

Construction, development and tests of a low cost, high efficiency stove-boiler for low calorific power biomasses

Reinaldo Delgado-García, Luis Velasco-Roldán, Eduardo Onofa-Cuichán & Estefanía Armas-Figueroa

Departamento de Ciencias de Energía y Mecánica, Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, Sangolquí, Ecuador. rrdelgado1@espe.edu.ec

Received: November 05th, 2015. Received in revised form: Mayo 20th, 2016. Accepted: July 21th, 2016.

Abstract

According to World Health Organization [1], 3000000 million people cook and heat their houses with open fires and stoves that burn biomass and charcoal, most of them placed in cool climates with very limited vegetal biodiversity and consequently meager energy resources. For this reason, the target of this research has been to give answer to water heating and thermal comfort needs of living places in cool climates, having in account the local limited industrial and technological development. This vertical heater consists of three chambers: a combustion chamber, a heat exchanger and a natural convection biomass drying chamber. Tests show that the overall efficiency of the boiler/stove is around 80%, with values of efficiency in cooking 30% higher than other improved stoves prototypes, reducing the boiling time 68% and saving 34% of fuel. It obtains 150 liters of warm water at temperature over 40 °C by means of heat recovery.

Keywords: stove; boiler; kitchen; energy saving; heat transfer; biomass.

Desarrollo, construcción y pruebas de una cocina-calentador de bajo costo y alta eficiencia energética para biomasa de reducido poder calorífico

Resumen

Según la Organización Mundial de la Salud [1], 3.000.000 millones de personas cocinan y calientan sus hogares con fuegos abiertos y cocinas en los que queman biomasa y carbón vegetal, situándose una buena parte de ellas en climas fríos con muy limitada biodiversidad vegetal y por lo tanto escasos recursos energéticos. Por ello el objetivo de la presente investigación ha sido dar respuesta a la necesidad de calentamiento de agua y el acondicionamiento térmico de viviendas situadas en climas fríos, teniendo en cuenta el limitado desarrollo industrial y tecnológico local. Este calentador vertical se compone de tres cámaras: una cámara de combustión, un intercambiador de calor y una cámara de secado de la biomasa por convección natural. Las pruebas realizadas demuestran que la eficiencia global de la caldera/cocina se sitúa en torno al 80%, presentando valores de eficiencia en la cocción de un 30% mayores a otros prototipos de cocinas mejoradas, disminuyendo el tiempo de ebullición un 68% y ahorrando un 34% de combustible y obteniendo 150 litros de agua caliente a una temperatura superior a 40°C procedente de la recuperación de calor.

Palabras clave: cocina; calentador; ahorro de energía; transferencia de calor; biomasa.

1. Introducción

El presente trabajo se enmarca dentro de la línea de investigación del Grupo de Energías Renovables del Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad de las

Fuerzas Armadas, enfocada a la caracterización de variables de sostenibilidad para la planificación y desarrollo de soluciones técnicas y constructivas sostenibles, conscientes de la realidad climática, tecnológica, industrial y social en la que se implantan.

How to cite: Delgado-García, R., Velasco-Roldán, L., Onofa-Cuichán, E. & Armas-Figueroa, E. Desarrollo, construcción y pruebas de una cocina-calentador de bajo costo y alta eficiencia energética para biomasa de reducido poder calorífico DYNA 83 (199) pp. 183-190, 2

El estudio del estado del arte nos muestra que la mayor parte de las investigaciones relacionadas con calderas domésticas se refieren a productos industrializados para la producción en masa. Estas calientan aire o agua. Las investigaciones se centran en la obtención de altas eficiencias en el funcionamiento del quemador para la reducción del consumo de los llamados pellets: pequeñas porciones de biomasa prensada procedente del reciclado de residuos vegetales [2]. En el tema de las cocinas eficientes las investigaciones se centran en la reducción del consumo de leña, la limitación del costo y la reducción de los contaminantes vertidos al interior de la vivienda o a la atmósfera. No se han encontrado investigaciones científicas remarcables en el estudio referido a sistemas polivalentes (cocción, calentamiento de agua y calefacción) con un bajo costo de construcción.

Las calderas que utilizan pellets para la combustión surgen en 1989 como una alternativa a las chimeneas de tiro abierto, buscando desarrollar un tipo de estufa que pueda utilizar residuos de biomasa y reducir las emisiones de CO₂ en relación a estufas que utilizan combustible fósil. Gracias al apoyo de un ventilador, estos aparatos aseguran una buena mezcla de gases, aire y llama y producen una combustión completa que reduce al mínimo los gases de combustión y las cenizas. La cantidad de calor emitido es controlado mediante la cantidad de biomasa quemada. La eficiencia de dichas estufas se sitúa entre el 56 y el 68% [3,4].

Dentro del ámbito de las cocinas económicas existen múltiples estudios realizados con el objetivo de mejorar la eficiencia de las tradicionales cocinas de fogones abiertos, con eficiencia próxima al 10%, (Aristazabal Hernandez, 2014) con el objetivo de reducir el consumo de leña en países en vías de desarrollo [5].

