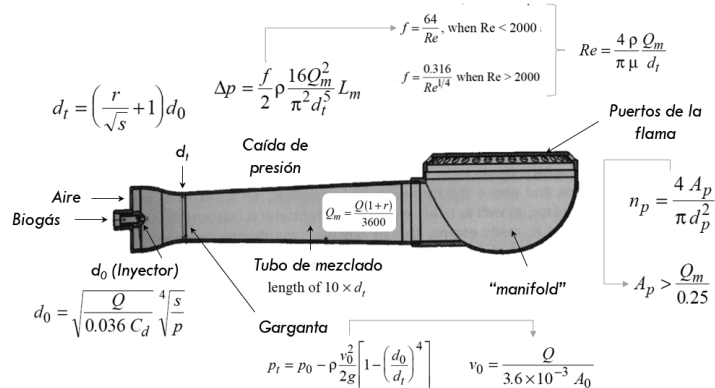


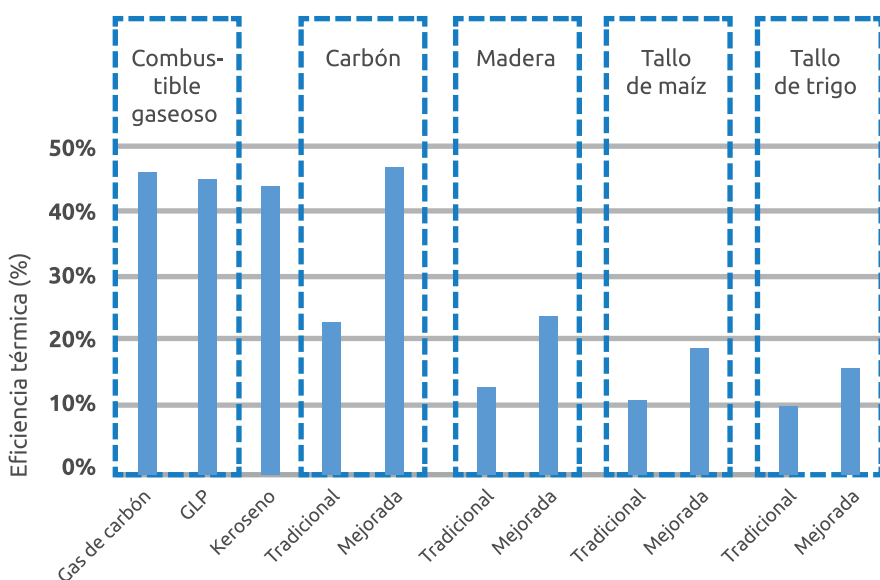
Figura 1. Dibujo de una estufa señalando las diferentes secciones con un resumen de las ecuaciones involucradas.

Fuente: Adaptado y tomado de: Fulford, D. 2015. Small-scale rural biogas programmes: A handbook. Practical Action Publishing.

Ahora bien, una estufa puede ser juzgada por su eficiencia térmica. La eficiencia térmica, es un indicador que permite evaluar la habilidad de una estufa (o una condición particular de operación) en entregar energía neta a una olla (cazuela o cacerola), de la energía recibida en forma de biogás. En otras palabras, si una estufa recibe por ejemplo 18 MJ de energía (gracias al metano en el biogás), y esta "entrega" 7 MJ en forma de calor absorbido por la olla, significa que tiene 38,9 % de eficiencia térmica (7 MJ ÷ 18 MJ).

Pruebas realizadas a varias estufas modificadas a biogás, utilizadas en el marco del Programa Nacional de Biogás en Nicaragua (Viquez, J. 2016), presentaron eficiencias térmicas entre 48% y 55%, lo cual es excelente si lo comparamos con una estufa tradicional con leña, que tiene una eficiencia térmica inferior al 15%, e inclusive una mejorada con hasta 25%. Otras eficiencias se pueden ver en la Figura 2.

Figura 2. Resumen de eficiencias térmicas de diferentes estufas que utilizan variedad de combustibles. Fuente: (Bailis, P. et al. 2007).



