

## Artículo Científico

# Evaluación de un prototipo de cocina de biomasa tipo batch utilizando asai y pellets de aserrín de pino como combustible, conforme a la normativa NB/ISO 19867-1, para su implementación en áreas rurales de Bolivia

Evaluation of a batch-type biomass stove prototype using asai and pine sawdust pellets as fuel, in accordance with regulation NB/ISO 19867-1, for implementation in rural areas of Bolivia

 Mariela Lizbeth Huanca Alcazar<sup>1</sup>  Evelyn Cardozo<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Estudiante. Universidad Mayor de San Simón. Cochabamba. Bolivia. [201801574@est.umss.edu-marielalizbethhuanca@gmail.com](mailto:201801574@est.umss.edu-marielalizbethhuanca@gmail.com)

<sup>2</sup>Investigador. Universidad Mayor de San Simón. Cochabamba. Bolivia. [evelyncardozo.r@fcyt.umss.edu.bo](mailto:evelyncardozo.r@fcyt.umss.edu.bo)

## RESUMEN

En el departamento de Pando, Bolivia, se generan grandes cantidades de residuos de pepa de asaí sin un aprovechamiento adecuado. Este estudio evaluó el desempeño térmico y ambiental de una cocina mejorada de biomasa tipo Batch, conforme a la normativa NB/ISO 19867-1, utilizando pellets de aserrín de pino y mezclas con residuos de asaí como combustibles alternativos.

Se realizaron pruebas experimentales con diferentes combinaciones de combustible (100% pellets de pino, 40% asaí - 60% pellets, y 30% asaí - 70% pellets) para analizar la eficiencia térmica, consumo energético, emisiones de CO, CO<sub>2</sub> y SO<sub>2</sub>. Se emplearon pruebas de hervor de agua y un analizador de gases para la evaluación.

Los resultados indicaron que el uso de pellets puros alcanzó una eficiencia térmica del 35%, mientras que las mezclas con asaí registraron 34.20% y 34.61%, la concentración de CO varió entre 407 ppm (pellets puros), 408 ppm (mezcla 30% asaí, velocidad alta) y 310 ppm (mezcla 30% asaí, velocidad media), con una concentración máxima de CO<sub>2</sub> del 2.47% v/v y 4 ppm de SO<sub>2</sub> aproximadamente.

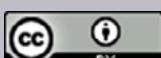
El estudio concluye que la combinación de residuos de asaí con pellets de pino en cocinas mejoradas representa una alternativa viable y sostenible para reducir el impacto ambiental y aprovechar desechos agroindustriales en Bolivia.

**Palabras clave:** Biomasa. Combustibles sólidos. Cocinas de biomasa

## ABSTRACT

In the department of Pando, Bolivia, large quantities of asaí seed waste are generated without proper utilization. This study evaluated the thermal and environmental performance of an improved batch-type biomass stove, in accordance with standard NB/ISO 19867-1, using pine sawdust pellets and mixtures with asaí waste as alternative fuels.

Experimental tests were conducted with different fuel combinations (100% pine pellets, 40% asaí - 60% pellets, and 30% asaí - 70% pellets) to analyze thermal efficiency, energy consumption, CO, CO<sub>2</sub>, and SO<sub>2</sub> emissions, as well



---

as particulate matter generation. Water boiling tests and gas analysis were used for evaluation.

The results indicated that the use of pure pellets achieved a thermal efficiency of 35%, while the asaí mixtures recorded 34.20% and 34.61%. In terms of emissions, CO varied between 407 ppm (pure pellets) and 408 ppm (30% asaí mixture High speed) and 310 ppm (30% asaí mixture, medium speed), with a maximum CO<sub>2</sub> concentration of 2.47% v/v and approximately 4 ppm of SO<sub>2</sub>.

The study concludes that the combination of asaí waste with pine pellets in improved stoves represents a viable and sustainable alternative to reduce environmental impact and utilize agro-industrial waste in Bolivia.

**Keywords:** Biomass. Solid fuels. Biomass stoves

## 1. INTRODUCCIÓN

El uso de biomasa como fuente de energía sigue siendo una alternativa clave en diversas regiones, especialmente en áreas rurales donde el acceso a combustibles fósiles es limitado.

El cambio climático centró nuevamente la atención en la biomasa como la única fuente de carbono orgánico para producir combustibles a gran escala. (Deng et al., 2023). La definición de biomasa varía debido a la heterogeneidad, sin embargo, de manera general la biomasa consiste en una mezcla de materia de origen natural proveniente de plantas y animales (McKendry, 2002). Cabe resaltar que la biomasa es un recurso energético completamente renovable, ya que el CO<sub>2</sub> liberado durante su combustión no contribuye al aumento del dióxido de carbono atmosférico, las plantas absorben el CO<sub>2</sub> liberado en el ambiente por la descomposición de otras plantas, utilizándolo para su crecimiento y procesos metabólicos (Tursi, 2019).

Los bosques y océanos distribuidos en diversas regiones de la Tierra alberga una enorme cantidad de biomasa. Según varios informes, las reservas globales de biomasa, se estima en aproximadamente 1.8 billones de toneladas terrestres y 4 mil millones de toneladas acuáticas. En términos energéticos, el potencial de producción de biomasa a nivel mundial representa más de 80 veces el consumo de energía anual del planeta (Tursi, 2019).

En 2023 se estima que alrededor de 2 mil millones de personas en el mundo aún no tienen acceso a cocinas limpias. La implementación y el desarrollo de esta tecnología han avanzado de manera más lenta en comparación con el acceso a la electricidad (*Access to clean cooking – SDG7, s. f.*).

Debido a la contaminación del aire en el interior de los hogares causada por la cocción de alimentos con combustibles sólidos, anualmente mueren 1.6 millones personas prematuramente, lo que representa más del 2% de las enfermedades a nivel mundial (y el 4% en los países más pobres). (Kshirsagar & Kalamkar, 2014).

Como solución a estos problemas globales, los sistemas de cocinas mejoradas (ICS) que cuentan con una mayor eficiencia energética, menores emisiones de CO y material particulado que las cocinas tradicionales, reducen las enfermedades respiratorias, el tiempo y el costo de obtener combustible, el cambio climático y

---

la deforestación resultantes. En enero de 2011 se estableció nuevos estándares en tecnologías de cocina ICS, al menos un 90% de reducción de emisiones y un 50% de ahorro de combustible en comparación con la tecnología base (fuego de tres piedras) (*Biomass Cookstoves Technical Meeting: Summary Report*, s. f.)

Una cocina de biomasa es un dispositivo diseñado para quemar combustibles sólidos, la energía liberada durante la combustión de la biomasa se dirige a una olla, sartén o plancha, que permite el uso de la energía para la cocción de alimentos, calentar espacios y agua, iluminar interiores. Las cocinas modernas ofrecen más que un fuego común, ya que se caracterizan por su alta eficiencia, bajas emisiones y seguridad para los usuarios. Dependiendo de los hábitos alimenticios, factores socioculturales y tipos de combustible disponibles, existen diversos diseños de cocinas alrededor del mundo, ya sean tradicionales o mejorados (Kshirsagar & Kalamkar, 2014).

