UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR

FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA

EVALUACIÓN ENERGÉTICA DE COCINAS ARTESANALES A LEÑA DE LA ESTACIÓN EXPERIMENTAL DE LA FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS DE LA UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR

PRESENTADO POR:

SANDRA DIONISIA VILLANUEVA BELTRÁN

PARA OPTAR AL TÍTULO DE:

INGENIERA MECÁNICO

CIUDAD UNIVERSITARIA, ABRIL 2024

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR

RECTOR :

MSc. JUAN ROSA QUINTANILLA

SECRETARIA GENERAL :

Lic. PEDRO ROSALÍO ESCOBAR CASTANEDA

FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

DECANO :

Ing. LUIS SALVADOR BARRERA MANCÍA

SECRETARIO :

Arq. RAÚL ALEXANDER FABIÁN ORELLANA

ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA

DIRECTOR INTERINO :

M.Sc. e Ing. GUSTAVO SALOMÓN TORRES RÍOS LAZO

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA

Trabajo de Graduación previo a la opción al Grado de:

INGENIERA MECÁNICO

Título :

EVALUACIÓN ENERGÉTICA DE COCINAS ARTESANALES A LEÑA DE LA ESTACIÓN EXPERIMENTAL DE LA FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS DE LA UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR

Presentado por :

SANDRA DIONISIA VILLANUEVA BELTRÁN

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docente Asesor :

M.Sc. e Ing. LEYLA MARINA JIMENÉZ MONROY

San Salvador, abril de 2024

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docente Asesor :

M.Sc. e Ing. LEYLA MARINA JIMENÉZ MONROY

AGRADECIMIENTOS

A la Facultad de Ciencias Agronómicas por abrirme las puertas de la Estación Experimental y de Prácticas, brindarme las herramientas y apoyo para la realización de esta investigación. De manera especial a los ingenieros José Mauricio Tejada, Rigoberto Antonio Urías y Juan De Dios Chávez, quienes me apoyaron en las diferentes visitas y pruebas que llevé a cabo.

A mi docente asesor, M.Sc. e Ing. Leyla Marina Jiménez Monroy por la motivación, asesoría y paciencia durante la realización de esta investigación.

INDICE

AGRADECIMIENTOS i

INDICE DE FIGURAS Y GRÁFICOS v

INDICE DE TABLAS vii

INTRODUCCIÓN ix

OBJETIVOS GENERALES Y ESPECÍFICOS xi

1 MARCO TEÓRICO 1

1.1 Cocinas artesanales a leña. 1

1.2 Cocinas a leña mejoradas. 3

1.3 Biomasa y combustibles sólidos 6

1.3.1 Biomasa 6

1.3.1.1 Características energéticas de la biomasa 7

1.3.2 Combustibles sólidos 9

1.4 Contaminación y riesgos causados por el empleo de leña como combustible. 14

1.4.1 Contaminación atmosférica 14

1.4.1.1 Contaminación del aire por partículas en suspensión y gases de combustión. 14

1.4.1.2 Emisión de CO_2 a la atmósfera 17

1.4.2 Riesgos para la salud 17

1.5 Marco Legal 22

1.6 Eficiencia térmica en cocinas de biomasa. 24

1.6.1 Eficiencia energética en cocinas artesanales a biomasa y transferencia de energía 27

1.6.2 Eficiencia energética en cocinas mejoradas de biomasa y transferencia de energía 29

2 METODOLOGÍA DEL ESTUDIO 33

2.1 Protocolos internacionales de rendimiento en cocinas a leña. 33

2.1.1 Prueba de ebullición de agua (Water Boiling Test 4.2.3). 33

2.1.1.1 Beneficios y limitantes de la prueba de ebullición de agua. 38

2.1.1.2 Panorama general, prueba de ebullición de agua. 39
2.1.2 Prueba de cocción controlada (CCT 2.0). 41
2.1.2.1 Objetivos de la prueba de cocción controlada 42
2.1.3 Prueba de desempeño de cocinas (KPT 4.0)..... 43
2.1.3.1 Objetivos y aplicaciones de la prueba de desempeño de cocinas. 45
2.1.4 Emisiones contaminantes (WBT 4.2.3) 46
2.1.4.1 Medidas De Emisiones 47
2.1.5 Norma ISO 19867:1 48
2.1.5.1 Panorama general del protocolo ISO 19867:1 49
2.2 Selección de protocolos internacionales a aplicar en la investigación.....50
2.3 Selección de combustible sólido. 51
2.3.1 Condiciones del combustible para la prueba de ebullición del agua. 52
2.4 Equipos e instrumentos necesarios.....53
2.4.1 Equipos e instrumentos necesarios para la prueba de ebullición de agua y emisiones contaminantes. 53
2.5 Proceso de acondicionamiento para la toma de las muestras. 54
2.5.1 Seguridad Y Salud..... 54
2.5.2 Condiciones generales previas 54
2.5.3 Seleccionando el combustible y las ollas para la prueba..... 55
2.5.4 Preparación previa a la toma de datos 56
2.6 Instrucciones para cada fase de la prueba de ebullición del agua.....60
3 RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS 67
3.1 Indicadores de desempeño y toma de datos para los modelos de cocina evaluados.67
3.1.1 Procedimiento para toma de datos para pruebas en cocina tradicional y mejorada tipo rocket. 69
3.2 Cálculos y resultados. 73
3.2.1 Cálculos y resultados prueba de ebullición de agua para cocina tradicional (fabricada localmente)..... 73

3.2.2 Cálculos y resultados prueba de ebullición de agua para cocina mejorada tipo Rocket…… 79

3.3 Comparación de aprovechamiento y eficiencia energética de cocina a leña de la EEP con cocina mejorada. 85

3.4 Oportunidades de mejora y trabajos futuros. 87

CONCLUSIONES.....89

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....92

ANEXOS 96

Anexo A. Procedimiento de construcción de cocina tradicional 96

Anexo B. Datos tomados para pruebas en cocina tradicional.....100

Anexo C. Datos tomados para pruebas en cocina mejorada tipo rocket. 101

Anexo D. Hoja de cálculo WBT versión 4.2.4.....103

INDICE DE FIGURAS Y GRÁFICOS

Figura 1.1. Cocina tradicional de 3 piedras, (Partnership for Clean Indoor Air, 2012) 1

Figura 1.2 Origen de la biomasa, (TRANSBIOMA,2012) 6

Figura 1.3 Consumo mundial de energía primaria por fuente. (Smil, 2017) 11

Figura 1.4 Hogares por tipo de combustible para cocinar, según área geográfica (EHPM, 2022) 12

Figura 1.5 Comparación de tamaño entre PM10 y PM2.5 y cabello humano, (MARN, 2017) 15

Figura 1.6 Vista lateral de cocina con los modos de transferencia de calor (Elaboración propia) 25

Figura 1.7 Esquema de volumen de control en cocina (Elaboración propia).....26

Figura 2.1. Temperatura durante las tres fases de la prueba de ebullición. (N. MacCarty) 41

Figura 2.2 Potencia durante las tres fases de la norma ISO 19867-1. (EPA, 2018) ...49

Figura 2.3 Formato para toma de datos traducido y tropicalizado de la WBT 4.2.3 (Clean Cooking Alliance, 2014) 59

Figura 2.3. Instrucciones para cada fase de la prueba de ebullición de agua, traducido y tropicalizado de la WBT 4.2.3 (Clean Cooking Alliance, 2014).....68

Figura 3.1. Dimensiones de la cocina mejorada tipo “rocket” empleada para las pruebas. (elaboración propia). 70

Figura 3.2. Fotografía de la cocina mejorada empleada para las pruebas. (Fuente propia). 72

Figura 3.3. Cocina tradicional durante el proceso de encendido del fuego. (Fuente propia). 72

Gráfico 1. Variabilidad de las características e indicadores de eficiencia en la prueba de ebullición del agua para la cocina tradicional usando leña de madrecacao. (Elaboración propia) 78

Gráfico 2. Variabilidad de las características e indicadores de eficiencia en la prueba de ebullición del agua para la cocina mejorada tipo rocket usando leña de madrecacao. (Elaboración propia).....84

Figura A. 1. Ladrillo rojo, con sección de 27x13.5x7 cm. 96

Figura A. 2. Proceso de recolección de tierra blanca. 97

Figura A. 3. Preparación de la mezcla para fabricación de cocina tradicional. 97

Figura A. 4. Colocación de mezcla y ladrillos durante el proceso de fabricación de cocina tradicional. 98

Figura A. 5. Cocina tradicional fabricada con prácticas locales. 99

Figura A. 6. Datos para las tres fases de la prueba A1 en cocina tradicional. 100

Figura A. 7. Datos para las tres fases de la prueba A2 en cocina tradicional. 100

Figura A. 8. Datos para las tres fases de la prueba A3 en cocina tradicional. 100

Figura A. 9. Datos para las tres fases de la prueba B1 en cocina mejorada. 101

Figura A. 10. Datos para las tres fases de la prueba B2 en cocina mejorada. 101

Figura A. 11. Datos para las tres fases de la prueba B3 en cocina mejorada. 101

Figura A. 12. Datos para las tres fases de la prueba B4 en cocina mejorada. 102

Figura A. 13. Datos para las tres fases de la prueba B5 en cocina mejorada. 102

Figura A. 12. Hoja de cálculo de WBT versión 4.2.4. para información general. [Captura de pantalla]. 103

Figura A. 13. Hoja de cálculo de WBT versión 4.2.4. [Captura de pantalla] 104

Figura A. 14. Hoja de cálculo de WBT versión 4.2.4. para consolidación de resultados. [Captura de pantalla] 105

INDICE DE TABLAS

Tabla 1.1. Cocinas mejoradas usadas en El Salvador, (BUN-CA, 2012)..... 5

Tabla 1.2 Tipos de biomasa, biocombustibles sólidos (Garg, 2006) 10

Tabla 1.3 Norma de Calidad de aire ambiente (inmisiones), (Norma Salvadoreña, NSO 13.11.01:01).....16

Tabla 1.4 Guías de calidad del aire y objetivos intermedios para material particulado: media anual, (WHO, 2005) 20

Tabla 1.5 Guías de calidad del aire y objetivos intermedios para material particulado: media de 24 horas, (WHO, 2005).....21

Tabla 1.6 Resultados de eficiencia para cocinas tradicionales en condiciones de laboratorio, (Partnership for Clean Indoor Air, 2012) 28

Tabla 1.7 Resultados de eficiencia para estufas Justa, (Partnership for Clean Indoor Air, 2012) 31

Tabla 2.1. Especies candidatas a emplear como biocombustible. 53

Tabla 3.1. Gcrit para el método de Grubbs. 73

Tabla 3.2. Cálculo de la velocidad de combustión para pruebas en cocina tradicional. Aplicación del test de Grubbs para identificar valores atípicos. (Elaboración propia). 73

Tabla 3.3. Cálculo de la potencia para pruebas en cocina tradicional. Aplicación del test de Grubbs para identificar valores atípicos. (Elaboración propia). 74

Tabla 3.4. Cálculo de la velocidad del tiempo de ebullición para pruebas en cocina tradicional. Aplicación del test de Grubbs para identificar valores atípicos. (Elaboración propia). 75

Tabla 3.5. Cálculo de temperatura del tiempo de ebullición corregida para pruebas en cocina tradicional. Aplicación del test de Grubbs para identificar valores atípicos. (Elaboración propia). 76

Tabla 3.6 Cálculo de la eficiencia térmica para pruebas en cocina tradicional. Aplicación del test de Grubbs para identificar valores atípicos. (Elaboración propia). 77

Tabla 3.7. Cálculo del consumo específico para pruebas en cocina tradicional. Aplicación del test de Grubbs para identificar valores atípicos. (Elaboración propia). 77

Tabla 3.8. Cálculo de la velocidad de combustión para pruebas en cocina mejorada. Aplicación del test de Grubbs para identificar valores atípicos. (Elaboración propia). 79

Tabla 3.9. Cálculo de la potencia para pruebas en cocina mejorada. Aplicación del test de Grubbs para identificar valores atípicos. (Elaboración propia).....80

Tabla 3.10. Cálculo del tiempo de ebullición para pruebas en cocina mejorada. Aplicación del test de Grubbs para identificar valores atípicos. (Elaboración propia). 81

Tabla 3.11. Cálculo de la temperatura del tiempo de ebullición corregida para pruebas en cocina mejorada. Aplicación del test de Grubbs para identificar valores atípicos. (Elaboración propia). 82

Tabla 3.12. Cálculo de la eficiencia térmica para pruebas en cocina mejorada. Aplicación del test de Grubbs para identificar valores atípicos. (Elaboración propia) 82

Tabla 3.13. Cálculo del consumo específico para pruebas en cocina mejorada. Aplicación del test de Grubbs para identificar valores atípicos. (Elaboración propia) 83

Tabla 3.14. Características entre fases de alta potencia (inicio frio) para prueba de ebullición de agua. (Elaboración propia). 85

Tabla 3.15. Características entre fases de alta potencia (inicio caliente) para prueba de ebullición de agua. (Elaboración propia). 86

Tabla 3.16. Características entre fases de baja potencia (ebullir a fuego lento) para prueba de ebullición de agua. (Elaboración propia) 86

INTRODUCCIÓN

La evaluación de la eficiencia energética de cocinas ha ido evolucionando desde la década de los 80´s con organizaciones como la VITA hasta hoy en día con la Clean Cooking Alliance, la cual recopila de manera general, tres pruebas de rendimiento con diferentes variantes y aplicaciones específicas. Incluso la Organización Internacional de Estandarización (ISO) ha incluido desde el 2018 dentro de sus normas, un protocolo para la evaluación de la eficiencia energética y emisiones en cocinas. La finalidad de la aplicación de estos estándares en esta investigación es apoyar el desarrollo y sustentar el uso de cocinas que ofrezcan un rendimiento más limpio, con lo que se salvaguarda la salud y los recursos medio ambientales.