Debido a la baja presión del biogás en los biodigestores flexibles (también conocidos como tubulares, de bolsa, de geomembrana, salchicha, Taiwán, entre otros), una práctica común para "adaptar" estufas a biogás, es eliminar los inyectores en las estufas, y realizar una conexión directa (tal y como se muestra en la Figura 3). Esto elimina por completo el ingreso de aire primario en premezcla, dejando únicamente el aire secundario (aire que se acerca a la llama durante la combustión) para la combustión.



Figura 3. Estufa a biogás sin inyección del biogás, con eliminación de ingreso de aire primario.

Fuente: Elaboración propia.

La estufa de la Figura 3, al usarse, presenta una llama azulada, sin embargo, se sospecha que la eficiencia térmica puede ser fuertemente reducida por falta de oxígeno atmosférico, y, en proporciones no estequiométricas para una combustión completa. Por lo tanto, este estudio buscaba evaluar el impacto del aire primario en la eficiencia térmica, principalmente para la estufa tradicional (como la de la Figura 3), que elimina por completo este concepto, pero comparando con otras estufas que inyectan biogás a presión en diferentes condiciones. Estos son los resultados del Proyecto de Graduación realizado por los estudiantes Mukhtaar Caydiid², y Phenny Adhiambo Omondi³, como requisito para su título en la Universidad EARTH, quienes, por tanto, merecen todo el crédito por los resultados de esta investigación.

METODOLOGÍA

El experimento se realizó en la finca pecuaria de la Universidad EARTH, ubicada en Las Mercedes, Guácimo, Limón, Costa Rica. La temperatura media anual es de 25°C, con una humedad relativa de 85%, precipitación de 3.687 mm y una elevación de 35 msnm. Se utilizó biogás del biodigestor flexible de geomembrana de PVC, alimentado con estiércol bovino y porcino, con un volumen líquido de 60 m³, y un TRH de 35 días en diseño. El biogás fue filtrado para remover sulfuro de hidrogeno únicamente, y se agregó presión, utilizando una bomba de diafragma y un regulador de presión.

Se evaluó la eficiencia térmica de cuatro estufas. La primera estufa tradicional (T), es una simple hornilla de aluminio fundido, conectada directamente a la tubería de biogás, sin aire primario (similar a la de la Figura 3). La segunda estufa, fue fabricada exclusivamente para biogás (B) (según el fabricante Puxin). La tercera estufa viene de fábrica para gas licuado de propano (GLP). La cuarta estufa, es la tercera estufa, pero modificada a biogás, incrementando únicamente el diámetro del inyector a 1,6 mm (GLPaB-1,6) y 4,3 mm (GLPaB-4,3). La Tabla 1, presenta un resumen de las estufas utilizadas, y la Figura 4, muestra el inyector de la estufa GLP, GLPaB-1,6 y GLPaB-4,3.

Estufa	Combustible	Acrónimo	Descripción
Tradicional	Biogás	T (tradicional)	Sin aire primario.
Fabricada para biogás	Biogás	B (biogás)	Diseñada para biogás.
Fabricada para GLP	GLP	GLP (Gas licuado de Propano)	Diseñada para GLP.
Fabricada para GLP, modificada a biogás	Biogás	GLPaB-1,6 (propano a biogás)	Diseñada para GLP, pero modificada a biogás, con incremento del inyector a 1,6 mm.
	Biogás	GLPaB-4,3 (propano a biogás)	Diseñada para GLP pero modificada a biogás, con incremento del inyector a 4,3 mm.

Tabla 1. Resumen de las estufas señalando el combustible, acrónimo y la descripción de cada una.

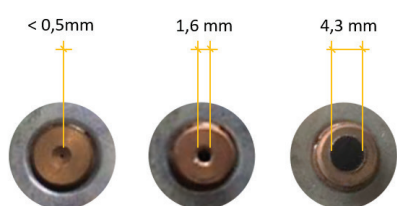


Figura 4. Muestra de los inyectores de la estufa GLP, antes y luego de su modificación a biogás.
Fuente: Elaboración propia.