El período entre 1970 y 1980 fue el inicio de la primera ola en el desarrollo de estufas mejoradas. Las preocupaciones sobre cómo el uso excesivo de biocombustibles contribuiría a la deforestación y la pobreza motivaron esta primera fase, que se centró en mejorar la eficiencia energética de las estufas, con la reducción de humo como un objetivo secundario. Durante este tiempo, también comenzó el movimiento de cocinas en África, particularmente en el Sahel, tras la grave sequía de finales de los años 70. El terremoto de Guatemala en 1976 introdujo los ICS en Centroamérica, especialmente la estufa Lorena (Westhoff et al., 1995).

A mediados de la década de 1980, los diseños de estufas mejoradas comenzaron a evolucionar constantemente, apoyados en estudios científicos sobre transferencia de calor y mecánica de fluidos. Durante este periodo, se implementaron procedimientos de prueba y diseño sistemáticos, con un enfoque en la eficiencia del combustible y la reducción del humo. Aunque los programas de estufas en India y China fueron clave, Barnes et al. señalaron que no tuvieron mucho éxito entre 1980 y principios de 1990. A partir de los 90, el enfoque se centró en las necesidades del usuario, incluyendo la seguridad y la comodidad, y se integraron preocupaciones medioambientales. Programas como el NPIC en India, que distribuyó más de 35 millones de estufas (Venkataraman et al., 2010), y el NISP en China, que introdujo 129 millones de estufas, marcaron un hito en el desarrollo de estufas mejoradas. Hoy en día, el NISP sigue siendo uno de los programas más exitosos (Barnes & Weltbank, 1994).

Tras más de diez años de declive, el interés por la energía doméstica y, por ende, por las estufas mejoradas resurgió a nivel internacional. En la Cumbre Mundial sobre el Desarrollo Sostenible de 2002, celebrada en Johannesburgo, la EPA de los Estados Unidos lanzó la Alianza para un Aire Interior Limpio, para abordar los riesgos ambientales y de salud asociados con el uso de combustibles de biomasa tradicionales en interiores. Además, en 2008, el Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL) incluyó los programas de estufas en su agenda como parte de proyectos descentralizados más pequeños, registrando alrededor de 14 proyectos de estufas como “Programas de Actividades” para mayo de 2013 (Kshirsagar & Kalamkar, 2014).

El 56 % de la población en países en desarrollo depende principalmente de combustibles sólidos, como la biomasa tradicional y el carbón, para la cocción de sus alimentos, con un acceso muy limitado a formas de energía modernas y más eficientes. La disponibilidad de tecnologías como las cocinas mejoradas alcanza

---

solo al 27 % de las personas que dependen de estos combustibles(Rajkumar et al., 2019). En los países menos desarrollados, los niveles de acceso son aún más bajos; por ejemplo, en África subsahariana, solo el 6 % de la población que utiliza biomasa tradicional cuenta con cocinas mejoradas. No obstante, el acceso es considerablemente mayor en países como China, Tailandia y Brasil. (*Layout 1, s. f.*)

La combustión ineficiente de biomasa genera contaminación del aire en el hogar (HAP), incluyendo emisiones de carbono, carbono orgánico, material particulado (PM2.5), monóxido de carbono (CO) e hidrocarburos policíclicos aromáticos (Kim et al., 2011).

La exposición a estos contaminantes está asociada con enfermedades respiratorias y cardiovasculares, cáncer de pulmón y un sistema inmunológico debilitado, especialmente entre mujeres y niños, ya que las mujeres suelen ser las principales encargadas de cocinar en muchos países de bajos y medianos ingresos (Kim et al., 2011; Pandey et al., 2017). A nivel mundial, más de 3.7 millones de muertes prematuras se atribuyen al humo relacionado con las actividades de cocina (*Low-Cost Solutions Can Give Billions Access to Modern Cooking by 2030, but the World Is Failing to Deliver - News*, 2023; Rajkumar et al., 2019).

Las estufas de cocina de flujo forzado han mostrado ser prometedoras, mejorando la eficiencia térmica y reduciendo las emisiones de CO y PM2.5 (MacCarty et al., 2010). El suministro de aire secundario en estas estufas mejora la mezcla, reduciendo las emisiones de PM2.5. Varios estudios han examinado estufas de cocina de flujo forzado con suministros de aire primario y/o secundario, revelando que la inyección de aire secundario influye en las emisiones de partículas (Kirch et al., 2018; Sharma & Dasappa, 2017). Sin embargo, un mayor flujo de aire del aire secundario a veces puede causar el apagado de la llama, aumentando las emisiones de partículas finas mientras que puede reducir la masa total de material particulado, pero aumentar las concentraciones de partículas ultrafinas. Optimizar el suministro de aire es crucial para mejorar los diseños de las estufas de cocina (Caubel et al., 2018).

El uso de estufas mejoradas de biomasa ha demostrado ser una alternativa eficiente en Etiopía, reduciendo el consumo de combustible y mejorando las condiciones del hogar (Mekonnen, 2022). De manera similar se evaluaron la eficiencia térmica de una estufa mejorada mediante la prueba de ebullición de agua, obteniendo una eficiencia del 25 % al calentar 5 litros de agua (Barpatragohain et al., 2021)

Durante las pruebas experimentales, se evaluaron diferentes diseños de estufas (10, 20 y 40 orificios, además de un diseño alternativo) en función de su eficiencia térmica, producción de calor y emisiones. La estufa de 40 orificios presentó el mayor valor de energía generada (316.880 kJ) y las menores emisiones de gases (273 ppm), aunque también mostró la eficiencia térmica más baja (15.38%). En contraste, el diseño alternativo alcanzó la mayor eficiencia térmica (16.47%) pero con mayores niveles de emisión (333 ppm). Estos resultados demuestran que, si bien se ha logrado un avance significativo en la reducción de emisiones y el aprovechamiento de residuos, es necesario continuar con mejoras técnicas para optimizar el rendimiento térmico. (Himanshu et al., 2022; (*PDF*) *Effect of Holes System Designing for Low Energy Stove Using Coffee Husk Bio-Pellet as Solid Fuel*, s. f.)

Se han desarrollado estudios sobre estufas gasificadoras mejoradas, como el caso de la estufa Belony. Después de la fabricación con la primera modificación, la eficiencia alcanzó un 20,02 % al utilizar cáscara de arroz, un 25,89 % con una mezcla en proporciones iguales de pellets de biomasa y cáscara de arroz, y un 26,27 % al emplear una mezcla en partes iguales de cáscara de arroz y astillas de madera. No obstante, se observó la emisión de cantidades considerables de humo cuando la cámara de combustión principal estuvo completamente cubierta por la base de la olla. El cambio realizado mostró buenos resultados únicamente cuando se utilizaron pellets de biomasa de forma exclusiva; sin embargo, al emplear mezclas con cáscara de arroz o cáscara de arroz sola, se generaron emisiones visibles de humo. Por lo tanto, el uso de pellets de biomasa en esta tecnología se presenta como una opción prometedora para lograr una combustión más limpia y un entorno de cocción más saludable. (Bhusal et al., 2015; Sharma & Dasappa, 2017).