En la investigación presentada por M.R. Avilés & S.E. Morán, “Evaluación de tres modelos de cocinas ahorradoras de leña lorena mejorada, tezulutlán y finlandia, y un prototipo de cocina con dos materiales de combustión en San Luis Talpa, La Paz, El Salvador”, se proyectaron nuevos desafíos en la evaluación, la cual se limitó a estudiar el consumo de leña y tiempos de ebullición. Por lo que, tomando esa proyección, la intención inicial para este trabajo fue aplicar estándares internacionales para la evaluación de eficiencia energética, medir emisiones de gases, sistematizar la información para estas cocinas y establecer formatos basados en estos protocolos internacionales para ser empleados en pruebas de rendimiento. Debido a reestructuraciones y cambios en la Estación Experimental y de Prácticas, las cocinas que serían objeto de estudio fueron removidas, por lo que el objeto de estudio pasó a ser una cocina tradicional, construida con métodos autóctonos del lugar y la cocina mejorada tipo Rocket.

El cuerpo del estudio se divide en el marco teórico donde se da explicación a algunas variables, la segunda parte es la metodología del estudio, donde se proponen y descartan los estándares y elementos a emplear en los experimentos y la parte tres que es la recopilación de datos obtenidos de las pruebas, para finalmente presentar resultados y conclusiones de los objetivos que motivaron esta investigación.

Tanto para la cocina tradicional como para la mejorada tipo rocket se realizaron pruebas, aplicando el protocolo de la prueba de ebullición de agua. Se llevaron a cabo 3 pruebas para la cocina tradicional y 5 pruebas para la cocina mejorada. Con las cuales se recopiló información de diferentes variables como el consumo especifico, eficiencia térmica, tiempo de ebullición corregido, potencia, etcétera.

OBJETIVOS GENERALES Y ESPECÍFICOS

OBJETIVO GENERAL

- ✓ Evaluar la eficiencia energética de las cocinas artesanales a leña con que cuenta la estación experimental de la Facultad de Ciencias Agronómicas de la Universidad de El Salvador.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- ✓ Analizar el consumo de la energía basándose en pruebas estandarizadas que evalúen la eficiencia energética, temperaturas, tiempo de ebullición, la tasa de incineración y el consumo específico de combustible de los tipos de cocinas artesanales a leña con que cuenta la Estación experimental.
- ✓ Medir las emisiones, producto de la combustión.
- ✓ Identificar otras variables pertinentes que afecten el uso de la leña como combustible.
- ✓ Identificar, priorizar y registrar oportunidades para mejorar el desempeño energético de las cocinas artesanales a leña de la Estación Experimental.
- ✓ Sistematizar la información de la eficiencia energética de los tipos de cocinas artesanales a leña con que cuenta la Estación experimental.

1 MARCO TEÓRICO

1.1 Cocinas artesanales a leña.

La cocción de alimentos se realiza tradicionalmente utilizando fogones abiertos o en un artefacto rudimentario que por lo general es construido en el hogar y que puede tener o no chimenea. El diseño más simple consiste de 3 piedras, que pueden ajustarse al tamaño y forma de una olla o comal[1], como se representa en la figura 1.1. Otros artefactos comunes son los fogones en forma de U que se construyen con 3 paredes de ladrillos u otros materiales locales alrededor del fuego.

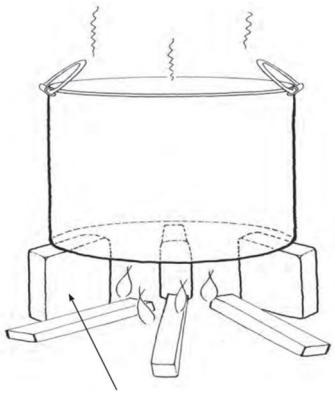


Figura 1.1. Cocina tradicional de 3 piedras, (Partnership for Clean Indoor Air, 2012)

La cocina tradicional de leña es un dispositivo que hace que los alimentos se cocinen de un modo sumamente ineficiente ya que presenta una serie de desventajas, entre ellas un consumo excesivo de combustible. El principio de funcionamiento de la cocina tradicional se basa en la combustión incompleta de

[1] Díaz, Rodolfo (OLADE). *Asistencia técnica sobre lecciones aprendidas y recomendaciones para el desarrollo de proyectos de estufas eficientes en Guatemala, El salvador, Honduras, Nicaragua y Panamá*. 2010

la leña por medio de la cual convierte la energía potencial del combustible en energía calorífica por procesos de transferencia de calor, transfiriendo esta energía de calor a la olla o recinto donde se encuentran los alimentos y, expulsando el humo hacia sus alrededores que es una fuente importante de contaminación y, por ende, de enfermedades, sobre todo para las mujeres, los niños y ancianos que desarrollan actividades familiares alrededor del fogón.

Se continúa usándolas porque tienen las ventajas siguientes: son económicas o no tienen ningún costo, fáciles de construir, usar y cambiar de lugar, se pueden utilizar diferentes especies de combustibles y se adaptan a las formas de los recipientes. Sin embargo, su principal problema es la baja eficiencia, la cual oscila entre el 5% y el 15%[2]. Por otro lado, la combustión de la leña es incompleta e incontrolada y genera una gran cantidad de partículas y gases contaminantes, ocasionado también un elevado consumo de leña.

Desventajas:

- ✓ Desprende humo en el ambiente circundante de la cocina.
- ✓ Peligro de quemaduras debido al contacto directo con el fuego.
- ✓ Pérdida del calor en un 80% por esar el fuego al aire libre.
- ✓ Inestabilidad en el soporte de las ollas con riesgo de sufrir quemaduras.
- ✓ Posición inadecuada al momento de cocinar (dolores de espaldas).

[2] Dutt, G. *Cheranatzicurin: tecnología apropiada para cocinar con leña*. 1989. Ciencias, No. 15, pp. 43-47.

- ✓ Hollín en los alrededores de la cocina.
- ✓ Ambiente antihigiénico.
- ✓ Mayor uso de combustible (leña, bosta), incrementando el gasto del hogar.
- ✓ Demora en la preparación de los alimentos.

1.2 Cocinas a leña mejoradas.

Nace de la concepción de transformar la cocina tradicional a leña en una de mejor eficiencia, con la finalidad de reducir el consumo de leña y mitigar el consumo de combustibles sólidos como madera. Por tanto, se le llamó “cocina mejorada” al diseño de una cocina práctica, económica, que pueda usar combustibles sólidos de la zona y asegure un mayor aprovechamiento energético de estos. Es un sistema de cocción de alimentos que también permite una disminución o eliminación de las emisiones de gases en el interior de la vivienda por la quema de madera para cocinar alimentos. Debe de permitir cocinar bien o mejor los alimentos que en un fogón tradicional y tener un costo accesible a los usuarios.

Entre los objetivos que se tiene en la implementación de una cocina mejorada están los siguientes:

- ✓ Ahorrar combustible para cocinar, como la leña.
- ✓ Mejorar la salud de la población expulsando el humo al exterior de las viviendas, por medio de una chimenea.
- ✓ Mejorar el proceso de combustión.

- ✓ Mejorar las condiciones de limpieza y comodidad durante la preparación de alimentos.
- ✓ Reducir los tiempos de preparación de alimentos.

Las cocinas mejoradas constan de una cámara de combustión, un canal o canales por los que circula el humo, comales y planchas y una chimenea. Los beneficios del uso de estas estufas son la reducción en el consumo de leña lo que también reduce el tiempo que se invierte en conseguirla, disminuye la deforestación y se mitigan emisiones de gases de efecto invernadero (GEI). Además, expulsa el humo fuera de la vivienda, si cuenta con chimenea, lo que reduce los riesgos a la salud por padecimientos respiratorios.

Para lograr estas características, una estufa mejorada debe cumplir criterios mínimos de diseño como tener un fuego encerrado que permita una buena combustión de la leña, y un adecuado suministro de aire que disminuya la radiación térmica y reduzca las emisiones de gas y su contenido tóxico. También debe garantizar una buena transferencia de calor hacia los utensilios para cocinar, ya sea en contacto directo con las llamas y gases calientes o a través de una plancha. Pueden tener chimeneas para la extracción de los gases de combustión hacia el exterior de los hogares. Los materiales que se utilizan en su construcción deben ser resistentes al calor y con alto aislamiento térmico.

Los modelos de estufas mejoradas con fuego directo y sin chimeneas son los que tienen costos muy bajos de implementación, tienen alta eficiencia energética, mejoran la calidad de las emisiones, pero no las eliminan del interior de los hogares; y son más fáciles de operar, mantener y reparar. Aquellos

modelos que poseen chimeneas, tienen media y alta eficiencia energética, son más fáciles de encender por el tiro ejercido por la chimenea, poseen planchas metálicas, son más costosos y se requiere capacitación para su operación y mantenimiento. En ambos tipos de modelos hay problemas con el tamaño de la leña, porque requieren pequeños diámetros. En Centroamérica y específicamente en el país se poseen diseños de estufas mejoradas con y sin chimeneas, estos diseños se presentan en la tabla 1.1:

Tabla 1.1. Cocinas mejoradas usadas en El Salvador, (BUN-CA, 2012)

Tipo de modelo	**Principales características**
Armenia	El principio de funcionamiento de las estufas de leña tipo Armenia es el ahorro de la leña, lo que se consigue al mejorar la combustión con una buena circulación del aire. Ello permite una mejor distribución de la llama y conservar el calor en el interior de la estufa. El modelo de las estufas Armenia se creó tomando como base el de la cocina Lorena, a la cual se le hicieron adaptaciones provenientes de otros modelos.
Turbococina	Es la aplicación práctica del "Método de combustión a baja temperatura". Logra ahorros de hasta un 90%, debido a que aprovecha al máximo la energía generada por la combustión de la madera, utilizando pequeños trozos de leña.
Ecocinas	Las Ecocinas son estufas mejoradas portátiles, cuya reducción de consumo de leña se estima en un 70%, según sus diseñadores. La reducción en el humo es de aproximadamente el 90%, comparadas con un fogón abierto, las cuales utilizan el conocido diseño de la organización Stove Team International.

1.3 Biomasa y combustibles sólidos

1.3.1 Biomasa

Es toda materia orgánica no fosilizada, ya sea originada en un proceso biológico espontaneo o provocado. Esta materia puede tener múltiples usos y utilidades para las personas, tal como suponer una fuente de energía, pues se puede trasformar en sustancias combustibles denominadas biocombustibles.

La energía que acumula la biomasa tiene su origen en el sol: a partir del proceso denominado fotosíntesis, las plantas absorben energía lumínica del sol, agua del suelo y el CO_2 de la atmósfera, almacenando en ellas sustancias orgánicas (energía) y liberando oxígeno durante el proceso. Posteriormente, los animales incorporan y transforman esta energía al alimentarse de las plantas, por lo que los productos de esta transformación, que se consideran residuos, también pueden ser utilizados como recurso energético, tal como se muestra en la figura 1.2.

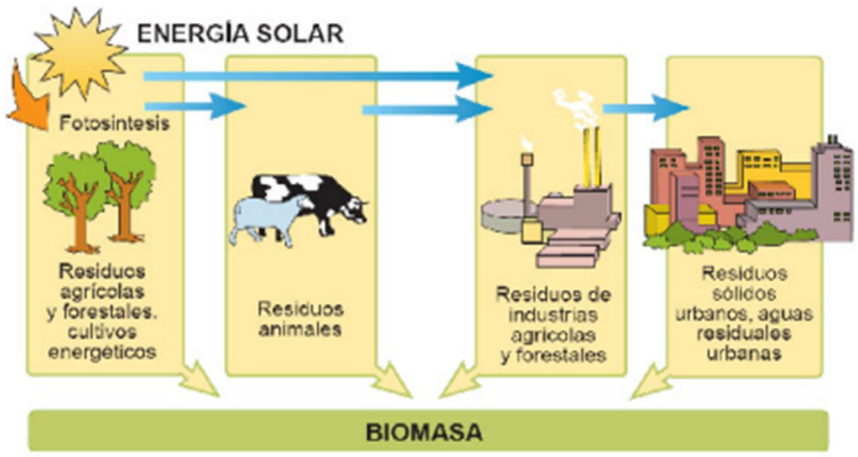


Figura 1.2 Origen de la biomasa, (TRANSBIOMA,2012)

1.3.1.1 Características energéticas de la biomasa

La evaluación de la viabilidad técnica y económica de un proceso de conversión de la biomasa en energía requiere considerar ciertos parámetros y condiciones, agrupados en:

Composición química: los diferentes tipos de biomasa están formados por una parte orgánica, una inorgánica y agua. Durante la combustión, se quema la parte orgánica, la inorgánica influye en el proceso de combustión y forma la ceniza o residuo sólido.

Contenido en humedad: o también denominada humedad relativa, es la relación de la masa de agua contenida por kilogramo de materia seca. La humedad de la biomasa puede medirse en base seca (ec.1) o en base húmeda (ec.2), ya que se puede considerar el peso húmedo de la leña húmeda (Ph) y el peso seco (Po) obtenido al pesar la leña tras ser secada en una estufa, para evaporar el agua presente. Así tenemos:

$$h = \frac{P_h - P_o}{P_o} \quad ec.1$$

$$H = \frac{P_h - P_o}{P_h} \quad ec.2$$

Cuanto menor sea este contenido mejor será el valor calorífico de esa biomasa y su proceso de combustión, ya que cuando se quema la biomasa, primero hay que evaporar el agua antes de que el calor esté disponible. La mayoría de los procesos de conversión energética requieren valores de humedad

relativa inferiores al 30%. Con valores superiores se hace necesaria la implementación de operaciones de acondicionamiento y secado previas al proceso de conversión de energía.

Porcentaje en cenizas: indica la cantidad de materia sólida no combustible por kilogramo de materia prima. Conviene que su porcentaje en relación a la materia seca sea el menor posible.

