

# **Evaluación del desempeño de un sistema de microgasificación integrado a una estufa mejorada portátil**

**Renzo Antonio Ceme Vincés**

**Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano  
Honduras**

Noviembre, 2018

ZAMORANO  
CARRERA DE AMBIENTE Y DESARROLLO

# **Evaluación del desempeño de un sistema de microgasificación integrado a una estufa mejorada portátil**

Proyecto especial de graduación presentado como requisito parcial para optar  
al título de Ingeniero en Ambiente y Desarrollo en el  
Grado Académico de Licenciatura

Presentado por

**Renzo Antonio Ceme Vines**

**Zamorano, Honduras**

Noviembre, 2018

# Evaluación del desempeño de un sistema de microgasificación integrado a una estufa mejorada portátil

Renzo Antonio Ceme Vines

**Resumen.** La constante extracción de biomasa vegetal para la cocción de alimentos ha generado presión sobre los recursos forestales en Latinoamérica. Las estufas mejoradas reducen el uso de combustible sólido y disminuyen la generación de gases; sin embargo, con el uso de esta tecnología se continúa promoviendo el consumo de leña. El aprovechamiento de biomasa residual mediante la integración de la gasificación al sistema de cocción mejorado puede representar una alternativa para esta problemática. Esta investigación se enfoca en evaluar la implementación de la microgasificación a una estufa mejorada portátil, mediante el cálculo de eficiencias energéticas y cuantificación de concentraciones totales de gases. Se aplicó el principio de la prueba de ebullición de agua, modificando a 60 °C la temperatura máxima esperada. Los combustibles sólidos utilizados fueron pino, roble y pellets. Se evaluó la operación del microgasificador para el desarrollo de un protocolo de funcionamiento y se comparó su desempeño frente a la cámara de combustión rocket. Las evaluaciones con mayor eficiencia energética en términos porcentuales se registraron al operar el microgasificador con pino (37.52) y roble (37.55). Con respecto a las emisiones, el mejor escenario se presentó en la evaluación del microgasificador con pellets, con emisiones de 1.44 g/kg de CO y 0.45 mg/kg de PM<sub>2.5</sub>. Los factores influyentes fueron el tamaño del combustible y el oxígeno presente en el flujo de aire.

**Palabras clave:** Combustibles sólidos, eficiencia energética, emisiones totales, pellets.

**Abstract.** The constant extraction of plant biomass for the cooking of food has generated pressure on forest resources in Latin America. Improved stoves reduce the use of solid fuel and decrease the generation of gas; however, the use of this technology continues to promote the consumption of firewood. The use of residual biomass by integrating gasification into the current cooking system can represent an alternative for this problem. This research focuses on evaluating the implementation of micro gasification to a portable improved stove, by calculating energy efficiencies and quantifying total gas concentrations. The principle of the water boiling test was applied, modifying the maximum expected temperature to 60 °C. The solid fuels used were pine, oak and pellets. The operation of the micro gasifier was evaluated for the development of an operating protocol and its performance compared to the rocket combustion chamber. The evaluations with the highest energy efficiency in percentage terms were recorded when operating the micro gasifier with pine (37.52) and oak (37.55). With respect to emissions, the best scenario was presented in the evaluation of the micro gasifier with pellets, with emissions of 1.44 g/kg of CO and 0.45 mg/kg of PM<sub>2.5</sub>. The influential factors were the size of fuel and the oxygen present in the airflow.

**Key words:** Energy efficiency, pellets, solid fuels, total emissions.

## CONTENIDO

Portadilla .....	i
Página de firmas.....	ii
Resumen.....	iii
Contenido.....	iv
Índice de Cuadros, Figuras y Anexos .....	v
<b>1. INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>1</b>
<b>2. METODOLOGÍA.....</b>	<b>4</b>
<b>3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....</b>	<b>11</b>
<b>4. CONCLUSIONES .....</b>	<b>22</b>
<b>5. RECOMENDACIONES .....</b>	<b>23</b>
<b>6. LITERATURA CITADA.....</b>	<b>24</b>
<b>7. ANEXOS .....</b>	<b>27</b>

## ÍNDICE DE CUADROS, FIGURAS Y ANEXOS

### Cuadros Página

1. Poder Calorífico Inferior y densidad de los combustibles utilizados.....	11
2. Resultado de las variables al punto de ebullición en evaluaciones preliminares ..	11
3. Protocolo de funcionamiento del microgasificador.....	12
4. Resumen de las pruebas realizadas con el microgasificador.....	15
5. Resumen de las pruebas realizadas con la cámara de combustión codo rocket....	15
6. Prueba Duncan para eficiencia energética (%)......	18
7. Evaluación de las emisiones totales en el microgasificador y el codo rocket.....	20
8. Prueba Duncan para las emisiones de CO (g/kg).....	20
9. Prueba Duncan para las emisiones de PM <sub>2.5</sub> (mg/kg).....	21

### Figuras Página

1. Dimensiones de las partes del microgasificador para evaluación preliminar.....	5
2. Control de las entradas de aire del microgasificador.....	5
3. Partes del microgasificador utilizado para el protocolo .....	6
4. Integración del microgasificador a la estufa mejorada.....	6
5. Balance de energía del sistema de cocción integrado .....	8
6. Relación entre la entrada de aire y el porcentaje de remanente .....	12
7. Comportamiento de la temperatura del agua utilizando microgasificador.....	13
8. Comportamiento de la temperatura del agua utilizando la cámara rocket .....	14
9. Gráfico de barras con datos obtenidos en el balance de energía .....	16
10. Transferencia de energía en microgasificador con diferentes combustibles .....	17
11. Transferencia de energía en cámara rocket con diferentes combustibles.....	17
12. Comparación de las eficiencias energéticas para cada tecnología .....	18
13. Relación entre velocidad de combustión y humedad del combustible.....	19
14. Relación entre la velocidad de transferencia de energía y eficiencia.....	19

### Anexos Página

1. Combustibles utilizados en el microgasificador.....	27
2. Filtros al final de las evaluaciones para cada combustible y tecnología .....	27
3. Procedimiento utilizado para evaluación preliminar del microgasificador.....	28
4. Prueba de normalidad para eficiencia energética y remanentes .....	28
5. Prueba de normalidad para las emisiones totales .....	29

## 1. INTRODUCCIÓN

Las fuentes de energía renovable representaron el 13.7% del suministro total mundial de energía primaria en el 2016, y de esta fracción, el 62.4% corresponden a carbón vegetal y biomasa sólida (Agencia Internacional de Energía [IEA], 2018). En el 2004, se estimó que 60 millones de personas en Latinoamérica utilizaron biomasa como principal recurso para la cocción de sus alimentos (IEA, 2006). Actualmente, el consumo de este recurso continúa incrementándose debido a las características climáticas, geológicas y por el potencial forestal de la mayoría de los países de la región latinoamericana (Poveda, 2013).

En consecuencia, la extracción incontrolada de biomasa forestal tiene sus impactos negativos en el ambiente, tales como la deforestación, pérdida de biodiversidad, aumento de la erosión del suelo y otros efectos (Seoánez, 2013). Según estudios realizados sobre emisiones de Gases de Efecto Invernadero [GEI], 2.1 millones de toneladas de dióxido de carbono [CO<sub>2</sub>] fueron generadas en 74 países en desarrollo entre el 2005 al 2010, de las cuales el 30% corresponden a la cosecha de leña (Pearson, Brown, Murray y Sidman, 2017).

Existen varios tipos de tecnologías para la combustión de alimentos, entre las cuales destacan las estufas de Gas Licuado de Petróleo [GLP], carbón vegetal, leña con mejoras en sistemas de combustión y tradicionales; estas tecnologías reportan una capacidad de aprovechar el potencial energético del combustible del 57, 35, 25 y 10 por ciento respectivamente (Chan y Sopian, 2018). Se ha demostrado que una estufa tradicional consume 10.87 kg de madera al día y emite 7 toneladas equivalentes de CO<sub>2</sub> al año, lo cual representa un modelo ineficiente de tecnología (Ludeña et al., 2015). Por otra parte, de acuerdo a informes publicados por el Banco Mundial (2018), se estima que el 44.1% de la población hondureña vive en áreas rurales. Estas zonas demandan 11 millones de m<sup>3</sup> de madera al año, para la cocción de alimentos en fogones tradicionales (Díaz, 2017).

Una de las soluciones que se han desarrollado para atenuar estos impactos es la implementación de estufas mejoradas, las cuales reducen el consumo de leña, evitando el uso de 0.86 toneladas anuales de madera forestal (Aristizábal, 2010). El principio de esta tecnología se resume en la implementación de una cámara de combustión aislada que permita alcanzar una combustión más limpia y aprovechar el potencial energético del combustible, reduciendo las emisiones dañinas para la salud, lo cual previene la incidencia de enfermedades respiratorias en los usuarios (Bryden et al., 2006).

El diseño de los modelos de estufas mejoradas implementados en Honduras se fundamenta en la incorporación de una cámara de combustión tipo rocket, rodeada de un material refractario que funciona como aislante térmico y una plancha lisa como superficie de cocción. Investigaciones de laboratorio han demostrado que, a diferencia de los sistemas

tradicionales, las estufas mejoradas reducen hasta un 49% del impacto al calentamiento global de los productos de combustión incompleta (MacCarty, Ogle, Still, Bond y Roden, 2008). La combustión incompleta de la madera se genera debido a una disminución de las concentraciones de oxígeno durante la quema de este recurso, lo que ocasiona el incremento en las emisiones dañinas para la salud como el monóxido de carbono [CO] y material particulado [PM] (Smith, 2006).