Finalmente, Ahmad et al. (2022) compararon el desempeño de varias estufas de carbón en China, encontrando que el modelo 2-TL presentaba la mayor eficiencia térmica, con un 87.2 % al utilizar briquetas de carbón.

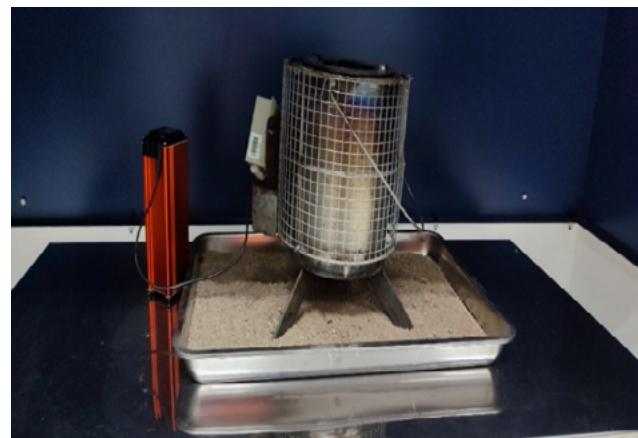
Se han realizado estudios para evaluar el desempeño de siete tipos de cocinas que incorporan un ventilador con el fin de modificar la relación aire-combustible. En dichos estudios se emplearon dos tipos de combustible: briquetas de carbón semicoquizado y carbón crudo. La cocina identificada como 2-TL presentó los valores más altos de eficiencia térmica y las emisiones más bajas de monóxido de carbono (CO) y material particulado, especialmente cuando se utilizaron briquetas como combustible. Estos resultados indican que la homogeneidad de la biomasa y el contenido de humedad tienen una influencia significativa en el aumento de la eficiencia de combustión y en la reducción de contaminantes. (Ahmad et al., 2022)

Este estudio tiene como objetivo analizar el desempeño térmico y ambiental de una cocina conforme a la normativa boliviana NB/ISO 19867-1, empleando pellets de aserrín de pino y residuos de asaí como combustibles. Se busca determinar la viabilidad del asaí como combustible alternativo y evaluar los cambios en la eficiencia, las concentraciones de gases en las mezclas con asaí en comparación con el uso exclusivo de aserrín de madera.

## 2. METODOLOGÍA

### 2.1 Prototipo

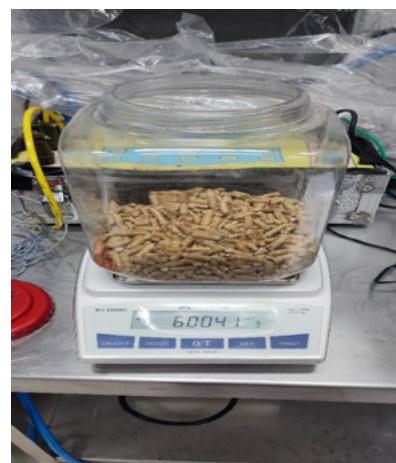
La cocina que se evaluó presenta las siguientes características:



**Figura N°1:** Prototipo de cocina que se evaluó. Fuente: Elaboración propia,2024

Tiene un ventilador con diferentes velocidades, que nos permite regular la entrada de aire a la cámara de combustión que presenta algunos orificios, para una combustión más completa, el ventilador se alimenta con una batería de litio, que se recarga con energía solar que es captada por paneles solares (ver Fig. 1).

El combustible que se usó para la evaluación de la cocina son pellets de 8 mm certificados para evitar variaciones en el tamaño, composición de pellets que podría generar diferencias en la evaluación y así proveniente del departamento de Pando.



**Figura N°2:** Pellets certificados. Fuente: Elaboración propia,2024

## 2.2. Condiciones de rendimiento energético.

Para la determinación de las condiciones de rendimiento energético se desarrolló la prueba bajo la normativa NB/ISO 19867-1, que es una simulación del proceso de cocción que ayuda a entender, a diseñadores de cocinas mejoradas, con qué grado de eficiencia se transfiere la energía generada por el combustible utilizado, la cocina está diseñada para funcionar a diferentes niveles de potencia, por tanto, la cocina se evaluó en 3 fases (potencia alta, potencia media y potencia baja).

Previo a la realización de la prueba se determinó el poder calorífico del combustible, la humedad, registro la temperatura ambiente y temperatura de ebullición local.

### 2.2.1. Poder calorífico

#### Determinación del poder calorífico en bomba calorimétrica

Los pellets fueron triturados y homogenizados con ayuda de un mortero. Posteriormente, una porción de la muestra se envolvió en papel de combustión y se sujetó a un hilo de ignición en la bomba calorimétrica. La bomba fue alimentada con oxígeno a alta presión (~30 atm) para garantizar la combustión completa y luego se sumergió en el agua del calorímetro, registrándose la temperatura inicial. Se inició la combustión y se midió el aumento de temperatura ( $\Delta T$ ). Finalizada la combustión, la solución acuosa remanente, que contenía los ácidos formados, se extrajo y se transfirió a un matraz Erlenmeyer. A la solución se le añadió fenolftaleína como indicador y se tituló con una solución estandar de NaOH 0,02 M hasta alcanzar el punto de equivalencia, determinado por el cambio de color. El volumen de NaOH consumido se registró para la corrección de la energía liberada durante la combustión.

### 2.2.2. Porcentaje Humedad de los pellets.

La humedad de los pellets se determinó mediante el método gravimétrico, utilizando una balanza higrométrica digital. Se tomó una muestra homogenizada, representativa del lote evaluado, la cual fue introducida en el equipo. La muestra fue sometida a una temperatura de 120 °C hasta lograr la evaporación completa del agua. El equipo registró el valor de sólidos totales en la pantalla una vez alcanzada la estabilización, y el porcentaje de humedad se calculó por diferencia respecto al 100 %, se realizaron 3 análisis por lote de pellets y así.

### 2.2.3. Fases de la secuencia de la prueba estándar (eficiencia térmica)

La prueba estándar de eficiencia térmica se llevó a cabo en tres fases consecutivas. Para los pellets, las pruebas se realizaron durante tres días consecutivos, mientras que para las mezclas con asaí se realizaron únicamente dos fases consecutivas durante el mismo período. Cada fase correspondió a diferentes niveles de potencia y velocidades de ventilación de la cocina.

#### Primera fase: potencia alta, velocidad alta (encendido en frío)

Se verificó que la batería de la cocina asistida por ventilador estuviera completamente cargada.

Se pesó la olla vacía y el material de ignición, el cual no debía superar los 30 g por cada 5 litros de agua.

---

Se midió y registró la masa del primer lote de combustible.

La olla se llenó con 5 litros de agua a temperatura ambiente, se pesó nuevamente y se registró la masa total.

Se realizaron las conexiones entre el Data Logger, la computadora y la termocupla, registrándose la temperatura del agua cada 5 segundos.