Poder calorífico: el contenido calórico por unidad de masa es el parámetro que determina la energía disponible en la biomasa y se expresa como la cantidad de energía por unidad física (ej. Joule por kilogramo). Es la energía que se libera en forma de calor cuando la biomasa se quema completamente. De manera más concreta, el poder calorífico superior (PCS) es aquel calor que verdaderamente se produce en la reacción de combustión, y el inferior (PCI) el realmente aprovechable, producido sin utilizar la energía de la condensación del agua y de otros procesos.

El PCI de un combustible se determina a partir del PCS, extrayendo el calor latente del agua formada, de acuerdo a la ecuación 3:

$$PCI = PCS - 2.5(9H + H_2O) \quad ec.3$$

Donde: PCI Poder calorífico inferior (MJ/Kg)

PCS: Poder calorífico superior (MJ/Kg)

2.5: Calor de condensación del agua a 0ºC (MJ/kg agua)

9 Kilos de agua que se forman al oxidar un kilo de hidrógeno

H: Tanto por uno de hidrógeno en el combustible

H_2O: Tanto por uno de humedad del combustible

Habitualmente, el contenido energético de la biomasa se mide en función del poder calorífico del recurso, aunque para alguno de ellos, como es el caso de la biomasa residual húmeda, se determina en función del poder calorífico del producto energético obtenido en su tratamiento.

Densidad aparente: se define como el peso por unidad de volumen del material en el estado físico que presenta. Los combustibles que presentan una densidad aparente elevada favorecen la relación de energía por unidad de volumen, ya que se requieren menores tamaños de los equipos y se aumenta el tiempo que transcurre entre cargas del equipo. Por el contrario, las materias primas de baja densidad aparente necesitan un mayor volumen de almacenamiento y transporte.

1.3.2 Combustibles sólidos

Se denomina combustible a cualquier sustancia que reacciona químicamente con un agente oxidante para obtener fundamentalmente energía en forma de calor. Esta definición no incluye a los combustibles nucleares. Según sea el estado físico de esas sustancias los combustibles se clasifican en sólidos, líquidos y gaseosos.

Biocombustibles solidos: se considera biocombustible sólido aquel combustible sólido, no fósil, compuesto por materia orgánica de origen vegetal,

animal, o producido a partir de la misma mediante procesos físicos, susceptible de ser utilizado en aplicaciones energéticas.

Los productos leñosos han sido la primera fuente de energía utilizada por el hombre hasta la revolución industrial, incluso hoy en día, para gran parte de la humanidad, especialmente en los países más desfavorecidos, sigue siendo la principal fuente de energía usada como combustible. Aunque generalmente este combustible sólido se utiliza directamente, también presenta otras formas de uso con fin energético que requieren de algún tipo de acondicionamiento especial. Las más generalizadas son las astillas, el serrín, el carbón vegetal, los pélets y las briquetas. La tabla 1.2 presenta los diferentes tipos de biocombustibles sólidos a partir de biomasa:

Tabla 1.2 Tipos de biomasa, biocombustibles sólidos (Garg, 2006)

BIOMASA		
Biocombustibles solidos	Madera/ Desechos de madera	Madera y desechos de madera que se queman directamente para obtener energía. Esta categoría también incluye la madera para producción de carbón vegetal, pero no la producción real de carbón vegetal (se trataría de un cómputo doble puesto que el carbón vegetal es un producto secundario).
	Lejía de sulfito (licor negro)	Licor agotado alcalino procedente de las autoclaves de la producción de sulfato o pulpa a la sosa durante la fabricación del papel, en el cual el contenido de energía proviene de la lignina eliminada de la pulpa de la madera. Este combustible en su forma concentrada suele ser 65-70 por ciento sólido.
	Otra biomasa solida primaria	Incluye la materia vegetal utilizada directamente como combustible aún no incluida en la madera/los desechos de madera ni en la lejía de sulfito. Se incluyen los desechos vegetales, materia/desechos animales, y otra biomasa sólida.

	Carbón vegetal	El carbón vegetal que se quema como energía cubre el residuo sólido de la destilación destructiva y la pirólisis de la madera y de otras materias vegetales.

De todos los biocombustibles sólidos mencionados en la tabla 1.3, la leña (troncos y ramas de árboles), el carbón vegetal y otros combustibles sólidos (principalmente residuos agrícolas) son los más ampliamente empleados. Estos biocombustibles son considerados como biomasa tradicional, y ascienden al 7% del total actual del consumo mundial de energía[3], porcentaje que supera la demanda de energía hidráulica y a la energía nuclear juntas. Los combustibles leñosos constituyen probablemente unos dos tercios del consumo en los hogares[4]. Como se muestra en la figura 1.3:

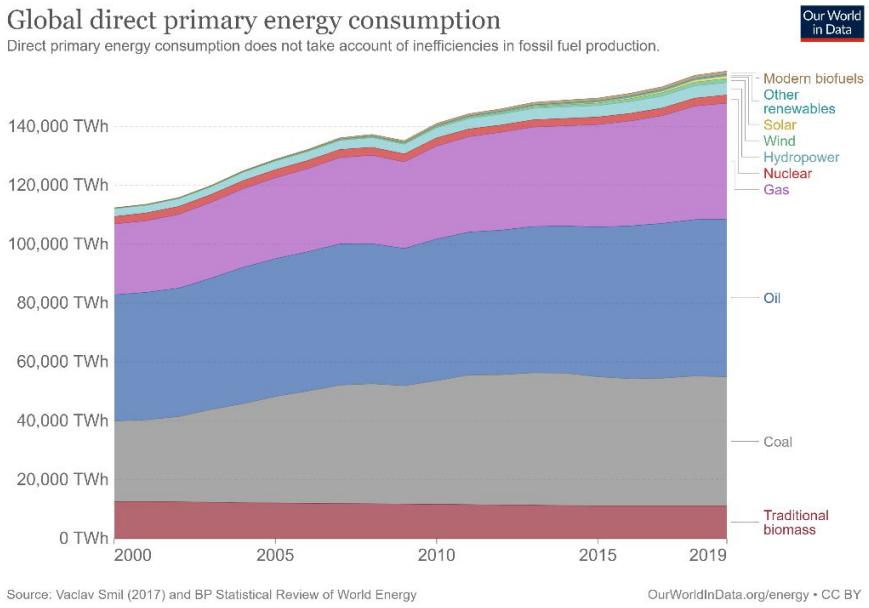


Figura 1.3 Consumo mundial de energía primaria por fuente. (Smil, 2017)

[3] Smil & BP Statical Reviwe of World Energy, 2017.
[4] Smith, 2006

En El Salvador según la encuesta de hogares de propósitos múltiples 2022 del Banco Central de Reserva, el uso de leña a nivel nacional es de 5.9%. En el área urbana un 1.7% usa leña, mientras que en el área rural el panorama es distinto ya que el 12.9% de los hogares usan leña, tal como se representa en la figura 1.4:

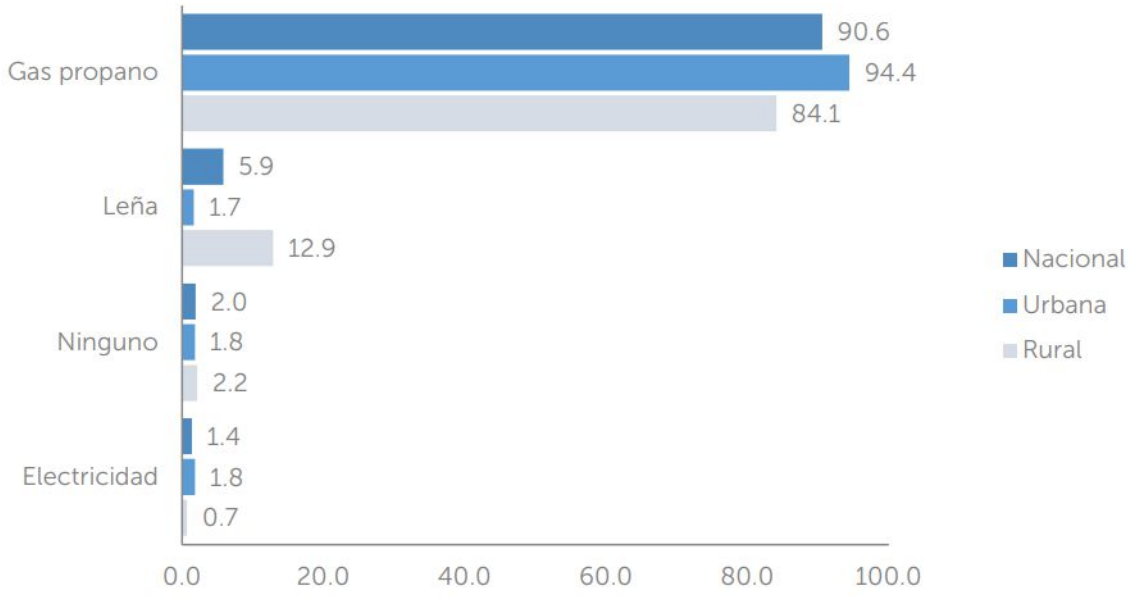


Figura 1.4 Hogares por tipo de combustible para cocinar, según área geográfica (EHPM, 2022)

Desventajas del uso de biomasa tradicional en estufas:

- ✓ En muchos casos, la demanda de biocombustible supera con creces el suministro sostenible. Esto puede contribuir a la deforestación, degradación de la tierra y la desertificación.
- ✓ La quema sucia conduce a emisiones.

- ✓ La disminución de los recursos genera una carga de trabajo adicional para quienes recolectan leña (mayormente mujeres y niños), ya que tienen que invertir más tiempo en la recolección. El combustible que reúnen es a menudo de un grado menor (poder calorífico bajo y alta humedad) y, por lo tanto, se quema con más humo y menos calor.
- ✓ Cada año, el humo de los fuegos abiertos y las estufas tradicionales, los cuales provocan contaminación del aire interior, causa millones de muertes prematuras en el mundo debido al uso ineficiente de combustible de biomasa.
- ✓ La leña a menudo se recolecta diariamente y no tiempo de secado antes de uso. Esto hace que el uso sea menos ineficiente ya que se desperdicia algo de calor para eliminar la humedad de la madera. El biocombustible húmedo produce más humo.

Ventajas del uso de biomasa tradicional en estufas:

- ✓ La biomasa es una fuente de energía renovable, si se produce de manera sostenible. La siembra eficiente garantiza que la oferta satisfaga la demanda.
- ✓ En la mayoría de las regiones del mundo, la gente usa madera o alguna forma de biocombustible. Con la estufa adecuada, la mayoría de estos combustibles se pueden quemar sin mayor procesamiento.
- ✓ Por lo general los biocombustibles son de fácil acceso. La recolección de leña parece ser más económica que los combustibles alternativos como el gas, la parafina y la electricidad. Por lo tanto, los biocombustibles son más asequibles para los más desfavorecidos.

- ✓ La biomasa está al alcance de los usuarios. Los usuarios no dependen de proveedores, servicios públicos o importaciones como el caso de combustibles sólidos fósiles.
- ✓ La preparación del biocombustible para un adecuado desempeño suele ser más importante para reducir las emisiones que la propia tecnología (tecnologías de bajo costo).

1.4 Contaminación y riesgos causados por el empleo de leña como combustible.

1.4.1 Contaminación atmosférica.

La combustión de la biomasa en fogones abiertos se da de manera incompleta e incontrolada y genera, por ello, gran cantidad de partículas y gases contaminantes. Dichas partículas y gases contaminantes afectan directamente la calidad del aire.

1.4.1.1 Contaminación del aire por partículas en suspensión y gases de combustión.

La contaminación atmosférica por material particulado se define como la alteración de la composición natural de la atmósfera como consecuencia de la entrada en suspensión de partículas. El tamaño es la principal variable de clasificación, permitiendo agrupar las diferentes sustancias en: partículas gruesas (PM10), que son las que tienen un diámetro menor o igual a 10 micras, partículas finas (PM2.5), aquellas con un tamaño inferior o igual a 2,5 micras. La

figura 1.5 muestra la comparación entre los tamaños de material particulado y cabello humano:

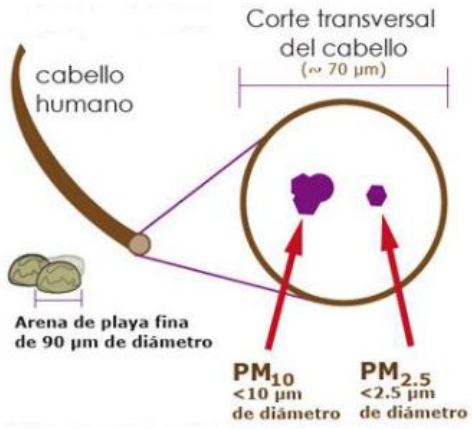


Figura 1.5 Comparación de tamaño entre PM10 y PM2.5 y cabello humano, (MARN, 2017)

Esa contaminación atmosférica por partículas suspendidas, también puede provocar un efecto negativo en el medioambiente, como la deposición o lluvia ácida, la afectación de la visibilidad (bruma), el balance radiactivo de energía que se relaciona con el cambio climático, y la eutrofización, entre otros.

En El Salvador, se considera que el uso de leña para cocinar contribuye como fuente antropológica que afecta directamente la calidad del aire ambiental del Área Metropolitana de San Salvador. La cocción con leña es una fuente de emisión de PM2.5, que además de viciar el aire supone riesgos en la salud

humana[5]. Las partículas de combustión resultantes de la quema de leña y otros elementos de biomasa son en su mayoría del tipo fino (PM2.5)[6].

