

# Construcción de una estufa de uso doméstico utilizando como fuente de combustible biomasa sólida.

Emérita Delgado, Ph.D, Daniel Serrano, Ing, Luis Montoya, Ing. Juan Peralta, Ph.D. Cesar Moreira, Ph.D  
Escuela Superior Politécnica del Litoral, Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la Producción, Centro de Desarrollo Tecnológico Sustentable. Campus Gustavo Galindo Km 30.5 Vía Perimetral. Ecuador  
eadelgad@espol.edu.ec, jperal@espol.edu.ec, cemoreir@espol.edu.ec

**Abstract—** *The present study comprises the analysis, design and construction of a domestic stove gasifier for rural communities, the unit utilizes local residual biomass available in Ecuador's Zone 8 as a fuel. During the analysis, literature was consulted in order to avoid common known problems presented in this kind of stoves. Additionally, it has been considered multiple design criteria and heat transfer analysis. Importantly, for the construction, local materials has been used to keep costs low and increment its accessibility.*

*Throughout the evaluation of the stove gasifier several experiments using the local available biomass were run (rice husks, dry branches and litterfall). The best results were obtained when using agroforestral residues, i.e. a blend of 90% dry branches and 10% litterfall. However, a problem of compaction was detected when using rice husks; this compaction lead to a poor combustion and excess of smoke. To prevent compaction leaves was used as a bulking material. The results suggested that the best blend when working with rice husks was a mix of 20% rice husks and 80% of litterfall, higher concentrations of rice husks will result in excessive amounts of smoke and poor combustion.*

*Finally, the designed stove gasifier works well, if the used biomass does not go through compaction. Therefore, it can be used in rural villages as an alternative for cooking*

**Keywords—** *biomass, rice husks, stove, gasifier, litterfall*

**Resumen—** *El presente estudio está relacionado al diseño, análisis y construcción de una estufa domestica para comunidades rurales, utilizando como combustible principal la biomasa sólida residual disponible en la zona 8 del Ecuador, es decir, biomasa proveniente del sector arrocero, podas, cañeras, hojarasca, entre otros. Durante el análisis, se consultó literatura disponible con el fin de evitar problemas comunes que se presentan en tipo de estufas. Adicionalmente, se ha considerado varios criterios de diseño y análisis de transferencia de calor. Es importante destacar que, para diseñar una estufa de bajo costo e incrementar su accesibilidad, se ha utilizado para la construcción del equipo material disponibles de la zona.*

*Durante la etapa de evaluación de la estufa gasificadora se realizaron varios experimentos usando la biomasa disponible localmente (cascarilla de arroz, ramas secas y hojarasca). Los mejores resultados se obtuvieron con mezclas de residuos agroforestales, específicamente, una mezcla de 90% ramas secas y 10% de hojarasca. Por otra parte, se detectó problemas de compactación al utilizar el 100 % de la cascarilla de arroz; esta compactación conduce a una mala combustión y exceso de humo. Para evitar el problema de compactación, se decidió incrementar la densidad aparente utilizando como mezclas hojarasca. Es así, que los resultados sugieren que al trabajar con cascarilla de arroz se realicen mezclas del 20% cascarilla con el 80% hojarasca. Esto es debido que*

*en concentraciones mayores de cascarilla de arroz dan lugar a cantidades excesivas de humo y una mala combustión.*

*Finalmente, podemos indicar que se ha diseñado una estufa gasificadora que mantiene una combustión controlada sin emisión de gases contaminantes, siempre que la biomasa utilizada no pasa por la compactación. Por lo tanto, se puede utilizar en la zona rural como una alternativa para cocinar.*

**Palabras Claves—** *biomasa, cascarilla de arroz, estufa, gasificadora, hojarasca*

## I. INTRODUCCIÓN

A partir de la publicación realizada por la Organización Latinoamericana de Energía (OLADE) y el Censo de la Población y Vivienda realizado en el año 2010, establece que la principal fuente de combustible utilizado para uso doméstico en el Ecuador, es el gas licuado de petróleo GLP seguido del carbón vegetal obtenido a través de la tala de árboles [1] [2]. Cabe indicar que la leña, el carbón y los residuos vegetales son utilizados aún en las poblaciones rurales de América Latina para la preparación de alimentos [3] por motivo de la falta de acceso del combustible fósil a las comunidades o por factores económicos. Por otra parte, las estufas utilizadas con leña o carbón producen humos por efecto de la combustión de manera descontrolada generando emisiones nocivas que constituye un riesgo para la salud de las personas.