De acuerdo a la fuente de origen, la leña es considerada como biomasa sólida de carácter primario, al igual que los cultivos energéticos. En esta misma línea, los de carácter secundario son: la biomasa residual seca como subproductos agrícolas, restos forestales e industriales (Montoya y Serrano, 2016). Por otra parte, la eficiencia energética de las estufas mejoradas varía de acuerdo al combustible utilizado; las briquetas de aserrín y bagazo de caña de azúcar, elaboradas con dimensiones que se ajustan a la estructura de la cámara de combustión, han logrado eficiencias promedio de 30 y 26%, mientras que la palma de coco, el pino y carbón han llegado hasta un 23, 22 y 20% respectivamente (León, 2017).

Estudios han demostrado que el 33.7% de las familias en las zonas urbanas y el 59.2% en las zonas rurales utilizan leña como fuente principal de energía para la cocción de sus alimentos (Sanders y Morazán, 2011). Además, se ha demostrado que el consumo promedio diario de leña para la cocción de alimentos en las familias rurales en Honduras es de 2.45 kilogramos (Yanchapaxi, 2015). A pesar de las mejoras registradas, el uso de esta tecnología sigue promoviendo el consumo de leña y por lo tanto la presión sobre el recurso forestal se mantiene. Se estima que el crecimiento poblacional aumentará la demanda de leña hasta un 15% más del uso actual (Díaz, 2013).

Por tales razones, es importante analizar la introducción de tecnologías alternativas que aumenten las eficiencias del proceso de combustión, permitan el uso de diferentes formas de biomasa residual seca (secundaria) y reduzcan la generación de emisiones. La gasificación es una opción que, al ser integrada al diseño actual de las estufas mejoradas, puede resultar en mejoras significativas a la cámara de combustión. Esta alternativa consiste en un proceso termoquímico que transforma el combustible sólido a gaseoso y se complementa con la combustión de los gases producidos. Ambos procesos se realizan en reacciones exotérmicas que requieren oxígeno para la producción de energía en forma de calor (Roth, 2013).

La aplicación de los principios de gasificación en tecnologías de cocción como los microgasificadores, favorecen el intercambio de aire para la combustión de la biomasa y los gases generados durante el proceso. Además, permiten aprovechar el potencial energético de formas de biomasa diferentes a la leña en troncos (Castells y Velo, 2000). La microgasificación tiene menos restricciones que la estufa mejorada con cámara rocket, en cuanto a las dimensiones y tipo de combustible. Al mejorar la combustión, se incrementa la eficiencia energética, lo cual deriva en la reducción del consumo de biomasa y se disminuyen las emisiones de CO y PM (Anderson, Reed y Wever, 2007).

A nivel comercial, la gasificación es una tecnología poco utilizada para la conversión energética de la biomasa (Carrasco, 2008). En contraste, la microgasificación está tomando mayor auge en los países cuyas familias utilizan madera como fuente de cocción de sus

alimentos. De acuerdo a investigaciones anteriores, un microgasificador puede funcionar como cámara de combustión en una estufa de plancha. Los resultados obtenidos superan a los de la estufa mejorada en cuanto al tiempo de ebullición, menores concentraciones de gases y un alto rendimiento en producción de biocarbón (Támara, 2012).

Igualmente, se han realizado estudios para evaluar el efecto de combinar un microgasificador con una estufa mejorada, obteniendo resultados que demuestran la reducción de hasta un 90.6% en las emisiones de CO y se concluye que ambas tecnologías se pueden utilizar de acuerdo a las necesidades y disponibilidad de combustibles. En esta investigación, el microgasificador se integró de forma fija y separado de la cámara de combustión rocket de la estufa (Valenzuela, 2012).

La integración de la microgasificación al diseño actual de estufas mejoradas utilizando combustibles alternativos a la leña, se convierte en una oportunidad de contribuir al incremento de la eficiencia energética y mejorar el desempeño de la cámara de combustión, por tales razones, se plantean los siguientes objetivos:

- Definir el protocolo de operación de la estufa utilizando el microgasificador como dispositivo de entrega de energía.
- Comparar la eficiencia energética de la estufa con cámara rocket y su modificación con el dispositivo microgasificador.
- Caracterizar las emisiones totales generadas por el sistema de cocción modificado.

## 2. METODOLOGÍA

### **Sitio de estudio y equipo utilizado.**

Las pruebas se realizaron en el Centro de Evaluación de Estufas Mejoradas [CEEM], utilizando el Sistema de Monitoreo de Emisiones en Laboratorio [LEMS], para cuantificar las emisiones totales de monóxido de carbono [CO], dióxido de carbono [CO<sub>2</sub>] y material particulado de 2.5 micras de diámetro [PM<sub>2.5</sub>]. Además, se utilizó el calorímetro del Laboratorio de Energía para conocer el potencial energético de los combustibles utilizados.

### **Caracterización y preparación de los combustibles.**

Los combustibles utilizados para la operación de la cámara rocket y su modificación con microgasificador fueron pino (*Pinus oocarpa*), roble (*Quercus spp.*) y “pellets” de origen indeterminado. Se obtuvo el Poder Calorífico Inferior [PCI] en base seca mediante la metodología de “IKA Calorimetric bomb” y la Densidad [ $\rho$ ] de cada combustible aplicando el principio de Arquímedes.

La estufa con codo rocket fue evaluada con leños de pino y roble de  $1.5 \times 2.5 \times 40$  centímetros de longitud. Por otro lado, la tecnología de gasificación fue evaluada con “pellets” y pequeños fragmentos de pino y roble, con dimensiones de  $1.5 \times 2.5 \times 0.1$  centímetros de longitud, se controló que la humedad promedio de los combustibles no supere el 12% previo a su uso en el protocolo.

### **Principio de operación fundamentado en el protocolo WBT.**

La Prueba de Ebullición de Agua [WBT] es un protocolo utilizado para evaluar la eficiencia de estufas mejoradas y las emisiones generadas durante el proceso de combustión, simulando su operación en un ambiente controlado de laboratorio. De acuerdo a la Alianza Global para las Estufas Limpias [GACC], el protocolo WBT permite controlar el consumo de leña, consumo de agua, tiempo de ebullición, y monitorear emisiones de CO<sub>2</sub>, CO y PM<sub>2.5</sub> generadas en tres diferentes fases (GACC, 2014).

Para este estudio, se utilizó el procedimiento de la primera fase del protocolo WBT conocida como “Alta potencia con inicio frío”, que consiste en cuantificar la cantidad de combustible necesaria para llevar 5 L de agua hasta el punto de ebullición (96.1 °C). Para estos ensayos, se redujo en un 50% el volumen de agua a ser utilizado para los diferentes ensayos, registrando datos en la hoja de cálculo de “WBT 4.2.4” tales como: masa y humedad del combustible, masa del agua, temperatura inicial y final del agua, masa de remanentes y cenizas, masa de las ollas, datos del IAP y del equipo del LEMS. Se construyeron dos ollas Mylar o de politereftalato de etileno, las cuales facilitaron la

transferencia de calor hacia el agua. Se controló que la temperatura del agua al inicio del ensayo fuera  $\leq 25\text{ }^{\circ}\text{C}$  y que cada prueba se realizara en un intervalo mínimo de 24 horas, para que la estufa se encontrara a temperatura ambiente.

### **Evaluación preliminar de la tecnología de gasificación.**

Previo a la evaluación del dispositivo integrado a la cámara rocket, se operó de forma independiente un microgasificador para identificar aspectos relevantes sobre su desempeño y otras variables. Estas se determinaron mediante la operación de una unidad experimental, que facilitó el control del flujo de aire primario y la combustión de biomasa con volumen variable. Esta consistió en una estructura metálica dotada de un cilindro externo (1), interno (2) y una tapadera (3); cuyas dimensiones se describen en la Figura 1.

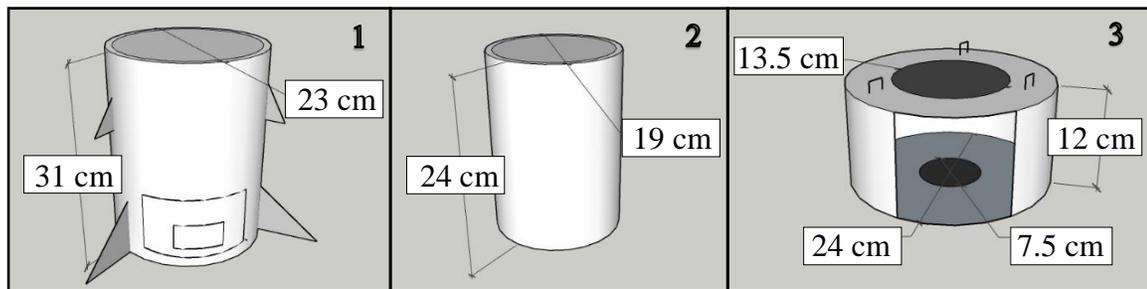


Figura 1. Dimensiones de las partes del microgasificador para evaluación preliminar.

**Variables de desempeño del microgasificador.** Se modificó el protocolo de WBT, aplicando el principio de la primera fase, donde se cuantificó la cantidad de combustible necesaria para llevar al punto de ebullición 2.5 L de agua contenida en una olla de metal expuesta al fuego directo. Los combustibles utilizados fueron pellets y fragmentos de pino de  $1.5 \times 2.5 \times 2\text{ cm}$  de longitud. Las variables de interés fueron: el tiempo de combustión necesario para llegar al punto de ebullición (minutos), la cantidad de combustible utilizado (gramos), transferencia de energía (kJ/min) y el porcentaje de sólidos remanentes (%).

Se realizaron 3 repeticiones por variación en la alimentación del flujo de aire primario al microgasificador y por cada combustible. El ingreso de aire se controló mediante la abertura ubicada en la parte inferior del microgasificador, operando el proceso con una entrada de 100, 75 y 50 por ciento (Figura 2).