Se evaluó la eficiencia térmica de cada estufa, siguiendo la metodología de "Prueba de agua en ebullición", WBT (por sus siglas en inglés), Versión 4.2.3 (*Global Alliance for Clean Cookstoves*, 2014). Esta prueba, consiste en elevar la temperatura de 3 kg de agua, de temperatura ambiente a 98°C. Se documentó la pérdida de agua por evaporación (peso inicial menos peso final con balanza electrónica), además del consumo de biogás (medido con un medidor Ritter de 50 L *Bellows-type*), y su calidad con un analizador de gases *GeoTech* (GA-5000). Para las estimaciones de eficiencia térmica, se asumieron los valores de calor específico del agua en 4,2 kJ/kg.K y la entalpía de evaporación en 2.980 kJ/kg. Cada prueba fue realizada cuando la estufa estaba fría, caliente y luego operada en "fuego lento" (45 min manteniendo una temperatura constante), tal y como sugiere la metodología, con una única repetición. También, cada estufa fue evaluada variando la cantidad de aire primario que es succionado por el efecto venturi, reduciendo la apertura de la compuerta para tal fin, en 100%, 50% y 0% abierta (la Figura 4 muestra la tres posiciones en la estufa de biogás (B).



1. 100% abierta



2. 50% abierta



3. 0% abierta

Figura 5. Ejemplificación de la apertura de la compuerta de aire primario en la estufa a biogás.
Fuente: Elaboración propia

Adicionalmente, de cada estufa se estimó su potencia, una característica que dice que tan “grande” es la estufa, en términos de la cantidad de energía que es capaz de entregar por unidad de tiempo, altamente influenciado por la eficiencia térmica y consumo de biogás.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La Tabla 2, presenta el promedio de la eficiencia térmica obtenida para cada estufa, incluyendo los resultados de las variaciones de aire primario (presentado como % de O₂). Se incluye también la potencia estimada en kW y el consumo de biogás de cada estufa en Nm³/hr.

Tabla 2. Resultados de la eficiencia térmica promedio (entre frío, caliente y fuego lento) de cada estufa, según la cantidad de aire primario proporcionado, además de la potencia y consumo de biogás.

Estufa	Acrónimo	Inyector (Ø mm)	Eficiencia térmica			Potencia (kW)	Consumo de biogás (Nm ³ /hr)
			0% aire	50% aire	100% aire		
Biogás	B	4 mm	36%	41%	37%	2,2	1,0
Tradicional	T	N/A	20%	-	-	1,4	1,3
GLP	GLP	0,46	41%	53%	49%	1,4	0,1
GLP a biogás (1,6 mm)	GLPaB-1,6	1,6	41%	37%	44%	0,8	0,3
GLP a biogás (4,3 mm)	GLPaB-4,3	4,3	29%	23%	23%	2,0	1,1

ACERCA DE LA EFICIENCIA TÉRMICA, LA ESTUFA Y SU REQUERIMIENTO DE AIRE PRIMARIO

El efecto venturi, se logra al crear una caída en la presión en la “garganta” de la estufa, al reducir la velocidad del biogás saliendo del inyector. El diámetro de la garganta, se calcula para proporcionar estequiométricamente la cantidad de oxígeno requerido para una combustión completa. Por ejemplo, 1 L de biogás con 55% de metano, requiere 6,7 L de aire para una combustión completa (Viquez, J. 2018), y por tanto, una mejor eficiencia térmica. Sin embargo, se acostumbra a sobredimensionar la garganta, regulando la entrada de aire con una compuerta.

Observando los resultados de la Tabla 2, la estufa a biogás (B) tiene su mejor eficiencia térmica (41%) cuando el aire es proporcionado a 50% de apertura de la compuerta. Estos son resultados similares a eficiencia de otras estufas a biogás (Viquez, J. 2016). En esta estufa (B), al incrementar el aire primario (abriendo la compuerta), la mezcla se empobrece¹, reduciendo su eficiencia térmica. Aunque no es un efecto visual significativo (ambos son una llama azulada), los resultados muestran una reducción de hasta 10% en la eficiencia térmica.

Un efecto similar es visto en la estufa de GLP, que operó con su mayor eficiencia térmica (53%) a 50% de apertura. Al empobrecer o enriquecer la mezcla (cerrando o abriendo la compuerta de aire), la eficiencia térmica se ve afectada negativamente (bajando de 8% hasta un 28%).