De lo antes expuesto, el estudio plantea el diseño y construcción de una estufa portátil sostenible enfocada a los sectores rurales campesinos e indígenas donde se utilice como combustible principal la biomasa sólida procedente de los residuos de procesos agrícolas, corte de poda, clareos, maderas, entre otros residuos. Por otro lado, una buena combustión de la biomasa sería una alternativa viable para reducir las emisiones de dióxido de carbono, logrando completar el llamado "ciclo de carbono". De esta manera, reemplazando las estufas de leña convencionales por una estufa más sostenible se controlara la generación de gases o humos y material particulado generado por la combustión incompleta del residuo de biomasa.

### A. Biomasa en el Ecuador.

El uso de biomasa sólida para combustible es ampliamente aplicado en las zonas rurales de América Latina, sin embargo, la disponibilidad de los diferentes tipos de biomasa

lignocelulosa varía según la zona desde el tipo de suelo y las condiciones climáticas del lugar. Siendo variante las propiedades físicas, químicas y energética (poder calorífico) de la biomasa a partir de su procedencia.

A partir del atlas Bioenergético del Ecuador, elaborado por el Ministerio Coordinador de Producción, Empleo y Competitividad (MCPEC); Ministerio de Electricidad y Energía Renovable (MEER) ; e, Instituto Nacional de Preinversión (INP) siendo publicado en el año 2015, se identifica tres sectores con potencial bioenergético , como lo son: la producción agrícola, el sector pecuario y el sector forestal [4]. En relación al sector agrícola en la figura 1, se presenta la clasificación de los cultivos clasificados en cultivos permanentes (cultivo que mantiene un prolongado periodo de producción) y cultivos transitorios (El tiempo de crecimiento del cultivo es menor a un año, sembrando nuevamente después de la cosecha).

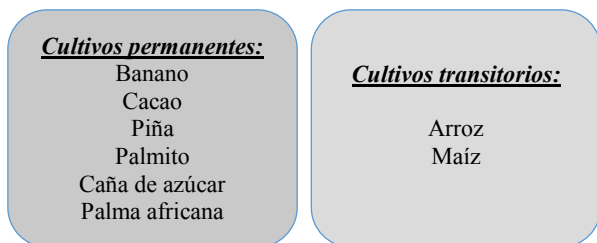


Fig. 1. Clasificación de los cultivos en el Ecuador.

Por otro parte, es conveniente indicar que los residuos forestales son una importante fuente de biomasa lignocelulosa, por lo que se requiere dejar durante la tala del árbol un porcentaje de estos residuos en el campo con la finalidad de proteger el suelo de la erosión, además de mantener el nivel de nutrientes orgánicos del mismo. Entre los residuos forestales generados en diferentes procesos productivos se encuentran: restos de plantaciones (ramas, corteza y raíces), residuos de poda, restos de aserrío y restos de ebanisterías.

En el caso de la provincia del Guayas el recurso de biomasa es altamente extenso, debido al alto índice de actividad agrícola local, esto significa que existen diversas fuentes de aprovechamiento de biomasa. En la tabla I se muestra la cantidad de producción agrícola y generación de residuos estimadas en el año 2014, siendo publicada en el Atlas bioenergético del Ecuador.

TABLA I. PRODUCTOS AGRÍCOLAS CULTIVADOS EN LA PROVINCIA DEL GUAYAS.

Provincia	Superficie [km2]	Producto	Producción absoluta [t/año] TOTAL	Residuos [t/año] TOTAL
Guayas	153341	Arroz	6'473.875,15	3'891.128,69
		Banano		
		Caña de azúcar		
		Cacao		
		Palma africana		

Fuente: Atlas bioenergética del Ecuador [Datos del 2014].

En la figura 2, se presentan los porcentajes de la producción absoluta (t/año) y el porcentaje de los residuos (t/año) generados en los cultivos agrícolas de la provincia del Guayas. Cabe indicar, que en ciertos casos la cantidad de residuos obtenidos de un producto es superior a la cantidad neta de producción, debido a que se suma el peso de las cascaras, ramas, tallos, entre otros residuos. Es así, que se puede observar en el grafico que la principal fuente de residuo agrícola en la provincia del Guayas es la cascarilla de arroz.