En el país, actualmente se encuentra vigente la Norma de Calidad del Aire Ambiental, Inmisiones Atmosféricas (NSO 13.11.01:01), en la cual se establece que para todo el territorio nacional los límites máximos permisibles concentración de material particulado para un año PM2.5 15 µg/m3 y 65 µg/m3 para 24 horas; para un año PM10 50 µg/m3 y 150 µg/m3 para 24 horas. Dichos datos y otros más se presentan en la tabla 1.3:

Tabla 1.3 Norma de Calidad de aire ambiente (inmisiones), (Norma Salvadoreña, NSO 13.11.01:01)

Contaminante	Símbolo	Unidad	Limite de inmisión	Período de medición
Dióxido de azufre	SO_2	µg/Nm^3	80	Anual
			365	24 horas
Monóxido de carbono	CO	µg/Nm^3	10 000	8 horas
			40 000	1 hora
Oxidos de nitrógeno	NO_2	µg/Nm^3	100	Anual
			150	24 horas
Ozono	O_3	µg/Nm^3	235	1 hora
			120	8 horas
			60	Anual
Partículas inhalables	PM_{10}	µg/Nm^3	50	Anual
			150	24 horas
	$PM_{2,5}$	µg/Nm^3	15	Anual
			65	24 horas
Partículas Totales Suspendidas	PTS	µg/Nm^3	75	Anual
			260	24 horas
Plomo	Pb	µg/Nm^3	0,5	Anual
			1,5	Trimestral

[5] (MARN, 2017)
[6] (OMS, 2005)

1.4.1.2 Emisión de CO_2 a la atmósfera.

La leña que no arde debidamente convirtiéndose en dióxido de carbono da lugar a productos de combustión incompleta: básicamente monóxido de carbono, pero también benceno, butadieno, formaldehído, hidrocarburos poli aromáticos y muchos otros compuestos peligrosos. En el medio ambiente, el dióxido de carbono es la sustancia que más contribuye al efecto invernadero, es decir, que absorbe gran parte de la radiación solar incidente, reteniéndola cerca de la superficie terrestre y produciendo un calentamiento progresivo de la misma.

El monóxido de carbono (CO) por su parte, es un gas sin color ni olor emitido, como se mencionó, como consecuencia de la combustión incompleta de carburantes fósiles y de biocombustibles. El CO posee consecuencias sobre el clima, ya que contribuye a la formación de gases de efecto invernadero: su vida media en la atmósfera es de unos tres meses, lo que permite su lenta oxidación para formar CO_2, proceso durante el cual también se genera O_3. El límite de inmisiones tanto según la Guías de Calidad del Aire Actualización de la World Health Organización y la norma salvadoreña NSO 13.11.01:01 es de 10 mg/m^3 para 8 horas, como puede corroborarse en la tabla 1.4.

1.4.2 Riesgos para la salud.

Según la OMS para septiembre de 2021, unos 2600 millones de personas siguen cocinando y calentando sus hogares con combustibles sólidos (es decir, madera, residuos agrícolas, carbón vegetal y mineral y excrementos de animales)

y queroseno, en fuegos abiertos y en cocinas con fugas. En su mayoría son personas pobres que viven en países de ingresos bajos y medianos.

Esos combustibles y tecnologías ineficientes para cocinar producen elevados niveles de contaminación del aire doméstico dado que liberan elementos nocivos para la salud, tales como pequeñas partículas de hollín que penetran profundamente en los pulmones. En viviendas mal ventiladas el humo puede producir concentraciones de partículas finas 100 veces superiores a las aceptables. La exposición afecta particularmente a las mujeres y los niños, que pasan la mayor parte del tiempo cerca del hogar.

Anualmente, 3.8 millones de personas mueren prematuramente por enfermedades atribuibles a la contaminación del aire doméstico causada por el uso ineficiente de combustibles sólidos y queroseno para cocinar. Entre esas defunciones:

- ✓ 27% se deben a neumonía
- ✓ 18% a accidente a cerebrovascular
- ✓ 27% a cardiopatía isquémica
- ✓ 20% a neumopatía obstructiva crónica,
- ✓ y 8% a cáncer de pulmón.

Neumonía: la exposición a la contaminación del aire doméstico casi duplica el riesgo de neumonía en la niñez y es responsable del 45% de todas las muertes por esa enfermedad en niños menores de 5 años. La contaminación del aire doméstico también supone un riesgo de infecciones agudas de las vías

respiratorias inferiores (neumonía) en adultos e influye en el 28% de todas las muertes que padece ese

Enfermedad pulmonar obstructiva crónica: una de cada cuatro muertes (25%) por enfermedad pulmonar obstructiva crónica (EPOC) en adultos en países de ingresos bajos y medianos se debe a la contaminación del aire doméstico. Las mujeres expuestas a altos niveles de humo en interiores tienen dos veces más probabilidades de padecer EPOC que las que utilizan combustibles y tecnologías más limpios. Entre los hombres (que ya corren un alto riesgo de EPOC debido a las altas tasas de consumo de tabaco) la exposición a la contaminación del aire doméstico casi duplica ese riesgo.

Accidente cerebrovascular: 12% de todas las defunciones debidas a accidentes cerebrovasculares se pueden atribuir a la exposición diaria a un aire doméstico contaminado por cocinar con combustibles sólidos y queroseno.

Cardiopatía isquémica: aproximadamente un 11% de todas las defunciones por cardiopatía isquémica, que representan más de un millón de muertes prematuras cada año, se pueden atribuir a la contaminación del aire doméstico.

Cáncer de pulmón: aproximadamente el 17% de las defunciones causadas cada año por cáncer de pulmón en adultos son atribuibles a la exposición a los carcinógenos de la contaminación del aire doméstico producida por el uso de queroseno o combustibles sólidos, tales como madera y carbón vegetal o mineral, para cocinar.

En general, las partículas en suspensión pequeñas y otros contaminantes del humo de interiores inflaman las vías respiratorias y los pulmones, dificultan la respuesta inmunitaria y reducen la capacidad de oxigenación de la sangre. Las tablas 1.4 y 1.5 muestran los objetivos y la guía de la calidad del aire para media anual y media de 24 horas, respectivamente, donde se presentan el porcentaje de riesgo a la salud.

Tabla 1.4 Guías de calidad del aire y objetivos intermedios para material particulado: media anual, (WHO, 2005)

Nivel de la media anual	**PM_{10} ($\mu g/m^3$)**	**$PM_{2.5}$ ($\mu g/m^3$)**	**Fundamento del nivel escogido**
Objetivo intermedio – 1 (OI-1) de la OMS	70	35	Se estima que estos niveles se asocian con una mortalidad a largo plazo 15% más alta, aproximadamente, que en las GCA
Objetivo intermedio – 2 (OI-2) de la OMS	50	25	Además de otros beneficios para la salud, estos niveles disminuyen el riesgo de mortalidad prematura en 6%, aproximadamente [2-11%], en comparación con el OI-1 de la OMS
Objetivo intermedio – 3 (OI-3) de la OMS	30	15	Además de otros beneficios para la salud, estos niveles reducen el riesgo de mortalidad en otro 6% [2-11%], aproximadamente, en comparación con el OI-2 de la OMS
Guías de la calidad del aire de la OMS (GCA)	**20**	**10**	Estos son los niveles más bajos a los cuales se ha demostrado, con más de 95% de confianza, que la mortalidad cardio pulmonar y por cáncer pulmonar aumenta en respuesta al PM2.5.

Tabla 1.5 Guías de calidad del aire y objetivos intermedios para material particulado: media de 24 horas, (WHO, 2005)

Nivel de la media de 24 horas	**PM_{10} ($\mu g/m^3$)**	**$PM_{2.5}$ ($\mu g/m^3$)**	**Fundamento del nivel escogido**
Objetivo intermedio – 1 (OI-1) de la OMS	150	75	Basado en coeficientes de riesgo publicados en estudios multicéntricos y metaanálisis (incremento de alrededor de 5% de mortalidad a corto plazo sobre las GCA)
Objetivo intermedio – 2 (OI-2) de la OMS	100	50	Basado en coeficientes de riesgo publicados en estudios multicéntricos y metaanálisis (incremento de alrededor de 2.5% de mortalidad a corto plazo sobre las GCA)
Objetivo intermedio – 3 (OI-3) de la OMS	75	37.5	(incremento de alrededor de 1.2% de mortalidad a corto plazo sobre las GCA)
Guías de la calidad del aire de la OMS (GCA)	**50**	**25**	Basado en la relación entre niveles de 24 horas y anuales de PM.

Además, se ha demostrado la relación entre la contaminación del aire doméstico y el bajo peso al nacer, la tuberculosis, las cataratas y los cánceres nasofaríngeos y laríngeos.

La mortalidad debida a cardiopatías isquémicas y accidentes cerebrovasculares también se ve influida por factores de riesgo, como la hipertensión, las dietas malsanas, la falta de actividad física y el consumo de tabaco. Algunos factores de riesgo de neumonía infantil son la lactancia materna insuficiente, el bajo peso al nacer y el humo de tabaco ajeno. En cuanto al cáncer de pulmón y la neumopatía obstructiva crónica, el consumo de tabaco y el humo de tabaco ajeno también son factores de riesgo importantes.

1.5 Marco Legal

En El Salvador como en muchos países latinoamericanos, la regulación de los recursos naturales tuvo su origen en el derecho administrativo vinculado a lo agrario, la salud pública y, en menor medida, al derecho municipal[7]. No es sino hasta 1983 que en la Constitución de la República de El Salvador se hace referencia expresa al medio ambiente, estableciendo el marco de la política medioambiental: "es deber del Estado proteger los recursos naturales, así como la diversidad e integridad del medio ambiente para garantizar el desarrollo sostenible" (Art. 117) y declara de interés social la protección, conservación, aprovechamiento racional y restauración de los recursos naturales.

Desde el punto de vista institucional, es hasta diciembre de 1990 que en El Salvador se dan los pasos necesarios para hacer realidad lo establecido en la Constitución, al crearse mediante decreto ejecutivo el Consejo Nacional del Medio Ambiente (CONAMA). A esta institución se le adscribe la obligación de velar por la óptima y racional utilización de los recursos naturales, el control de la contaminación y el establecimiento del equilibrio ecológico; para ello se le faculta para proponer políticas y estrategias. Asimismo, se crea, en el mismo decreto, la Secretaría Ejecutiva del Medio Ambiente (SEMA), como la unidad responsable de coordinar y velar por el comportamiento de las políticas y estrategias emanadas del CONAMA[8].

[7] (Chávez, 2007)
[8] (Chávez, 2007)

El 19 de mayo de 1997 se estableció mediante el Decreto Ejecutivo no. 27, la creación del Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales (MARN) basándose en el mandato de la Constitución de la República, en su artículo 117. Este nuevo ministerio absorbió a la Secretaria Ejecutiva de Medio Ambiente (SEMA). Una de las primeras funciones de esta cartera de Estado fue lograr la aprobación de la Ley del Medio Ambiente que considera la protección, conservación y recuperación del medio ambiente, el uso sostenible de los recursos naturales que permitan mejorar la calidad de vida de las presentes y futuras generaciones, meta que se alcanzó en marzo de 1998.

Se emitió la Ley Forestal en marzo de 1973, con la finalidad de regular la conservación, mejoramiento, restauración, y acrecentamiento de los recursos forestales. La ley forestal entró en vigencia el 22 de mayo de 2002, sosteniendo su finalidad: la creación de mecanismos que permitan el incremento, manejo y aprovechamiento en forma sostenible, de los recursos forestales y el desarrollo de la industria maderera. Así mismo, se declara de interés económico el desarrollo forestal del país desde el establecimiento de la plantación hasta el aprovechamiento final y todas sus formas de valor agregado. Esta legislación considera el aprovechamiento forestal como la cosecha de productos forestales maderables y los no maderables (leña) hasta la cosecha final, todo de conformidad con normas de manejo que garanticen su sostenibilidad.

En cuanto a regulaciones de inmisiones atmosféricas, se crea la Norma de Calidad del Aire Ambiental, Inmisiones Atmosféricas (NSO 13.11.01:01), Esta norma establece los límites de inmisiones de los principales contaminantes del

aire, que garantizan una calidad del aire ambiental aceptable para la salud y la vida humana en particular y para la vida silvestre en general.

1.6 Eficiencia térmica en cocinas de biomasa.

El concepto de eficiencia es un término que indica que tan bien se realiza un proceso de conversión o transferencia de energía (Y. Cengel, 2011). Para el caso de las cocinas de biomasa la eficiencia térmica se define como la fracción de calor producida por el combustible que es transferida al cuerpo receptor (olla). La energía restante se pierde en el ambiente. Por lo tanto, una eficiencia térmica más alta indica una mayor capacidad para transferir el calor producido hacia la olla. Mientras que la eficiencia térmica es una medida bien conocida del desempeño de la estufa, un mejor indicador puede ser el consumo específico ya que en casos, por ejemplo, en los que una estufa que es muy lenta para hervir puede tener un muy buen resultado en cuanto a eficiencia térmica porque una gran cantidad de agua se evaporó. Sin embargo, el combustible utilizado por el resto del agua puede ser muy alto ya que gran parte del agua se evapora y tomó mucho tiempo para hervir el agua de la olla. La eficiencia térmica por tratarse de una medida de dimensión uno, generalmente se expresa en valores de porcentaje.

$$h_t = \frac{Entrada\ bruta\ de\ calor\ a\ la\ olla}{Calor\ generado} \quad ec. 4$$

La ecuación 4 representa la eficiencia de transferencia de calor de una cocina de biomasa. Es una estimación de la energía total producida por el fuego que es usada para calentar el agua en la olla.

La física que gobierna el comportamiento de las estufas tiene sus raíces en la termodinámica[9], más específicamente en los principios de transferencia de calor. En la figura 1.6 se muestra un esquema simple para representar los modos de transferencia de calor que desempeñan un papel en el rendimiento de la estufa.

La primera ley de la termodinámica se aplica a este tipo de análisis, ya que proporciona una herramienta que permite un balance energético. El equilibrio es vital para determinar la forma más efectiva de mejorar la eficiencia energética.

