

CONSTRUCCIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE ESTUFA CON SISTEMA DE MICROGASIFICACIÓN

Walter H. Gonzales Arnao ^{1*}, Carlos A. Salvador Tixe ², Rafael L. Espinoza Paredes ³

¹ Facultad de Arquitectura, Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Perú

² Facultad de Ciencias, Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Perú

³ Centro de Energías Renovables y Uso Racional de la Energía (CER-UNI), Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Perú

RESUMEN

El presente trabajo de investigación consiste en la evaluación de una estufa que utiliza tecnología de microgasificación y utiliza diferentes tipos de biomasa como combustible. El objetivo fundamental de este trabajo fue diseñar, construir y caracterizar térmicamente una estufa modelo T-LUD y compararlo con otros modelos que trabajan con el mismo sistema. La estufa fue diseñada para que trabaje eficientemente y aproveche el potencial energético de los residuos de biomasa que se encuentran en las zonas altoandinas del Perú. Para cuantificar el desempeño de la estufa se utilizó el protocolo WBT modificado para estufas T-LUD, que consiste básicamente en hervir cinco litros de agua. Se utilizó como combustible leña de eucalipto. Como resultado la estufa presenta mejor desempeño en el campo, consume menor leña (0.777 kg), presenta menor tiempo punto de ebullición del agua (13.30min) y produce mayor biocarbón (0.210 kg). Presenta indicadores de potencia y rendimiento (17.67 kW y 0.870 °C/litro*kW respectivamente). En cuanto a la aceptabilidad el 90% de las familias encuestadas están dispuestas a adoptar esta tecnología. Se concluye que la estufa en general presenta mejor desempeño, debido a su diseño, mayor concentración de calor en la cámara de combustión, menor consumo de leña y tiempo de cocción.

Palabras clave: Caracterización de estufa T-LUD, comparación de estufas, aceptabilidad de estufa, sistema de microgasificación.

1. INTRODUCCIÓN

El uso tradicional de los combustibles de biomasa (madera, carbón vegetal, residuos de cosechas, desechos domésticos y estiércol) es una fuente importante de contaminación del aire dentro de los hogares en aproximadamente una mitad de la población mundial, afectando en su mayoría a los países en desarrollo [1]. Esta contaminación dentro del hogar es un factor de riesgo de las infecciones respiratorias agudas (IRA) en niños menores de 5 años [2] y en consecuencia, también son causa importante de la mortalidad infantil.

Las cocinas precarias de los hogares que utilizan estos combustibles por lo general se ubican en el suelo utilizando piedras y objetos de barro [3].

El uso de combustibles más limpios es caro para las familias pobres y no puede ser una opción para muchos de ellos por lo menos en los próximos años. Por lo tanto, la ventilación de las viviendas [4] y mejorar la calidad de las cocinas son intervenciones viables.

Hay un reporte en Perú que indica que el uso de cocinas mejoradas en hogares se asocia con una reducción significativa de los contaminantes del aire dentro del hogar y con una reducción de las infecciones respiratorias agudas [5]. La reducción de la producción de contaminantes del aire interior se explicaría por una combustión más completa de los combustibles en las

cocinas mejoradas, en consecuencia se reduciría la cantidad necesaria de combustibles de biomasa y se haría más eficiente su uso [6].

En comunidades rurales del Perú, la leña aun predomina en su uso como combustible para la cocción de alimentos y calefacción, siendo en mayor medida su uso en comunidades pobres extremas como lo presenta el informe técnico del INEI 2017 [7] y cuyas frecuencias de uso para el 2016 se muestra en la figura 1.

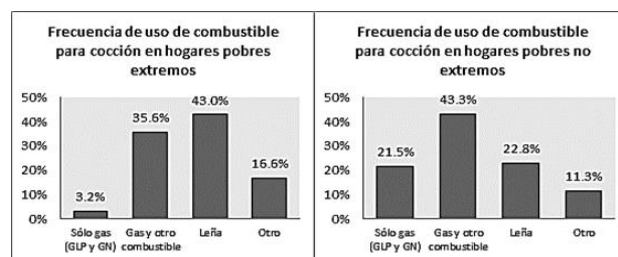


FIGURA 1. Frecuencia de uso de combustible para cocción de alimentos. Fuente: INEI, 2017.

¿Por qué el uso de este combustible?, en primer lugar, los costos fijos de las energías altas cuestan más. Segundo, hogares muy pobres no tienen los aparatos que se necesitan para consumir energías más avanzadas. Tercero, los hogares que dependen de residuos agrícolas y animales, en su mayoría, no tienen acceso a la infraestructura de electricidad o el mercado

* Correspondencia:

Correo electrónico: waltergonzalesarnao@gmail.com

de biocombustibles. Por estos motivos, los hogares urbanos son más propensos a usar energías más altas en la escalera energética debido a que existen economías a escala que permiten reducir costos fijos para el acceso a energías más eficientes [8]. Un hogar del sector rural quema en promedio 10 kg de leña por día. Por cada kg de leña consumido se emite a la atmósfera 1.8 kg de CO₂, lo que en un año equivale a 6.6 toneladas de CO₂ emitido al ambiente [9].

Cuando no se tiene planeado un uso específico de la biomasa, ella se convierte en un problema en cuanto a su manejo. La mejor manera de aprovechar cualquier tipo de biomasa de manera eficiente es cuando se combustiona por medio de gasificadores.

El Perú cuenta con el reglamento proporcionada por SENCICO para evaluar el desempeño de cocinas mejoradas [10]. Sin embargo, no existen normas para la evaluación de estufas con sistema de microgasificación. Las estufas con sistema de microgasificación son una gran alternativa tecnológica viable que no se encuentran difundidas en las poblaciones rurales del Perú. Por consiguiente, contar con un modelo de estufa que permita ahorrar leña y disminuir la emanación de humo contaminante brindará una mejor calidad de vida a los pobladores y permitirá combatir las enfermedades respiratorias por causa del humo en las viviendas que deterioran la salud de los pobladores, principalmente de mujeres y niños.

Para tal motivo, el presente trabajo de investigación aborda este tema y se plantea la construcción y caracterización de un prototipo de estufa con sistema de microgasificación basado en el principio T-LUD diseñada para que trabaje eficientemente y sea una gran alternativa tecnológica y viable para el manejo de la biomasa residual en las zonas altoandinas del Perú. Como resultado final del trabajo se presenta la estufa construida, la caracterización energética de la misma y resultados de aceptabilidad de la estufa en campo rural.