Entre los modelos desarrollados se encuentran la estufa Hyderabad Chula Deen, creada en la década de los 50, la estufa Patsari, desarrollada en los años 90 [6] en torno a la cual existen pruebas de cocción controlada [7]. De las investigaciones se deduce que la estufa Patsar presenta claras ventajas con respecto a las cocinas tradicionales, con una reducción del consumo de energía de entre un 19 y un 67% y un ahorro de combustible del 44%. [3]

Otro tipo de cocina mejorada es la denominada “tipo plancha”, que consigue, con la modificación de la cámara de combustión, que la eficiencia térmica global aumente un 12% con respecto a la estufa de fuego abierto o la estufa Lorena [6]. Esta plantea un concepto interesante de eficiencia energética basado en la acumulación de energía en la masa de tierra y arena que envuelve la cámara de combustión, fomentando la transferencia de energía por convección y radiación a la envolvente de los fogones. Esta energía es paulatinamente liberada al espacio interior. Este concepto de acumulación de energía se considera de capital importancia para la investigación al plantearse la estrategia de aprovechamiento máximo de la energía desprendida en la cámara de cocción como factor clave para el incremento de la eficiencia de la estufa. Esta energía será destinada al calentamiento de agua y al acondicionamiento térmico del espacio interior en el que se ubique la estufa.

En el ámbito de la reducción de elementos contaminantes, existe una gran carencia de estudios pormenorizados

referidos a la problemática en los países en vías de desarrollo. Las normativas estadounidenses y europeas se centran en el control de la calidad del aire basado en los niveles de CO₂ y posible presencia de olores mediante un control estricto de los rangos de ventilación que permitan la mayor eficiencia energética [8]. En la mayor parte del mundo el problema de los fuegos abiertos al interior de la vivienda supone un gravísimo riesgo para la salud de las personas. En este campo se han realizado pruebas técnicas estandarizadas para el seguimiento de estufas mejoradas en la India y México. Se evaluaron los cambios en la calidad del aire interior y el consumo de combustible y se obtuvo una reducción de los niveles de monóxido de carbono entre 30-70 %, mientras las concentraciones de partículas disminuyeron entre 25 % y 65 %, y el consumo de combustible se redujo entre 20 % y 67 % [9]. En estudios realizados en el área subsahariana se analizaron estufas que fueron mejoradas mediante el confinamiento y control de la combustión en quemadores de chapa de acero. En este caso el consumo de leña se redujo entre un 22% y 46% con relación a estufas tradicionales construida con piedras [10].

En los últimos años están evolucionando las estufas denominadas “cohetes” (Rocket) [11], de tiro forzado. Gracias a la quema completa de la biomasa se reducen las emisiones de monóxido de carbono (CO) en 75%, óxido de nitrógeno (N₂O) hasta un 90%, consumo de combustible en un 33% y las emisiones de partículas en suspensión en un 46%, todo ello en comparación con las estufas de combustión abierta.

Una variante de este tipo de caldera, aún no estudiada de forma científica, la denominada *Rocket Mass*, incorpora una variante de gran interés para la investigación: la recuperación de energía procedente de los gases de combustión, que se produce al envolver el conducto de extracción en tierra o ladrillos. El punto débil de esta propuesta es la excesiva pérdida de carga en un circuito de extracción con escaso diferencial de altura entre la entrada de aire a la cámara de combustión y el punto de extracción al exterior. Por este motivo se dotan siempre de detectores de CO₂ y/o ventilación forzada.

El estudio del estado del arte demuestra que, así como existen múltiples investigaciones centradas en el incremento de la eficiencia energética de la combustión mediante el diseño del quemador, no existen investigaciones centradas en la gran cantidad de energía no aprovechada que es evacuada a través del conducto de gases.

Con dicho objetivo, por lo tanto, se diseña un calentador de baja temperatura y presión, que permita la combustión eficiente de biomasa con reducido poder calórico y la máxima recuperación del calor producido en la cámara de combustión y el circuito de extracción de humos.

El fluido acumulador de energía a usar será agua de circulación natural. Este diseño permitirá la acumulación de la energía y proporcionará agua caliente sanitaria y el acondicionamiento térmico de la vivienda, independientemente del momento del día en el que se produzca la cocción. De esta forma se consigue desvincular temporalmente la generación de energía y el consumo de esta. Estas necesidades están determinadas por condicionantes independientes: el uno la alimentación y el otro las pautas higiénicas, los condicionantes climáticos y el patrón de uso de la propia vivienda.

2. Descripción del proyecto

Para lograr el objetivo propuesto el proyecto deberá garantizar obtener las mayores temperaturas en la cámara de combustión y las menores temperaturas de evacuación de gases con un mínimo consumo de biomasa. La estufa proyectada cuenta con 3 partes principales. La cámara de combustión, la cámara de cocción y la cámara de secado

2.1. Cámara de combustión

Se diseña una cámara de combustión de lecho fluidizado circulante [3], la cual se muestra en la Fig. 3, muy adecuado para combustibles con reducido poder calorífico. Esta cámara puede garantizar una eficiencia de combustión de biomasa de 90%, con biomasa de hasta un 60% de humedad, alcanzando temperaturas que oscilan entre los 800°C y 900°C y evitando así la producción de escoria por ceniza. Sobre la misma se ubica la cámara de cocción, como se muestra en la Fig. 2.