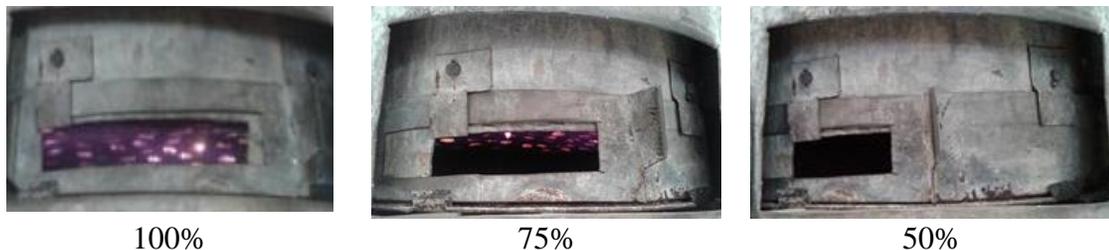


Figura 2. Control de las entradas de aire del microgasificador.

Para las evaluaciones con pino, se colocaron astillas de este combustible dentro del microgasificador formando una pirámide que permitió una mejor circulación del aire, se dispersó 18 g de alcohol etílico al 95% y se encendió. Por otra parte, debido a las características de los pellets, únicamente se utilizó el alcohol como material de ignición una vez colocado todo el combustible en el microgasificador.

**Integración del dispositivo de microgasificación en cámara rocket.**

El dispositivo de microgasificación utilizado para el desarrollo del protocolo de operación luego de su integración a la estufa mejorada, tiene una capacidad volumétrica de 848.78 cm<sup>3</sup>. La base y paredes metálicas son perforadas (Figura 3), permitiendo flujos constantes de aire. Este dispositivo fue instalado dentro de la cámara de combustión de la estufa mejorada y carece de mecanismos para el control del flujo de aire. En la Figura 4 se puede observar la integración del microgasificador en la cámara de combustión.



Figura 3. Partes del microgasificador utilizado para el protocolo.

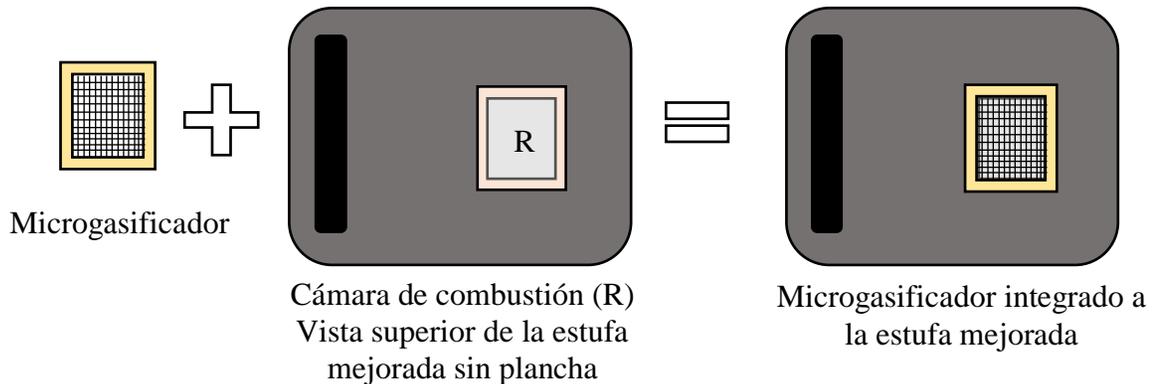


Figura 4. Integración del microgasificador a la estufa mejorada.

**Protocolo de operación del microgasificador integrado a la estufa mejorada.**

Se plantea la realización de un protocolo de funcionamiento del microgasificador como fuente de entrega de energía para una estufa mejorada portátil, en el cual se desarrolla un proceso estandarizado de operación de la microgasificación a la cámara de combustión de la estufa mejorada portátil.

A partir del procedimiento descrito en la prueba WBT, se realizaron variaciones congruentes con la operación del microgasificador, ya que este, a diferencia de la cámara rocket, trabaja por lotes de combustibles y no puede ser alimentado durante el proceso. Las dimensiones actuales de la cámara de combustión y del dispositivo integrado no permitieron la utilización de combustible necesario para llegar al punto de ebullición del agua. En consecuencia, se estableció el alcance de 60 °C como temperatura final del ensayo. El cual se estandarizó definiendo masas iguales de pino, roble y pellets para todas las repeticiones en el microgasificador.

Para la construcción del protocolo de operación, se tomó como punto de partida los resultados de las evaluaciones preliminares de la unidad de microgasificación, particularmente el volumen de alcohol etílico al 95%, el volumen de agua a calentar y la preparación del combustible previo a su introducción al proceso de combustión. Las variables a ser definidas para el desarrollo del protocolo son: masa del combustible (gramos), volumen del agua para calentar (litros) y masa del material de ignición (gramos).

#### **Estimación de la eficiencia energética del microgasificador integrado a cámara rocket.**

El segundo objetivo del estudio se cumplió mediante comparaciones de eficiencia energética de la estufa mejorada con y sin microgasificador, aplicando el principio de la primera fase del WBT modificado. La evaluación con la cámara de combustión rocket finalizó cuando la temperatura del agua llegó a los 60 °C.

Se realizaron tres repeticiones de cada combinación de combustible (pino y roble) y tecnología (microgasificador y cámara rocket). Los pellets solamente se utilizaron cuando el sistema operó con el microgasificador, ya que la cámara rocket no se encuentra diseñada para operar con este tipo de combustible. Los datos registrados para la estimación de eficiencia energética fueron: masa inicial y final del agua y combustible, masa de los sólidos remanentes (ceniza y carbón vegetal), tiempo y temperaturas del agua cada 2 minutos.

**Balance de energía.** Para el cálculo de eficiencia energética, se realizó un balance y se determinó la energía: inicial (liberada por el combustible y el material de ignición), entregada (transferida al agua), no liberada (presente en los sólidos remanentes) y no aprovechada (calentamiento de superficies y emisiones). Estos cálculos se realizaron para conocer las entradas y salidas de energía durante el proceso. Con el fin de determinar la eficiencia energética, se desarrolló un esquema (Figura 5) del sistema de cocción integrado con cámara de combustión rocket y microgasificador.

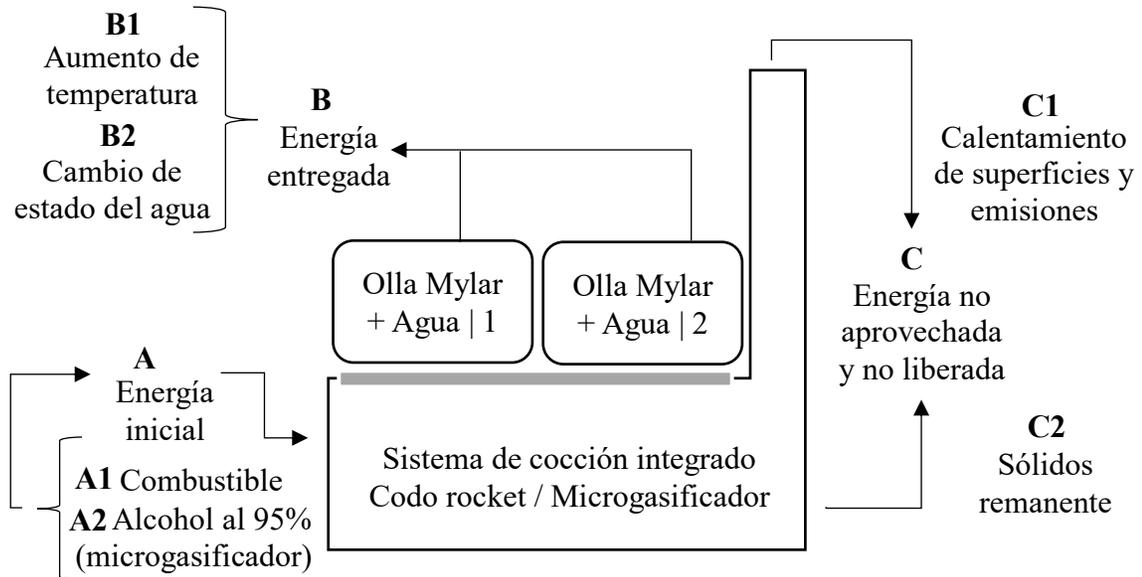


Figura 5. Balance de energía del sistema de cocción integrado.

El alcohol etílico al 95% se utilizó únicamente para las evaluaciones con el microgasificador. La energía no liberada presente en el remanente al final de la combustión se determinó mediante el cálculo de carbono fijo del método de Análisis Proximal. Además, se desarrollaron ecuaciones con base en la codificación de cada unidad del sistema:

$$A = B + C \quad [1]$$

Donde:

A = Energía inicial (kJ)

B = Energía entregada (kJ)

C = Energía no aprovechada y no liberada (kJ)

La energía inicial (A) representa al calor transferido al medio durante todo el proceso de combustión, esta incluye la energía presente en el combustible y en el alcohol al 95% utilizado, los datos se determinaron mediante las siguientes ecuaciones:

$$A1 = PCIc \times mc \quad [2]$$

$$A2 = (me \times \Delta H^\circ C) / PMe \quad [3]$$

$$mc = mh - (h \times mh) \quad [4]$$

Donde:

A1 = Energía del combustible (kJ)

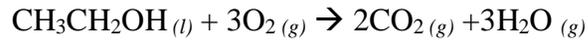
PCIc = Poder Calorífico Inferior del combustible (kJ/kg)

mc = Masa del combustible seco (kg)

A2 = Energía del alcohol etílico al 95% (kJ)

$m_e$  = Masa del alcohol etílico al 95% (kg)  
 $P_{Me}$  = Masa molecular del alcohol etílico al 95% (g/mol)  
 $\Delta H^\circ C$  = Entalpía de combustión del alcohol etílico al 95% (kJ/mol)  
 $m_h$  = Masa del combustible húmedo (kg)  
 $h$  = Porcentaje de humedad (%)