Se midió la temperatura inicial del agua colocando un termómetro digital sumergible en el centro de la olla, fijado a 5 cm del fondo.

Se introdujo en la cámara de combustión el primer lote de combustible y el material de ignición, encendiéndose la cocina con el ventilador en velocidad alta. Una vez que la llama se estabilizó, se registró la hora de inicio de la prueba.

Cuando el agua alcanzó la temperatura de ebullición local, se anotó la hora de finalización y la temperatura.

Inmediatamente se pesó nuevamente la olla con el agua a temperatura de ebullición.

El combustible restante fue retirado sin el uso de agua para extinguir la llama. Los pellets no consumidos se separaron del carbón, pesándose ambos y registrando sus masas.

### **Segunda fase: potencia media, velocidad media (encendido en caliente)**

Esta fase se inició inmediatamente después de la primera, aprovechando la cocina caliente.

Se repitió el mismo procedimiento de la fase anterior, modificando únicamente la velocidad del ventilador a nivel medio.

### **Tercera fase: potencia baja, velocidad baja (encendido en caliente)**

La tercera fase comenzó de forma inmediata tras finalizar la segunda, manteniendo la cocina caliente.

Se repitió el procedimiento de la fase anterior, con la diferencia de que la velocidad del ventilador se reguló en nivel bajo.

### **2.3. Condiciones de salud (mediciones al interior del ambiente de la cocina).**

Las condiciones de salud se basan en la medición de concentración del monóxido de carbono para este estudio se desarrolló la prueba bajo la normativa NB/ISO 19867-1.

### **Determinación de concentración de monóxido de carbono, dióxido de carbono y dióxido de azufre:**

La prueba se realizó tres veces por día a diferentes potencias de cocción durante tres días consecutivos para los pellets al 100 %. En el caso del asaí, las pruebas se efectuaron únicamente a dos potencias, y a potencia alta con una mezcla de 30 % asaí y 70 % pellets, también durante tres días consecutivos.

Previo a cada ensayo, se efectuó una prueba de fugas, utilizando como gas trazador dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), con el fin de garantizar la estanqueidad del sistema.

Posteriormente, se encendió el analizador de gases HORIBA PG-350, calibrando el equipo y registrando la concentración de CO entre 10 y 20 minutos antes del encendido de la cocina.

Se pesó el combustible y el material de ignición, además de verificar que la batería del ventilador estuviera cargada y en correcto funcionamiento.

Para iniciar la prueba, se encendió la cocina y se reguló la entrada de aire mediante el ventilador en sus diferentes velocidades (baja, media y alta). Seguidamente, se colocó la olla con 5 L de agua, previamente tapada. El sistema se instaló próximo a la tubería del extractor de la campana, procurando evitar fugas. Se registró la hora de inicio de cada ensayo.

Una vez que el agua alcanzó la temperatura de ebullición local, se mantuvo en esa condición durante aproximadamente 45 minutos o hasta que la concentración de CO<sub>2</sub> descendió a la mitad del valor máximo registrado en la prueba.

Durante el proceso, se procuró mantener la llama lo más constante posible. Al concluir el tiempo establecido, se apagó la cocina y de forma simultánea el analizador de gases, registrando la hora de finalización del ensayo.

### 3. RESULTADOS

Para calcular la eficiencia, previamente se determinaron los valores de humedad de los combustibles (pellets y asaí), así como su poder calorífico y la temperatura media de ebullición en Cochabamba.

En la Tabla 1 se presentan los valores de humedad obtenidos mediante la balanza higrométrica digital, donde se observa que el contenido de humedad del asaí es superior al de los pellets.

**Tabla N ° 1.**

Valores de humedad de los combustibles

% Humedad	% Pellets	% Asaí
Análisis 1	5,84	7,60
Análisis 2	5,89	8,04
Análisis 3	5,85	7,81
media	5,86	7,82

Fuente: Elaboración propia, 2025

En la Tabla 2 se presentan los valores de poder calorífico, donde se observa que el asaí posee un poder calorífico inferior al de los pellets. Cabe destacar que las pruebas se realizaron únicamente con las pepas de asaí, sin considerar el bagazo en el muestreo.

**Tabla N ° 2.**

Valores de poder calorífico de los combustibles

Combustible	Equivalente en H <sub>2</sub> O del calorímetro [Kcal/Kg]	Valor calorífico mayor del combustible seco [Mj/Kg]	Valor calorífico menor del combustible seco [Mj/Kg]
Pellets	-4885,5637	-20,4549	-18,1940
Asaí	-3273,7098	-13,7064	-11,4455

Fuente: Elaboración propia, 2025

En la Tabla 3 se presentan los valores promedio registrados desde el inicio de la ebullición hasta cinco minutos después de alcanzada, obteniéndose un valor promedio de aproximadamente 89 °C.

**Tabla N ° 3.**

Valores de temperatura de ebullición media

Nº Prueba	Temperatura media de ebullición en Cochabamba
Prueba 1	89,98
Prueba 2	89,95
Prueba 3	89,05
Promedio	89,66

Fuente: Elaboración propia, 2024

**Valores de eficiencia térmica y tiempo de ebullición de 5 L de agua a diferentes potencias.**

En la Tabla N.º 4 se presentan los valores de eficiencia térmica obtenidos durante tres días consecutivos de pruebas, en las que se evaluó el desempeño de la cocina a diferentes velocidades de ventilación. Los mejores resultados se alcanzaron a velocidad alta, con un promedio de 35,21 %, seguidos por la velocidad media con 34,67 % y la velocidad baja con 32,63 %. Cabe señalar que los cálculos de eficiencia se realizaron sin considerar la masa de carbón residual.

**Tabla N° 4.**

Valores de eficiencia térmica para cada fase de prueba de hervido de 5 L, 100 % pellets

% Eficiencia térmica (100% pellets)			
	Potencia de alta(frio)	Potencia de media(caliente)	Potencia de baja
Prueba 1	35,03	34,46	32,76
Prueba 2	35,52	34,56	32,69
Prueba 3	35,07	35,00	32,44
Promedio	35,21	34,67	32,63

Fuente: Elaboración propia, 2024

En la Tabla N.<sup>o</sup> 5 se presentan los valores de eficiencia térmica obtenidos al utilizar mezclas con asaí como combustible. Cuando la cocina opera a velocidad alta (nivel 5) con una mezcla que contiene un 30 % de asaí, se alcanza una eficiencia del 34,24 %. A velocidad media (nivel 3), con una mezcla de 40 % de asaí, la eficiencia obtenida es de 34,21 %. El mejor resultado se obtuvo al trabajar a velocidad media con una mezcla de 30 % de asaí, alcanzando una eficiencia del 34,61 %. Cabe destacar que los cálculos de eficiencia se realizaron sin considerar la masa de carbón residual.