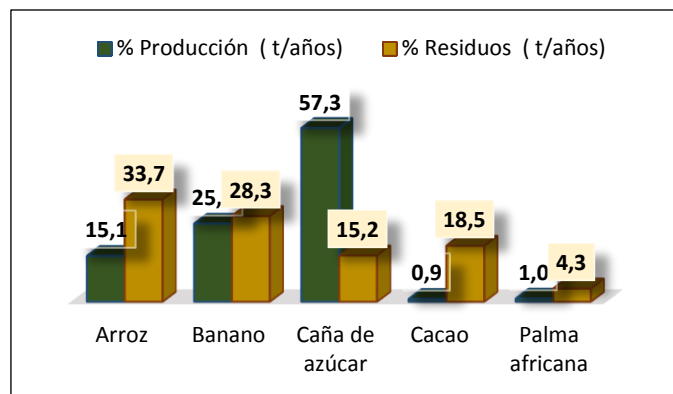


Fig.2. Provincia del Guayas: porcentaje de producción y residuos (t/año) estimado.

Fuente: Atlas bioenergética del Ecuador [Datos del 2014].

## II. MATERIALES Y METODOLOGÍA

### A. Parámetros de diseño

Previo al dimensionamiento de las estufa se hace necesario, estudiar los tipos de estufas existentes en el mercado, sus ventajas y desventajas, problemas de combustión de la biomasa dentro del sistema, costos, funcionamientos, humedad del producto, tiempo de eliminación del producto, entre otros parámetros que acarrea la complejidad del diseño.

A partir del estudio realizado por Paul Anderson (2011), existen diversos tipos de diseños de estufas, en donde las modificaciones realizadas en cada una de estas, buscan reducir

el humo de la combustión y la pérdida térmica. En la tabla II, se presenta una descripción de las ventajas y desventajas de las diferentes estufas utilizadas para la quema de biomasa [5].

TABLA II.  
TIPOS DE ESTUFAS PARA BIOMASA

Tipo de estufa	Ventajas	Desventajas
De leña	Fácil fabricación. Aprovecha la leña de forma eficiente.	Genera gran cantidad de emisiones
Mejorada	Fácil fabricación construida con materiales como arcilla y cerámica. Portabilidad.	Genera considerable cantidad de emisiones.
Cohete	Buena combustión. Portabilidad. Funciona con aire forzado.	No aprovecha al máximo el calor que se genera por los gases de combustión
Semi-gasificadora	Mantiene una mejor combustión de la biomasa.	Necesita un control en la cantidad de aire de ingreso en la estufa.
Gasificadora	Mejor combustión. Funciona bajo el principio de la gasificación con corriente ascendente	Muy costosa.
Fan Jet	Mejor combustión	Utiliza energía eléctrica para el funcionamiento de un ventilador.

Por otra parte, en términos de la combustión de la biomasa, se puede considerar como un proceso neutro en emisiones de CO<sub>2</sub>, debido a que el CO<sub>2</sub> que se libera hacia la atmosfera durante la combustión será el mismo que se ha fijado en la biomasa a través de la fotosíntesis durante el crecimiento de los cultivos sin considerar procesos previos generados a partir de las actividades humanas. Pero aun así, es necesario controlar el proceso de combustión por los humos y partículas de hollín que se genera durante la quema de esta, generando problemas respiratorios en la salud de los usuarios.

### B. Selección y Diseño de estufa.

Para la selección del diseño de la estufa más conveniente a ser utilizada en las zonas campesinas perteneciente a la provincia del Guayas, se ha seleccionado dos alternativas de estufas; tipo cohete y gasificadora, porque ambos diseños pueden generar una mejor combustión durante su funcionamiento (Establecido en la tabla II). Para realizar la selección del diseño más conveniente, se ha optado en elaborar una matriz de decisión donde se analiza y pondera cuatro criterios fundamentales como son; costo, durabilidad, portabilidad y seguridad (Método de jerarquización).

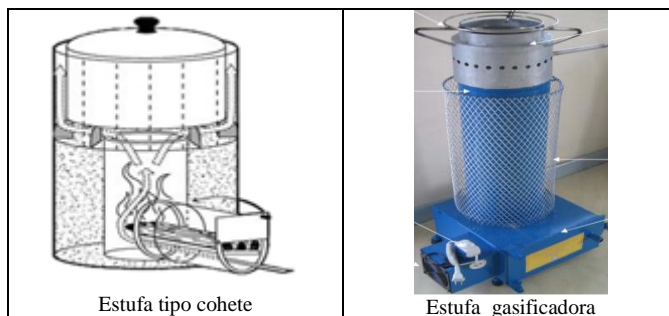


Fig. 3 Estufas tipo cohete y gasificadora  
Fuente : Winiarski, 1982. Alexis Belonio, 2005

Los criterios mencionados serán ponderados, partiendo de establecer la importancia relativa de cada criterio para proceder a comparar cada uno de ellos entre sí. Esta metodología se realiza para determinar el factor de importancia relativa entre criterios (costo, durabilidad, seguridad, portable). En la tabla III se muestra la importancia relativa que se han establecido para ponderar dichos criterios.