Por otra parte, para obtener la  $\Delta H^\circ C$  se utilizaron las entalpías de formación de los compuestos en la combustión del alcohol etílico al 95%. La reacción exotérmica y los cálculos estequiométricos se describen a continuación:



$$\Delta H^\circ C = \sum n \times \Delta H^\circ (\text{productos}) - \sum n \times \Delta H^\circ (\text{reactivos}) \quad [5]$$

$$\Delta H^\circ C = 2 \times \Delta H^\circ (\text{CO}_2) + 3 \times \Delta H^\circ (\text{H}_2\text{O}) - \Delta H^\circ (\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH})$$

Con base a tablas termodinámicas de JANAF (1971), la masa molecular del etanol es de 46.07 g/mol y las entalpías de formación de los compuestos presentes en la reacción son los siguientes:

$\Delta H^\circ (\text{CO}_2) = - 393.5 \text{ kJ/mol}$   
 $\Delta H^\circ (\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH}) = - 277.7 \text{ kJ/mol}$   
 $\Delta H^\circ (\text{H}_2\text{O}) = -285.5 \text{ kJ/mol}$

Por lo tanto:

$$\Delta H^\circ C = 2 \times (- 393.5 \text{ kJ/mol}) + 3 \times (-285.5 \text{ kJ/mol}) - (- 277.7 \text{ kJ/mol}) = - 1,365.8 \text{ kJ/mol}$$

La energía entregada (B) indica la cantidad de calor transferido al agua durante el proceso de combustión. Para estos cálculos fue necesario conocer el calor específico del agua (4.186 kJ/kg  $\times$  °C) y el calor latente de vaporización (2260 kJ/kg), esta información se recopiló de la plataforma “HyperPhysics” de Georgia State University (Nave, 2017).

$$B1 = C_e \times m_a \times \Delta T \quad [6]$$

$$B2 = L_v \times A_e \quad [7]$$

Donde:

$C_e$  = Calor específico del agua (kJ/kg  $\times$  °C)  
 $m_a$  = Masa del agua utilizada (kg)  
 $\Delta T$  = Diferencia de temperatura (°C)  
 $L_v$  = Calor latente de vaporización (kJ/kg)  
 $A_e$  = Agua evaporada (kg)

Una vez obtenida la energía inicial (A) y la entregada (B), se calculó la energía no aprovechada y no liberada (C) mediante el despeje de fórmula de la ecuación principal. Se cuantificó los remanentes y la energía contenida en ellos, mediante el análisis de carbono volátil de los remanentes en el Laboratorio de Energía. Para calcular la eficiencia energética (EE) se estableció una relación entre la energía entregada y la energía inicial.

$$C = A - B \quad [8]$$

$$EE = (B / A) \times 100 \quad [9]$$

### **Caracterización de las emisiones del microgasificador integrado a la cámara rocket.**

Para cumplir con el tercer objetivo de esta investigación, se utilizó la información procesada por el equipo LEMS sobre las emisiones totales de CO<sub>2</sub>, CO y PM<sub>2.5</sub>, se realizó el monitoreo de las emisiones generadas en cada combinación de combustible y tecnología. Se cuantificó la concentración de estos contaminantes para establecer comparaciones entre las emisiones generadas por el microgasificador frente a la cámara rocket. El equipo LEMS se calibró 10 minutos antes del encendido del sistema de cocción. Se registró la masa promedio de los filtros de fibra de vidrio antes y después de cada evaluación.

### **Diseño experimental.**

Se desarrolló un Diseño Completamente al Azar (DCA) para conocer diferencias significativas entre el desempeño de dos tipos de tecnologías de cocción, el microgasificador integrado a la estufa mejorada con tres combustibles y la cámara de combustión rocket con dos combustibles. La variable independiente fue el tipo de combustible en ambos experimentos, en el microgasificador: pino, roble y pellets (3 niveles), y en la cámara rocket: pino y roble (2 niveles). Las variables dependientes analizadas fueron: las emisiones totales (CO, CO<sub>2</sub>, PM<sub>2.5</sub>) y eficiencias energéticas.

**Análisis estadístico.** Los resultados obtenidos fueron analizados mediante estadística descriptiva para identificar tendencias en el desempeño de las tecnologías. Asimismo, se realizó la prueba de Shapiro-Wilk para determinar la normalidad de los datos ( $P < 0.05$ ). Posteriormente, se aplicó un Análisis de Varianza (ANDEVA) para determinar diferencias estadísticas entre las emisiones totales y eficiencias energéticas en el microgasificador y la estufa con cámara rocket. Finalmente, se aplicó una prueba post hoc de Duncan para la separación de las medias estadísticas. Los datos fueron procesados en el programa estadístico “Statistics Product and Service Solutions” (SPSS versión 19). Las diferencias significativas fueron reportadas con un nivel de significancia menor del 5% ( $P < 0.05$ ).

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### **Poder Calorífico Inferior y densidad de los combustibles.**

En el Cuadro 1 se puede observar que los pellets tienen mayor energía contenida por cada kilogramo de combustible, en comparación con el pino y roble, asimismo, se determinó que es el segundo combustible con mayor densidad, siendo el roble aquel con una alta relación entre su masa y volumen.

Cuadro 1. Poder Calorífico Inferior y Densidad de los combustibles utilizados.

<b>Combustible</b>	<b>PCI (kJ/kg)</b>	<b>Metodología</b>	<b><math>\rho</math> (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Metodología</b>
“Pellets”	17,061	IKA Calorimetric bomb	0.909	Principio de Arquímedes
<i>Pinus oocarpa</i>	15,739		0.565	
<i>Quercus spp.</i>	15,082		1.013	

#### **Variables de desempeño del microgasificador.**

En el Cuadro 2 se resume los promedios de los resultados obtenidos en la evaluación preliminar. No se encontró diferencias observables en cuanto al tiempo para llegar al punto de ebullición [PE] y la transferencia de energía. Sin embargo, la Figura 6 demuestra una relación entre la proporción de aire y el porcentaje de remanente sólido obtenido al final del proceso, lo cual se asocia a la cantidad de combustible consumido al punto de ebullición.

Cuadro 2. Resultado de las variables al punto de ebullición en evaluaciones preliminares.

<b>Variables</b>	<b>Combustible</b>	<b>Porcentaje de abertura</b>		
		<b>100%</b>	<b>75%</b>	<b>50%</b>
Tiempo para llegar al PE (min)	Pino	9.00	10.00	8.00
	Pellets	16.00	13.00	15.00
Combustible consumido al PE (g)	Pino	383.33	333.69	313.06
	Pellets	278.69	275.59	272.82
Velocidad de combustión (g/min)	Pino	41.09	33.37	37.58
	Pellets	17.42	20.67	17.80

Existen factores que influyen en el proceso de combustión, como la cantidad de aire proporcionado, la humedad y forma del combustible (Esparza, 2017). La Figura 6 demuestra que un mayor acceso de aire al sistema genera menor cantidad de sólidos

remanentes, lo cual indica que una mayor proporción del combustible se consumió dejando cenizas como residuo.

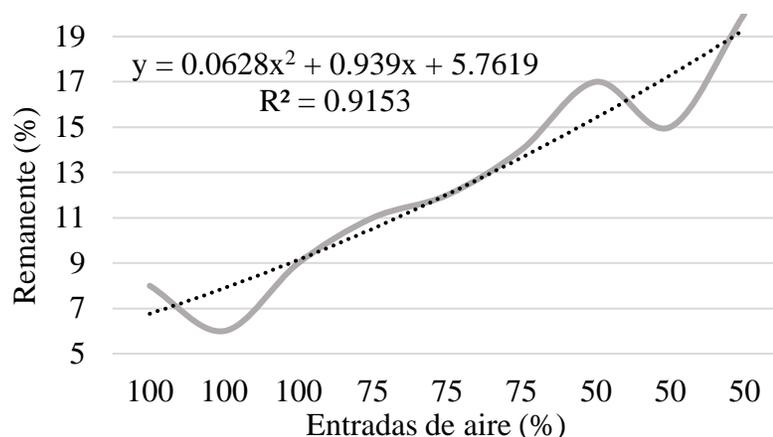


Figura 6. Relación entre la entrada de aire y el porcentaje de remanente.

### Protocolo de operación del microgasificador integrado a la cámara de combustión.

Se realizó un protocolo de operación basado en la metodología de evaluación de WBT. Para esto, se consideró al pino como el combustible óptimo utilizado en las evaluaciones, además, el material de ignición que facilitó el encendido del proceso fue el alcohol etílico al 95%. En el siguiente cuadro se resume el procedimiento estandarizado para la evaluación del dispositivo microgasificador:

Cuadro 3. Protocolo de funcionamiento del microgasificador.

Proceso	Pasos	Observaciones
Preparación del combustible	Cortar el combustible homogéneamente	Estandarizar dimensiones que permitan el flujo de aire
	Medir y registrar la humedad del combustible	Hacer tres mediciones de humedad en tres muestras
Preparación del agua	Pesar dos ollas Mylar con 2.5 L de agua cada una	Regular con anticipación la temperatura del agua a $\leq 25^{\circ}\text{C}$
Pesado de los materiales	Pesar y registrar la masa del combustible	De acuerdo a la capacidad del microgasificador
	Pesar y registrar el material de ignición	Pesar el 6% correspondiente a la masa del combustible utilizado
Montaje inicial del sistema	Levantar la plancha de la estufa mejorada	Plancha a temperatura ambiente
	Colocar el microgasificador en la cámara de combustión	Estufa a temperatura ambiente con suficiente material aislante
	Introducir el combustible pesado anteriormente	Procurar no aglomerar el combustible

Proceso	Pasos	Observaciones
Encendido	Rociar los gramos de material de ignición	Asegurar que el combustible esté humedecido solo en la superficie
	Encender el combustible	Esperar entre 0.5 a 1 minuto para asegurar la ignición
Montaje final del sistema	Ubicar la plancha en la estufa	Procurar no apagar el fuego
	Colocar las ollas Mylar encima de la plancha	Asegurar que no haya derrame del líquido de las ollas
	Introducir el termopar de los termómetros en el agua	Registrar la temperatura del agua de las ollas cada 2 minutos
Desmontaje	Pesar y registrar la masa de las ollas Mylar con agua	Usar guantes térmicos y protección para la balanza digital
	Recolectar, pesar y registrar la masa de los remanentes	Utilizar un recipiente y protección para la balanza digital

**Tiempo y temperatura máxima.** En las Figuras 7 y 8, se puede observar una discrepancia entre el comportamiento de la temperatura del agua para cada combustible y tecnología utilizada. La principal diferencia entre ambas tecnologías es que el microgasificador requiere menor cantidad de combustible y menor tiempo para llegar a la temperatura control del agua en comparación con la cámara rocket.