2. FUNDAMENTO TEÓRICO

El T-LUD (Top Lit Up Draft), es una cámara de combustión microgasificadora que genera menores emisiones de gases efecto invernadero (GEI), en comparación con otros modelos de estufas mejoradas de biomasa. Esta cámara de combustión genera calor con pedazos pequeños de biomasa sólida como desperdicios de cultivos, “chips” de madera y “pellets” por nombrar algunos [11].

En un microgasificador se puede emplear una amplia variedad de residuos orgánicos (biomasa), inclusive aquellos que no se pueden emplear en estufas [12]. El uso de gasificadores permite que el humo que se genera de la combustión de la biomasa se queme [13]. Un gasificador es un dispositivo en el cual se dan procesos termoquímicos a través de la combustión de biomasa para obtener gases combustibles con bajo poder calorífico comparado al del gas natural [14]. La

calidad del gas producto de la gasificación está asociada al poder calorífico, cantidad de alquitrán y material particulado presente en la biomasa [15]. Durante este proceso se verifican cuatro etapas relacionadas con la combustión de la biomasa que son la evaporación del agua, la pirolisis que da lugar a vapores combustibles y biocarbón (biochar), y cuando se dispone de suficiente oxígeno el biocarbón puede llegar a convertirse en ceniza quemando los vapores y gases generados con una mezcla apropiada de oxígeno Roth (2011).

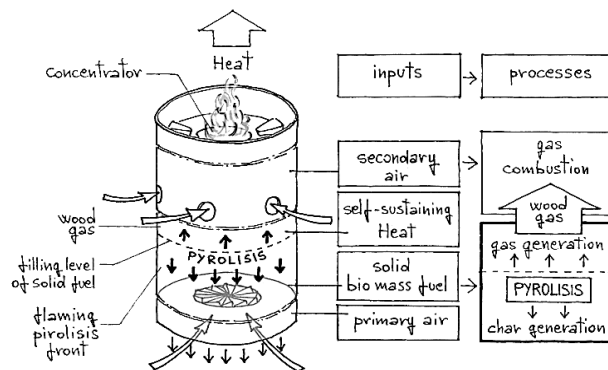


FIGURA 2. Esquema de las fases de combustión de una estufa de microgasificación [16].

El biocarbón es un subproducto que al ser mezclado con el suelo mejora significativamente la productividad de los cultivos y reduce la lixiviación de nutrientes [17]. Además, se ha demostrado que el biochar no llega a ser consumido en los procesos de degradación biológica como en el caso de los fertilizantes [18].

La diferencia entre las características de estufas T-LUD de otras estufas está en el ingreso de oxígeno primario que da inicio a la combustión inicial, la producción de gases (humo) y el ingreso de oxígeno secundario que al entrar en contacto con los gases produce una combustión secundaria. Considerando que los flujos de oxígeno primario y secundario en el gasificador son separados a diferencia del proceso de la mayoría de estufas donde estos se mezclan. El control de flujo de oxígeno permite limpiar la combustión, además controla el ingreso de oxígeno reduciendo el enfriamiento y manteniendo el calor [19].

Existen en el mercado diferentes modelos de estufas de gasificación. Cada modelo se diferencia en la geometría de la cámara de combustión como en la geometría de la cámara de reacción; otra característica de cada modelo es el mecanismo del suministro de aire así como la geometría del quemador, y el material de la cámara de combustión [20]. Estas estufas son normalmente prefabricadas y vendidas una vez ensambladas por completo, pero también pueden construirse con materiales locales como por ejemplo latas de conservas. Si se compran son bastante caras, pero son más duraderas y eficientes, con lo que los usuarios pueden ahorrar más combustible. Los

microgasificadores son eficientes y alcanzan los índices de emisiones más bajos entre las cocinas de tiro natural, con un ahorro de energía y emisiones de hasta el 70 % y 90 % respectivamente en comparación con los fuegos de tres piedras (J. Barbieri et al. ,2015).

3. DESARROLLO EXPERIMENTAL

3.1. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL PROTOTIPO DE ESTUFA

Para la construcción del primer prototipo nos basamos en el modelo de estufa denominada “Champion-2008” TLUD Gasifier Cookstove desarrollada por PhD Paul S. Anderson probado con éxito en Estados Unidos [21].

Existe documentación gráfica: bosquejos y dibujos explicativos de la construcción de la estufa y su funcionamiento, también existe evidencia fotográfica de la misma (Ver Figura 3). En cuanto a los materiales la estufa “Champion-2008” TLUD Gasifier Cookstove es de plancha metálica de acero inoxidable. En la figura 4, se puede apreciar los componentes de las estufa y funcionamiento “Champion-2008” TLUD Gasifier Cookstove.



FIGURA 3. Vista (Izq.) Estructura completa de cocina: “Champion-2008” TLUD Gasifier Cookstove; (Der.) vista interior de la cocina - cámara de combustión. Fuente: P.S. Anderson, 2009.

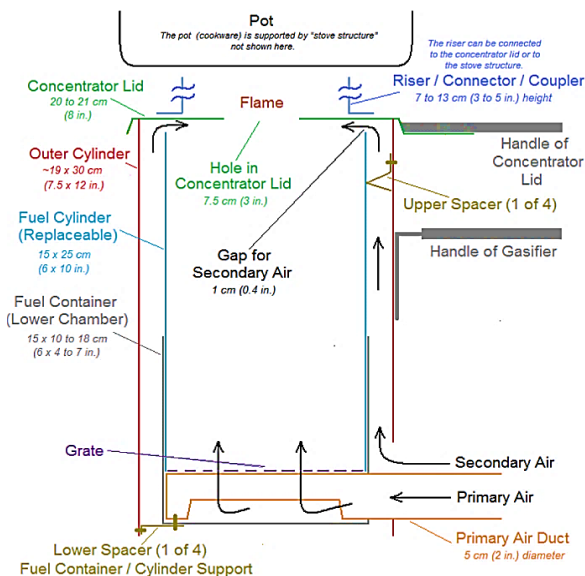


FIGURA 4. Componentes y funcionamiento de la estufa Champion TLUD Gasifier Cookstove. Fuente: P.S. Anderson, 2009.

La estufa se encuentra constituido por dos cilindros concéntricos (paredes exterior e interior). La estufa tiene por dimensiones: aproximadamente de 8 pulgadas (200 mm) de diámetro y de 8 a 12 pulgadas (200 a 300 mm) de alto. La estufa dispone de una tapa con mango metálico para su fácil manipulación, en su centro tiene un agujero circular por donde sale la llama y donde se coloca la olla, posee cámara de combustión, cenicero de malla metálica en forma de tambor para el ingreso del biocarbón producido. Asimismo, cuenta con una extensión tubular metálico en la parte inferior por donde ingresa aire a la cámara de combustión. La estufa exteriormente posee un mango de madera para poder manipularse y desplazarse.