En la caldera el suministro de aire primario es generado por efecto chimenea y circula desde la cámara de combustión hasta la parte superior del calentador. Una abertura deslizante permite graduar el “tiro” y con ello la combustión mediante la entrada de aire. La combustión inducida se ha optimizado con un 20% de oxígeno por encima del estrictamente necesario, para de esta forma asegurar una combustión completa sin presencia de partículas no quemadas que puedan generar hollín.

Una portezuela permite la carga de la cámara de combustión con la biomasa.

Dado que el objetivo es obtener una caldera económica y sin mantenimiento se pretende evitar la necesidad de cualquier tipo de ventilador o bomba. No obstante, la caldera permite la conexión de un circuito de recirculación que disipa el calor en sitios alejados del lugar en el que se sitúe la misma. Para fomentar el movimiento interior del agua por convección natural (termosifón), en la cámara de almacenamiento de agua se diseñó y construyó un calentador eminentemente vertical. El esquema general se muestra en la Fig. 1.

Al ser un calentador de tubos de agua (acuotubular) el fuego incide directamente sobre los conductos de agua, siendo esta el área principal de transferencia de energía y el punto en donde se alcanzan las mayores temperaturas. Con ello se induce el desplazamiento del agua caliente hacia la parte superior de la cámara de almacenamiento de energía.

Teniendo en cuenta que la flama óptima emite un 80% de la energía por radiación, un 10% por convección y un 10% por conducción, el calentador está diseñado para aprovechar la mayor cantidad de calor emitido por la combustión de biomasa. La cámara de combustión pretende transferir de forma eficiente el calor generado a la cámara de agua que la envuelve, por medio del aumento del área de transferencia y recuperando de esta forma la energía de las llamas y los gases. En el diseño final, la cámara de combustión cuenta con una superficie de intercambio de 0,158 m² por conducción, 0,194 m² por convección y 0,518 m² por radiación.

Para realizar el diseño térmico, en primer lugar se calcula la cantidad de calor requerida para calentar los 150 litros de agua, de 10°C a 40°C, por medio de un balance de masa, así como la cantidad de biomasa necesaria para la obtención de dicha cantidad de calor. Se calcula posteriormente la relación aire-combustible ideal para una reacción estequiométrica real, asumiendo que existe una combustión completa, y la masa de aire necesaria para la combustión, utilizando dicha relación aire combustible.

Por otro lado se calcula el porcentaje de gases de combustión en los productos de la reacción estequiométrica real, para determinar qué cantidad de gases genera la combustión y poder dimensionar la cámara de convección y la chimenea. Así mismo se determina el volumen total que ocupan la biomasa y el aire necesarios en el proceso de combustión. De esta forma se obtienen las dimensiones de la cámara de combustión.

2.2. Cámara de cocción

La cámara de cocción se muestra en la Fig. 2. La misma alberga los recipientes con los alimentos para cocinar. Está limitada por los conductos de agua que separan la misma de la cámara de combustión en su parte inferior y limita con la cámara de secado de biomasa en su parte superior. Las 4 caras laterales limitan con la cámara de agua en las que se produce el primero de los sucesivos procesos de recuperación de calor. El volumen de la cámara de convección se determina mediante el volumen de los gases de combustión producidos.

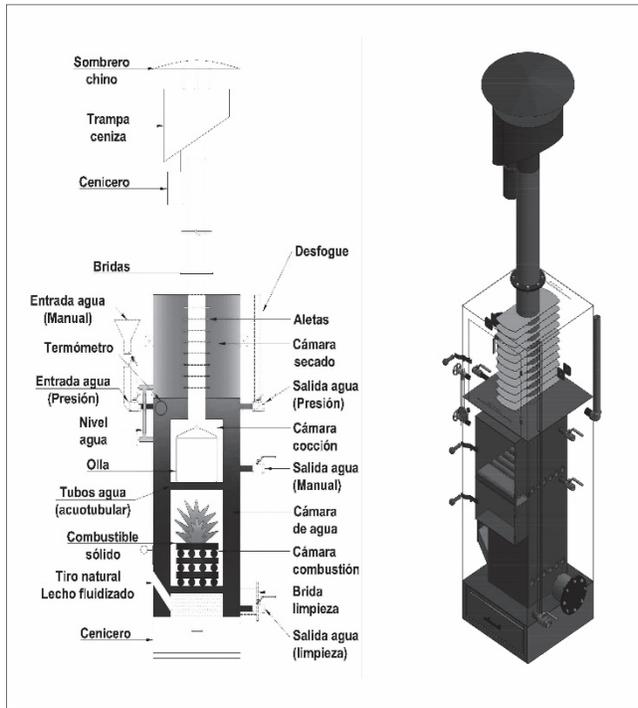


Figura 1
Principios básicos de funcionamiento del calentador
Fuente: autores



Figura 2 Cámara de cocción
Fuente: Autores

Figura 3 Cámara de combustión

2.3. Cámara de almacenamiento de agua

Las cámaras de cocción y secado se envuelven por una cámara de agua de una capacidad de 150 litros.