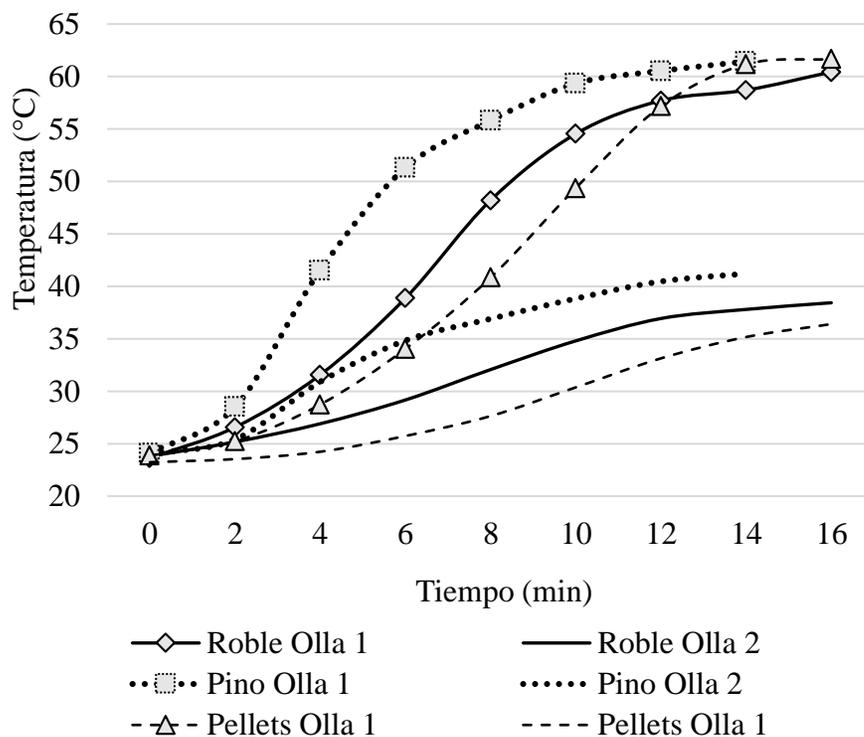


Figura 7. Comportamiento de la temperatura del agua utilizando microgasificador.

La transferencia de energía tiene una tendencia cuadrática en la microgasificación (Figura 7) y lineal en la cámara de combustión rocket (Figura 8), lo cual está asociado a la alimentación de combustible en cada tecnología. Para el microgasificador, entre el minuto 2 al 12 se observa una mayor potenciación en la transferencia de energía (alimentación por lotes de combustible). Para la cámara rocket, la entrega de energía se mantuvo constante hasta cierto punto, debido a que el proceso fue interrumpido cuando el agua llegó a la temperatura control (alimentación continua del combustible).

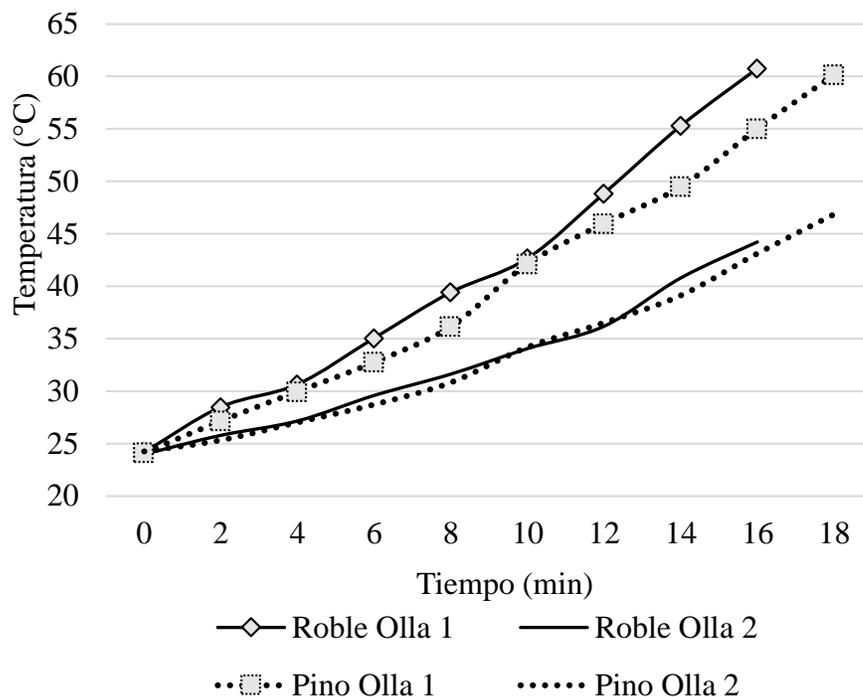


Figura 8. Comportamiento de la temperatura del agua utilizando la cámara rocket.

Este comportamiento se debe a que la gasificación es un proceso de reacción química exotérmica que transfiere energía a través de la combustión de los gases con un alto poder calorífico aprovechable (Morato, Rocco y Catelli, 2012). Por tales razones, en la microgasificación se verifica un mejor proceso de combustión de los gases en contraste con la cámara combustión rocket.

### **Balance de energía.**

El Cuadro 4 resume los promedios y coeficientes de variación de las variables de respuesta para el microgasificador y sus combustibles correspondientes. Se determinó que las mayores variaciones se encuentran en el porcentaje de remanentes, obteniendo mayores promedios en las combinaciones del microgasificador con roble.

Cuadro 4. Resumen de las pruebas realizadas con el microgasificador.

Variables / Microgasificador	Roble		Pino		Pellets	
	Promedio	C.V (%)	Promedio	C.V (%)	Promedio	CV (%)
Humedad (%)	9.47	5.35	9.08	1.02	9.23	2.96
Combustible húmedo (g)	116.00	0.00	116.00	0.00	116.00	0.00
Combustible seco (g)	105.03	0.56	105.47	0.10	105.30	0.30
Combustible/tiempo (g/min)	6.56	0.56	7.53	0.10	6.58	0.30
Remanentes (%)	2.08	13.26	0.28	44.28	1.29	49.32
Energía inicial (kJ)	1788.95	0.41	1893.27	0.14	2013.90	0.31
Energía entregada (kJ)	671.82	2.48	710.30	6.11	670.31	2.77
Energía sin liberar (kJ)	32.65	12.67	4.27	47.14	20.10	50.08
Eficiencia (%)	37.55	2.09	37.52	6.26	33.28	2.62
Emisiones de CO (g/kg)	78.55	10.39	47.53	42.52	27.97	0.87
Emisiones de CO <sub>2</sub> (g/kg)	1737.29	2.04	1758.61	1.81	1777.74	1.39
Emisiones de PM <sub>2.5</sub> (mg/kg)	2.28	10.51	4.36	15.18	0.47	4.16

C.V: Coeficiente de variación.

El Cuadro 5 resume los promedios y coeficientes de variación de las variables de respuesta para el cámara de combustión rocket y sus combustibles correspondientes. Se determinó que las mayores variaciones se encuentran en el porcentaje de remanentes, obteniendo mayores promedios en las combinaciones del codo rocket con pino.

Cuadro 5. Resumen de las pruebas realizadas con la cámara de combustión codo rocket.

Variables / Codo rocket	Roble		Pino	
	Promedio	C.V (%)	Promedio	C.V (%)
Humedad (%)	10.74	2.08	10.59	2.43
Combustible húmedo (g)	547.67	5.16	334.57	4.49
Combustible seco (g)	488.79	4.93	299.23	4.57
Combustible/tiempo (g/min)	30.55	4.93	16.62	4.57
Remanentes (%)	4.14	5.06	8.56	5.01
Energía liberada (kJ)	7030.04	5.05	4277.26	4.40
Energía entregada (kJ)	725.78	6.55	757.08	3.89
Energía sin liberar (kJ)	341.86	5.09	432.35	8.06
Eficiencia (%)	10.32	2.39	17.38	8.19
Emisiones de CO (g/kg)	43.77	14.22	28.67	28.41
Emisiones de CO <sub>2</sub> (g/kg)	1763.05	0.78	1788.18	0.71
Emisiones de PM <sub>2.5</sub> (mg/kg)	8.82	10.51	4.30	13.69

C.V: Coeficiente de variación.

En la Figura 9 se observa los valores obtenidos en el balance de energía de acuerdo al promedio de las evaluaciones realizadas para cada tipo de tecnología con su respectivo combustible. El codo rocket tuvo mayor liberación y pérdida de energía porque la combustión se desarrolló en un mayor tiempo en comparación con el microgasificador. Además, el roble tuvo mayor liberación y pérdida de energía, lo cual se asocia al contenido de humedad del combustible.

Una de las observaciones relevantes de la Figura 9 es que la energía entregada es similar para cada escenario, lo cual sustenta la homogeneidad de las evaluaciones realizadas. El microgasificador utilizó menos cantidad de energía del combustible y las pérdidas fueron menores, debido a la dinámica de combustión en cada tecnología. Por último, la energía sin liberar es aquella contenida en los remanentes generados al final del proceso de combustión, lo cual indica que la cámara rocket fue menos eficiente por que generó mayor carbón vegetal al final del proceso.