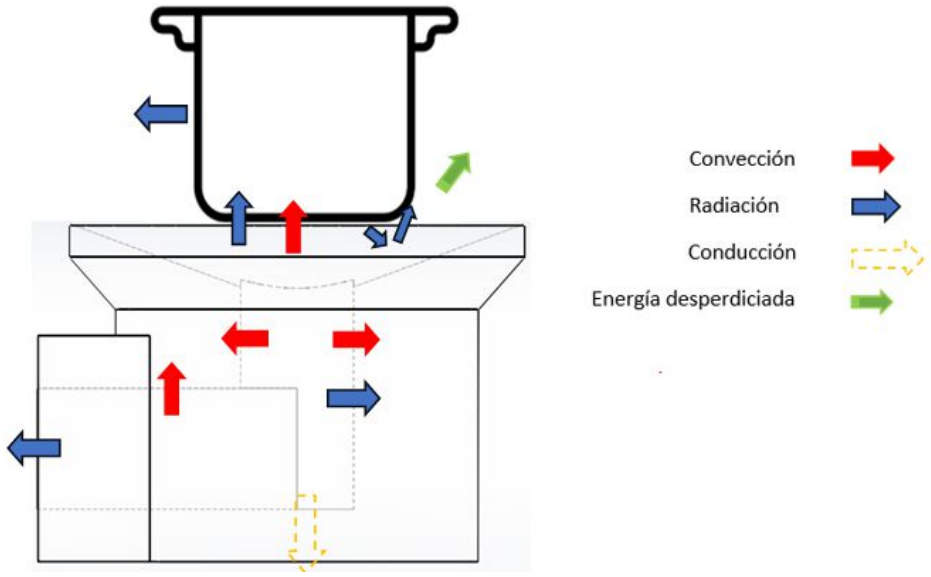


Figura 1.6 Vista lateral de cocina con los modos de transferencia de calor

(Elaboración propia)

[9] Zube, D. Heat transfer efficiency of biomass cookstoves. 2010

Si se usa un volumen de control, tal como se representa en la figura 1.7, para analizar el equilibrio de energía transferida entre calor, trabajo y masa[10]. Y asumiendo que la cocina a evaluar tiene un flujo isobárico donde la razón permanece constante, ignorando los efectos transitorios. Esto toma sentido ya que la mayor parte del tiempo que los usuarios pasan cocinando suele ser cuando la estufa ya ha "calentado" y la llama ya no se apaga. Otras suposiciones simplificadoras incluyen energía cinética y potencial constante entre la entrada y la salida del volumen de control, trabajo mecánico cero, y comportamiento del gas ideal[11].

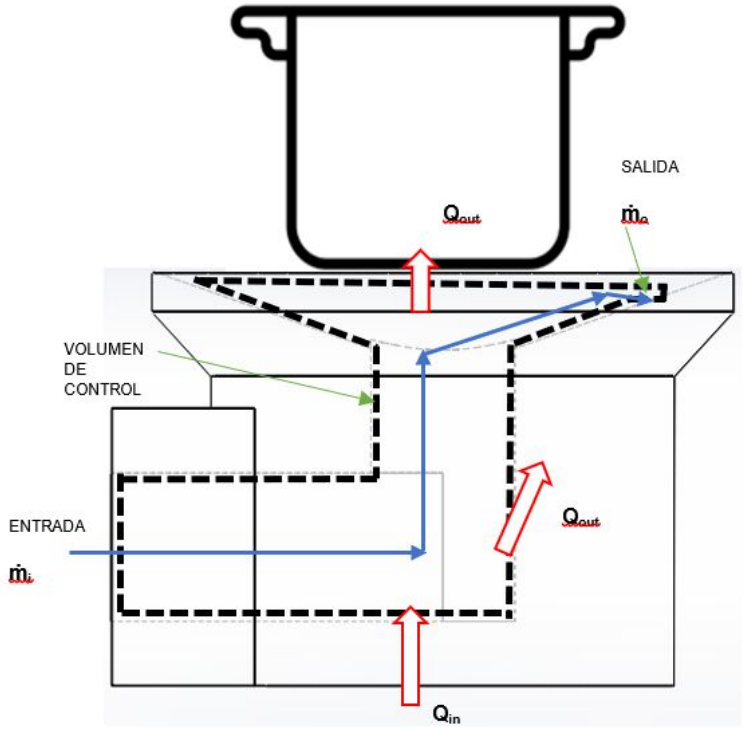


Figura 1.7 Esquema de volumen de control en cocina (Elaboración propia)

[10] Zube, D. Heat transfer efficiency of biomass cookstoves. 2010
[11] Zube, D. Heat transfer efficiency of biomass cookstoves. 2010

Con base en lo anterior, el balance energético queda reducido a lo siguiente:

$$\dot{E}_\iota = \dot{E}_o \quad ec.5$$

$$\dot{Q}_\iota - \dot{Q}_o = \dot{m} C_{p,avg}(T_o - T_i) \quad ec.6$$

La ecuación 6 es una ecuación fundamental que demuestra la interdependencia entre caudal másico, temperatura y transferencia de calor dentro y fuera de la estufa.

1.6.1 Eficiencia energética en cocinas artesanales a biomasa y transferencia de energía.

Las cocinas artesanales de fuego abierto son utilizadas todos los días por un gran porcentaje de población del mundo. Fogones abiertos con leña húmeda, operado sin atención en el viento pueden tener puntuaciones tan bajas como 5% en la eficiencia térmica[12]. El operador y las condiciones de uso determinan en gran medida la eficacia de la operación.

Aunque este tipo de cocinas registren valores de eficiencia térmica sumamente bajos, estas pueden tener un aprovechamiento más o menos exitoso dependiendo del cuidado y las habilidades del operador. Si la leña se quema en la punta y se empuja a medida se va consumiendo, el fuego puede permanecer caliente y la combustión relativamente limpia. También si gran parte de la leña

[12] Partnership for Clean Indoor Air. Test Results of Cook Stove Performance. 2012

está ardiendo sin llama, se puede generar mucho humo. Si la olla está más cerca del fuego, más calor se transfiere a olla.

En estudios y pruebas realizadas en laboratorio entre los años 2002-2012 por Partnership for Clean Indoor Air, a diferentes tipos de cocinas mejoradas alrededor del mundo, incluyendo la cocina tradicional, se obtuvo el desempeño siguiente para ésta última tal como se evidencia en la tabla 1.6.

Cabe resaltar el hecho que en los laboratorios de pruebas las cocinas tradicionales usan menos madera y hacen menos humo que en las evaluaciones en campo. Las cocinas tradicionales a biomasa bien construidas, protegidas del viento y supervisadas con cuidado pueden presentar una eficiencia térmica de entre 20% a 30%[13]. De esta manera las cocinas hacen un uso más eficiente de la energía.

Tabla 1.6 Resultados de eficiencia para cocinas tradicionales en condiciones de laboratorio, (Partnership for Clean Indoor Air, 2012)

Resultados de la prueba de ebullición del agua	**Promedio**
Tiempo para ebullir masa de 5 kg (min)	26.69
Consumo especifico (g/L)	120.18
Energía especifica consumida (kJ/L)	2091.87
Potencia (W)	8,001.96
Eficiencia térmica (%)	20

[13] Partnership for Clean Indoor Air. Test Results of Cook Stove Performance. 2012

1.6.2 Eficiencia energética en cocinas mejoradas de biomasa y transferencia de energía.

Las características clave de cualquier cocina mejorada sobre cualquier cocina tradicional han venido estudiándose durante muchas generaciones, hay ciertas modificaciones que mejoran la eficiencia de las estufas de biomasa. Las siguientes sugerencias mejoran la combustión y la eficiencia en la transferencia de calor hacia la olla o plancha[14]:

1. Un fuego más caliente quema leña más limpiamente. Un aislante alrededor del fuego ayuda a que arda con una temperatura más elevada.
2. Quemar demasiada leña a la vez crea humo. La leña se quema limpiamente cuando se adiciona lentamente al fuego. La leña se calienta y produce gases que pueden quemarse más completamente si el gas y el aire se mezclan en llamas.
3. La cantidad correcta de aire entrante ayuda a que el fuego arda limpiamente. Aumentando la velocidad de la cantidad adecuada de aire ayuda a que el fuego arda más y a mejorar la mezcla de combustible-aire.
4. Una rejilla que levanta la madera por encima del piso de la cámara de combustión. Esto permite que el aire fluya arriba a través del fuego. El aire puede entrar en el fuego desde debajo, lo cual es beneficioso.

[14] Partnership for Clean Indoor Air. Test Results of Cook Stove Performance. 2012

5. Aislamiento de la ruta de los gases de combustión calientes (excepto alrededor de la olla o plancha). Con esto se entrega más calor a la superficie de cocción debido a que el calor no se pierde en el cuerpo de la estufa.
6. Obtener más calor en la olla. La mayoría de la ineficiencia en la cocción se produce porque el calor no se transfiere efectivamente a la olla. La transferencia de calor se puede aumentar dirigiendo el calor gases en un estrecho canal paralelo a la superficie de cocción. Los gases deben mantenerse lo más calientes posible y fluyendo a la mayor velocidad posible sin disminuir la temperatura del gas.
7. Aumentando el área de cocción la superficie es útil. Por otra parte, disminuyendo la superficie de agua expuesta en las ollas ayuda a reducir la producción de vapor.
8. Un espacio aislado por encima del fuego mejora la mezcla de gases calientes. Este reduce significativamente las emisiones, especialmente si el gas está bien mezclado.

Alrededor del mundo hay diferentes tipos de cocinas mejoradas que aplican más de una de las sugerencias antes listadas. En Centroamérica se cuentan con muchos modelos diferentes de estas estufas, por ejemplo: la eco estufa Justa o eco fogón Justa es originaria de Honduras y ampliamente usada en los demás países de Centroamérica que por su diseño, estructura y materiales originales logran una mayor eficiencia en el aprovechamiento del calor generado por la combustión de la leña y logra una reducción de la contaminación por gases materiales y material particulado emitido a la atmósfera y en el hogar.

El cuerpo de estufa Justa está construido de ladrillos que encierran una cámara de combustión tipo “rocket”. La cámara de combustión está hecha de baldosa (cerámica de piso).

Un área de sección transversal constante se mantiene en toda la estufa desde la entrada de combustible, hasta la cámara de combustión, baja la plancha. La transferencia de calor aumenta porque los gases calientes se ven obligados a hacer contacto con la parte inferior de la plancha. Las cenizas ayudan a mantener los gases calientes, mientras que el área transversal constante dentro de la estufa reduce la fricción que ralentiza los gases. El calor tiene que pasar a través de la plancha hacia las ollas que están sobre ellas.

La tabla 1.7 presenta los resultados de la prueba de ebullición de agua para la cocina mejorada Justa, realizadas en laboratorios por Partnership for Clean Indoor Air. La estufa Justa puede calentar dos o tres ollas de comida a la vez. Está diseñada para Centroamérica, donde se usa el comal para hacer tortillas. Ya que el calor tiene que pasar a través de la plancha a las ollas de comida, la estufa usa más combustible que una estufa (mejorada) de una sola olla para hervir y calentar agua a fuego lento.

Tabla 1.7 Resultados de eficiencia para estufas Justa, (Partnership for Clean Indoor Air, 2012)

Resultados de la prueba de ebullición del agua	**Promedio**
Tiempo para ebullir 5 L de agua (min)	46.73
Consumo especifico (g/L)	132.43
Energía especifica consumida (kJ/L)	2,221.74

Potencia (W)	8,444.21
Eficiencia térmica (%)	19

Sin embargo, el cuerpo sellado de la estufa elimina casi toda la contaminación de la habitación a través de la chimenea. Este tipo de estufa, con chimenea funcional, puede resolver el problema de la contaminación del aire interior. El cuerpo sólido también protege a los usuarios de quemaduras.

El fogón tipo plancha proporciona al usuario muchas ventajas: ollas limpias, cocina limpia, mayor conveniencia y un uso de combustible potencialmente reducido para una variedad de tareas de cocina. En pruebas de campo, la estufa Justa ahorró aproximadamente el 70% de la madera que normalmente se usa para cocinar (en cocinas tradicionales)[15].

[15] Partnership for Clean Indoor Air. Test Results of Cook Stove Performance. 2012

2 METODOLOGÍA DEL ESTUDIO

2.1 Protocolos internacionales de rendimiento en cocinas a leña.

2.1.1 Prueba de ebullición de agua (Water Boiling Test 4.2.3).

La prueba de Ebullición de Agua (Water Boiling Test, por sus siglas en Inglés) es una simulación simple del proceso de cocción con la finalidad de medir cuan eficiente es una estufa en utilizar combustible para calentar el agua en una olla y la cantidad de emisiones producidas durante el proceso. La prueba de ebullición de agua usa agua para simular comida, la cantidad estándar a emplear es: dos terceras partes de la capacidad total de la olla.

La prueba de ebullición de agua simula el proceso de cocción y apoya la toma de decisiones de los diseñadores de las estufas, ya que permite entender cómo y en qué medida se transfiere la energía desde el combustible a la olla. La prueba está conformada por tres fases: fase de alta potencia de inicio frío, en el cual la estufa se encuentra a temperatura ambiente; fase de alta potencia de inicio caliente, la estufa se encuentra precalentada, y la fase de ebullición a fuego lento, en el cual se trata de simular un proceso de cocción. Las ventajas de la prueba incluyen la simplicidad de su realización y la repetibilidad. Toda la prueba debe llevarse a cabo al menos tres veces para cada estufa [16]. Los resultados deben ser promediados y analizados estadísticamente[17].

[16] Enviromental Protection Agency, PCIA & Alliance. The Water Boiling Test 4.2.3. Cookstove Emissions and Efficiency in a controlled laboratory setting. 2014.

[17] VITA. Testing the Efficiency of Wood-Burning Cookstoves. 1985.