Una serie de conductos tubulares de acero con diámetro de una pulgada están conectados a la cámara de almacenamiento de agua y dividen la cámara de cocción y la cámara de combustión. Estos tubos permiten sostener los recipientes para la cocción sobre las llamas. A la vez son los principales inductores de la circulación de agua por convección en el interior de la cámara al recibir directamente sobre ellos las llamas, calentándose rápidamente y calentando a su vez el agua que contienen con lo que se garantiza el flujo convectivo del agua hacia la cámara de almacenamiento.

Conociendo la temperatura del agua caliente obtenida como resultado de la transferencia de calor, se calcula el volumen de la misma, para saber qué cantidad de agua fría (10°C) debe mezclarse con la caliente (80°C), determinando la relación de flujos máscicos de agua caliente y fría, para una temperatura especificada del flujo resultante (agua 40°C).

2.4. Cámara de secado de biomasa

La Fig. 4 muestra la estructura de la cámara de secado. Uno de los principales factores que determinan la capacidad calorífica de una biomasa es su contenido de humedad. En el caso de quemarse madera húmeda, es necesaria cierta cantidad de calor para evaporar el agua contenida en ella, con lo que se ve afectada la combustión. En lugares con climas lluviosos se dificulta el acceso a biomasa seca, por lo que los procesos de combustión son generalmente poco eficientes.

Existen varios factores necesarios para un secado óptimo de la biomasa. En primer lugar, la cantidad de calor y la temperatura son fundamentales para evaporar el contenido de agua en la madera o en cualquier otra biomasa utilizada. Por otra parte, la humedad relativa del aire circulante debe ser baja para poder absorber la humedad contenida en la madera y por último, es necesario un movimiento del aire,

(turbulento) encargado de desplazar tanto el calor como la humedad extraída de la madera. El manejo adecuado de estos tres factores es indispensable para el éxito en el secado de la madera.

Se ha diseñado por ello un segundo proceso de recuperación de calor a través del conducto de extracción de humos, forzando a que éste caliente una cámara de secado de biomasa. El conducto de extracción dispone de unas aletas de acero dimensionadas para obtener la mayor transferencia de calor posible. La cámara de secado presenta unas perforaciones en la cara frontal que facilitan la circulación del aire entre esta y el interior de la vivienda. Este flujo de aire permite la disipación del vapor de agua y la transmisión de calor a la vivienda.

Para la determinación de la longitud efectiva de las aletas anulares de sección transversal uniforme se parte de suponer la aleta infinitamente larga para determinar la distribución de temperatura a lo largo de la misma. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 1.

Se observa que la temperatura de la aleta disminuye muy poco para posiciones más allá de los 10 cm. Buscando la mayor rentabilidad económica del diseño térmico se determinó utilizar 8 aletas de dicha dimensión en el interior de la cámara de secado. Esta disposición aumenta la transferencia de calor entre la chimenea y el fluido que lo rodea en un 72%, de acuerdo con el procedimiento de cálculo descrito por Incropera y Dewitt [11].

2.5. Otros elementos

El diámetro de la chimenea se diseñó para mantener una velocidad de salida del fluido entre 3 y 5 m/s, para la correcta evacuación de los gases. Este valor depende de la diferencia de temperatura entre el aire exterior y la cámara de combustión, por lo que se consideró el promedio de temperatura entre 10 y 20°C para el aire exterior. Se colocó una válvula de guillotina de para regular la entrada de aire necesaria y mantener una correcta combustión. Para determinar la altura de la chimenea se consideró el análisis de flujo de fluidos a régimen estacionario teniendo en cuenta que la caldera opera a la presión atmosférica y con tiro natural.



Figura 4. Cámara de secado
Fuente: Autores



Figura 5. Prototipo de estufa
Fuente: Autores

Tabla 1
Distribución de temperatura en la aleta

Longitud aleta (m)	Temperatura aleta (°C)
1.95313E-05	189.81
0.90625E-05	189.63
0.000078125	189.25
0.00015625	188.51
0.0003125	187.03
0.000625	184.12
0.00125	178.42
0.0025	167.59
0.005	147.97
0.01	115.76
0.02	72.14
0.03	46.51
0.04	31.45
0.05	22.60
0.06	17.41
0.07	14.35
0.08	12.56
0.09	11.50
0.10	10.88
0.11	10.52
0.12	10.30

Fuente: autores

Debido al uso doméstico de este calentador por personas sin conocimientos técnicos se instaló una tubería de desfogue que evita alcanzar temperaturas y presiones excesivas que pudieran poner en peligro a los usuarios.

Se dispone de varias entradas y salidas de agua en la parte inferior y superior de la cámara de almacenamiento. Estas tienen por objeto el relleno de la cámara. Además garantizan la posibilidad de una recirculación bombeada del agua hacia radiadores de baja temperatura, de ser conveniente. De esta forma la calefacción de la vivienda no solo puede producirse por la radiación de las chapas perimetrales o la recirculación de aire de la cámara de secado, sino que será posible potenciar la disipación de dicha energía en zonas alejadas de la vivienda. La estructura externa de la cocina calentador se muestra en la Fig. 5.