**Tabla N°5.**

Valores de eficiencia térmica para cada fase de prueba, mezcla de pellets y asaí

% Eficiencia térmica		
Potencia alta (velocidad 5, 30% asaí)	Potencia media (velocidad 3, 40% asaí)	Potencia media (velocidad 3, 30% asaí)
34,24	34,20	34,61

Fuente: Elaboración propia, 2025

En la Tabla N.<sup>o</sup> 6 se presenta el tiempo requerido para que 5 litros de agua alcancen la temperatura de ebullición local, utilizando pellets como único combustible. El menor tiempo se registró a velocidad alta, con un promedio de 16,67 minutos. A velocidad media, el tiempo promedio fue de 17,33 minutos, mientras que a velocidad baja ascendió a 23 minutos. Estos resultados indican que la velocidad alta permite alcanzar la temperatura de ebullición en menor tiempo.

**Tabla N°6.**

Valores de tiempo de hervido de 5 L de agua en los 3 días de prueba en min 100% pellets

Tiempo de ebullición (100% pellets)			
	Potencia de alta(frio)	Potencia de media(caliente)	Potencia de baja
Prueba 1	17	17	22
Prueba 2	16	19	22
Prueba 3	16	16	25
Promedio	16,67	17,33	23,00

Fuente: Elaboración propia, 2024

En la Tabla N.<sup>o</sup> 7 se presenta el tiempo requerido para que 5 litros de agua alcancen la temperatura de ebullición local, utilizando mezclas de asaí y pellets como combustible. El menor tiempo se registró cuando la cocina operó a velocidad alta (nivel 5) con una mezcla que contenía 30 % de asaí, alcanzando la ebullición en 20 minutos. A velocidad media, el tiempo aumentó a 21 minutos con una mezcla de 30 % de asaí y a 24 minutos con una mezcla de 40 % de asaí. Estos resultados indican que tanto la velocidad de operación como el porcentaje de asaí influyen significativamente en el tiempo de ebullición.

**Tabla N°7.**

Valores de tiempo de hervido de 5 L de agua en min, mezcla pellets y asaí

Tiempo de ebullición		
Potencia de alta (velocidad 5, 30% asaí)	Potencia de media (velocidad 3, 40% asaí)	Potencia de media (velocidad 3, 30% asaí)
20	24	21

Fuente: Elaboración propia, 2025

**Concentración de monóxido de carbono**

Se utilizó un analizador de gases HORIBA PG-350, sin realizar ningún tipo de dilución, midiendo las emisiones como si fuera una chimenea. Los valores obtenidos se presentan a continuación.

En la Tabla N.<sup>o</sup> 8 se presentan los valores promedio de concentración de monóxido de carbono (CO) emitido durante el funcionamiento de la cocina a diferentes velocidades. A velocidad alta, se obtuvo un valor promedio de 460 ppm con un coeficiente de variación del 9,94 %. A velocidad media, el promedio fue de 700 ppm con un coeficiente de variación del 12,98 %, mientras que a velocidad baja se registró un valor promedio de 1161 ppm con un coeficiente de variación del 29,50 %. Las mediciones se realizaron durante aproximadamente 45 minutos, hasta que la concentración de CO<sub>2</sub> descendió a la mitad del valor máximo registrado.

**Tabla N° 8.**

Valores promedio de monóxido de carbono y coeficiente de variación entre los valores de los tres días de prueba a diferentes velocidades

Valores Estadísticos				Unidades
Velocidades	5(alta)	3(media)	1(baja)	
Media aritmética	460,09	700,23	1161,32	ppm
Desviación estándar	45,75	90,92	342,56	ppm
CV	0,10	0,13	0,29	
% CV	9,94	12,98	29,50	<25% Se acepta

Fuente: Elaboración propia, 2024

En la Tabla N.º 9 se presenta el valor promedio de concentración de monóxido de carbono (CO) cuando la cocina operó a velocidad alta utilizando una mezcla compuesta por 30 % de asaí y 70 % de pellets. Se obtuvo un valor promedio de 409 ppm, con un coeficiente de variación del 11,9 %. La medición se realizó durante aproximadamente 40 minutos, hasta que la concentración de CO<sub>2</sub> descendió a la mitad del valor máximo alcanzado.

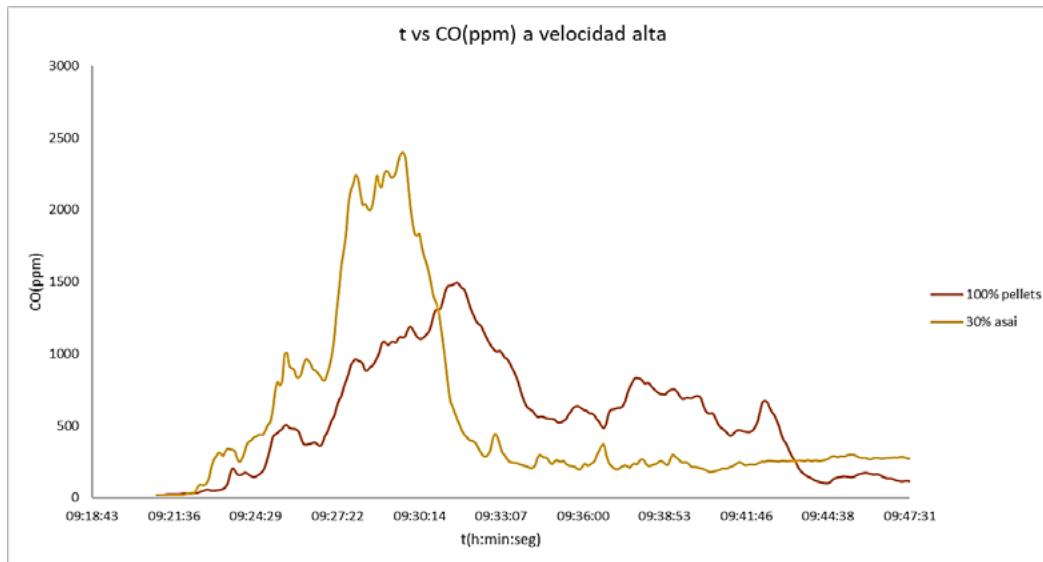
**Tabla N° 9.**

Valor promedio de monóxido de carbono y coeficiente de variación entre los valores de los tres días de prueba de la mezcla 30% asaí a velocidad alta

Valores Estadísticos	
Media aritmética	408,661
Desviación estándar	48,651
CV	0,119
% CV	11,905