En base a la información recabada, se logró diseñar y construir el primer prototipo de estufa con sistema de microgasificación, construida con plancha metálica de acero inoxidable (Ver Figura 5).



FIGURA 5. Vista (Izq.) Componentes de la estufa T-LUD preliminar construido; (Der.) vista interior de la estufa - cámara de combustión. Fuente: Elaboración propia.

La estufa construida presenta diferencias respecto a las dimensiones de la estufa Champion T-LUD, tiene por dimensiones 30 cm de diámetro, 45 cm de altura y 3 kg de masa; se encuentra constituido por dos cilindros concéntricos separados 2 cm. La tapa metálica presenta en el centro un orificio de 10 cm de diámetro.

Después de acoplar cada componente de la estufa, se le realizó la prueba de encendido en Laboratorio del CER-UNI, para lo cual usamos trozos de leña y papel. Se pudo constatar que presentaba problemas en el momento de prender la leña y esta humeaba excesivamente durante el inicio de la prueba lo que nos dificultó continuar con la misma. Ver Figura 6.



FIGURA 6. Vista de la Prueba de encendido desarrollada al prototipo preliminar construido. Fuente: Elaboración propia.

Estos problemas fueron revisados y analizados, se llegó a la conclusión que el prototipo de estufa construida presentaba problemas de diseño en los ductos de aire, tanto en el ducto de aire primario como en el secundario; es decir, se encontraba mal dimensionado. La falta de oxígeno en la cámara de combustión provocaba que la estufa humeara y por consiguiente el sistema trabajara inadecuadamente, por lo que se optó por realizar cambios en el diseño para un mejor funcionamiento de la estufa.

Para poseer mayor información y poder mejorar nuestro prototipo preliminar, se optó por buscar en el mercado estufas con sistemas de microgasificación para analizarlo y caracterizarlo. Se adquirió una estufa patentada y comercializada por la empresa "Solo Stove Campfire" procedente de los Estados Unidos (Ver Figura 7), este modelo es desmontable y permite analizar las partes que la componen y su funcionamiento. Se le realizaron pruebas de ensayo para caracterizarlo. El análisis y los resultados obtenidos, fueron un gran aporte para mejorar el diseño del prototipo de estufa preliminar construido.

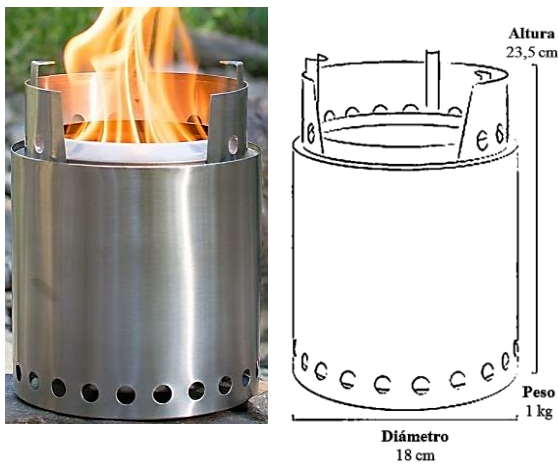


FIGURA 7. Imagen de la estufa comercial "Solo Stove Campfire" adquirida. Fuente: Elaboración propia.

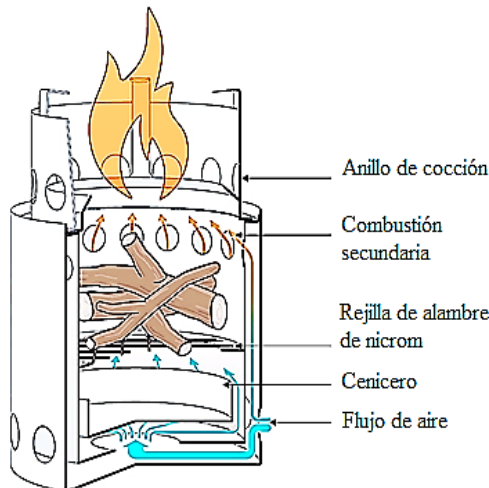
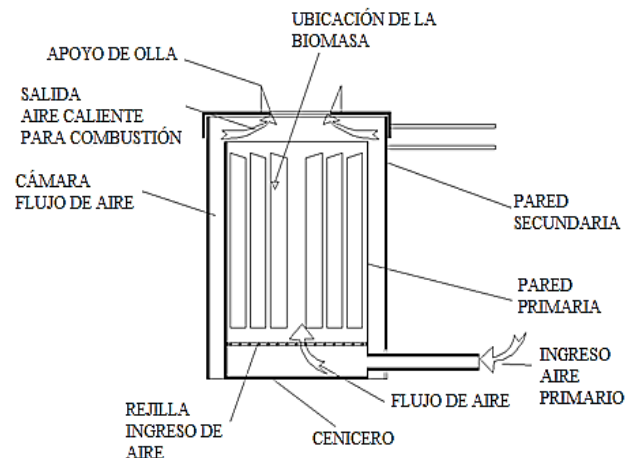


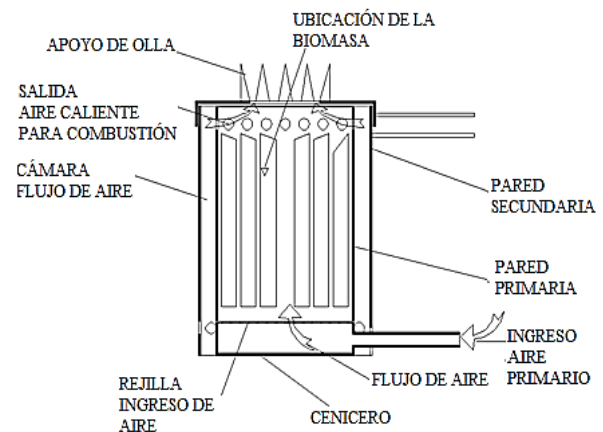
FIGURA 8. Esquema del funcionamiento de la estufa comercial Solo Stove adquirida. Fuente: Elaboración propia.

Con base en la información obtenida de la caracterización de la estufa comercial, se procedió a mejorar el diseño de nuestro prototipo preliminar. Se realizaron varios ajustes y se modificó el ingreso de aire al sistema, obteniéndose la "Estufa prototipo 1" (Ver Figura 9). De acuerdo a los resultados de la evaluación desarrollada a la estufa prototipo 1, se determinó continuar con la mejora del sistema y se le realizaron cambios basados en el diseño de la estufa comercial Solo Stove Campfire para favorecer la circulación del gas, lográndose construir la "Estufa prototipo 2" (ver Figura 10).



$$\text{Área de agujeros, ingreso de aire : } A_{\bullet} = 11.40 \text{ cm}^2$$

FIGURA 9. Vista del diseño de la estufa construida "Prototipo 1". Fuente: Elaboración propia.