Este mismo efecto no se repite con la estufa de GLP modificada a biogás (GLPaB). En esta ocasión, a mayor entrada de aire, mejor su eficiencia térmica (un 16% de incremento en 100% de apertura). La estufa está originalmente fabricada para GLP, por lo que la proporción entre aire y combustible está establecida (Aproximadamente a 1:23 (Viquez, J. 2018)). Al modificarla para biogás, esta proporción debe ajustarse, incrementando el biogás, y reduciendo el aire (proporcionalmente); esto se logra al incrementar el diámetro del inyector a 1,6 mm con la compuerta 100% abierta. Interesantemente, al incrementar el inyector a 4,3 mm, en ninguno de los ajustes (0%, 50% ni 100% de aire) se logra una buena eficiencia térmica (máxima de 29%), lo que indica que existe una limitación de hasta donde se puede incrementar el inyector. Esto no fue analizado con más detalle en esta investigación.

La estufa tradicional (T), prevista sin ingreso de aire primario, fue la que obtuvo la menor eficiencia térmica, con un promedio de 20%, siendo menos de la mitad, si lo comparamos con la estufa fabricada a biogás (B), demostrando la importancia de una mezcla correcta de aire: combustible premezclado antes la combustión.

¹ Una mezcla en donde proporcionalmente exista más aire y menos combustible (de lo requerido), se considera “pobre”. Mientras que una mezcla donde haya más combustible y menos aire (de lo requerido), se considera “rica”.

ACERCA DEL CONSUMO DE BIOGÁS Y LA POTENCIA DE UNA ESTUFA

La estufa a biogás (B), la tradicional (T), y la de GLPaB-4,3, presentaron consumos de biogás muy similares (entre 1,0 a 1,3 Nm³/hr). Este es un consumo típico de una estufa a biogás (Viquez, J. 2016), aunque otras fuentes reportan menores consumos, hasta de 0,5 Nm³/hr (Fulford, D. 2015).

La estufa de GLPaB-1,6 presentó el menor consumo de biogás, con 0,3 Nm³/hr, pues, evidentemente, el diámetro del inyector por el cual fluye el biogás, es significativamente más pequeño que su contraparte, con un inyector de 4,3 mm (GLPaB-1,6 y GLPaB-4,3 son la misma estufa solo se varió el diámetro del inyector, ver Figura 4).

El consumo de biogás a través de una estufa, puede ser estimado por la Ecuación 1. Para todas las pruebas, el biogás fue presurizado y regulado, entrando a la estufa con una presión constante de 23 mbar. El flujo para todas las estufas concuerda con las estimaciones de la Ecuación 1, por lo que se confirma que, el flujo es un efecto de presión del biogás pasando a través de un orificio.

Ecuación 1

$$Q_{\text{biogás}} = 0,036 \cdot C_d \cdot d^2 \sqrt{\frac{P}{S}}$$

Fuente: (Fulford, D. 2015).

Donde:

Q_{biogás} : Flujo de biogás en m³/hr
 C_d. Es el coeficiente de flujo (valores entre 0,8 y 0,9)
 D: Es el diámetro del inyector en mm
 P: Es la presión del biogás en mbar.
 S: Es la gravedad específica, usualmente de 0,94 kg/m³.

Erróneamente, estufas con mayor consumo de biogás, son vistas como estufas de mayor potencia o “capacidad”, pero, en su defecto, es la potencia que determina este “tamaño o capacidad”.

El cálculo de la potencia de una estufa, toma en consideración la eficiencia térmica, tal y como se muestra en la ecuación 2.

Ecuación 2

$$P = Q_{\text{biogás}} \cdot \epsilon \cdot PCS$$

Fuente:
 Elaboración propia.

Donde:

Potencia en kW
 Q_{biogás} : Flujo de biogás en m³/hr
 ε: Eficiencia térmica, en %
 PCS: Poder calorífico superior del biogás; depende del contenido de metano en el biogás (ej. 6kWh/m³ para biogás con 60% de metano).