Fuente: Elaboración propia, 2025

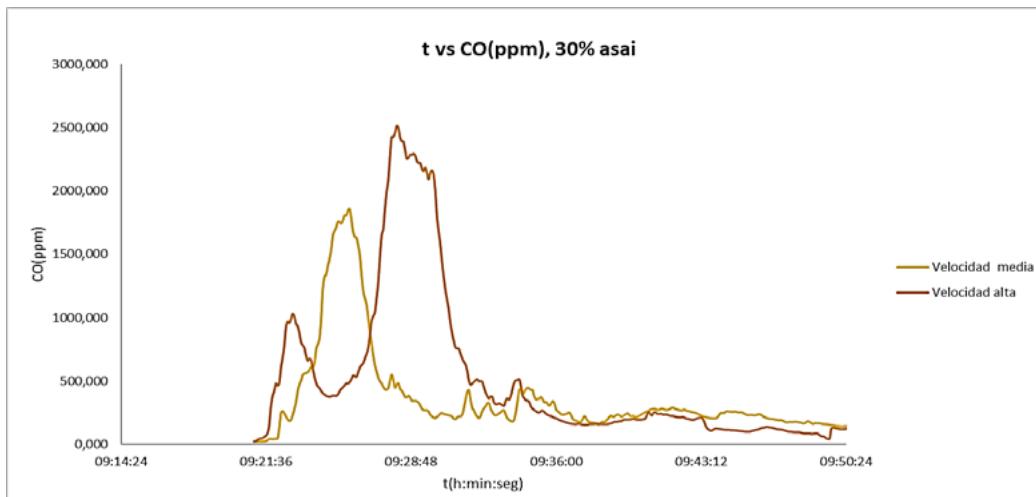
En la Figura N.º 3 se presentan las curvas de concentración de monóxido de carbono (CO) obtenidas durante las pruebas realizadas a velocidad alta. Se observa que, al utilizar mezclas con asaí, las curvas presentan picos iniciales más elevados, los cuales luego descienden y se estabilizan en un valor constante. En contraste, cuando se emplea 100 % pellets como combustible, la concentración de CO no muestra picos altos, pero se mantiene estable en valores superiores a los de las mezclas con asaí durante un periodo más prolongado. Como resultado, los valores promedio de concentración de CO son similares en ambos casos.



**Figura N° 3.** Curvas de concentración de monóxido de carbono en ppm con pellet al 100

y con mezclas de 30% asaí. Fuente: Elaboración propia, 2025

En la Figura N.º 4 se presentan las curvas de concentración de monóxido de carbono (CO) obtenidas durante las pruebas a velocidad media. Se observa que la emisión de CO es menor en comparación con las pruebas realizadas a velocidad alta. Además, el pico máximo de concentración registrado a velocidad media es considerablemente más bajo que el observado a velocidad alta.



**Figura N° 4.** Curvas de concentración de monóxido de carbono en ppm a velocidades media y alta. Fuente: Elaboración propia, 2025

### Para la concentración de dióxido de carbono

En la Tabla N.<sup>o</sup> 10 se presentan los valores promedio de concentración de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) medidos durante tres días consecutivos de pruebas, utilizando como combustible 100 % pellets. A velocidad alta, se obtuvo un valor promedio de 1,95 % v/v con un coeficiente de variación (CV) del 9,5 %. A velocidad media, el valor registrado fue de 2,00 % v/v con un CV de 3,5 %, mientras que a velocidad baja se registró una concentración de 1,50 % v/v con un CV de 10,86 %.

**Tabla N° 10.**

Valores promedio de dióxido de carbono y coeficiente de variación entre los valores de los tres días de prueba, 100% pellets.

Velocidades	Valores Estadísticos			unidades
	5(alta)	3(media)	1(baja)	
Media aritmética	1,95	2,00	1,50	% v/v
Desviación estándar	0,18	0,07	0,16	% v/v
CV	0,09	0,04	0,11	
% CV	9,50	3,50	10,86	<25% Se acepta

Fuente: Elaboración propia, 2024

En la Tabla N.<sup>o</sup> 11 se presentan los valores promedio de concentración de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) obtenidos al utilizar una mezcla de 30 % de asaí y 70 % de pellets como combustible, operando a velocidad alta. Se obtuvo un valor promedio de 2,47 % v/v, con un coeficiente de variación (CV) de 4,56 %.

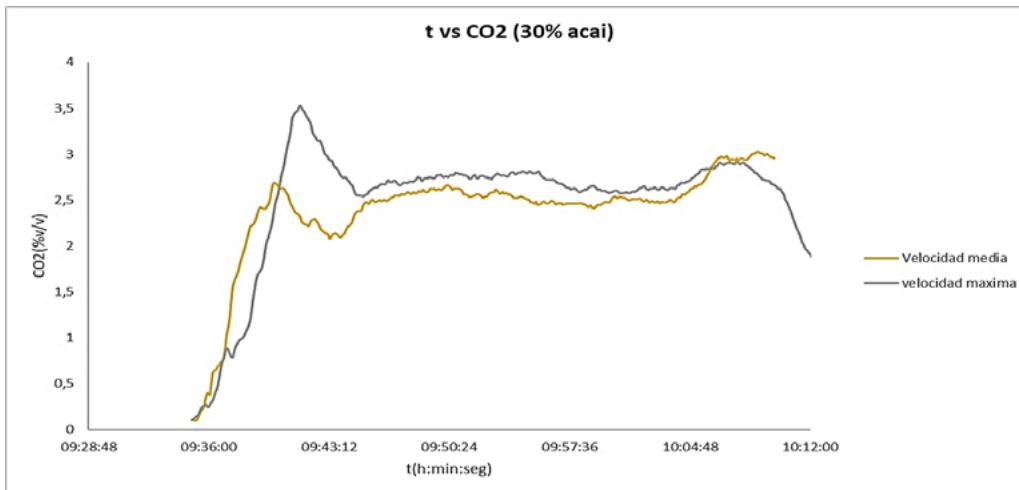
**Tabla N° 11.**

Valor promedio de dióxido de carbono y coeficiente de variación entre los valores de las pruebas con mezclas de 30% asaí y a velocidad alta

Valores Estadísticos (% v/v)	
Media aritmética	2,468
Desviación estándar	0,112
CV	0,046
% CV	4,556

Fuente: Elaboración propia, 2025

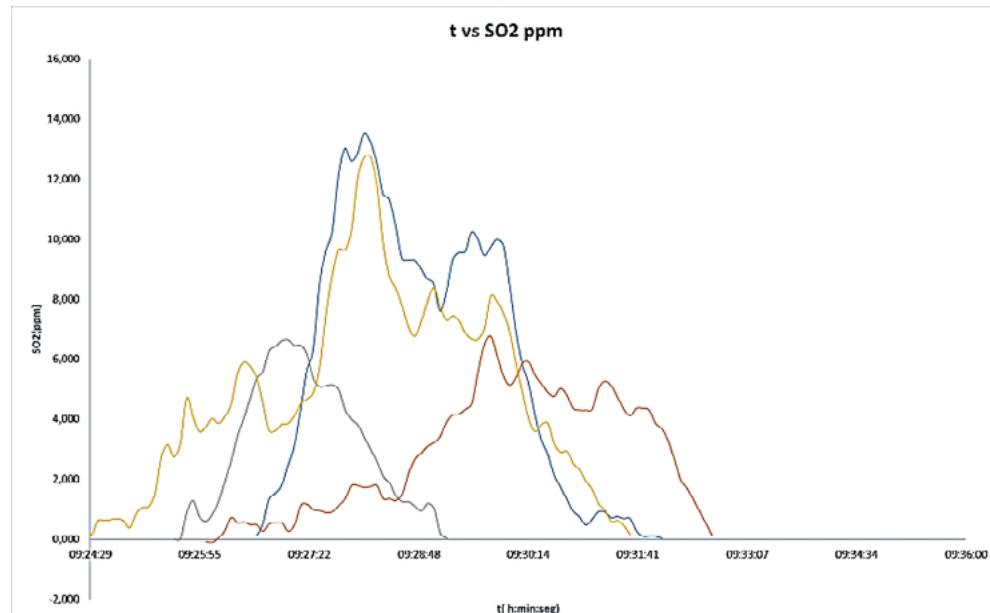
En la Figura N.<sup>o</sup> 5 se presentan las curvas de concentración de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) en % v/v, obtenidas durante el funcionamiento de la cocina a velocidades alta y media utilizando una mezcla de 30 % asaí y 70 % pellets como combustible. Se observa que, a velocidad alta, se alcanzan picos de concentración de CO<sub>2</sub> más elevados en comparación con los registrados a velocidad media.