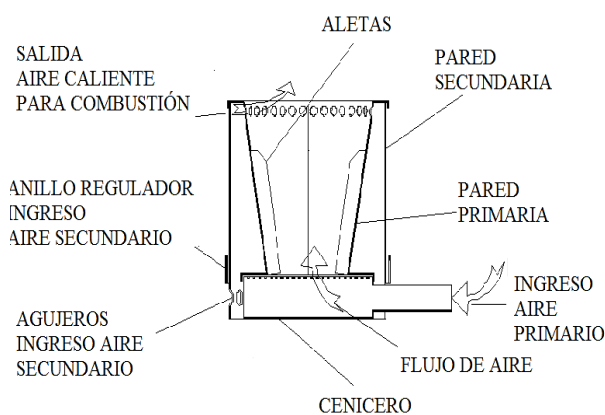
Modificaciones :

- 1.- Ampliación altura de la pared primaria.
- 2.- Adición de 22 agujeros de 1/2" de diámetro en la parte inferior de la pared secundaria.
- 3.- Adición de 20 agujeros de 1/2" de diámetro en la parte superior de la pared primaria.
- 4.- Extensión altura del apoyo de olla de 2cm a 4 cm.
- 5.- Ampliación diámetro agujero de la tapa de 10 a 20 cm.

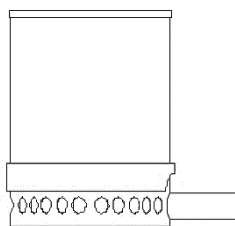
$$\text{Área de agujeros, ingreso de aire : } A_{\bullet} = 39.27 \text{ cm}^2$$

FIGURA 10. Vista del diseño de la estufa construida "Prototipo 2". Fuente: Elaboración propia.

Según el análisis de los resultados de las pruebas desarrolladas a la estufa prototipo 2, nos mostraba que el diseño podía mejorarse y por ende el desempeño de la estufa. Se optó por aumentar y controlar el ingreso de aire al sistema. Asimismo, de optimizar la transferencia de calor de la cámara de combustión a la olla. Con todo estos cambios realizados al diseño de la estufa prototipo 2, se logró construir el prototipo final “Estufa modificada” (ver Figuras 11).



Área de agujeros, ingreso de aire : $A_{\bullet} = 122.88 \text{ cm}^2$



Modificaciones :

- 1.- Ampliación diámetro de los 22 agujeros ubicados en la parte inferior de la pared secundaria.
- 2.- Ampliación de la cámara de aire ubicado entre la pared primaria y secundaria.
- 3.- Reducción la base inferior de la pared primaria, tomando esta la forma de un tronco de cono. Este cambio en el diseño tiene la finalidad que se genere el efecto Benoulli en la salida de aire caliente; es decir, provocar que el aire fluya a mayor velocidad.
- 4.- Adición de aletas al interior de la pared primaria.
- 5.- Construcción de una olla eficiente, presenta aletas adheridas en su base con la finalidad de mejorar la transferencia de calor entre la cámara de combustión de la estufa y la olla.

FIGURA 11. Vista del diseño Vista diseño interior y exterior del prototipo final de estufa construida con sistema de microgasificación “Estufa Modificada”. Fuente: Elaboración propia.

3.2. PRUEBAS DESARROLLADAS

Las pruebas de caracterización de las estufas se llevaron a cabo en las instalaciones del Laboratorio del Centro de Energías Renovables de la Universidad Nacional de Ingeniería (CER-UNI), distrito del Rímac, Provincia de Lima, región Lima y en la comunidad de San Francisco de Raymina (SFR) localizada en el distrito de Huambalpa, Provincia de Vilcashuamán, región

Ayacucho. La comunidad se ubica sobre los 3700 m s.n.m.

Las pruebas desarrolladas tuvieron lugar durante el periodo comprendido entre los meses de enero a octubre de 2017.

En el proceso de evaluación de las estufas con sistema de microgasificación sólo se utiliza la primera fase del protocolo WBT 4.2.3 (Water Boiling Test) [22], denominado “Arranque en frío”, en ella la cantidad de combustible agregada al inicio determina el tiempo total de cocción y de la prueba. Por esta razón no se puede aplicar todas las fases del protocolo WBT en estos tipos de estufas. Por tanto, teniendo siempre presente esta observación, se pueden desarrollar las pruebas.

La prueba de Arranque en frío, consiste básicamente en hervir 5 litros de agua en una olla sin tapa en un entorno controlado. Se anotan la temperatura inicial ambiental y de la agua contenida en la olla. Asimismo, se registran el tiempo hasta que el agua llegue al punto de ebullición, la temperatura de ebullición del agua, volumen final del agua en la olla, cantidad de leña consumida, cantidad de ceniza y biocarbón producido y el tiempo total de la prueba. Con todo estos parámetros se logra calcular las características térmicas de las estufas estudiadas, así como también se logra conocer el desempeño de las mismas. Para el proceso de evaluación, se contó con el apoyo del CER-UNI, dicha institución nos facilitó equipos e instrumentación requeridos para el desarrollo de las pruebas experimentales.

TABLA 1. Rangos y resolución de los equipos e instrumentación empelada.

Equipos e Instrumentación	Rango	Resolución
Multímetro digital Fluke 179	-40°C/+400°C	0.1°C
Termómetro digital IR Fluke 561	-40°C/+550°C	0.1°C
Termocupla Tipo K	-50°C/+200°C	0.1°C
Báscula de cocina	0kg/10kg	0.05kg
Cronómetro CASIO HS-80TW-1EF	0h/10h	1/1000 seg

Fuente: CER-UNI.

En cuanto al combustible utilizado para las pruebas, se empleó leña de eucalipto, el cual fue adquirido en una tienda distribuidora de la ciudad de Lima, dicha tienda en sus especificaciones indica que la leña tiene las características que se muestran en la Tabla 2.

TABLA 2. Especificaciones del combustible empleado.

Características del combustible	
Tipo de leña	Eucalipto
Humedad	< 20%
Poder Calorífico (promedio)	3900 kg/kJ

Fuente: Elaboración propia.

Se llevaron a cabo un total de 6 pruebas experimentales por cada estufa estudiada tanto en laboratorio como en campo rural, en esta última se desarrollaron en condiciones de uso cotidiano.