TABLA III.  
IMPORTANCIA RELATIVA PARA CADA CRITERIO.

Importancia	Ponderación
Igualmente, importante	1
Significativamente importante	5
Excesivamente más importante	10
Significativamente menos importante	1/5
Excesivamente menos importante	1/10

Una vez analizado el factor de importancia relativa por criterios, en la tabla IV, se muestran el resumen de los resultados de la suma ponderada de cada uno de los parámetros antes expuestos.

TABLA IV.  
FACTORES IMPORTANCIA RELATIVA DE CADA CRITERIO COMPARADO CON CADA ESTUFA.

Estufa	Costo	Durabilidad	Portabilidad	Seguridad	Total
Tipo cohete	0,402	0,044	0,002	0,002	0,450
Gasificadora	0,402	0,044	0,054	0,050	0,550

Como se puede observar en los resultados de análisis de la matriz de ponderación, la estufa gasificadora cumple con los parámetros óptimos para realizar el dimensionamiento y diseño de la estufa propuesta en este proyecto.

### I.B. Diseño de la estufa

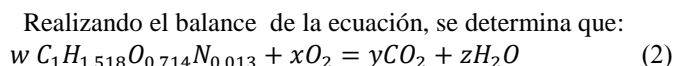
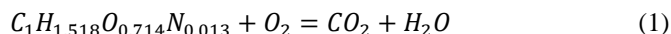
Para empezar con el dimensionamiento de la estufa es necesario determinar la cantidad de aire estequiométrico necesario para el proceso de combustión dentro del reactor, utilizando la ecuación de combustión. Conociendo previamente las composición química de la biomasa sólida. Tal como se ha mencionado en la Sección I –A, la mayor cantidad

de residuos generados en el sector agrícola en la provincia del Guayas es la cascarilla de arroz. A partir de ello, es necesario conocer la composición química de la cascarilla Tabla V, con la finalidad de determinar la cantidad de masa de aire necesaria para poder quemar 1 Kg de cascarilla, además calcular la energía necesaria para la combustión y el tiempo de consumo de la cascarilla. A partir de lo antes determinado se procederá al diseño del reactor (diámetro, altura).

TABLA V.  
COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LA CASCARILLA DE ARROZ

Composición Química de la cascarilla de Arroz				
	C	H	O	N
%Peso	39.1	5.2	37.2	0.6

La ecuación (1) de combustión para la cascarilla de arroz se describe a continuación:



Para determinar los coeficientes de cada molécula se toma que  $w = y = 1$  y se procede a igualar la cantidad de átomos de cada elemento.

Posterior, se realiza el cálculo de las moles totales para la cantidad de C, H y O siendo de 24.96 g/mol total. La cantidad de energía que se debe suministrar en la estufa se determina a través de la expresión;

$$Q_n = \frac{M_c \times E_s}{T} \quad (3)$$

Donde;  $Q_n$ , el calor necesario en Kcal/hr ;  $M_c$ , masa de la comida en kg ;  $E_s$ , la energía específica en Kcal/kg ;  $T$  Tiempo de cocción en horas.

Por otro lado se determina la energía entrante que se refiere a la cantidad de energía liberada por el combustible, es decir, es la cantidad de combustible requerido en la estufa para el proceso de ignición de la biomasa.

$$FCR = \frac{Q_n}{HV_f \times \eta_g} \quad (4)$$

Donde; FCR, Razón de Consumo de Combustible en kg/hr;  $Q_n$ , Calor necesario en Kcal/hr;  $HV_f$  = poder calorífico del combustible en Kcal/kg ;  $\eta_g$ , eficiencia de la gasificadora (%)

**El diámetro de reactor** interno de la estufa, se determina en función de la cantidad de combustible consumida por hora (FCR). La tasa de gasificación varía entre rangos de 110 – 210 kg/m<sup>2</sup>-hr; para el estudio se ha tomando el promedio entre

estos valores [6]. En la ecuación (5) se presenta la expresión para determinar el diámetro del reactor.

$$D = \left( \frac{1.27 FCR}{SGR} \right)^{0.5} \quad (5)$$

Siendo; D, Diámetro del reactor en metros; FCR, Razón de Consumo de Combustible en kg/hr ; SGR, Razón específica de gasificación de la cascarilla de arroz, entre 110 – 210 kg/m<sup>2</sup>-hr, tomando como referencia para el dimensionamiento 160 kg/m<sup>2</sup>-hr.