2.6. Costo

La caldera se construye en una metalmecánica (herrería) dotada de las herramientas básicas de corte y soldado. El costo de mano de obra y materiales ha sido de \$ 907,00 USD. Este costo es evidentemente muy superior al costo de fogones tradicionales o incluso al de los fogones mejorados, ya que estos se hacen normalmente con materiales reciclados o recursos locales. A pesar de ello los resultados obtenidos, así como la posibilidad de un importante incremento en el confort térmico de la familia justifica su mayor costo.

3. Resultados

3.1. Eficiencia energética en el calentamiento de agua

En el gráfico de la Fig. 6 puede observarse el tiempo requerido para el calentamiento del agua mediante el uso de las distintas biomásas.

En cuanto al consumo de biomasa se observa un menor

consumo relativo de esta en el caso de utilizar leña. Se requirieron 2,09 kg de leña con un 4% de humedad relativa, frente a 2,4 kg de pajonal con una humedad relativa del 8%, para el calentamiento de 150 litros de agua entre 18 y 40°C y una temperatura ambiente de 20°C. Pese a dicha diferencia es necesario tener en cuenta que el pajonal es un recurso natural abundante en el páramo andino. El comportamiento de diferentes biomásas se muestra en la Fig. 7.

Para calentar los 150 litros de agua contenidos en la caldera, se necesitan 2.09 kg (4.6 libras) de madera seca (4% humedad). Sin embargo, para calentar la misma cantidad de agua con madera húmeda (25% humedad), se requieren 2.31 kg. (5.09 libras). En la Fig. 7 queda de manifiesto esta situación.

La madera seca alcanza su máxima temperatura en la flama adiabática a los 8 minutos de iniciarse la combustión, a diferencia de la madera húmeda que alcanza su pico máximo en el minuto 12. Esto se debe a que en la madera húmeda primero se evapora la cantidad de agua contenida en la biomasa y luego se combustiona. Este efecto también se aprecia en la cantidad de biomasa necesaria para calentar una cantidad dada de agua al presentar la biomasa diferentes contenidos de humedad.

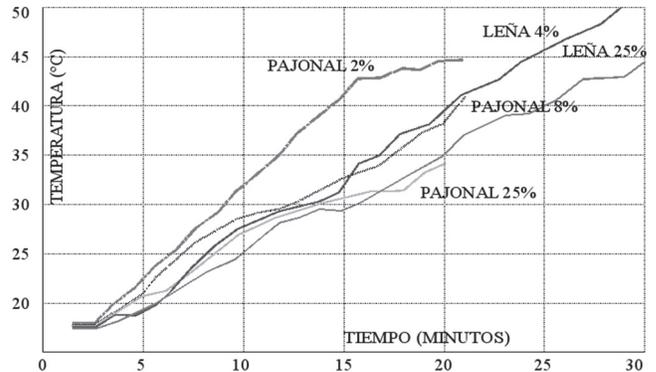


Figura 6. Gráfica del calentamiento de 150 litros de agua con distintas biomásas para distintas humedades relativas de esta
Fuente: autores

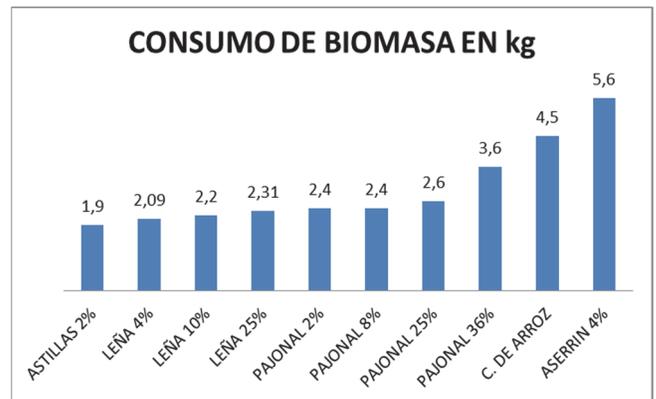


Figura 7. Masa de biomasa requerida (y humedad relativa de esta) para el calentamiento de 150 litros de agua entre 18 y 40°C
Fuente: autores

3.2. Eficiencia energética del sistema de cocción. Prueba de Ebullición de Agua.

La Prueba de Ebullición de Agua (Water Boiling Test, WBT por sus siglas en inglés) es una simulación simple del proceso de cocción con la finalidad de medir cuan eficiente es una estufa para calentar el agua en una olla. EL protocolo determina la cantidad de emisiones producidas durante el proceso, evalúa la eficiencia térmica, el tiempo de ebullición, la tasa de incineración y el consumo específico de combustible (CEC) de la estufa. [7]

La WBT simula, por lo tanto, el proceso de cocción y está conformada por tres ensayos: WBT (frío), en el cual la estufa se enciende al iniciar el día; WBT (caliente), en la que la estufa se encuentra precalentada, y WBT (a fuego lento), en el cual se trata de simular un proceso de cocción tradicional. Los parámetros evaluados por la WBT son el consumo específico de combustible (SCWBT, kg biomasa / litro de agua), que se muestra en la Tabla 2, y la eficiencia térmica (h, %), mostrada en la Tabla 3. La eficiencia térmica es una relación entre la tarea de ebullición y evaporación del agua frente a la energía suministrada por la combustión de la biomasa. [12]

Los resultados de la prueba de ebullición de la caldera/cocina han sido comparados con los resultados del prototipo de cocina mejorada de Javier D. Aristazabal, la Estufa FN, cuyo interesante trabajo ya mejoraba el rendimiento de las estufas tradicionales colombianas [12].