Las evaluaciones estuvieron distribuidas de la manera siguiente: 3 pruebas repetidas en ambiente abierto y 3 pruebas repetidas en un ambiente cerrado. Se obtuvieron como resultado las características térmicas de las mismas, las cuales fueron analizadas y comparadas para conocer el desempeño de cada una. Asimismo, se elaboraron las curvas Temperatura vs Tiempo del calentamiento de agua y se graficó la producción de biocarbón.

Para poder contar con una mejor información del funcionamiento de las estufas analizadas se propone la incorporación de 2 nuevos indicadores:

Indicador de resultado (Ir), indica el incremento de temperatura en el agua por volumen.

Indicador de rendimiento (IR), expresa el incremento de temperatura logrado en el agua (°C/litro) por kg de leña y tiempo de calentamiento (°C/litro*kW).

Los Indicadores de uso de leña (Iul) e indicador de potencia de estufa (Iw) que se mencionan en las características térmicas de la estufa, son llamados también por otros autores como: velocidad de combustión o tasa de incineración (g/min) y potencia de fuego de la estufa (W).

Finalmente, se capacitó a los pobladores de la comunidad en uso y manejo de la estufa propuesta y se

Definición de los Indicadores:

- Indicador de resultado: I_r (°C/litros)

$$= \frac{\Delta \text{Temperaturas}}{\text{Masa de agua final}} = \frac{(\text{Tmáx agua} - \text{Tinicial agua})(\text{°C})}{\text{Volumen de agua (litros)}}, \quad (1)$$

- Indicador de uso de leña / Velocidad de combustión: I_{ul} (kg/min)

$$= \frac{\text{Masa de combustible usado (kg)}}{\text{Tiempo punto ebullición agua (min)}}, \quad (2)$$

- Indicador de potencia de la estufa/potencia fuego de la estufa: I_w (kW)

$$= (I_{ul})_x = (I_{ul})_x \left(300 \frac{\text{kW} \cdot \text{min}}{\text{kg}} \right), \quad (3)$$

- Indicador de rendimiento: IR (°C/(litros*kW))

$$= \frac{I_r (\text{°C/litros})}{I_w (\text{kW})}, \quad (4)$$

desarrolló una encuesta de aceptabilidad de la estufa construida. Se encuestaron a 20 pobladores de SFR.

4. RESULTADOS Y ANÁLISIS

TABLA 3. Datos estadísticos Características térmicas de las estufas evaluadas en Laboratorio CER-UNI, Lima.

Características Térmicas	T-LUD Solo Stove		Estufa Prototipo 1		Estufa Prototipo 2		Estufa Modificada	
	Ambiente abierto	Ambiente cerrado	Ambiente abierto	Ambiente cerrado	Ambiente abierto	Ambiente cerrado	Ambiente abierto	Ambiente cerrado
Humedad del combustible : Eucalipto (%)	< 20	< 20	< 20	< 20	< 20	< 20	< 20	< 20
Masa del combustible (kg)	1.100	0.927	1.15	0.975	0.825	0.758	0.875	0.825
Temperatura Ambiente (°C)	26.40	26.20	26.80	27.20	29.50	29.40	27.70	28.20
Temperatura del agua (°C)	25.20	25.00	25.90	25.80	26.60	27.00	27.30	27.10
Temperatura máxima del agua (°C)	99.30	98.77	98.90	98.40	98.80	99.10	98.80	98.77
Masa de la olla con el agua (kg)	5.277	5.293	5.300	5.363	8.392	8.408	8.325	8.275
Masa del agua final (kg)	4.577	4.593	4.600	4.663	4.842	4.858	4.812	4.825
Masa de la ceniza o el biochar (kg)	0.142	0.078	0.208	0.108	0.125	0.085	0.125	0.133
Tiempo punto de ebullición (minutos)	31.30	20.00	28.00	22.00	23.70	18.00	21.30	19.30
Tiempo total de la prueba (minutos)	40.00	26.00	34.00	28.00	27.00	22.70	27.70	25.00
Área de agujeros de ingreso de aire (cm ²)	15.68	15.68	11.4	11.4	39.37	39.37	122.88	122.88
Indicador de resultado (Ir)* °C/litros	16.190	16.061	15.870	15.569	14.911	14.841	14.859	14.853
Indicador de uso de leña (Iul) kg/min	0.0351	0.0464	0.0411	0.0443	0.0348	0.0421	0.0411	0.0427
Indicador de potencia (Iw) kW	10.543	13.905	12.321	13.295	10.443	12.633	12.324	12.824
Indicador de rendimiento (IR)* °C/litros*kW	1.536	1.155	1.288	1.171	1.428	1.175	1.206	1.158

(*) : Indicadores propuestos para medir el desempeño de las estufas.

TABLA 4. Producción de biocarbón: Resultado de las pruebas desarrolladas a las estufas en Laboratorio CER-UNI, Lima.

Combustible : Eucalipto humedad : < 20%	Tipos de estufas evaluadas en Laboratorio CER-UNI, Lima				
		T-LUD Solo Stove	Estufa Prototipo 1	Estufa Prototipo 2	Estufa Modificada
	Producción de biocarbón (kg)	Ambiente abierto	0.142	0.208	0.125
	Ambiente cerrado	0.078	0.108	0.085	0.133

TABLA 5. Datos estadísticos Características térmicas de las estufas evaluadas en Campo Rural Comunidad San Francisco de Raymina, Ayacucho.

Características Térmicas	T-LUD Solo Stove		Estufa Prototipo 1		Estufa Prototipo 2		Estufa Modificada	
	Ambiente abierto	Ambiente cerrado	Ambiente abierto	Ambiente cerrado	Ambiente abierto	Ambiente cerrado	Ambiente abierto	Ambiente cerrado
Humedad del combustible : Eucalipto (%)	< 20	< 20	< 20	< 20	< 20	< 20	< 20	< 20
Masa del combustible (kg)	1.000	0.975	1.008	0.875	0.807	0.758	0.790	0.777
Temperatura Ambiente (°C)	14.70	13.30	15.30	10.70	13.87	10.80	14.03	11.73
Temperatura del agua (°C)	14.20	12.30	14.80	10.80	13.90	11.43	13.73	12.37
Temperatura máxima del agua (°C)	88.30	88.30	88.30	88.20	88.73	87.40	87.83	87.47
Masa de la olla con el agua (kg)	5.35	5.400	5.383	5.367	8.358	8.392	8.417	8.400
Masa del agua final (kg)	4.65	4.700	4.683	4.667	4.808	4.842	4.867	4.850
Masa de la ceniza o el biochar (kg)	0.268	0.225	0.275	0.250	0.25	0.233	0.210	0.207
Tiempo punto de ebullición (minutos)	22.00	19.30	18.00	17.30	16.70	14.70	13.30	13.30
Tiempo total de la prueba (minutos)	28.00	25.00	24.00	23.30	22.70	20.70	19.30	19.30
Área de agujeros de ingreso de aire (cm2)	15.68	15.68	11.4	11.4	39.37	39.37	122.88	122.88
Indicador de resultado (Ir)* °C/litros	15.935	16.170	15.695	16.585	15.564	15.690	15.225	15.485
Indicador de uso de leña (Iul) kg/min	0.0455	0.0505	0.0560	0.0506	0.0483	0.0516	0.0594	0.0584
Indicador de potencia (Iw) kW	13.636	15.155	16.800	15.173	14.497	15.469	17.820	17.526
Indicador de rendimiento (IR)* °C/litros*kW	1.169	1.067	0.934	1.093	1.074	1.014	0.854	0.884

(*) : Indicadores propuestos para medir el desempeño de las estufas.