**La altura del reactor**, se determina a través de la combustión de la biomasa, razón específica de gasificación, densidad y tiempo de combustión.

$$H = \frac{SGR \times T}{\rho_{CA}} \quad (6)$$

Siendo; H, Altura del reactor en metro, SGR, Razón específica de gasificación de la biomasa en kg/m<sup>2</sup>-hr; T, tiempo requerido para consumir la cascarilla de arroz en hr;  $\rho_{CA}$  = densidad de la cascarilla de arroz en kg/m<sup>3</sup> (100 kg/m<sup>3</sup>). Para el diseño inicial se ha considerado que el tiempo que debe tardar la eliminación de 1 Kg de cascarilla sea de aproximado de 40 min.

Para determinar el tiempo requerido para gasificar completamente la cascarilla de arroz, se determina a través de la ecuación (7), donde incluye el tiempo de ignición del combustible y el tiempo para generar el gas, adicional, el tiempo que tardara en combustionar todo el combustible en el reactor .

$$T = \frac{\rho_{CA} \times V_r}{FCR} \quad (7)$$

Siendo; T, Tiempo requerido para consumir la cascarilla de arroz en hr .  $V_r$ , Volumen del reactor en m<sup>3</sup> .  $\rho_{CA}$ , Densidad de la cascarilla de arroz en kg/m<sup>3</sup> . FCR, Razón de Consumo de Combustible en kg/hr.

Por otro parte es necesario determinar la **cantidad de aire necesaria** para gasificar la biomasa. Para este cálculo se utilizará la razón el aire estequiométrico para la cascarilla de arroz con una razón equivalente de 0.3.

$$AFR = \frac{\varepsilon \times FCR \times SA}{\rho_a} \quad (8)$$

Donde; AFR, Razón de flujo de aire m<sup>3</sup>/hr.  $\varepsilon$  = ratio equivalente, 0.3 a 04 utilizando para el análisis el valor de 0.3 . FCR, Razón de Consumo de Combustible en kg/hr . SA, Aire estequiométrico de la cascarilla de arroz.  $\rho_a$ , Densidad del aire, 1.25 kg/m<sup>3</sup>.

Finalmente, se realiza el análisis térmico de la estufa para determinar las pérdidas por convección, conducción del

prototipo y las pérdidas de radiación emitida del calentamiento de la biomasa hacia las paredes.

### C. Construcción.

El cuerpo exterior del prototipo será construido con materiales de acero ASTM-A36, de 3 mm de espesor, siendo cortada y rolada, para posteriormente ser ensamblado al reactor de la estufa. La parte externa esta conformado por dos tubos rolados hechos con plancha ASTM-A36 agujereadas de diámetro de 1 mm, esto permitirá el ingreso de aire en la cámara de combustión (reactor). La unión y fijación de cada parte de la estufa se realizar a través de soldadura. En la tabla VI se muestra cada componente de la estufa y el material con el que fue construido el prototipo.

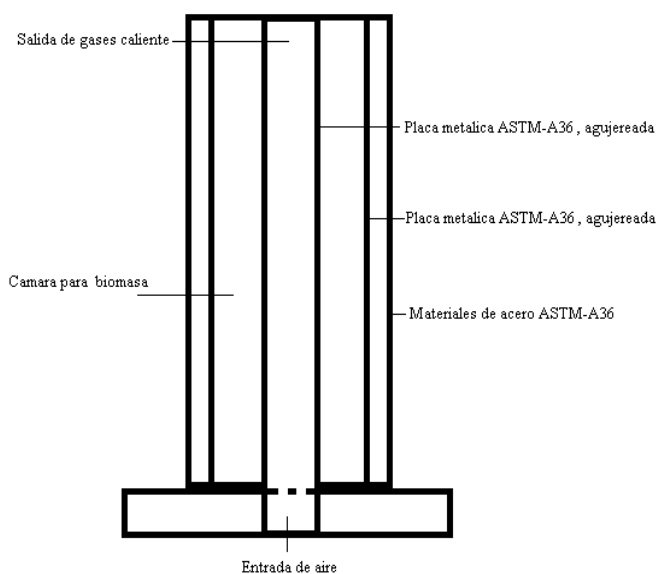


Fig. 4. Esquema del diseño de la estufa

TABLA VI  
COMPONENTES DE LA ESTUFA

Componente de la estufa	Material utilizado en la construcción
Reactor	Plancha de acero ASTM-A36 con agujereada 1 mm diámetro y un paso de 2 mm y espesor de 3 mm
Cilindro exterior	Plancha de acero ASTM-A36 mm de espesor 3 mm
Cilindro porta recipiente y donde se colocar la biomasa	Plancha de acero ASTM-A36 mm de espesor 3mm
Cilindro para entrada y salida de aire	Plancha de acero ASTM-A36 mm de espesor 3mm