El impacto de la eficiencia térmica en la potencia de la estufa se observa claramente comparando las estufas (B), (T) y (GLPaB-4,3), quienes tuvieron un consumo de biogás muy similar, pero dado las variaciones en sus eficiencias térmicas, la potencia final también es significativamente diferente. Por ejemplo, la GLPaB-4,3 tiene una potencia 10% menor a la estufa a biogás (B), a pesar de que esta consume un 10% menos de biogás. El efecto es aún más marcado en la estufa tradicional (T), con un consumo de biogás de 30% más que la estufa a biogás (B), pero la potencia es 36% menor. En términos prácticos, esto se traduce en que la estufa a biogás (B), consume la mitad del biogás que la estufa tradicional (T), además, logra cocinar 56% más rápido. La Tabla 3 muestra un ejemplo práctico, simulando calentar 10 L de agua de 20°C a 60°C, estimando el consumo de biogás requerido, y el tiempo en que lo puede hacer cada estufa analizada en esta investigación.

Tabla 3. Ejemplo práctico de los resultados del estudio. Caso hipotético de calentar 10 L de agua de 20°C a 60°C usando las estufas evaluadas.

Fuente: Elaboración propia.

Parámetro	Estufa			
	Biogás	Tradicional	GLP a biogás (1,6 mm)	GLP a biogás (4,3 mm)
Estufa				
Acrónimo	B	T	GLPaB-1,6	GLPaB-4,3
Eficiencia térmica (% max)	41%	20%	44%	29%
Potencia (kW)	2,2	1,4	0,8	2,0
Consumo de biogás (Nm ³ /d)	1,0	1,3	0,3	1,1
Agua por calentar (kg)	10			
Delta T (°C)	40			
Biogás necesario (m ³)	0,20	0,41	0,18	0,28
Tiempo (min)	12,45	19,48	37,14	16,00

CONCLUSIONES

La eficiencia térmica es un excelente parámetro para calificar una estufa, o inclusive juzgar, si su modificación (de GLP a biogás) mejoró o empeoró su eficiencia. Es una prueba fácil de realizar, sin la necesidad de equipos muy costosos.

Existen diferencias entre las eficiencias térmicas de diferentes estufas a biogás, aunque visualmente todas presentan una flama azulada. El consumo de biogás de cada estufa, el tamaño o color de la flama, no son indicadores para conocer qué tan eficiente y apropiada es la estufa a biogás. Una estufa con una buena eficiencia térmica, puede representar la mitad de consumo de biogás, en comparación con una estufa con baja eficiencia térmica.

Aunque es recomendable adquirir estufas fabricadas a biogás, se demostró que una modificación correcta puede llevar a eficiencias similares e inclusive superiores. Pero también se demostró, que una estufa mal adaptada (en este caso el inyector muy grande para GLPaB-4,3), puede tener un impacto significativo en la eficiencia final.

Aunque se evidenció que la cantidad de aire primario tiene un efecto significativo en la eficiencia térmica, no se evaluó el impacto de otros factores, como el diseño de la hornilla en sí, la posición de la llama sobre la olla, o los diferentes tipos de materiales.

Según los resultados de este estudio, una buena eficiencia térmica se logra al pre mezclar aire con el biogás, en la proporción correcta, previo a su combustión. Sin embargo, para biodigestores flexibles, que operan con bajas presiones (entre 0 y 15 mbar), esta opción es más dificultosa, por lo que se deberá continuar evaluando otras ideas para incrementar la eficiencia térmica cuando el biogás tiene poca presión, y no se tiene acceso o interés en usar bombas de biogás (para incrementar presión). Actualmente se están realizando más evaluaciones en la Universidad EARTH.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Bailis, P. R., Ogle, D., Maccarty, N., From, D. S. I., Smith, K. R., & Edwards, R. (2007). The water boiling test (WBT).

Fulford, D. (2015). Small-scale Rural Biogas Programmes: A Handbook. Practical Action Publishing.

Global Alliance for Clean Cookstoves; GACC. (2014). The water boiling test- Version 4.2.3.

Viquez, J. (2016). Informe de validación de 4 equipos a biogás. Managua: SNV Nicaragua.

Viquez, J. (2018). Manual práctico en biodigestores. Enfocado para pequeña y mediana escala en Latino América. San José. Cooperación Española. Costa Rica.