TABLA 6. Producción de biocarbón: Resultado de las pruebas desarrolladas a las estufas en Campo Rural San Francisco de Raymina, Ayacucho.

Combustible : Eucalipto humedad : < 20%	Tipos de estufas evaluadas en Campo Rural San Francisco de Raymina, Ayacucho			
	T-LUD Solo Stove	Estufa Prototipo 1	Estufa Prototipo 2	Estufa Modificada
Ambiente abierto	0.268	0.275	0.250	0.210
Ambiente cerrado	0.225	0.250	0.233	0.207

TABLA 7. Datos estadísticos temperatura vs tiempo pruebas desarrolladas en laboratorio del CER-UNI.

Tiempo (min)	Temperaturas (°C)							
	T-LUD Solo Stove		Estufa Prototipo 1		Estufa Prototipo 2		Estufa Modificada	
	Ambiente abierto	Ambiente cerrado	Ambiente abierto	Ambiente cerrado	Ambiente abierto	Ambiente cerrado	Ambiente abierto	Ambiente cerrado
0	25.2	25.0	25.9	25.8	26.6	27.0	27.4	27.4
2	27.2	28.5	28.5	29.6	29.8	30.4	31.2	31.8
4	31.5	33.9	32.6	34.5	35.1	37.1	37.3	38.2
6	37.2	41.9	38.9	41.9	42.6	46.6	44.2	46.7
8	43.9	50.8	46.9	49.8	51.8	57.8	52.4	56.6
10	50.9	61.0	55.7	59.6	62.6	70.1	60.6	67.0
12	58.4	72.6	64.5	70.6	72.8	81.4	69.7	77.5
14	66.0	83.5	72.5	81.6	81.9	90.4	79.4	86.8
16	73.2	91.8	79.7	90.1	88.9	96.1	87.4	94.1
18	79.3	96.7	85.7	95.7	93.9	98.6	94.0	98.1
20	84.5	98.4	90.4	97.7	97.0	98.9	97.7	98.8
22	88.9	98.7	94.3	98.2	98.4	98.8	98.8	98.7
24	92.0	98.6	96.5	98.2	98.6	98.9	98.6	98.3
26	94.5	98.2	98.2	98.5	98.5		98.2	
28	96.3		98.8	98.9	98.1			
30	97.5		98.8					
32	98.3		98.4					
34	98.7		98.6					
36	98.8							
38	98.8							
40	98.7							

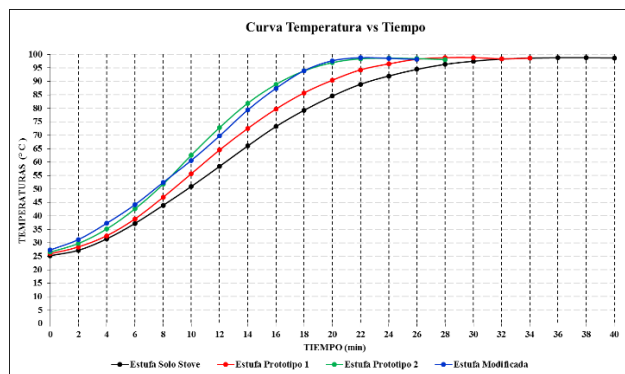


FIGURA 12. Comparación de curvas Temperatura vs Tiempo de las pruebas desarrolladas a las estufas en Laboratorio del CER-UNI (ambiente abierto).

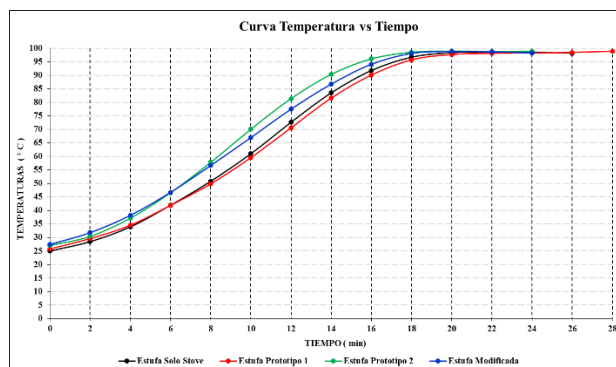


FIGURA 13. Comparación de curvas Temperatura vs Tiempo de las pruebas desarrolladas a las estufas en Laboratorio del CER-UNI (ambiente cerrado).

De acuerdo con los resultados de las pruebas realizadas en Laboratorio del CER-UNI en Lima, podemos indicar que:

- El indicador de rendimiento (IR) de la estufa modificada (°C/litro*kW), y en ambiente cerrado tiene un valor de 1.158 (°C/litro*kW).
- La estufa prototipo 2 es la que consume menor cantidad de leña que las otras analizadas.
- En pruebas realizadas en un ambiente abierto la estufa modificada tarda 21,3 minutos en promedio para hervir 5 litros de agua a una temperatura ambiente promedio de 27,70 °C, con un consumo de leña de eucalipto de 0.875 kg y con una producción de 0.125 kg de biocarbón.

- En pruebas realizadas en un ambiente cerrado la estufa modificada tarda 19.3 minutos en promedio para hervir 5 litros de agua a una temperatura ambiente promedio de 28.20 °C, con un consumo de leña de eucalipto de 0.825 kg y con una producción de 0.133 kg de biocarbón.

TABLA 8. Datos estadísticos temperatura vs tiempo pruebas desarrolladas en Campo Rural SFR.