Los parámetros evaluados por la prueba de ebullición de agua son la eficiencia térmica (h) y el consumo específico de combustible (SC, kg_{madera}/L_{agua}). La eficiencia térmica es una relación entre la tarea de ebullición y evaporación del agua con la energía suministrada por la combustión de la madera. El consumo específico es la relación entre el combustible consumido y la cantidad de agua hervida durante la prueba. En este caso el consumo específico de combustible se refiere a la medida de la cantidad de madera necesaria para producir 1 litro de agua hervida.

Para fase de alta potencia de inicio frio se tienen las ecuaciones 7 y 8, con las cuales se calculan la eficiencia térmica y el consumo específico[18], respectivamente:

$$h_c = \frac{\Delta E_{H_2O,heat} + \Delta E_{H_2O,evap}}{E_{released,c}} = \frac{4.186\left(T1_{cf} - T1_{ci}\right)(P1_{ci} - P1) + 2260.w_{cv}}{f_{cd}.LVH} \quad ec.7$$

Donde:

$T1_{cf}$: temperatura del agua al final de la fase (°C)

$T1_{ci}$: temperatura del agua al inicio de la fase (°C)

$P1_{ci}$: masa de la olla con agua antes de la fase (g)

$P1$ *:* masa de la olla vacía (g)

w_{cv} *:* agua evaporizada (g)

f_{cd} *:* equivalente de madera seca consumida (g)

LVH : poder calorífico inferior de la madera (combustible).

[18] Enviromental Protection Agency, PCIA & Alliance. The Water Boiling Test 4.2.3. Cookstove Emissions and Efficiency in a controlled laboratory setting. 2014.

$$SC_c = \frac{f_{cd}}{w_{cr}} \quad ec.8$$

Donde:

f_{cd} *:* equivalente de madera seca consumida (g)

w_{cr} *:* masa de agua hervida en la fase. Es el agua que queda al final de la fase (g).

Para fase de alta potencia de inicio caliente se tienen las ecuaciones 9 y 10, a partir de éstas se calculan la eficiencia térmica y el consumo específico. En esta fase, las medidas y los cálculos son idénticos a los de la fase de arranque en frio, excepto que los restos de ceniza no se extraen ni se pesan, se supone que la ceniza restante es la misma que los restos de ceniza en la fase de arranque en frio.

$$h_h = \frac{4.186\left(T1_{hf} - T1_{hi}\right)(P1_{hi} - P1) + 2260.w_{hv}}{f_{hd}.LVH} \quad ec.9$$

Donde:

$T1_{hf}$ *:* temperatura del agua al final de la fase (°C)

$T1_{hi}$ *:* temperatura del agua al inicio de la fase (°C)

$P1_{hi}$*:* masa de la olla con agua antes de la fase (g)

$P1$ *:* masa de la olla vacía (g)

w_{hv} *:* agua evaporizada (g)

f_{hd} *:* equivalente de madera seca consumida (g)

LVH *:* poder calorífico inferior de la madera (combustible).

$$SC_h = \frac{f_{hd}}{w_{hr}} \quad ec. 10$$

Donde:

f_{hd} *:* equivalente de madera seca consumida (g)

w_{hr} *:* masa de agua hervida en la fase. Es el agua que queda al final de la fase (g).

En la fase de cocción a fuego lento, las medidas iniciales son las mismas que en las pruebas de alta potencia, sin embargo, el objetivo de esta fase es mantener el agua a una temperatura alta con una mínima potencia de salida de la estufa. Esta fase difiere de las dos fases previas desde el objetivo, las interpretaciones de los cálculos también difieren de las de las fases de alta potencia. Además, se hace una suposición importante utilizando datos de la fase de alta potencia de arranque en caliente y se realiza un cálculo adicional que no aparece en las pruebas de alta potencia.

La suposición hecha en esta fase se basa en la cantidad de carbón presente al comienzo de la fase de cocción a fuego lento. Al final de la fase de arranque en caliente, cuando el agua hierve, se pesa rápidamente alterar el carbón y luego se tiende el fuego para mantener el agua dentro de unos pocos grados de ebullición durante 45 minutos. Quedará carbón en la estufa de la madera que se usó para hervir el agua durante el arranque en caliente. Retirar ese carbón de la estufa, pesarlo y volver a encenderlo perturba el fuego y puede provocar que la temperatura del agua caiga demasiado por debajo del punto de ebullición. Por lo tanto, el procedimiento recomendado es suponer que el carbón

presente al comienzo de la fase de cocción a fuego lento es el mismo que el carbón que se midió después de la prueba de arranque en frío de alta potencia. Si bien esto no es del todo exacto, el error introducido por esta suposición debe ser mínimo, especialmente si se sigue un procedimiento idéntico en el arranque en frío y fases de arranque en caliente.

Las ecuaciones para calcular la eficiencia y el consumo especifico son las siguientes:

$$h_s = \frac{4.186\left(T1_{sf} - T1_{si}\right)(P1_{si} - P1 + w_{sr})/2 + 2260.w_{sv}}{f_{sd}.LVH} \quad ec.11$$

Donde:

$T1_{sf}$ *:* temperatura del agua al final de la fase (°C)

$T1_{si}$ *:* temperatura del agua al inicio de la fase ($T1_{si}$ = $T1_{hf}$) [°C]

$P1_{si}$*:* masa de la olla con agua al inicio de la fase (g)

$P1$ *:* masa de la olla vacía (g)

w_{sr} *:* masa de agua hervida en la fase. Es el agua que queda al final de la fase (g).

w_{sv} *:* agua evaporizada (g)

f_{sd} *:* equivalente de madera seca consumida (g)

LVH *:* poder calorífico inferior de la madera (combustible).

$$SC_s = \frac{f_{sd}}{w_{sr}} \quad ec.12$$

Donde:

f_{sd} : equivalente de madera seca consumida (g)

w_{hr} : masa de agua hervida en la fase. Es el agua que queda al final de la fase (g).

2.1.1.1 Beneficios y limitantes de la prueba de ebullición de agua.

La prueba de Ebullición de agua se puede realizar en distintas partes del mundo utilizando equipo sencillo. Los principales beneficios son los siguientes:

- ✓ Proveer asesoría inicial o de laboratorio del desempeño de una estufa en un ambiente controlado.
- ✓ Comparar la efectividad de cada modelo al desarrollar tareas similares de cocción.
- ✓ Evaluar cambios en las estufas durante su desarrollo.
- ✓ Seleccionar los productos más prometedores en cuanto a evaluaciones en campo.
- ✓ Asegurar que las estufas fabricadas cumplan con el desempeño basado en el diseño.

Todas las pruebas estandarizadas implican compensaciones. Cuando las condiciones son altamente controladas y la variabilidad se reduce, una prueba es más capaz de detectar cambios pequeños. Sin embargo, una prueba más controlada es a menudo menos representativa del proceso de cocción real. Las pruebas controladas son adecuadas para comparar los diversos aspectos técnicos del diseño de la estufa y las evaluaciones de desempeño previas en

campo. Mientras que las pruebas basadas en laboratorio permiten diferenciar las estufas, las pruebas basadas en campo dan un mejor indicador del rendimiento durante el uso real. La prueba de ebullición de agua fue desarrollada para evaluar la actuación de la estufa en una forma controlada, y por lo tanto es probable que no se parezca a las costumbres de cocción locales como otras pruebas descritas. Aunque la prueba WBT es una herramienta útil por las razones expuestas anteriormente, es importante tener en cuenta sus limitaciones:

Es una aproximación del proceso de cocción y se lleva a cabo en condiciones controladas por técnicos capacitados.

Los resultados de las pruebas de laboratorio pueden diferir de los resultados obtenidos al cocinar los alimentos reales con los combustibles locales, incluso si la eficiencia y las emisiones se midieron exactamente de la misma manera para ambas pruebas.

Para confirmar los efectos deseados (si se trata de la conservación de combustible, reducción de humo, u otros impactos), las estufas deben ser evaluadas en condiciones reales de uso.

2.1.1.2 Panorama general, prueba de ebullición de agua.

La prueba de ebullición de agua consta de tres fases que siguen inmediatamente una a la otra. Estas se presentan a continuación y se muestran gráficamente en la figura 2.1. Como se mencionó anteriormente, esta prueba

debe llevarse a cabo al menos tres veces para cada estufa, lo que constituye un conjunto de pruebas.

1. Para la fase de alta potencia de inicio frío, el evaluador comienza con la estufa a temperatura ambiente y se utiliza combustible de un paquete previamente pesado para hervir una cantidad medida de agua en una olla estándar. El evaluador luego reemplaza el agua hervida con una nueva olla de agua a temperatura ambiente para realizar la segunda fase.
2. La fase de alta potencia de inicio caliente se lleva a cabo después de la primera fase, mientras la estufa está caliente. Una vez más, el evaluador utiliza combustible de un paquete previamente pesado para hervir una cantidad medida de agua en una olla normal. Al repetir la prueba con una estufa caliente ayuda a identificar las diferencias en el rendimiento entre una estufa cuando esta fría y cuando está caliente. Esto es particularmente importante para las estufas con elevada masa térmica, ya que las mismas pueden mantenerse calientes durante la práctica.
3. La fase de hervir a fuego lento proporciona la cantidad de combustible requerido para 5 litros de agua y por debajo del punto de ebullición durante 45 minutos. Este paso simula el tiempo de cocción de las legumbres o leguminosas comunes en gran parte del mundo.

Una prueba de estufa completa debe incluir siempre las tres fases de la prueba. Una prueba rápida para el uso interno de un laboratorio puede incluir sólo el arranque en frío y cocinar a fuego lento si la estufa tiene poca masa (sin cerámica). Pruebas de ebullición anteriores han demostrado que las fases de arranque en frío y de arranque en caliente producen los mismos resultados.

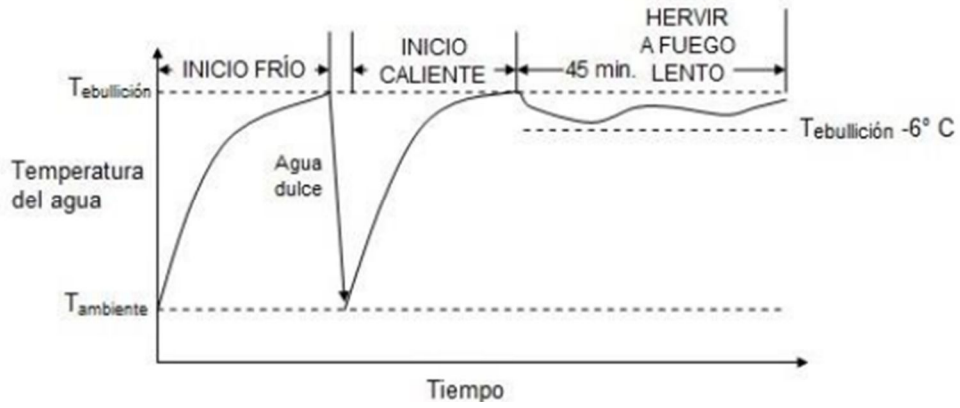


Figura 2.1. Temperatura durante las tres fases de la prueba de ebullición. (N. MacCarty)

2.1.2 Prueba de cocción controlada (CCT 2.0).

La prueba de cocción controlada (CCT) está diseñada para evaluar el desempeño de las estufas eficientes 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 (SC_{CCT}), la energía específica (E_{CCT}, $kJ/kg_{alimento}$) y el tiempo utilizado en la tarea de cocción (Δt, min). El consumo específico de la prueba de cocción controlada representa la cantidad de combustible requerido por la estufa para producir una unidad de masa de alimentos cocidos, se calcula mediante la ecuación 13. Donde f_d (g) es el combustible consumido en base seca y W_f (kg) es el peso total de los alimentos cocidos. La energía específica, E_{CCT} calculada usando la ecuación 14, evalúa la cantidad de energía requerida por la estufa durante la cocción para producir una unidad de masa de alimentos cocidos.

$$SC_{CCT} = \frac{f_d}{W_f} \quad ec.13$$

$$E_{CCT} = \frac{f_d . LH_V}{1000 * W_f} \quad \text{ec. } 14$$

Esta prueba está en un nivel medio respecto a lo simple de la prueba de ebullición de agua (WBT) y lo complejo de la prueba de desempeño de cocinas (KPT). El equipo requerido para realizar una serie de pruebas de cocción controlada es similar al equipo necesario para realizar la prueba de ebullición de agua. Además, se proporcionará una cantidad suficiente de alimentos, necesarios para realizar todas las pruebas[19].

A diferencia de la prueba de ebullición de agua la cual tiene procedimientos rígidamente fijados, la prueba de cocción controlada usa procedimientos variables dependiendo del tipo de comida a cocinar, el diseño de la estufa y la manera en que cada estufa es usada. Los resultados entre pruebas CCT son comparables únicamente cuando son realizados con el mismo fin usando exactamente los mismos procedimientos y las mismas condiciones.

2.1.2.1 Objetivos de la prueba de cocción controlada

Los principales objetivos de la prueba de cocción controlada son:

- ✓ Comparar el consumo de combustible y el tiempo de cocción de una comida en diferentes cocinas; y

[19] VITA. Testing the Efficiency of Wood-Burning Cookstoves. 1985.

- ✓ Determinar ya sea que una estufa puede cocinar efectivamente la gama de comidas que normalmente se preparan en el área donde se pretende introducir la cocina mejorada

La prueba de cocción controlada también puede ser usada para:

- ✓ Comparar diferentes prácticas de cocina en la misma estufa.
- ✓ Enseñarle a la persona que manipulará la cocina, su funcionamiento.
- ✓ Dar validación a la prueba de ebullición de agua al someter a la cocina a condiciones más realistas, pero controladas.

La prueba de cocción controlada normalmente es realizada en un laboratorio o en un centro para pruebas de campo por auxiliares de laboratorio entrenados con la compañía de trabajadores o usuarios potenciales.

Se recomiendan tres repeticiones de la prueba de cocción controlada para cada estufa que será comparada y/o estudiada[20].