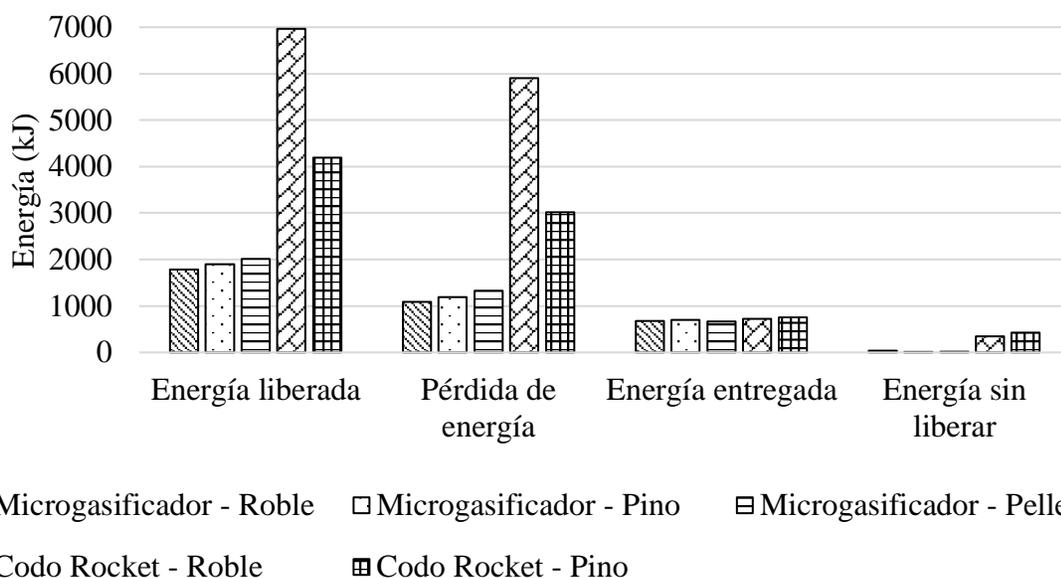


Figura 9. Gráfico de barras con datos obtenidos en el balance de energía.

**Transferencia de energía.** Las Figuras 10 y 11 indican el comportamiento de los combustibles en las diferentes tecnologías con respecto a la velocidad de transferencia de energía en forma de calor. Existen tres mecanismos de transferencia de calor: conducción, convección y radiación (Corace, 2009). Para este sistema de cocción integrado, la radiación es el paso de energía en forma de calor del combustible a la plancha, la conducción de la plancha a la olla; y la convección se refiere a la transferencia de energía mediante movimiento de fluidos calientes entre la plancha y el material aislante de la estufa.

En contexto con los mecanismos de transferencia de calor, la forma de estas gráficas se debe a la alimentación del combustible al sistema y a la de combustión generada en cada escenario. Durante las evaluaciones con cámara rocket, los leños fueron introducidos de

forma constante, en comparación con el microgasificador, donde se trabajó lotes por separado de pellets y fragmentos de pino y roble, lo cual permitió una quema más uniforme del combustible.

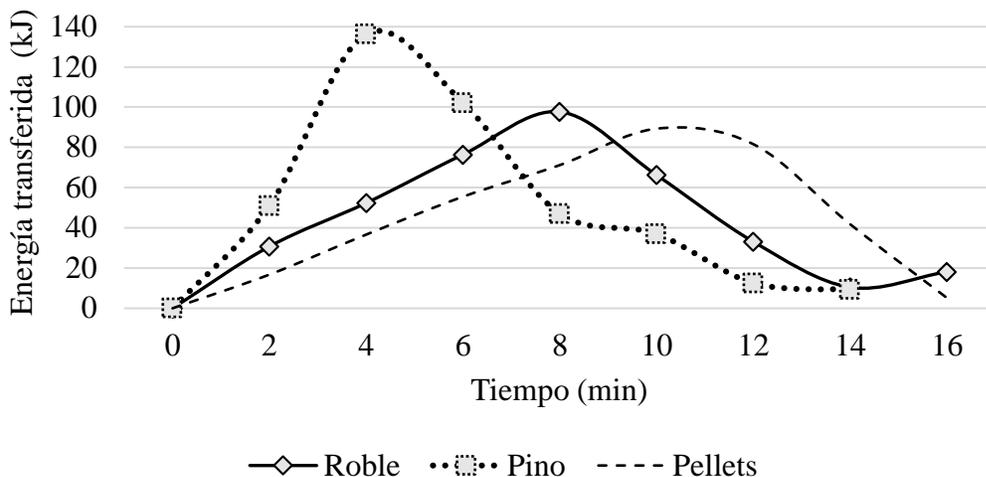


Figura 10. Transferencia de energía en microgasificador con diferentes combustibles.

Por otra parte, las curvas de transferencia de energía en la microgasificación llegan a sus puntos máximos (140, 100 y 90 kJ para pino, roble y pellets respectivamente) cuando empieza a ser más escaso el combustible, esto representa una quema constante y un aporte de energía adicional del poder calorífico de los gases generados. Por el contrario, en la cámara rocket, los picos y valles de las curvas indican una transferencia de energía interrumpida, debido a la forma de combustión de los leños. Asimismo, un mal aprovechamiento del flujo de aire en la cámara de combustión genera mayores cantidades de remanentes y por ende menores eficiencias en la transferencia de energía.

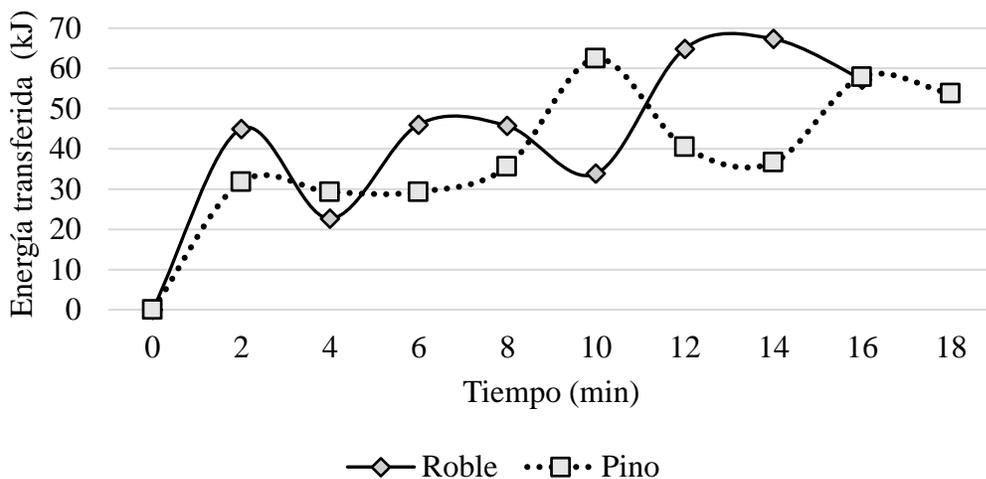


Figura 11. Transferencia de energía en cámara rocket con diferentes combustibles.

**Eficiencia energética de la estufa integrada con cámara rocket y microgasificador.** Se ha demostrado que la gasificación alcanza niveles óptimos de eficiencia en el uso de biomasa y que representa una alternativa para la sustitución de combustibles convencionales (Morini, 2014). En la Figura 12, se observa que el microgasificador tuvo mayor eficiencia energética en comparación con la cámara rocket.

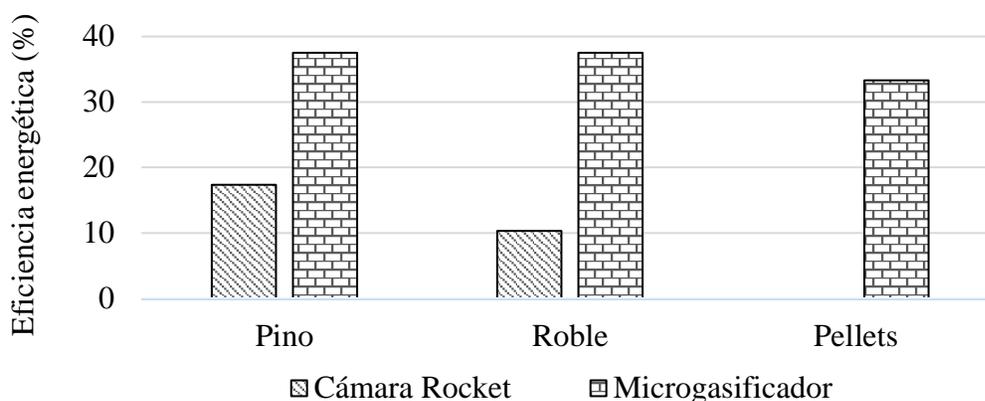


Figura 12. Comparación de las eficiencias energéticas para cada tecnología.

Las eficiencias energéticas para las tecnologías utilizadas difieren debido a la forma de combustión en cada caso, el microgasificador con pino y roble fueron los mejores escenarios de eficiencia energética ( $P < 0.05$ ) (Cuadro 6), puesto que el flujo de aire en el microgasificador favorece una mayor combustión de los gases y aprovecha de una mejor forma el calor presente en el combustible gasificado.

Cuadro 6. Prueba Duncan para eficiencia energética (%).

Tecnología – combustible	N	Subconjunto para alfa = 0.05			
		1	2	3	4
Codo rocket - Roble	3	10.32			
Codo rocket - Pino	3		17.38		
Microgasificador - Pellets	3			33.28	
Microgasificador - Pino	3				37.52
Microgasificador - Roble	3				37.55
Significancia		1.00	1.00	1.00	0.98

De acuerdo a la Figura 13, existe una dependencia directa entre la humedad del combustible y la velocidad de combustión. Este efecto se debe a que, se consume energía para evaporar la humedad presente en el combustible antes de entregar calor al sistema, liberando mayor cantidad de energía para romper los enlaces de hidrógeno de las moléculas de agua (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO], 2010).