Tiempo (min)	Temperaturas (°C)							
	T-LUD Solo Stove		Estufa Prototipo 1		Estufa Prototipo 2		Estufa Modificada	
	Ambiente abierto	Ambiente cerrado	Ambiente abierto	Ambiente cerrado	Ambiente abierto	Ambiente cerrado	Ambiente abierto	Ambiente cerrado
0	14.2	12.3	14.8	10.8	13.9	11.4	13.7	12.4
2	16.7	15.9	20.2	15.6	19.3	19.4	24.5	23.1
4	21.8	22.6	29.3	24.2	28.6	33.2	38.3	37.7
6	27.5	29.9	40.6	35.3	40.6	48.2	54.3	54.7
8	35.3	38.9	52.5	48.0	53.3	62.6	68.5	69.5
10	44.3	48.8	64.1	60.7	65.8	74.0	79.2	79.4
12	54.0	59.3	73.7	72.6	75.7	81.8	85.3	85.1
14	64.1	69.9	80.8	81.4	83.2	86.6	87.8	87.5
16	73.0	78.7	85.5	86.8	87.6	87.4	87.8	87.4
18	80.4	85.4	87.6	88.2	88.7	87.3		87.2
20	85.3	88.3	88.2	88.2	88.5			
22	87.4	88.2	88.1	88.0				
24	88.2							
26	88.3							
28	88.0							

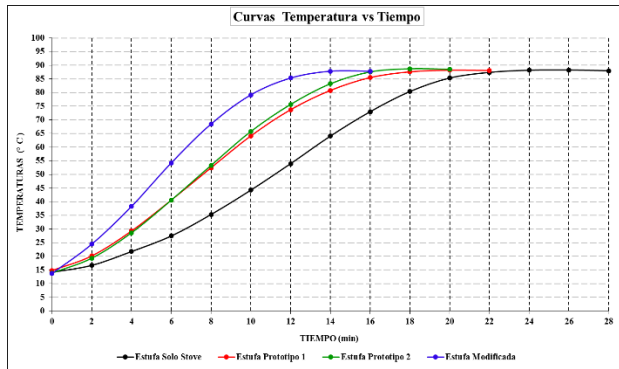


FIGURA 14. Comparación de curvas Temperatura vs Tiempo de las pruebas desarrolladas a las estufas en Campo Rural SFR (ambiente abierto).

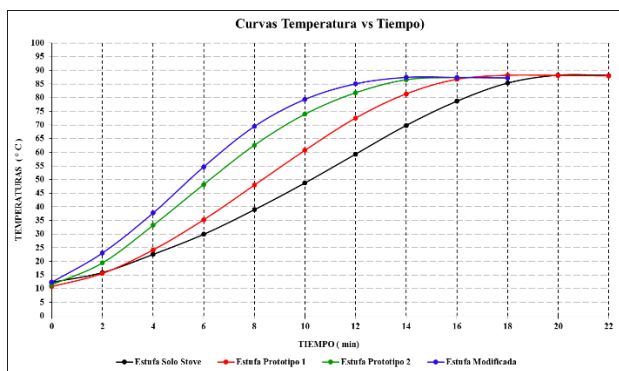


FIGURA 15. Comparación de curvas Temperatura vs Tiempo de las pruebas desarrolladas a las estufas en Campo Rural SFR (ambiente cerrado).

De acuerdo con los resultados de las pruebas realizadas en campo rural: Comunidad de San Francisco de Raymina - Ayacucho ubicada a 3 700 m s.n.m, podemos indicar que:

- El indicador de rendimiento (IR) de la estufa modificada en ambiente abierto tiene un valor de 0.854 (°C/litro*kW), y en ambiente cerrado tiene un valor de 0.884 (°C/litro*kW).
- La estufa modificada es la que consume menor cantidad de leña comparada con los demás prototipos en un ambiente abierto, mientras que la estufa prototipo 2 consume menos leña en un ambiente cerrado.
- En pruebas realizadas en un ambiente abierto la estufa modificada tarda 19.3 minutos para hervir 5 litros de agua a una temperatura ambiente en promedio de 14.03 °C, con un consumo de leña de eucalipto de 0,790 kg y con una producción de 0.210 kg de biocarbón.
- En pruebas realizadas en un ambiente cerrado la estufa modificada tarda 19.3 minutos para hervir 5 litros de agua a una temperatura ambiente en promedio de 11.73 °C, con un consumo de leña de eucalipto de 0,777 kg y con una producción de 0.207 kg de biocarbón.

En cuanto a la encuesta desarrollada en la comunidad San Francisco de Raymina. A continuación se presentan los resultados.

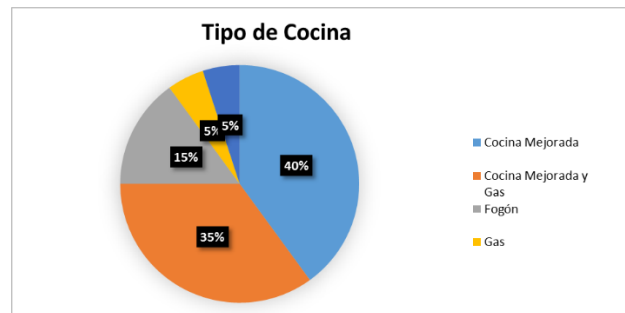


FIGURA 16. Porcentaje de uso frecuente, tipo de cocina empleado para cocinar y calentar agua.

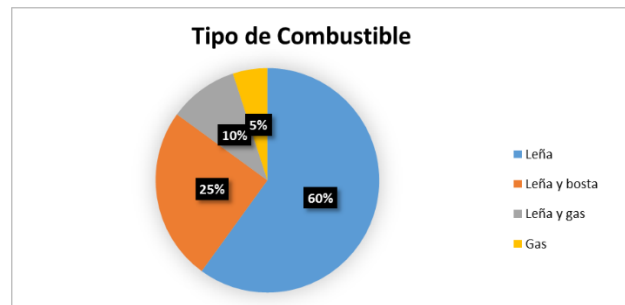


FIGURA 16. Porcentaje de uso frecuente, tipo de combustible para cocinar y calentar agua.

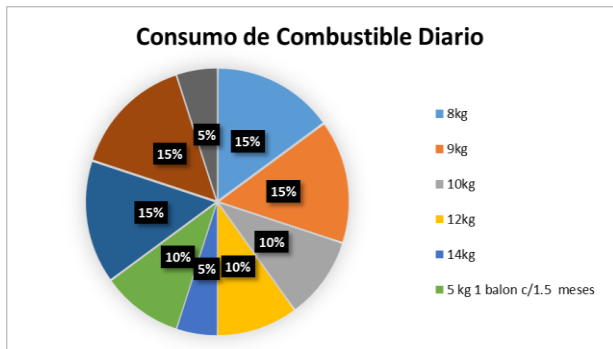


FIGURA 17. Porcentaje de uso frecuente, consumo diario de combustible para cocinar y calentar agua.