El prototipo de estufa cocina reduce el tiempo de entre un 26 y un 40%

Puede observarse en los gráficos de las Figs. 8 y 9 el importante incremento en la eficiencia energética de la cocción, así como una reducción de tiempo y consumo de biomasa para alcanzar la ebullición del agua

Tabla 2
Resultados de consumo obtenidos en la Prueba de ebullición de agua (WBT).

FASE	TASA DE INCINERACION (g/min)		CONSUMO (g/l)	
	Prototipo caldera	Estufa FN	Prototipo caldera	Estufa FN
FRÍO	185	49	120	199
CALIENTE	220	63	110	149
MODERADO	118	37	265	360

Fuente: autores

Tabla 3
Resultados de eficiencia obtenidos en la Prueba de ebullición del agua (WBT)

FASE	EFICIENCIA (%)		T. EBULLICIÓN (min)	
	Prototipo caldera	Estufa FN	Prototipo caldera	Estufa FN
FRÍO	20	16	13	42
CALIENTE	23	15	10	32
MODERADO	26	8		

Fuente: autores

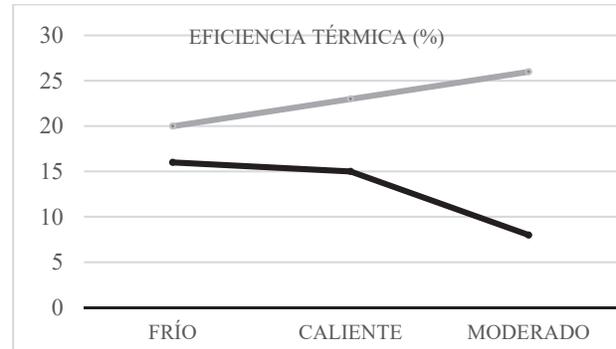


Figura 8. Eficiencia térmica (WBT)
Fuente: autores

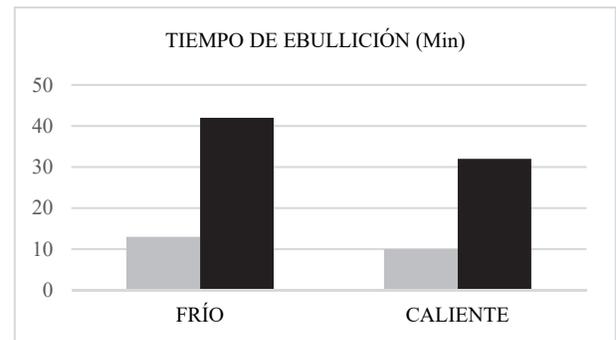


Figura 9. Tiempo de ebullición (WBT)
Fuente: autores

3.3. Prueba de Cocinado Controlado

La Prueba de Cocinado Controlado (Controlled Cooking Test, CCT por sus siglas en inglés) está diseñada para evaluar el desempeño de la estufa mejorada con respecto a las estufas comunes o tradicionales. Las estufas se comparan a medida que realizan una tarea estandarizada de cocción semejante a las condiciones de cocción típicas de la población local. Esta prueba ofrece una amplia gama de indicadores de desempeño energético, tales como el consumo específico de combustible (SCCCT, gramos de biomasa/kg alimento), la energía específica (ECCT, kJ/kg alimento) y el tiempo utilizado en la tarea de cocción (Δt , min). El SCCCT representa la cantidad de combustible requerido por la estufa para producir una unidad de masa de alimentos cocidos [12]

En la Tabla 4 se compara el consumo específico de combustible entre la Caldera cocina y el fogón tradicional. Puede observarse que se obtienen reducciones del consumo de leña del 34%. La caldera ha sido probada en los laboratorios de Energía Mecánica de la Universidad de Fuerzas Armadas en Salgolquí (Ecuador) a 2539 m.s.n.m. y

Tabla 4
Consumo específico de combustible en la Prueba de Cocción Controlada (CCT)

CONSUMO ESPECÍFICO DE COMBUSTIBLE (SCF)			
Prototipo caldera		Fuego abierto	
Alimentos (Kg)	2.9	Masa alimentos (Kg)	2.9
Leña (g)	2500	Masa leña (g)	3800
SCF	862	SCF	1310

Fuente: autores

con una presión atmosférica de 560 mm Hg. (0.74 atm) Pese a que la Prueba de Ebullición de Agua (WBT) y la Prueba de Cocinado Controlado (CCT) no hacen referencia a la presión atmosférica a la que deben efectuarse, dicha condición afecta evidentemente a la temperatura de ebullición del agua. A la presión atmosférica de Sangolquí el agua hierve en torno a los 92°C y no a los 100°C habituales a nivel del mar. Es por ello que los valores de los resultados comparados de las pruebas deben tener en cuenta dicha circunstancia. La diferencia de entalpías de saturación, para las presiones atmosféricas comparadas es de 34 kJ/kg de agua. Por ello para cualquier biomasa que se consuma en la caldera a nivel del mar debe aumentarse en aproximadamente un 8% la masa total del combustible.