Otra de las razones por las cuales la velocidad difiere en el consumo de combustible es la tecnología utilizada, la mayor velocidad de combustión se dio para los ensayos con la cámara rocket.

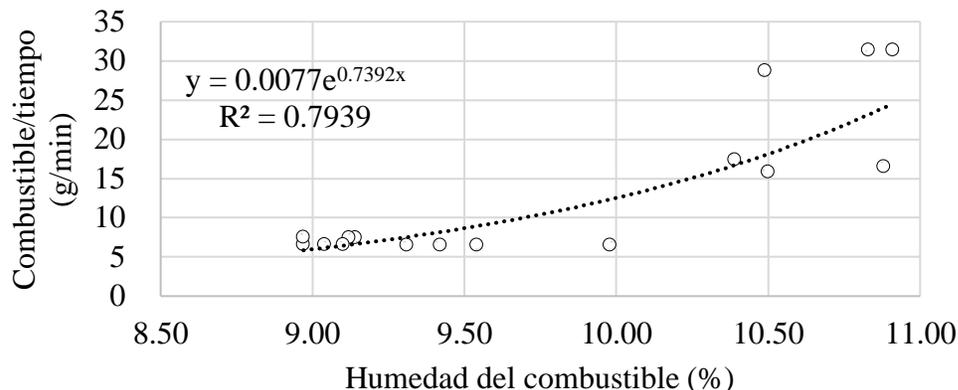


Figura 13. Relación entre velocidad de combustión y humedad del combustible.

La Figura 14 demuestra que hay una relación inversamente proporcional entre la velocidad de transferencia de energía y la eficiencia energética. Esto implica pérdidas de estabilidad en la combustión al desprender grandes cantidades de calor y emisiones en el proceso, ocasionadas por una acelerada quema de combustible (Navas, 2015).

Para el microgasificador, la velocidad de transferencia de energía fue menor y la eficiencia energética mayor, en comparación con la cámara rocket. Además, el roble fue el combustible que tuvo menor eficiencia y mayor velocidad transferencia de energía en la cámara rocket en comparación con el pino.

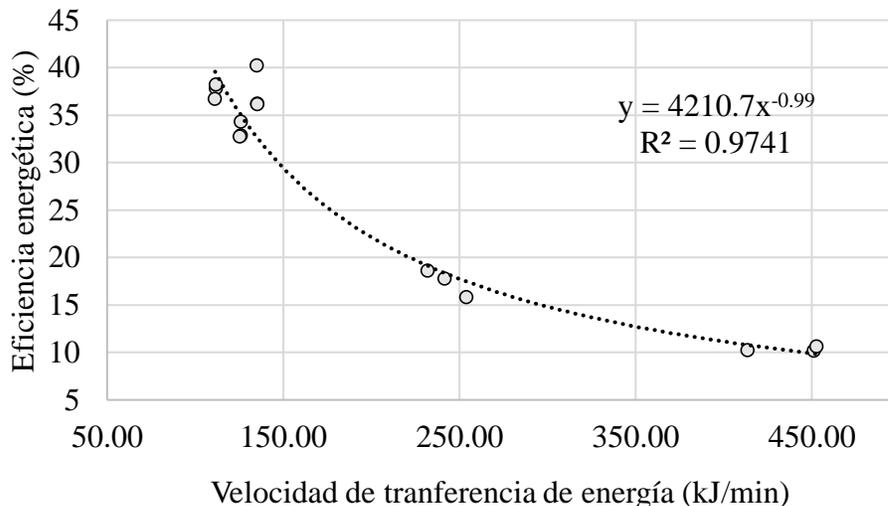


Figura 14. Relación entre la velocidad de transferencia de energía y eficiencia.

### Caracterización de las emisiones generadas.

Para ambas tecnologías, se verificó una combustión incompleta, la cual se produce cuando no hay una suficiente oxidación del combustible o hay un aporte de aire deficiente del oxígeno demandado para una combustión completa, generando mayor cantidad de CO y PM (Navas, 2015).

El Cuadro 7 demuestra una diferencia significativa en las concentraciones de CO y PM<sub>2.5</sub>, indicando deficiencia de oxígeno y presencia de material no combustionado que fue conducido junto a las emisiones, debido al combustible y la forma de combustión en cada tecnología. Además, no se encontró diferencias significativas ( $P > 0.05$ ) en cuanto al CO<sub>2</sub>, debido a que las emisiones fueron similares en cada ensayo, las cuales se encuentran relacionadas con la cantidad de sólidos remanentes obtenidos al final del proceso.

Cuadro 7. Evaluación de las emisiones totales en el microgasificador y el codo rocket.

Variable	Grados de libertad	Media cuadrática	F	Significancia
Emisiones de CO (g/kg)	4	0.100	7.94	0.00
Emisiones de CO <sub>2</sub> (g/kg)	4	0.001	1.76	0.21
Emisiones de PM <sub>2.5</sub> (g/kg)	4	29.160	85.66	0.00

En la prueba Duncan para las emisiones de CO (Cuadro 8) se encontró diferencias entre la evaluación del microgasificador con roble en comparación con las demás evaluaciones. La causa de esta diferencia radica en la dificultad del encendido del combustible, debido a la aglomeración de los fragmentos de madera en el microgasificador, causando una escasa oxidación del combustible y una mayor combustión incompleta.

A pesar de que los fragmentos de roble y pino tienen dimensiones iguales de corte para su uso en el microgasificador, el roble fue el combustible con mayor emisión de CO, esto se debe a que su alta densidad, disminuye los espacios porosos entre las partículas, por lo tanto, la disponibilidad de oxígeno a través del flujo de aire es menor.

Cuadro 8. Prueba Duncan para las emisiones de CO (g/kg).

Tecnología – combustible	N	Subconjunto para alfa = 0.05	
		1	2
Microgasificador – Pellets	3	1.445	
Codo rocket – Pino	3	1.446	
Codo rocket – Roble	3	1.638	
Microgasificador – Pino	3	1.646	
Microgasificador – Roble	3		1.894
Significancia		0.070	1.000

La mayor generación de PM<sub>2.5</sub> se presentó en las evaluaciones con roble en la cámara de combustión rocket (Cuadro 9). Al igual que las emisiones de CO, la alta densidad del combustible dificultó en el encendido de los leños, además, se tuvo problemas durante la combustión, esto se puede observar en las Figuras 10 y 11, donde la transferencia de energía para cada escenario se comportó de manera inconstante.

Cuadro 9. Prueba Duncan para las emisiones de PM<sub>2.5</sub> (mg/kg).

Tecnología - combustible	N	Subconjunto para alfa = 0.05			
		1	2	3	4
Microgasificador – Pellets	3	0.463			
Microgasificador – Roble	3		2.280		
Codo rocket – Pino	3			4.300	
Microgasificador – Pino	3			4.363	
Codo rocket – Roble	3				8.817
Significancia		1.000	1.000	0.897	1.000

## 4. CONCLUSIONES

- Las variables influyentes para el correcto funcionamiento del microgasificador integrado a la estufa mejorada fueron el tipo de combustible utilizado, su masa, contenido de humedad y el tamaño de la partícula. El desempeño óptimo se verifica al incrementar la eficiencia energética del sistema y reducir la concentración de emisiones de CO y PM<sub>2.5</sub>.
- El factor influyente para incrementar la eficiencia energética fue el aprovechamiento del oxígeno en el flujo de aire durante la reacción exotérmica, generando una combustión más completa en el microgasificador en comparación con el codo rocket. La mayor pérdida de energía se encontró al combinar las emisiones gaseosas y el calor irradiado a través de las superficies de la estufa.
- Una baja velocidad de transferencia de energía disminuye las emisiones de gases, por lo tanto, al existir una combustión más lenta, el proceso de gasificación es más completo. Sin embargo, el escenario con menor generación de emisiones de CO y PM<sub>2.5</sub> no corresponde al de mayor eficiencia energética, ya que esta última variable se encuentra relacionada con el consumo incompleto del combustible.

## **5. RECOMENDACIONES**

- Realizar mejoras al prototipo planteado, aumentando las entradas de aire en las partes frontales del microgasificador, lo cual permitirá un mejor aprovechamiento del oxígeno; y ampliando la altura del dispositivo, lo que permitirá una mayor capacidad volumétrica.
- Colocar dos bases perforadas desarmables (como está en el diseño actual) separadas a una distancia entre 1 a 2 centímetros entre ellas, esto ayudará a tener menores pérdidas del combustible entre los espacios de la base durante el proceso de combustión.
- Aplicar el protocolo de funcionamiento del microgasificador con otros tipos de combustibles disponibles, con diferentes densidades que permitan una mejor circulación de aire primario y secundario en el dispositivo.
- Diseñar otro microgasificador adaptable a la estufa mejorada, el cual cuente con regulación de entrada de aire y con un sistema de alimentación constante de combustible para alargar el tiempo de combustión.