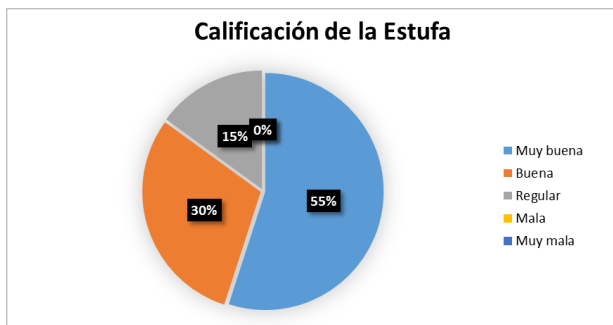


FIGURA 18. Porcentaje de calificación de la estufa propuesta en la comunidad.



FIGURA 19. Porcentaje de pobladores que utilizaría la estufa propuesta en la comunidad SFR.

5. CONCLUSIONES

- Se diseñó y construyó una estufa con planchas metálicas de acero inoxidable que utiliza la tecnología de microgasificación basada en el principio T-LUD, cuyas dimensiones son: 30 cm de diámetro, 45 cm de altura, y 3 kg de masa; esta constituida por 2 cilindros concéntricos separados 2 cm.
- Se logró calcular las principales Características Térmicas de la estufa tanto en Laboratorio y Campo Rural, los cuales se muestran en la Tabla 9.
- De acuerdo a los resultados finales, no existe una

amplia diferencia en las Características Térmicas de la estufa modificada con respecto a las demás modelos estudiadas. Lo más destacable es el tiempo en que se llega al punto de ebullición del agua, el tiempo empleado es menor comparado con otros modelos. Esto se ve reflejado en el indicador de potencia del fuego lw, el cual tiene un valor mayor a los demás.

- Comparando los resultados de indicadores obtenidos de las 4 estufas analizadas, el lw de la estufa modificada es mayor a todos, mientras que el IR promedio es menor.
- El 90% de las familias encuestadas se encuentran dispuestos a contar con la estufa propuesta como tecnología para la cocción de alimentos, debido a que esta estufa consume menor leña y ahorra costos y mejora el manejo de los residuos sólidos de la comunidad.

AGRADECIMIENTOS

Un agradecimiento especial al Dr. Manfred Horn Mutschler, al MSc. Juan Molina Fuertes, al CER-UNI por sus aportes y colaboraciones a la investigación.

REFERENCIAS

- [1] Rinne S, R. E., Rinne M, Simpson J, Glickman L. 2007. Use of biomass fuel is associated with infant Mortality and child health in trend analysis. *Am. J. Trop. Med. Hyg* 76(3): 585-501.
- [2] Ezzati, M., Kammen, DM. 2002. The health impacts of exposure to Indoor air pollution from solid fuels in developing countries: knowledge, gaps, and data needs. *Environ. Health Perspect* 110(11): 1057-1068.
- [3] Emmelin A., Wall S. 2007. Indoor Air Pollution. A Poverty-Related Cause of Mortality Among the Children of the World. *Chest*. 132 (1615 -1623).
- [4] Metha S, Shahpar C. 2004. The health benefits of interventions to reduce Indoor air pollution from solid fuel use: a cost-effectiveness analysis. *Energy for Sustainable Development* 8(3): 53 - 59.
- [5] Heising, K. 2005. Improved stoves as a key intervention to enhance environmental health in The Andes. Eschborn, Lima: German Agency for Technical Assistance and Pan American Center for Sanitary Engineering and Environmental Sciences (27).
- [6] Ramakrishna, J. e. a. 1989. Cooking in India: Che impact of improved stoves on Indoor air quality. *Environmental Intern* 15: 341 - 352.
- [7] INEI, "Evolución de la Pobreza Monetaria 2007-2016," Instituto Nacional de Estadística e Informática, Perú, Informe Técnico, May 2017.
- [8] D. Jack 2005. Income, household energy and health, Repsol YPF-Harvard Kennedy School Fellows, pp. 193-200
- [9] GIZ – Perú 2011. Proyecto Energía, Desarrollo y Vida – EnDev Perú: Lima
- [10] SENCICO 2009. Reglamento para la evaluación y certificación de la cocina mejorada: Lima
- [11] S. Támara, E. Fernando 2012. "Fabricación y evaluación de estufa mejorada de plancha 16" x 24", con cámara de combustión microgasificadora (T-LUD), para comparación con codo rocket", B.S. thesis, Zamorano: Escuela Agrícola Panamericana

- [12] C. Roth 2011. Micro-Gasificación: Cocinar con gas procedente de la biomasa sólida y seca, 1ra edición. GIZ – HERA: Honduras
- [13] Anderson, P., Reed, T. y Wever, P 2007. Micro-Gasification: What is it and why it works. Boiling Point, No 53: 35-37. HEDON Energy Network: USA
- [14] E. Gutiérrez, D. Rivadeneira, N. Paez 2014. Ingeniería conceptual, básica, de detalle y simulación para el sistema de aprovechamiento del alquitrán en el proceso de gasificación up-draft con capacidad de 50 Kg/H utilizando los RSU para el INER. Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE: Ecuador
- [15] R. Lesme, A. Recio, T. Preston, L. Rodríguez, L. Oliva 2008. Análisis termodinámico de un gasificador “Ankur” modelo WBG-10 trabajando con diferentes biomásas. Redalyc. Universidad de Oriente: Cuba
- [16] J. Barbieri *et al.*, “Guidelines on sustainable energy technologies for food utilization in humanitarian contexts and informal settlements”, pp. 102–104, 2015. Milan, Italy: Department of Energy, Politecnico di Milano: Italia
- [17] J. Lehmann, J. Guant, M. Rondon 2006. Black Carbon Sequestration in Soil-A New Frontier. Pennsylvania: USA
- [18] H. McLaughlin, P. Anderson, F. Shields, T. Reed 2009. All Biochars are Not Created Equal, and How to Tell Them Apart. North American Biochar Conference. Boulder, CO: USA
- [19] Anderson, P. 2010. Prueba de Anderson para estufa T-LUD, diseño en Camboya 27/04/10
- [20] S. F. Baldwin 1987. Biomass stoves: engineering design, development, and dissemination: Volunteers in Technical Assistance
- [21] P.S. Anderson 2009. Construction Plans for the ‘Champion-2008 TLUD Gasifier Cookstove, Illinois: USA
- [22] Partnership for Clean Indoor Air (PCIA) 2014. Prueba de ebullición de agua (WTB VERSIÓN 4.2.3): USA