2.1.3 Prueba de desempeño de cocinas (KPT 4.0).

La prueba de desempeño de cocinas (KPT) es el principal procedimiento realizado en campo para medir el consumo doméstico del combustible[21]. El objetivo principal de la prueba de desempeño de cocinas es cuantificar la tasa combustible consumido por dos cocinas (tradicional y mejorada) en condiciones

[20] VITA. Testing the Efficiency of Wood-Burning Cookstoves. 1985.
[21] Enviromental Protection Agency, PCIA & Alliance. Kitchen Performance Test 4.0. 2018.

típicas de uso del hogar. Los materiales aquí brindan orientación sobre el conjunto mínimo de procedimientos necesarios para cumplir con el objetivo principal de la prueba, una medida cuantitativa de combustible consumido. Las pruebas de desempeño de cocinas a menudo se combinan con encuestas de hogares, que ayudan a contextualizar las prácticas de consumo de combustible.

Debido a que ocurre en las casas de los usuarios de estufas, este tipo de prueba, cuando se realiza con cuidado, es la mejor manera de comprender el impacto de la estufa en el uso de combustible y, cuando se complementa con las encuestas apropiadas, sobre características y comportamientos generales del hogar[22]. Sin embargo, esta prueba de desempeño también es una forma particularmente difícil de probar estufas porque se entromete en las actividades diarias de las personas. Además, las medidas tomadas durante las pruebas son más inciertas porque las posibles fuentes de error son más difíciles de controlar en comparación con las pruebas de laboratorio. Por esta razón, el protocolo para las pruebas de desempeño de cocinas es bastante diferente de los protocolos prueba de ebullición de agua (WBT) y la prueba de cocción controlada (CCT).

Esta prueba ayuda a predecir los cambios reales en el consumo de combustible entre las familias que adoptan una estufa mejorada.

[22] VITA. Testing the Efficiency of Wood-Burning Cookstoves. 1985.

2.1.3.1 Objetivos y aplicaciones de la prueba de desempeño de cocinas.

Los principales objetivos de la prueba de desempeño de cocinas (KPT) son:

- ✓ Estudiar el impacto de una nueva cocina en el uso general de la energía del hogar.
- ✓ Demostrar a los usuarios potenciales la calidad de ahorro de combustible de una nueva estufa en el hogar y para practicas operacionales especificas correctamente ejecutadas[23].

La prueba de desempeño de cocinas se puede utilizar para muchos tipos diferentes de evaluaciones:

1. Demostrar las diferencias en el consumo de combustibles para cocinar entre los hogares que usan tecnologías de cocción tradicionales y hogares que utilizan tecnologías mejoradas de estufas.
2. Evaluar los patrones de mediano o largo plazo de consumo de combustible que resultan de la estufa intervenciones (por ejemplo, los probadores pueden encuestar periódicamente a una muestra de hogares usando la estufa nueva para determinar si los cambios en los patrones de consumo de combustible se mantienen a largo plazo).
3. Para probar las variaciones estacionales en el consumo de combustible resultantes de cambios en el clima, combustible disponibilidad, o ciclos agroeconómicos locales (independientes del cambio tecnológico).

[23] VITA. Testing the Efficiency of Wood-Burning Cookstoves. 1985.

4. Probar las diferencias en el consumo de combustible entre los hogares que usan estufas similares pero diferentes tipos de combustible (p. ej., leña en comparación con residuos de cultivos)

2.1.4 Emisiones contaminantes (WBT 4.2.3)

Sabemos que los contaminantes atmosféricos emitidos por el uso de combustibles sólidos tienen muchas repercusiones sanitarias y medioambientales. La eficiencia y emisiones deben ser evaluadas con el mismo protocolo, debido a que los cambios en la operación y diseño de la estufa afectan a ambas. Por lo que esta prueba será ejecutada junto a la prueba de ebullición de agua.

Mientras que el consumo de combustible es una medida relativamente simple, la determinación de las mediciones de contaminantes es significativamente más complicada. Además de las directrices para la medición de la eficiencia de combustible, la prueba de ebullición de agua también proporciona directrices para medir los contaminantes y la obtención de medidas de rendimiento de la estufa. Combinando estas mediciones con las mediciones de eficiencia, puede determinarse un parámetro útil: emisiones por tarea. Las medidas de emisiones de la prueba de ebullición de agua: no son a lo que las personas están expuestas, sino que son los contaminantes que salen de la

estufa. Esta es una forma más directa de comparar dos estufas que la concentración en el aire interior[24].

Este protocolo de prueba básico incluye instrucciones opcionales para la medición de Monóxido de Carbono (CO), Micropartículas (PM) y Dióxido de Carbono (CO2) en la chimenea de la estufa, también se pueden medir otros contaminantes.

2.1.4.1 Medidas De Emisiones

Las emisiones métricas se pueden utilizar para el CO2, CO, PM, u otros tipos. A través de diferentes emisiones métricas, las emisiones se reportan como masas sobre una base seca equivalente. Si se miden partículas ultrafinas (partículas de menos de 100 nm), este resultado puede ser reportado como el número de partículas.

- ✓ Las emisiones por MJ hacia la olla (IWA Métricas de alta potencia de las emisiones totales, CO y PM). Esta medida es preferible para las fases de alta potencia porque reporta las emisiones en cuanto a la salida deseada, energía para cocción y permite comparaciones entre las estufas y combustibles. La energía para cocinar que llega a la olla se mide como el calor sensible que elevó la temperatura del agua de la olla y el calor latente que produce vapor.

[24] Enviromental Protection Agency, PCIA & Alliance. The Water Boiling Test 4.2.3. Cookstove Emissions and Efficiency in a controlled laboratory setting. 2014.

- ✓ Índice de emisión (emisiones por hora). (IWA Métricas para emisiones intradomiciliares, CO y PM). Este indicador especifica la masa emitida sobre la duración de una fase. La tasa de emisión general para determinar el IWA Tier se basa en lo que sea mayor de la alta potencia o baja potencia de emisión de CO. La tasa de emisión de alta potencia es el promedio de las fases de inicio caliente e inicio frío.
- ✓ Tasa específica de emisión (Emisiones por tiempo por litro de agua) (IWA Métricas para emisiones totales de bajo poder, CO y PM). Esta medida es preferible para la fase de baja potencia debido a la dificultad en el cálculo de la energía hacia la olla debido a la limitada medición de calor (temperatura del agua relativamente constante) y la variación en la medición de calor latente (producción de vapor muy variable).
- ✓ Emisiones por tarea y emisiones por peso de combustible consumido. Estos son también reportados, sin embargo, estos indicadores tienen menos comparación entre las diferentes estufas.

2.1.5 Norma ISO 19867:1

La norma ISO 19867-1:2018. Cocinas limpias y soluciones de cocinas limpias -Protocolos armonizados de pruebas de laboratorio- fue publicada con la intención de mejorar la comparabilidad internacional de los datos sobre emisiones de contaminantes atmosféricos, eficiencia, seguridad y durabilidad en estufas de leña. Es aplicable a las estufas utilizadas principalmente para cocinar o calentar agua en aplicaciones domésticas, de pequeña empresa e institucionales, generalmente con una potencia de fuego inferior a 20 kW y un

volumen del recipiente de cocción inferior a 150 L. Esta norma específica métodos de medición y evaluación de laboratorio para:

a) las emisiones de partículas y gases contaminantes del aire,
b) eficiencia energética,
c) seguridad, y
d) durabilidad de las estufas.

2.1.5.1 Panorama general del protocolo ISO 19867:1

El panorama de la norma ISO 19867:1 es comparable con el de la prueba de ebullición de agua, consta de 3 fases: fase de alta potencia, fase de media potencia y fase de baja potencia. Con la diferencia en que incorpora un periodo de parada en cada fase, un periodo de arranque en la fase de baja potencia y define la duración de los períodos de prueba basadas en la quema período/tiempo (ISO) en oposición a la temperatura del agua (WBT). Todo esto se aprecia en la figura 2.2:

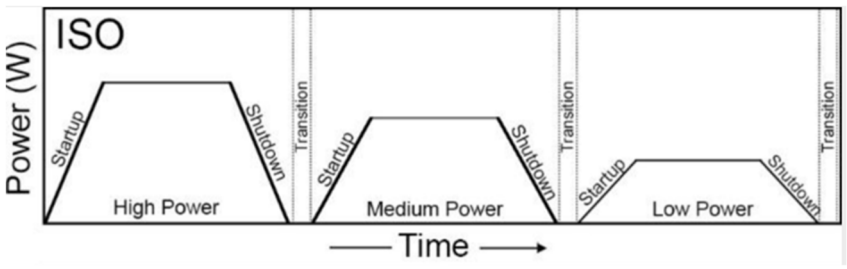


Figura 2.2 Potencia durante las tres fases de la norma ISO 19867-1. (EPA, 2018)

2.2 Selección de protocolos internacionales a aplicar en la investigación.

Las variables específicas como el diseño de la estufa, tipo de combustible, altitud, clima, uso de la cocina y la forma en que se acondicione el combustible pueden afectar dramáticamente el desempeño general de la estufa. Por esta razón ninguna prueba individual proporciona una medición completa o predice de manera correcta el rendimiento de la cocina en condiciones de uso real (en campo)[25].

Para el caso de esta investigación, se aplicarán únicamente las pruebas de ebullición del agua (WBT <que incluye en su desarrollo la prueba de emisiones>). El protocolo de prueba de cocción controlada, CCT no se considera que arrojará resultados diferentes a los que se obtienen de la fase de ebullición a fuego lento que incluye la prueba de ebullición del agua, la cual simula la cocción a fuego lento de un alimento. También se dejará de lado la prueba de desempeño de cocinas (KPT) ya que es una prueba cualitativa prolongada y que se lleva a cabo con la cooperación de las personas que usan día a día las estufas. La documentación cualitativa de la prueba de igual manera es diaria, y la manipulación de las cocinas en el campo experimental no se hace día con día, sino ocasional, por lo que la realización de esta prueba no cumpliría con requisitos de la misma y no presentaría un resultado verídico.

[25] Engines and Energy Conversion Laboratory. Stove Manufacturers Emissions & Performance Test Protocol (EPTP).

Tampoco se aplicará la prueba estandarizada ISO 19867:1 ya que basado en comparaciones hechas con la prueba de ebullición de agua, los resultados preliminares sugieren que los tipos de estufas tradicionales a leña, estufas tipo rocket, estufa con ventilador, estufa de pellets y estufa de GLP se mantuvieron consistentes con los datos de la prueba de ebullición de agua[26]. Únicamente en estufas de biomasa (pellets y con ventilación) avanzadas se pueden presentar emisiones métricas más elevadas comparadas con la prueba de ebullición de agua.

2.3 Selección de combustible sólido.

Para prepararse para la evaluación, un punto importante a determinar es el tipo y características del combustible a utilizar: el tipo, tamaño y la humedad del combustible tiene un efecto importante en los resultados de pruebas de rendimiento de la estufa. Por esa razón, todas las pruebas de una sola estufa, o todas las pruebas para comparar diseños o estufas, se deben hacer con el combustible del mismo tipo y contenido de humedad, y de tamaño similar. Así mismo, tratar de obtener todo el combustible de la misma fuente, si es posible.

[26] Environmental Protection Agency. Comparison of Cookstove Emissions and Performance Results Using the Water Boiling Test v4 and the new ISO 19867-1 Testing Protocols

2.3.1 Condiciones del combustible para la prueba de ebullición del agua.

La Clean Cooking Alliance propone que para los casos en que se requiere mejorar la repetibilidad en las pruebas de ebullición de ebullición del agua, deben tenerse en cuenta los siguientes aspectos para el combustible:

a) Tipo: utilizar leña con un alto poder calorífico (entre 20-21 MJ/kg) sin excesivo contenido de resina, debería ser usada para todas las pruebas. Debe escogerse una especie que sea bastante utilizada en la región.
b) Dimensiones: los combustibles sólidos de distintos tamaños tienen diferentes características de combustión.
c) Contenido de humedad: Todas las pruebas deben realizarse con madera de bajo contenido de humedad (los valores utilizados han sido 6,5% o 10% sobre una base húmeda). Esto reduce la variabilidad, pero puede haber diferencia en la combustión en cuanto a las condiciones de campo.

En la realización de esta investigación, tras revisar en conjunto con personal académico de la Facultad de Ciencias Agronómicas las especies de árboles leñosos más abundantes y con alto poder calorífico disponibles en la Planta Experimental de Agronomía, se hizo la selección final del biocombustible entre las dos especies que figuran en la tabla 2.1.

Atendiendo a las recomendaciones dadas en la WBT 4.2.3, ambas especies tienen un poder calorífico dentro del rango sugerido (20-21 MJ/kg). Más sin embargo el factor determinante fue la disponibilidad en el campo experimental de estas especies, si bien se cuenta con Eucalyptus camaldulensis la cantidad

de árboles no es tanta comparada con los árboles de Gliricidia sepium, por lo que se opta por esta última especie con un poder calorífico de 20.50 MJ/kg.

Tabla 2.1. Especies candidatas a emplear como biocombustible.