## 6. LITERATURA CITADA

- Anderson, P., Reed, T., y Wever, P. (2007). Micro gasification: What it is and why it Works. Recuperado de: <http://www.hedon.info/docs/BP53-14-Anderson.pdf>
- Aristizábal, J. (2010). Estufas mejoradas y bancos de leña: Una alternativa de autoabastecimiento energético a nivel de finca para comunidades dependientes de los bosques de roble de la Cordillera Oriental. (Colombia forestal) *13*(2), 245–256.
- Banco Mundial. (2018). Población rural (% de la población total). Recuperado de: <https://datos.bancomundial.org/indicador/SP.RUR.TOTL.ZS?locations=HN>
- Bryden, M., Still, D., Scott, P., Hoffa, G., Ogle, D., Bailis, R., y Goyer, K. (2006). Principios de diseño para estufas de cocción con leña. Aprovecho Research Center. Recuperado de: [provecho.org/?paybox\\_id=140](http://provecho.org/?paybox_id=140)
- Carrasco, J. (2008). Escuela de Organización Industrial. Master en Energía Renovables y Mercado Energético. Combustión directa de la biomasa.
- Castells, E., y Velo, E. (2000). La gasificación. Santos.
- Chan, H., y Sopian, K. (2018). Renewable Energy in Developing Countries. Springer.
- Corace, J. (2009). Mecanismos de transferencia del calor. Universidad Nacional del Nordeste. Recuperado de: <http://ing.unne.edu.ar/pub/fisica2/U05.pdf>
- Díaz, J. (2017). Proyecto promoción de sistemas agroforestales de alto valor con cacao en Honduras. Fundación Hondureña de Investigación Agrícola.
- Díaz, R. (2013). Uso racional y sostenible de la leña en los países del SICA. Organización Latinoamericana de Energía. Recuperado de: [http://www.olade.org/wp-content/uploads/2015/08/UsoLe%C3%B1a\\_OLADE-SICA-2013.pdf](http://www.olade.org/wp-content/uploads/2015/08/UsoLe%C3%B1a_OLADE-SICA-2013.pdf)
- Esparza, F. (2017). El Fuego o combustión Bomberos de Navarra Nafarroako Suhiltzaileak. Recuperado de: <http://www.bomberosdenavarra.com>
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (2010). Mecanismo de transferencia de energía. Recuperado de: <http://www.fao.org/docrep/012/y7223s/y7223s04.pdf>

- Alianza Global para las Estufas Limpias. (2014). Protocolos. Recuperado de: <http://cleancookstoves.org/technology-and-fuels/testing/protocols.html>
- Agencia Internacional de Energía. (2006). Perspectiva Energética Mundial. Recuperado de: <https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/weo2006.pdf>
- Agencia Internacional de Energía. (2018). Información de fuentes renovables. Recuperado de: <https://webstore.iea.org>
- JANAF (1971). Thermochemical Tables, Midland, MI, Dow Chemical Co. Recuperado de: [file:///D:/Downloads/datospdf.com\\_tablas-termodinamica-completas-cengel-.pdf](file:///D:/Downloads/datospdf.com_tablas-termodinamica-completas-cengel-.pdf)
- León, M. (2017). Evaluación del desempeño de estufas mejoradas portátiles operadas con combustibles sólidos alternativos. Zamorano.
- Ludeña, C., Salomón, M., Cocco, M., Dannecker, C., Grütter, J., y Zelaya, S. (2015). Identificación y priorización de Acciones Nacionales Apropriadadas de Mitigación (NAMA) en los sectores de agricultura, transporte y eco-fogones en Honduras. Washington, DC. Banco Interamericano de Desarrollo.
- MacCarty, N., Ogle, D., Still, D., Bond, T., y Roden, C. (2008). A laboratory comparison of the global warming impact of five major types of biomass cooking stoves. *Energy for Sustainable Development*. 12(2), 56–65. Recuperado de: [https://doi.org/10.1016/S0973-0826\(08\)60429-9](https://doi.org/10.1016/S0973-0826(08)60429-9)
- Montoya, L., y Serrano, D. (2016). Diseño, análisis y construcción de una estufa de uso doméstico utilizando como fuente de combustible biomasa sólida. Escuela Superior Politécnica del Litoral. Recuperado de: <https://www.dspace.espol.edu.ec/retrieve/97057/D-CD88359.pdf>
- Morato, D., Rocco, I., y Catelli, M. (2012). Conversión de Residuos Sólidos Urbanos en Energía. Recuperado de: [http://www.um.edu.uy/docs/10\\_conversion\\_de\\_residuos\\_solidos\\_urbanos-en\\_energia.pdf](http://www.um.edu.uy/docs/10_conversion_de_residuos_solidos_urbanos-en_energia.pdf)
- Morini, M. (2014). Energía Estrategia. Gasificación: un sistema eficiente para optimizar la utilización de biomasa. Recuperado de: <http://www.energiaestrategica.com/gasificacion-un-sistema-eficiente-para-optimizar-la-utilizacion-de-biomasa/>
- Navas, D. (2015). Eficiencia energética en las instalaciones de calefacción y ACS en los edificios. Editorial Elearning, Ed.
- Nave, C. (2017). HyperPhysics. Georgia State University. Recuperado de: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbasees/hph.html>
- Pearson, T., Brown, S., Murray, L., y Sidman, G. (2017). Greenhouse gas emissions from tropical forest degradation: An underestimated source. *Carbon balance and management*. Recuperado de: <https://doi.org/10.1186/s13021-017-0072-2>

- Poveda, D. (2013). Latinoamérica: un mercado en expansión para la biomasa. *Energética XXI*.
- Roth, C. (2013). Micro-gasification: cooking with gas from dry biomass. Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH. Recuperado de: [https://www.giz.de/de/html/suchergebnisse.html?query=Micro-Gasification%3A+Cooking+with+gas+from+biomass&send\\_button\\_search=Suchen](https://www.giz.de/de/html/suchergebnisse.html?query=Micro-Gasification%3A+Cooking+with+gas+from+biomass&send_button_search=Suchen)
- Sanders, A., y Morazán, L. (2011). Informe sobre encuesta nacional de leña, consumo de leña en hogares y pequeña industria en Honduras. Recuperado de: <http://docplayer.es/10895483-Encuesta-nacional-de-lena-consumo-de-lena-en-hogares-y-pequena-industria-en-honduras-informe-final.html>
- Seoáñez, C. (2013). Tratado de la biomasa: Con especial incidencia sobre la biomasa como fuente energética. (Madrid: McGraw-Hill España) Recuperado de: <https://ebookcentral.proquest.com>
- Smith, K. (2006). El uso doméstico de leña en los países en desarrollo y sus repercusiones en la salud. Recuperado de: <http://www.fao.org/tempref/docrep/fao/009/a0789s/a0789s09.pdf>
- Támara, F. (2012). Fabricación y evaluación de estufa mejorada de plancha 16" x 24", con cámara de combustión microgasificadora (T-LUD). Zamorano.
- Valenzuela, J. (2012). Efecto de combinar un T-LUD en una estufa mejorada con plancha Justa 2x3. Zamorano.
- Yanchapaxi, G. (2015). Análisis del consumo de leña en doce comunidades de los municipios de Catacamas, La Esperanza, Marcala y Yuscarán, Honduras. Zamorano.

## 7. ANEXOS

**Anexo 1.** Combustibles utilizados en el microgasificador.



**Anexo 2.** Filtros al final de las evaluaciones para cada combustible y tecnología.



**Anexo 3.** Procedimiento utilizado para evaluación preliminar del microgasificador.

<b>Proceso</b>	<b>Materiales</b>	<b>Condiciones</b>
Pesado del microgasificador, combustible y ollas	Balanza digital	Microgasificador y ollas limpias a temperatura ambiente
Control del contenido de agua en el combustible	Medidor de humedad	Tres muestras aleatorias con humedad menor al 12%
Regulación de la temperatura del agua	Termómetro y agua fría	Agua $\leq 25$ °C
Pesado del agua	Balanza digital	2.5 kg de agua
Pesado del alcohol	Balanza digital	18 g de alcohol etílico al 95%
Encendido de los materiales de combustión	Fósforo	Puertas cerradas con extractor de humo y aire encendido.
Colocación de la olla con agua y control de la temperatura	Termómetro	Se coloca el termopar dentro del agua, registrando la temperatura cada 2 minutos
Pesado de los materiales al llegar al punto de ebullición	Guantes, termómetro y balanza digital	Se pesa la olla con agua y el microgasificador con el combustible no consumido

**Anexo 4.** Prueba de normalidad para eficiencia energética y remanentes.

<b>Variable</b>	<b>Tecnología - combustible</b>	<b>Shapiro-Wilk</b>		
		<b>Estadístico</b>	<b>Grados de libertad</b>	<b>Significancia</b>
Eficiencia energética (%)	Microgasificador - Pellets	0.920	3	0.453
	Microgasificador - Pino	0.911	3	0.423
	Microgasificador - Roble	0.821	3	0.166
	Codo rocket - Pino	0.998	3	0.913
	Codo rocket - Roble	1.000	3	0.978
Remanente (%)	Microgasificador - Pellets	0.972	3	0.677
	Microgasificador - Pino	0.991	3	0.817
	Microgasificador - Roble	0.964	3	0.637
	Codo rocket - Pino	0.990	3	0.806
	Codo rocket - Roble	0.770	3	0.045

**Anexo 5.** Prueba de normalidad para las emisiones totales.

Variable	Tecnología - combustible	Shapiro-Wilk		
		Estadístico	Grados de libertad	Significancia
Emisiones de PM <sub>2.5</sub> (mg/kg)	Microgasificador - Pellets	0.92	3	0.46
	Microgasificador - Pino	0.96	3	0.62
	Microgasificador - Roble	1.00	3	0.86
	Codo rocket - Pino	1.00	3	0.94
	Codo rocket - Roble	0.83	3	0.18
Emisiones de CO (g/kg)	Microgasificador - Pellets	0.99	3	0.79
	Microgasificador - Pino	0.95	3	0.58
	Microgasificador - Roble	0.97	3	0.67
	Codo rocket - Pino	0.92	3	0.47
	Codo rocket - Roble	0.78	3	0.06
Emisiones de CO <sub>2</sub> (g/kg)	Microgasificador - Pellets	0.81	3	0.14
	Microgasificador - Pino	0.99	3	0.81
	Microgasificador - Roble	0.83	3	0.19
	Codo rocket - Pino	0.89	3	0.37
	Codo rocket - Roble	0.79	3	0.09