Es importante tener en cuenta que a 2500 m.s.n.m la densidad del aire disminuye en un 26% y por lo tanto el contenido de oxígeno, requiriéndose más aire para una mejor combustión.

3.4. Eficiencia energética global del calentador

No ha podido compararse el rendimiento de la estufa cocina o su capacidad de recuperación de calor de forma precisa con fogones tradicionales al no existir un protocolo de pruebas normado. No obstante resulta evidente que el rendimiento es alto teniendo en cuenta que se obtienen 150 litros de agua a una temperatura superior a 40°C tras la cocción de los alimentos. Se suma por lo tanto la reducción de consumo de biomasa con la obtención de agua caliente sanitaria y calefacción para la vivienda.

4. Ejemplo de aplicación

En el páramo ecuatoriano, al igual que en amplias zonas andinas, existe un gran número de pequeños asentamientos poblacionales dedicados al pastoreo a alturas en las que la dureza del clima impide el crecimiento de vegetación arbórea. Dicha población cuenta con pequeños arbustos como único recurso energético con el que cocinar, calentar agua y acondicionar térmicamente sus viviendas. La escasez de recursos junto con la utilización de sistemas de combustión abierta únicamente alcanza para la cocción de alimentos.

Amplias zonas de alta montaña de la cordillera andina se caracterizan por sus bajas temperaturas y una alta nubosidad. Áreas, por lo tanto, con gran demanda energética para el acondicionamiento térmico de sus viviendas pero carentes de radiación solar que permita el aprovechamiento de cualquier tipo de energía alternativa basada en la captación solar [13].

Dicha circunstancia, aparejada de una escasez de recursos energéticos conlleva importantes problemas de confort térmico interior para sus habitantes [14]. No es habitual en este tipo de viviendas el calentamiento de agua para su utilización en la higiene personal de los habitantes de la vivienda, debido principalmente a la necesidad de destinar el escaso combustible a la cocción de alimentos. El aprovechamiento del calor residual generado por el fuego de las cocinas representa la principal y escasa fuente de calefacción.

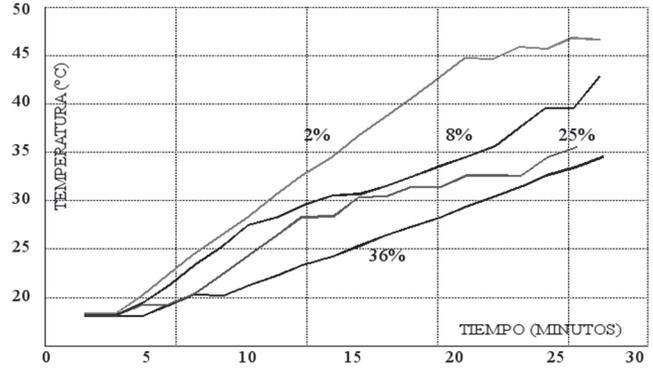


Figura 10. Gráfica del calentamiento de 150 litros de agua con pajonal para distintas humedades relativas de este
Fuente: autores

Esta estrategia sin embargo tiene altos riesgos ya que la mala combustión y la masiva utilización de sistemas abiertos sin extracción de humo generan con frecuencia problemas de salud y contaminación provocados por las sustancias tóxicas con monóxido de carbono o enfermedades respiratorias provocadas por el hollín que genera una combustión incompleta [12].

El único recurso vegetal abundante en la zona es el pajonal, un tipo de paja. Su utilización está limitada debido a su escaso poder calorífico, la cantidad de humo que genera su combustión y su alto contenido de humedad.

En la gráfica de la Fig. 10 se observan los resultados obtenidos en la caldera/cocina utilizando pajonal con distintos contenidos de humedad

Se observa nuevamente que es de vital importancia el secado de la biomasa que se produce en la cámara de secado recuperando la energía de los gases de combustión con el objetivo de incrementar la capacidad calorífica de la biomasa

5. Conclusiones

- La caldera/cocina ahorra un 34% en consumo de combustible en la cocción, comparándola con una cocina a fuego abierto.
- La humedad relativa de la biomasa afecta en gran medida a la eficiencia. Mientras que la eficiencia del aserrín es del 30%, la del pajonal es del 70%. Esta diferencia radica en la cantidad de humedad contenida en la biomasa, la geometría de la misma y la configuración de la cámara de combustión.
- La eficiencia global de la caldera/cocina es del 80%, (Eficiencia tomada a partir de la combustión de 4.6 libras. De madera con una humedad del 4% y de la distribución y pérdidas de su poder calórico durante el tiempo de calentamiento de los 150 litros de agua y la temperatura de los gases de escape) ya que la mayoría de pérdidas originadas en la misma son aprovechadas para generar calefacción y secado de Biomasa.
- El costo de fabricación de la caldera permite ahorrar un 9% si se lo compara con la adquisición de equipos que permitan las mismas aplicaciones (cocción, calefacción, secado de madera y temperado de agua)
- La caldera/estufa es un 30 % más eficiente que la estufa

FN [12] reduciendo el tiempo de ebullición de agua en un 68 %. Por otro lado la tasa de incineración, es decir la velocidad con la que se consume el combustible, es del 70%. Para finalizar, la caldera/cocina permite ahorrar un 34% en combustible.