**Figura N° 5.** Curvas de concentración de dióxido de carbono en % v/v con 30% azaí a velocidad alta. Fuente: Elaboración propia,2025

#### Para la concentración de dióxido de azufre

En la Figura N.<sup>o</sup> 6 se observa la presencia de concentraciones de dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>) cuando se emplean mezclas con azaí como combustible. En cambio, este gas no se detecta al utilizar 100 % pellets de pino. En promedio, se registró un valor de 4 ppm de SO<sub>2</sub>.



**Figura N°6.** Curvas de concentración de dióxido de azufre en ppm en mezclas de 30% azaí a alta velocidad. Fuente: Elaboración propia,2025

#### 4. DISCUSION

El mayor contenido de humedad del asaí (7,82 %) en comparación con los pellets (5,8 %) afecta la eficiencia térmica. Debido a su elevado contenido de humedad, el asaí consume una parte significativa de la energía liberada durante la combustión en la evaporación del agua, disminuyendo así su eficiencia térmica y su poder calorífico neto. Los resultados mostraron que la eficiencia fue menor con las mezclas en general, lo que se alinea con la teoría de que la mayor humedad menores eficiencias. Se observó una diferencia promedio de 4 minutos en el tiempo de ebullición entre ambos combustibles, siendo más eficiente el uso de pellets puros. Esto se debe principalmente a su menor humedad (5,8 %) y mayor homogeneidad, lo que permite una combustión más rápida y estable. En cambio, el asaí, con mayor humedad y composición heterogénea, reduce temporalmente la eficiencia térmica, al requerir más tiempo para alcanzar una combustión óptima.

Los resultados obtenidos muestran que cuando se utiliza pellets de pino al 100 %, el incremento de la velocidad de combustión conlleva una mayor disponibilidad de oxígeno en la cámara, lo que favorece una combustión más completa. Esto se traduce en una disminución de las concentraciones de monóxido de carbono (CO), ya que el oxígeno adicional permite la oxidación completa del CO a CO<sub>2</sub>. Este comportamiento es característico de un proceso de combustión eficiente.

Sin embargo, al utilizar mezclas con 30 % de asaí y 70 % de pellets, se observa un fenómeno contrario: a velocidad alta, las concentraciones de CO aumentan comparada con la prueba a velocidad media de esta misma mezcla. Esto podría deberse a que el asaí por su estructura no tiene una interacción adecuada con el oxígeno debido al corto tiempo de residencia en la cámara y la mayor velocidad de ingreso de aire podría estar enfriando la temperatura del sistema, liberando compuestos volátiles como CO sin que estos lleguen a oxidarse completamente. En contraste, a velocidad media, estas mezclas presentan menores concentraciones de CO, lo que sugiere que una velocidad moderada permite un tiempo de combustión más prolongado, favoreciendo una oxidación más completa de los compuestos generados durante la combustión.

En resumen, la eficiencia de la combustión y la formación de CO en esta cocina dependen tanto del tipo de combustible como de la velocidad de operación. El uso de mezclas con asaí requiere un control más preciso de la velocidad de combustión o incluso un pretratamiento del residuo (como secado) para mejorar su comportamiento energético y reducir las emisiones contaminantes.

En el presente estudio, se observó que, al utilizar exclusivamente pellets de pino, las emisiones de SO<sub>2</sub> fueron prácticamente nulas. Sin embargo, al incorporar semilla de asaí en la mezcla, se detectaron emisiones bajas de SO<sub>2</sub>. La presencia de dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>) en emisiones de combustión suele estar relacionada directamente con el contenido de azufre en el combustible utilizado.

#### 5. CONCLUSIONES

Se realizaron pruebas experimentales para evaluar el rendimiento térmico, consumo energético y emisiones gaseosas de una cocina mejorada, utilizando pellets de pino puros y mezclas con residuos de asaí (30 % y 40 %). Los resultados permitieron establecer lo siguiente:

---

Los pellets de pino presentaron un poder calorífico de 20,45 MJ/kg, mientras que el asaí alcanzó 13,71 MJ/kg, evidenciando que el menor contenido energético y mayor humedad del asaí reduce la eficiencia térmica de las mezclas.

La cocina alcanzó un nivel 3 de eficiencia energética según la normativa ISO/TR 19867-3, mostrando un rendimiento superior al de cocinas tradicionales. La eficiencia térmica fue de 35 % con pellets puros, 34,61 % con 30 % de asaí y 34,20 % con 40 % de asaí. La diferencia se atribuye principalmente a la mayor humedad y composición heterogénea del asaí, que requiere más energía para evaporar el agua antes de la combustión.

El tiempo de ebullición del agua fue menor con pellets puros, aproximadamente 4 minutos menos que con mezclas de asaí, lo que refleja la combustión más rápida y estable de los pellets debido a su estructura homogénea.

Respecto a las emisiones, los pellets puros a velocidad alta generaron 407 ppm de CO (5,96 g CO/MJ), mientras que la mezcla 30 % asaí - 70 % pellets alcanzó 309 ppm de CO a velocidad media, indicando que un flujo de aire moderado favorece la oxidación completa de los compuestos durante la combustión de mezclas.

Se registró una concentración de CO<sub>2</sub> de 2,47 % v/v al usar la mezcla con 30 % de asaí a velocidad alta, y bajas emisiones de SO<sub>2</sub> asociadas a la presencia de compuestos azufrados en el asaí, ausentes en los pellets puros.

En conclusión, la mezcla de residuos de asaí con pellets de pino constituye una alternativa energética sostenible para comunidades rurales donde se genera este residuo. No obstante, el uso de 100 % asaí no resulta viable debido a la imposibilidad de mantener una llama estable con la cantidad de material de ignición recomendada. Para optimizar el desempeño de la cocina, se recomienda ajustar el flujo de aire según el tipo de combustible, equilibrando eficiencia energética y emisiones, así como explorar otras biomasas agroindustriales con buen poder calorífico y bajas emisiones contaminantes. Estas medidas permitirán desarrollar sistemas más limpios, eficientes y adaptados a contextos rurales, promoviendo el uso de residuos como fuente energética renovable y reduciendo el impacto ambiental.