Fig. 5. Construcción del prototipo experimental

### D. Pruebas experimentales

Las pruebas de campo de la estufa fueron realizadas en un largo periodo a fin de verificar el correcto funcionamiento de la estufa. A continuación, se detallan los equipos de medición utilizados, la metodología y las mezclas de biomasa:

- **Termocupla.** – Son utilizadas para medir las temperaturas que se generan dentro del reactor, así como en el recipiente de cocción.
- **Balanza.** Equipo utilizado para realizar mediciones de pesaje de la biomasa dentro del reactor y así poder relacionar la cantidad de biomasa utilizada con el tiempo de combustión.
- **Cronómetro.** - Utilizado para medir el tiempo que la biomasa tarda en combustionar dentro del reactor de la estufa

Durante las pruebas de campo se registraron varias variables con la finalidad de determinar la eficiencia de la estufa, siendo estas:

- Peso de biomasa inicial
- Tiempo de consumo de biomasa
- Temperaturas de la biomasa y del agua de cocción
- Peso de las cenizas.

En relación a la medición de la masa de la biomasa, se realiza previamente antes de introducirla en el reactor, este valor será un indicador del tiempo que dure la combustión de la biomasa y la masa de las cenizas.

El tiempo de consumo de la biomasa en el reactor lleno es una variable esencial de las pruebas, ya que esta nos permite estimar la autonomía de funcionamiento de la estufa, y establecer el mínimo tiempo necesario para cocinar los alimentos sin necesidad de recargarla antes de este tiempo. En el proceso de medición de temperaturas se utilizan termocuplas o termopares calibrados, realizando 5 puntos de mediciones en distintas parte de la estufa. Este análisis nos permitirá

determinar el error estimado del análisis de transferencia de calor teórico.

**Mezcla de biomasa sólida.**

Para analizar el funcionamiento de la estufa se realizaron pruebas con cascarillas de arroz y mezclas de biomasa lignocelulosa:

- Utilización del 100% cascarilla de arroz
- Mezcla del 80 % de hojarasca, 20% de cascarilla de arroz
- Mezcla del 90 % de residuos de árboles (ramas secas), 10% de hojarasca
- 60 % de ramas de árboles y 40 % de cascarillas

III. RESULTADOS

A. Dimensionamiento de la estufa

A continuación se presenta los cálculos desarrollado durante la etapa de diseño de la estufa, siendo estos:

TABLA VII  
DIMENSIONAMIENTO DE LA ESTUFA

Parámetros	Valores
Energía necesaria	2600 Kcal/h
Energía entrante	5.1 Kg/h
Diámetro del reactor	20 cm
Altura del reactor	80 cm
Tiempo de combustión	49 min.
Cantidad de aire	1.96 m3/h
Velocidad del aire	1.71 cm/seg
Calor generado	2.5 Kw

B. Pruebas experimentales.

A continuación se presentan los resultados obtenidos de las pruebas de funcionamiento realizadas en la estufa para cuatro distintas muestras. Cabe añadir que cada uno de las pruebas con biomasa se repitieron múltiple veces con el fin de determinar el funcionamiento real del prototipo y a la vez realizar los cambios de diseño del ducto de ingreso de aire. Por otra parte es importante indicar que se registraron el contenido de humedad de la biomasa, siendo de ramas secas un 10-13 %, hojas secas 4%, cascarilla de arroz 14 % de humedad.

**Prueba N°1:** Durante la prueba se llenó el reactor con cascarilla de arroz como se muestra en la Figura 6. La tabla VIII se muestra los valores de temperatura registradas durante esta prueba.



Fig. 6 Prueba con cascarilla de arroz.

TABLA VIII.  
MEDICIÓN DE TEMPERATURAS OBTENIDAS DE PRUEBA DEL PROTOTIPO DE LA ESTUFA CON 100% CASCARILLA

Medición	T ambiente [°C]	T de biomasa [°C]	T interna del reactor [°C]	T del agua [°C]
1	27	820	470	135
2		789	458	128
3		832	435	129
4		789	448	132
5		795	472	134

Como resultado se determinó para una masa de biomasa de 1000 gramos, el tiempo de combustión fue de 47 minutos, con una cantidad de cenizas de 460 gramos.

**Prueba N°2 :** Durante la prueba se llenó la cámara de la estufa con una mezcla de biomasa del 80% de hojarasca y 20% de cascarilla de arroz como se muestra en la figura 7. La tabla IX muestra los valores de las mediciones realizadas.