- El estudio abre gran cantidad de campos para un sistema de calefacción y calentamiento de agua aprovechando la necesidad existente de preparación de alimentos para las clases más desfavorecidas, lo cual podría repercutir en la mejora de hábitat de buena parte de la población que no tiene acceso a combustibles fósiles, ni a suministro eléctrico ni a biomasa de alto poder calorífico.

Agradecimientos

La concepción del proyecto de investigación así como su desarrollo fueron generados gracias al apoyo institucional proporcionado por la carrera de Ingeniería Mecánica de la Universidad de las Fuerzas Armadas (ESPE)

Bibliografía

- [1] Organización Mundial de la Salud. No Title. 2014. Retrieved from <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs292/es/>
- [2] Cespi, D., Passarini, F. and Ciacci, L., Heating systems LCA: Comparison of biomass-based appliances. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 19(1), pp. 89-99, 2014.
- [3] Purvis, C.R., Kariher, P.H. and Geraghty, A., Low emission and high efficiency residential pellet-fired heaters. In *Bioenergy 2000* (Ed.), Low emission and high efficiency residential pellet-fired heaters. Buffalo, 10 P, 2000
- [4] Elias, X., ¿Se considera la biomasa como una alternativa energética?, *Econotermia*, LXXXI, pp. 46-50, 2006
- [5] Arvind, K.M.P. and Kumar, P.M., Comparative study of effect of different parameters on performance and emission of biomass cook stoves. *International Journal of Research in Engineering & Technology*, 2(3), pp. 121-126, 2013.
- [6] Jiménez, R.D., Soriano, V.M.B., Fax, T. and Masera, O., De La "Lorena" a La "Patsari". Programa de energía rural, Grupo Interdisciplinario de Tecnología Rural Apropiada A.C. (GIRA) Michoacán, México, 2004.
- [7] Hoja de toma de datos de WBT, CTT, 2014.
- [8] Fernández, S.Z., Tarrío-Saavedra, J., Naya, S. and López-Beceiro, J., Impact estimates of the actions for the rehabilitation of energy efficiency in residential building, *DYNA* 81(186), pp. 200-207, 2014.
- [9] Smith, K.R., Dutta, K., Chengappa, C., Gusain, P.P.S., Berrueta, O. M.V., Edwards, R., and Shields, K.N., Monitoring and evaluation of improved biomass cookstove programs for indoor air quality and stove performance: Conclusions from the Household Energy and Health Project. *Energy for Sustainable Development*, 11(2), pp. 5-18. 2007. DOI: 10.1016/S0973-0826(08)60396-8
- [10] Adkins, E., Tyles, E, Wang, J. Siriri, D. and Modi, V.V., Field testing and survey evaluation of household biomass cookstoves in rural sub-Saharan Africa. *Energy for Sustainable Development*, 14(3), pp. 172-185, 2010. DOI: 10.1016/j.esd.2010.07.003
- [11] Incropera, F. y Dewitt, P., *Fundamentos de Transferencia de Calor*, pp 114-123, Ed. Pearson Education, 1999.
- [12] Aristazabal-Hernandez, J., Validación y evaluación comparativa de la eficiencia de una estufa de leña mejorada bajo condiciones controladas y prueba de campo I. *Informador Técnico*, 78(1), pp. 12-24, 2014.
- [13] INAMHY. Annual reports 2004/2014. Available at: <http://www.serviciometeorologico.gob.ec>
- [14] Proterra, R.E.D.I. and Proterra, R.I., *Técnicas de Construcción con Tierra*, 2011.

R. Delgado-García, graduado de Dr. en Ciencias Técnicas en la Facultad de Máquinas Energéticas, Universidad Politécnica Estatal de San Petersburgo, Rusia, en 1987. Desde 1988 hasta 2010 compartió sus actividades entre el sector productivo y la docencia en la Facultad de Energía Nuclear de la Universidad de la Habana. Profesor Principal Titular de la cátedra de Termodinámica en el Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica, Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, Ecuador.
ORCID: 0000-0002-1244-0877

L. Velasco-Roldán, graduado de Dr. en Arquitectura y Eficiencia Energética en Edificios por la Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Barcelona en 2005. Asesor técnico del Colegio de Arquitectos de las Islas Baleares. Becario Prometeo de la Secretaría Nacional de Educación Superior, Ciencia y Tecnología en el año 2014. Investigador Asociado de la Universidad de las Fuerzas Armadas, Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica.
ORCID: 0000-0001-5778-1934

E. Onofa-Cuichánb, graduado de Ing. Mecánica en la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE en 2015.
ORCID 0000-0001-5916-776X

E. Armas-Figueroa, graduado de Ing. Mecánica en la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE en 2015.
ORCID 0000-0002-7771-8374



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
SEDE MEDELLÍN
FACULTAD DE MINAS

Área Curricular de Ingeniería
Química e Ingeniería de Petróleos

Oferta de Posgrados

Maestría en Ingeniería - Ingeniería Química
Maestría en Ingeniería - Ingeniería de Petróleos
Doctorado en Ingeniería - Sistemas Energéticos

Mayor información:

E-mail: qcaypet_med@unal.edu.co
Teléfono: (57-4) 425 5317