## 6. BIBLIOGRAFIA

*Access to clean cooking – SDG7: Data and Projections – Analysis.* (s. f.). IEA. Recuperado 23 de septiembre de 2025, de <https://www.iea.org/reports/sdg7-data-and-projections/access-to-clean-cooking>

Ahmad, R., Zhou, Y., Liang, C., Li, G., Zhao, N., Abbas, A., Yu, F., Li, L., Gong, J., Wang, D., Yang, Y., Tang, Z., Sultan, M., Sun, C., & Dong, R. (2022). Comparative evaluation of thermal and emission performances for improved commercial coal-fired stoves in China. *RSC Advances*, 12(32), 20886-20896. <https://doi.org/10.1039/D2RA03364J>

Barnes, D. F. & Weltbank (Eds.). (1994). *What makes people cook with improved biomass stoves? A comparative international review of stove programs.* World Bank.

Barpatragohain, R., Bharali, N., & Dutta, P. P. (2021). Thermal Performance Evaluation of an Improved Biomass Cookstove for Domestic Applications. En S. Revankar, S. Sen, & D. Sahu (Eds.), *Proceedings of International Conference on Thermofluids* (pp. 579-590). Springer Singapore. [https://doi.org/10.1007/978-981-15-7831-1\\_54](https://doi.org/10.1007/978-981-15-7831-1_54)

Bhusal, P., Ale, B. B., & Singh, R. M. (2015). *Performance Evaluation of Domestic Rice Husk Gasifier Stove (Belonio Type) and Study on Modification of Design for using Different Biomass.*

*Biomass Cookstoves Technical Meeting: Summary Report.* (s. f.).

Caubel, J. J., Rapp, V. H., Chen, S. S., & Gadgil, A. J. (2018). Optimization of Secondary Air Injection in a Wood-Burning Cookstove: An Experimental Study. *Environmental Science & Technology*, 52(7), 4449-4456. <https://doi.org/10.1021/acs.est.7b05277>

Deng, W., Feng, Y., Fu, J., Guo, H., Guo, Y., Han, B., Jiang, Z., Kong, L., Li, C., Liu, H., Nguyen, P. T. T., Ren, P., Wang, F., Wang, S., Wang, Y., Wang, Y., Wong, S. S., Yan, K., Yan, N., ... Zhou, H. (2023). Catalytic conversion of lignocellulosic biomass into chemicals and fuels. *Green Energy & Environment*, 8(1), 10-114. <https://doi.org/10.1016/j.gee.2022.07.003>

Himanshu, Pal, K., Jain, S., & Tyagi, S. K. (2022). Energy and exergy analysis and emission reduction from forced draft gasifier cookstove models: A comparative study. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 147(15), 8509-8521. <https://doi.org/10.1007/s10973-021-11137-y>

Kim, K.-H., Jahan, S. A., & Kabir, E. (2011). A review of diseases associated with household air pollution due to the use of biomass fuels. *Journal of Hazardous Materials*, 192(2), 425-431. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2011.05.087>

Kirch, T., Birzer, C. H., Medwell, P. R., & Holden, L. (2018). The role of primary and secondary air on wood combustion in cookstoves. *International Journal of Sustainable Energy*, 37(3), 268-277. <https://doi.org/10.1080/14786451.2016.1166110>

Kshirsagar, M. P., & Kalamkar, V. R. (2014). A comprehensive review on biomass cookstoves and a systematic approach for modern cookstove design. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 30, 580-603. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.10.039>

*Layout 1.* (s. f.). Recuperado 23 de septiembre de 2025, de <https://cleancooking.org/wp-content/uploads/2021/07/32-1.pdf>

*Low-cost solutions can give billions access to modern cooking by 2030, but the world is failing to deliver—News.* (2023, julio 26). IEA. <https://www.iea.org/news/low-cost-solutions-can-give-billions-access-to-modern-cooking-by-2030-but-the-world-is-failing-to-deliver>

MacCarty, N., Still, D., & Ogle, D. (2010). Fuel use and emissions performance of fifty cooking stoves in the laboratory and related benchmarks of performance. *Energy for Sustainable Development*, 14(3), 161-171. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2010.06.002>

---

McKendry, P. (2002). Energy production from biomass (part 2): Conversion technologies. *Bioresource Technology*, 83(1), 47-54. [https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(01\)00119-5](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(01)00119-5)

Mekonnen, B. A. (2022). Thermal efficiency improvement and emission reduction potential by adopting improved biomass cookstoves for sauce-cooking process in rural Ethiopia. *Case Studies in Thermal Engineering*, 38, 102315. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2022.102315>

Pandey, A., Patel, S., Pervez, S., Tiwari, S., Yadama, G., Chow, J. C., Watson, J. G., Biswas, P., & Chakrabarty, R. K. (2017). Aerosol emissions factors from traditional biomass cookstoves in India: Insights from field measurements. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 17(22), 13721-13729. <https://doi.org/10.5194/acp-17-13721-2017>

(PDF) *Effect of holes system designing for low energy stove using coffee husk bio-pellet as solid fuel.* (s. f.). ResearchGate. Recuperado 23 de septiembre de 2025, de [https://www.researchgate.net/publication/329152217\\_Effect\\_of\\_holes\\_system\\_designing\\_for\\_low\\_energy\\_stove\\_using\\_coffee\\_husk\\_bio-pellet\\_as\\_solid\\_fuel](https://www.researchgate.net/publication/329152217_Effect_of_holes_system_designing_for_low_energy_stove_using_coffee_husk_bio-pellet_as_solid_fuel)

Rajkumar, S., Young, B. N., Clark, M. L., Benka-Coker, M. L., Bachand, A. M., Brook, R. D., Nelson, T. L., Volckens, J., Reynolds, S. J., L'Orange, C., Good, N., Koehler, K., Africano, S., Osorio Pinel, A. B., & Peel, J. L. (2019). Household air pollution from biomass-burning cookstoves and metabolic syndrome, blood lipid concentrations, and waist circumference in Honduran women: A cross-sectional study. *Environmental Research*, 170, 46-55. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2018.12.010>

Sharma, M., & Dasappa, S. (2017). Emission reduction potentials of improved cookstoves and their issues in adoption: An Indian outlook. *Journal of Environmental Management*, 204, 442-453. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.09.018>

Tursi, A. (2019). A review on biomass: Importance, chemistry, classification, and conversion. *Biofuel Research Journal*, 6(2), 962-979. <https://doi.org/10.18331/BRJ2019.6.2.3>

Venkataraman, C., Sagar, A. D., Habib, G., Lam, N., & Smith, K. R. (2010). The Indian National Initiative for Advanced Biomass Cookstoves: The benefits of clean combustion. *Energy for Sustainable Development*, 14(2), 63-72. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2010.04.005>

Westhoff, B., Europäische Kommission, Germann, D., & Rigby, N. (with Commission of the European Community & SfE - Sozietät für Entwicklungsplanung). (1995). *Stove images: A documentation of improved and traditional stoves in Africa, Asia and Latin America* (1. engl. ed). Brandes und Apsel.