Fig. 7. Prueba con hojarasca y cascarilla de arroz.

**Digital Object Identifier:** (to be inserted by LACCEI).  
**ISSN, ISBN:** (to be inserted by LACCEI).

TABLA IX.

TEMPERATURAS DE PRUEBA DEL PROTOTIPO DE LA ESTUFA CON MEZCLA DE 20% DE CASCARILLA DE ARROZ Y 80% DE HOJARASCA COMO BIOMASA.

Medición N°	T ambiente [°C]	T de biomasa [°C]	T de la pared del reactor [°C]	T del agua [°C]
1	27	815	471	132
2		796	462	129
3		799	458	127
4		820	445	132
5		814	465	134

Como resultado de esta prueba se determinó que para un peso de biomasa de 1000 gramos se obtuvo un tiempo de combustión de 30 minutos, con una cantidad de cenizas de 210 gramos.

**Prueba N°3 :** Durante la prueba se llenó la cámara de la estufa con una mezcla de biomasa del 90% ramas secas y 10 % de hojarasca como se muestra en la figura 8. La tabla X muestra los valores de las mediciones realizadas.



Fig. 8. Prueba realizadas con ramas secas y hojarascas.

TABLA X.

TEMPERATURAS DE PRUEBA DEL PROTOTIPO DE LA ESTUFA CON MEZCLA DE 90% DE RAMAS SECAS Y 10% DE HOJARASCA COMO BIOMASA.

Medición N°	T ambiente [°C]	T de biomasa [°C]	T de la pared del reactor [°C]	T del agua [°C]
1	27	841	432	139
2		817	443	136
3		720	473	112
4		741	439	123
5		777	440	137

En esta prueba, se estableció que 1000 gramos de biomasa se combustiona en un tiempo de 17 minutos. Por lo que se necesitarían 2661 g de biomasa para alcanzar el tiempo de cocción establecido en la teoría de 47 min. La cantidad de cenizas obtenida en esta prueba fue de 120 gramos.

Finalmente, se realizó el análisis de las mezclas del 1000 gramos que comprende un 60 % de ramas secas (13% humedad) y cascara de arroz un 40 %. Durante la primera hora de combustión se pudo observar que las temperaturas registradas en la entrada de aire, temperatura del gas caliente a la salida y temperatura del gas en el centro del reactor llega un punto de estabilización. Véase figura 9.

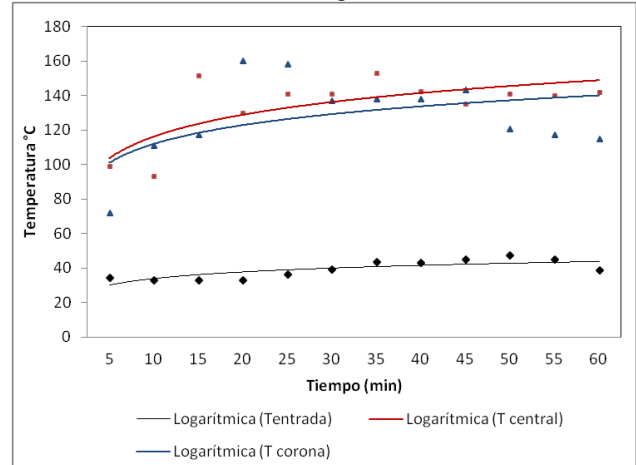


Fig. 9. Prueba realizadas con ramas secas y cascarrilla de arroz

### C. Seguridad del uso de la estufa

El diseño de la estufa cuenta con un cilindro metálico mayor al del reactor en la que se genera un aislamiento térmico brindado por el aire entre los dos cilindros, de esta manera se reducir la temperatura externa de la estufa, sin embargo, esta temperatura ronda los 100°C lo cual sigue representando un riesgo de quemaduras para el usuario.

### D. Costo

La estufa gasificadora tiene un costo 62,20 dólares, contemplando en el análisis el costo de materiales, mano de obra, combustible y pintura.

## IV. CONCLUSIONES

### A. Diseño del equipo experimental

- En base a los resultados obtenidos del análisis de transferencia de calor podemos concluir que para la composición de ramas y hojarascas el calor total transferido y los tiempos de combustión cumplen con los parámetros de diseño, logrando la funcionalidad del prototipo.
- En el funcionamiento del prototipo existen pérdidas por transferencia de calor, estas son debido a la convección y radiación, estas son considerables, sin embargo, la radiación emitida hacia la olla nos

proporciona el calor necesario para el funcionamiento adecuado a pesar de las pérdidas mencionadas.

- A fin de evitar pérdidas de calor y proporcionar al usuario una experiencia de uso más segura, se hace necesaria la implementación de un aislante térmico de mayor resistencia que el aire
- En relación a su portabilidad, a diferencia de una cocina convencional, la estufa gasificadora puede ser desplazada por el usuario sin riesgos de sobre esfuerzo físico, y en comparación con las estufas construidas en barro que no se pueden desplazarse. Es así que la estufa gasificadora representa una ventaja ya que puede ser trasladada con facilidad por el usuario.

#### B. Biomasa

- Los tipos de biomasa sólida analizados son de fácil acceso en las zonas campesinas de la provincia del Guayas, siendo la cascarilla de arroz el mayor residuo agroindustrial del área, y así mismo las hojarascas y ramas secas son de fácil recolección.

#### C. Prueba experimental

- En la prueba con cascarilla de arroz las temperaturas se mantuvieron inicialmente estables, sin embargo, se observó un decremento en la intensidad de la llama después de un intervalo de tiempo, produciendo mediciones de temperatura menores a las iniciales, sin que se hubiese combustionado en su totalidad la biomasa dentro del reactor.
- En la prueba realizada con la mezcla del 80% hojarascas y 20% cascarilla de arroz, las temperaturas se mantuvieron constantes hasta que se hubiese combustionado en su totalidad la biomasa dentro del reactor. De igual manera ocurrió con la composición de 90% ramas secas y 10% hojarascas.

#### D. Emisión de la combustión de la biomasa sólido

- Durante la combustión de la cascarilla de arroz, se observó varias fases de combustión. La fase inicial se produjo una combustión con baja emisión de gases, dicha emisión fue aumentando visiblemente con el tiempo (humo gris), hasta finalizar con una disminución en la intensidad de la llama, permitiendo que no toda la biomasa sea quemada. Esto se produce por la falta de aire o de remoción de la biomasa con la finalidad de alcanzar su máxima capacidad de quemado.
- El empleo de hojarascas y cascarilla de arroz, mejoró e incrementó la velocidad del proceso de combustión

de la biomasa, sin embargo, se observó una emisión constante de humo gris.

- El empleo de ramas secas y hojarascas, disminuyó el tiempo del proceso de combustión en comparación a los resultados obtenidos en las otras pruebas de biomasa, además la emisión de gases fue mínima durante todo el proceso (humo transparente).

#### E. Recomendaciones

Para futuros trabajos se pretende realizar comparaciones del tiempo de ignición y temperaturas del diseño del prototipo en relación a las estufas que utilizan combustibles fósiles.

#### REFERENCIAS

- [1] Rodolfo Díaz, OLADE. Uso Racional y Sostenible de la leña en los países de SICA. Octubre 2013
- [2] INEN. Resultados del Censo 2010 de población y vivienda en el Ecuador. 2010.
- [3] Tthos, *TLUD Stoves - Within a Classification of Stoves*, 2011, en línea [22 de mayo del 2016]
- [4] Ministerio Coordinador de Producción, Empleo y Competitividad; Ministerio de Electricidad y Energía Renovable; e, Instituto Nacional de Preinversión. Atlas Bioenergético del Ecuador, 2015
- [5] Anderson, P. S. (Febrero de 2011). [http://ethoscon.com/pdf/ETHOS/ETHOS2011/Anderson\\_TLUDs2011ClassificationStoves.pdf](http://ethoscon.com/pdf/ETHOS/ETHOS2011/Anderson_TLUDs2011ClassificationStoves.pdf)
- [6] Madrid Vicente, LA BIOMASA Y SUS APLICACIONES ENERGETICAS, Madrid, Primera Edición, Alianza Ediciones, 2012.
- [7] Aracil, Bahillo. TECNOLOGÍAS PARA EL USO Y TRANSFORMACIÓN DE BIOMASA ENERGÉTICA. Alicante, AMV Ediciones, 2016.
- [8] Zong Zhang, Yixiang Zhand. Systematic and conceptual errors in standards and protocols for thermal performance of biomass stoves. *El Sevier, Renewable and Sustainable Energy Reviews*. November 2016.
- [9] R. Suresh, V.K Sing. Evaluation of the performance of improved biomass cooking stoves with different solid biomass fuel types. *ELSEVIER. Biomasa and Bionergy*. Volume 95. p.p 27-34. December 2016.
- [10] Yuanch Chen, Guofeng. Efficiencies and pollutant emissions from forced-draft biomass-pellet semi-gasifier stoves: Comparison of International and Chinese water boiling test protocols. *ELSEVIER. Energy for Sustainable Development*. Volumen 32. Pp 22-30. June 2016