Datos de los posibles biocombustibles a emplear	
Nombre/Nombre científico	**Poder calorífico (MJ/kg)**
Madrecacao (Gliricidia sepium)	20.50
Eucalipto (Eucalyptus camaldulensis)	20.08

2.4 Equipos e instrumentos necesarios.

2.4.1 Equipos e instrumentos necesarios para la prueba de ebullición de agua y emisiones contaminantes.

Tomando la última actualización de la prueba estandarizada de ebullición de agua, la versión 4.2.3, presenta el siguiente listado de equipo e instrumento necesario:

- ✓ Balanza con una capacidad de al menos 6 kg y precisión de ± 1 gramo
- ✓ Material resistente al calor para proteger la balanza
- ✓ Termómetro digital con una precisión de 0,5 °C, con sonda de termopar adecuado para la inmersión en líquidos
- ✓ Medidor de la humedad de la madera o bien horno para el secado de la madera y balanza para pesar (el medidor de la humedad es menos preciso, especialmente para maderas muy húmedas)
- ✓ Cronómetro

- ✓ Cinta métrica para la medición de la madera y la estufa (cm)
- ✓ Ollas estándar: ollas que se utilizan en la región y tienen un volumen de aproximadamente 7 litros (para las pruebas de 5-L) o 3.5 litros (para las pruebas de 2.5-L). Para cada tamaño, se deberá elegir una forma estándar (altura y circunferencia) que se utilice en el área.
- ✓ Regla de madera o metal para fijar el termómetro en agua
- ✓ Espátula para quitar el carbón de la estufa
- ✓ Tenazas para el manejo de carbón
- ✓ Cacerola para la transferencia de carbón
- ✓ Bandeja de metal para sostener el carbón para su pesaje
- ✓ Guantes resistentes al calor (opcional)

2.5 Proceso de acondicionamiento para la toma de las muestras.

2.5.1 Seguridad Y Salud

Para garantizar la seguridad y la salud del evaluador, se deben usar una mascarilla y protección ocular. También para eliminar cualquier tipo de riesgo al momento de pesar la leña que no se ha quemado, de cualquiera de las tres fases, es recomendado usar arena para apagar la llama de los bloques y luego proceder a pesarlos.

2.5.2 Condiciones generales previas

Es necesario realizar al menos una prueba en cada tipo de estufa. El evaluador debe realizar suficientes pruebas para familiarizarse con el procedimiento de prueba y con las características y el funcionamiento de la estufa. Esto proporcionará una indicación de cuánto combustible se requiere para

hervir la cantidad requerida de agua. Las estufas nuevas también deben usarse antes de la prueba porque el rendimiento de la estufa puede variar en función de la frecuencia que se ha utilizado la misma. A veces las estufas nuevas tienen componentes cerámicos que contienen cantidades desconocidas de humedad. Es útil encender la estufa primero para eliminar cualquier humedad antes de realizar cualquier prueba.

2.5.3 Seleccionando el combustible y las ollas para la prueba

a) Habiendo determinado el tipo y características del combustible a utilizar: el tipo, tamaño y la humedad del combustible tiene un efecto importante en los resultados de pruebas de rendimiento de la estufa. Por esa razón, todas las pruebas de una sola estufa, o todas las pruebas para comparar diseños o estufas, se deben hacer con el combustible del mismo tipo y contenido de humedad, y de tamaño similar. Así mismo, tratar de obtener todo el combustible de la misma fuente, si es posible. Para las pruebas de esta investigación se utilizará combustible con dimensiones de sección transversal de ~6 cm x ~6 cm.
b) Determinar el tipo de olla que va a utilizar y registrar su tamaño y forma: según el protocolo WBT 4.2.3 se puede utilizar olla de 3.5 litros para las regiones en donde es raro que se acostumbre a hervir hasta 5 litros de agua; por lo que debido a las dimensiones de las cocinas a probar y a costumbres de cocción del país se decidió usar olla de 3.5 litros, empleando 2.5 litros de agua para cada fase, tal como se recomienda también en el protocolo donde: aunque algunas de las medidas del WBT han sido normalizadas a la cantidad de agua hervida, los resultados no

deben ser comparados entre estufas de diferentes tamaños. La realización de pruebas con una olla de tamaño estándar mejora la repetitividad y comparación.

2.5.4 Preparación previa a la toma de datos

La preparación diaria previo a las pruebas se lista a continuación y ésta puede hacerse el día anterior a la ejecución.

a) Asegurar que haya suficiente espacio y tiempo suficientes para llevar a cabo la prueba sin interrupciones. Tomará de 1 ½ - 2 horas realizar las fases de alta y baja potencia para una estufa.
b) Preparar el combustible: preparar y pesar bastante combustible para cada WBT que se lleve a cabo. La leña que se utilizará para iniciar el fuego debe estar preparada antes de tiempo y se incluye en los paquetes pre pesados de combustible.
c) Determinar el contenido de humedad del combustible a utilizar.
d) Preparar agua: se necesitan al menos 5 litros de agua (2.5 litros por ollas pequeñas) para cada olla que se utiliza en las tres fases del WBT. Si el agua es escasa en la zona, el agua utilizada el día anterior puede ser enfriada y reutilizada en la prueba del día siguiente. El agua debe estar a temperatura ambiente antes de la prueba. No empiece las pruebas con agua que está más caliente que la temperatura ambiente.

Además de la preparación general que puede realizarse con antelación, está la preparación propia al inicio de cada set de pruebas. Donde es importante

registrar generalidades de la prueba y descripción de la estufa, condiciones del ambiente y descripciones del combustible. El registro de estos datos puede hacerse directamente en la hoja de cálculo del WBT 4.2.3 o bien registrarlos manualmente junto con los datos obtenidos para cada fase de la prueba, para lo que se propone el “formato de toma de datos”, tomado y tropicalizado para esta investigación y futuras investigaciones, del WBT 4.2.3.

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
PRUEBA DE EBULLICION DE AGUA:
FORMATO DE TOMA DE DATOS

Nombres (operadores):		Temperatura del aire:	
Fecha:		Condiciones del viento:	
Tipo de estufa/modelo:			
Numero de prueba:		Dimensiones del combustible:	
Ubicación:			
Tipo de combustible:		Contenido de humedad:	
Notas:			

Peso de la olla 1 (sin agua)		Peso del recipiente para carbón:	
Peso de la olla 2 (sin agua)			
Peso de la olla 3 (sin agua)			
Peso de la olla 4 (sin agua)		Punto local de ebullición:	

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
PRUEBA DE EBULLICION DE AGUA:
FORMATO DE TOMA DE DATOS

	Inicio frío		**Inicio caliente**		**Hervir a fuego lento**	
	Inicio	Fin	Inicio	Fin	Inicio	Fin
Hora						
Peso del combustible						
Temperatura del agua, olla 1						
Temperatura del agua, olla 2						
Temperatura del agua, olla 3						
Temperatura del agua, olla 4						
Peso de la olla 1 con agua						
Peso de la olla 2 con agua						
Peso de la olla 3 con agua						
Peso de la olla 4 con agua						
Material de ignición						

Figura 2.3 Formato para toma de datos traducido y tropicalizado de la WBT 4.2.3 (Clean Cooking Alliance, 2014)

2.6 Instrucciones para cada fase de la prueba de ebullición del agua

Habiendo registrado los detalles y condiciones del ambiente, resta la ejecución de las pruebas, para lo que se deben seguir las instrucciones para cada fase, el cual ha sido tomado y adecuado a esta investigación del WBT 4.2.3 de la Clean Cooking Alliance.

Para la ejecución con éxito de las tres fases de la prueba se debe considerar lo siguiente:

a) la estufa debe comenzar a temperatura ambiente
b) es necesaria la medición continua de la temperatura del agua
c) las ollas no deben estar tapadas durante la prueba ya que pueden aumentar la variabilidad de los resultados.

El formato del instructivo está dividido por cada fase, la fase de alta potencia de inicio frio y la fase de alta potencia de inicio caliente comparten la mayoría de los pasos a seguir, con ligeras diferencias. Las instrucciones para la fase de baja potencia de ebullición a fuego lento si difieren de las otras fases por lo que hay que prestarle cuidado al correcto seguimiento.

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
PRUEBA DE EBULLICION DE AGUA:
INSTRUCCIONES PARA CADA FASE

FASE I. INICIO FRIO (ALTA POTENCIA)	
Instrucciones	**Variables a medir**
1. Asegúrese de haber pesado la leña a emplear en esta fase.	Peso del combustible: _____ g
2. Coloque la olla en la estufa. Mida la temperatura inicial del agua.	Temperatura inicial agua: _____ °C
3. Use accesorios de madera para colocar un termómetro en cada olla que se use en la prueba, ya que la medición de la temperatura debe ser continua. La temperatura puede ser medida en el centro a 5cm desde la parte inferior.	
4. Tenga listo el crónometro, pero no inicie todavía.	
5. Inicie el fuego siguiendo el procedimiento documentado (que dependerá de las practicas locales).	
6. Una vez que el fuego ha sido encendido, inicie el cronómetro y registre la hora. Lleve rápidamente al punto de ebullición adicionando leña cuando sea conveniente, pero sin ser excesivamente derrochador. Las ollas no deben estar tapadas durante el proceso.	Tiempo inicial: ___ : ___ (hr:min)
7. Cuando el agua de la primera olla alcanza el punto de ebullición local predeterminado mostrado en el termómetro digital, hacer rápidamente los pasos 7.a - 7.g. a) Anote el tiempo en que se alcanzó el punto de ebullición local (para cocina con ollas múltiples, anotar el tiempo en	Tiempo final (olla #1): ___ : ___ (hr:min)

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR

PRUEBA DE EBULLICION DE AGUA:
INSTRUCCIONES PARA CADA FASE

que la olla #1, olla principal, llegue al punto de ebullición y también anotar el tiempo para las demás)	
b) Registre también la temperatura	Temperatura final agua:
c) Quite toda la leña de la estufa y apague las llamas. Traslade la leña ayudándose de pala y guantes a un recipiente con cantidad considerable de arena.	_____ °C Peso del combustible final:
d) Pese la leña sin quemar junto con la madera restante del paquete previamente pesado.	_____ g
e) Extraer todo el carbón que queda de la estufa y pesarlo.	Peso del carbón: _____ g
f) Pesar la o las ollas con agua	Peso de la olla con agua (final):
g) Botar el agua caliente de cada olla	_____ g

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR

PRUEBA DE EBULLICION DE AGUA:
INSTRUCCIONES PARA CADA FASE

FASE II. INICIO CALIENTE	
Instrucciones	**Variables a medir**
1. Tenga listo el cronometro, pero no inicie todavía.	
2. Asegúrese de haber pesado la leña a emplear en esta fase.	Peso del combustible: _____ g
3. Inicie el fuego siguiendo el procedimiento documentado (que dependerá de las prácticas locales).	
4. Una vez que el fuego ha sido encendido, inicie el cronómetro y registre la hora. Lleve rápidamente al punto de ebullición adicionando leña cuando sea conveniente, pero sin ser excesivamente derrochador. Las ollas no deben estar tapadas durante el proceso.	Tiempo inicial: ___ : ___ (hr:min)
5. Cuando el agua de la primera olla alcanza el punto de ebullición local predeterminado mostrado en el termómetro digital, hacer rápidamente los pasos 5.a - 5.g. a) Anote el tiempo en que se alcanzó el punto de ebullición local (para cocina con ollas múltiples, anotar el tiempo en que la olla #1, olla principal, llegue al punto de ebullición y también anotar el tiempo para las demás) b) Registre también la temperatura c) Quite toda la leña de la estufa y apague las llamas. Traslade la leña ayudándose de pala y guantes a un	Tiempo final (olla #1): ___ : ___ (hr:min) Temperatura final agua: _____ °C

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR

PRUEBA DE EBULLICION DE AGUA:
INSTRUCCIONES PARA CADA FASE

recipiente con cantidad considerable de arena. d) Pese la leña sin quemar junto con la madera restante del paquete previamente pesado. e) Extraer todo el carbón que queda de la estufa y pesarlo. f) Pesar la o las ollas con agua g) Botar el agua caliente de cada olla	Peso del combustible final: _____ g Peso del carbón: _____ g Peso de la olla con agua (final): _____ g

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR

PRUEBA DE EBULLICION DE AGUA:
INSTRUCCIONES PARA CADA FASE

FASE III. EBULLICIÓN A FUEGO LENTO (BAJA POTENCIA)	
Instrucciones	**Variables a medir**
1. Tenga listo el cronometro, pero no inicie todavía.	
2. Anote el peso de la olla con agua.	Peso del combustible: _____ g
3. Continua: Anote el peso del combustible sobrante de la segunda fase más el tercer paquete de combustible y las astillas.	
4. Reencienda la leña caliente que fue reemplazada. Siga el procedimiento de la Fase I.	
5. Una vez que el fuego ha sido encendido, inicie el cronómetro y registre la hora.	Tiempo inicial: ___ : ___ (hr:min)
6. Por 45 minutos mantenga el fuego a un nivel que mantiene la temperatura del agua lo más cerca posible a 3 grados por debajo del punto de ebullición. La prueba es inválida si la temperatura en la olla baja de más de 6 °C por debajo del punto de ebullición local.	
7. Después de los 45 minutos, rápidamente haga los pasos 7.a-7. e a) Anote el tiempo. Registre la temperatura final del agua que todavía debe ser de 3 °C por debajo del punto de ebullición establecido. Quite toda la leña de la estufa y apague las llamas. Elimine todo el carbón suelto de los extremos de la leña en el recipiente para carbón. b) Pesar la leña sin quemar retirada de la estufa junto con la leña restante del segundo bulto pesado previamente.	Tiempo final: ___ : ___ (hr:min) Temperatura final agua: _____ °C Peso del combustible final: _____ g

c) Extraer todo el carbón que queda de la estufa. Pesar el carbón restante junto con el carbón de las puntas de los leños. d) Quite todo el sobrante de la estufa y apague las llamas. e) Separar cuidadosamente el carbón y la leña no quemada y pesar por separado.	Peso del carbón: _____ g
8. Pese la olla con el agua que ha quedado.	Peso de la olla con agua (final): _____ g

Figura 2.3. Instrucciones para cada fase de la prueba de ebullición de agua, traducido y tropicalizado de la WBT 4.2.3 (Clean Cooking Alliance, 2014)

3 RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

3.1 Indicadores de desempeño y toma de datos para los modelos de cocina evaluados.

La finalidad de las pruebas para ambos tipos de cocinas evaluadas, será la obtención de las características de desempeño de cada estufa junto a los indicadores de eficiencia. Para el cálculo de estas variables deben recopilarse los datos que se detallan en el instructivo para cada fase.

Dentro de las características a evaluar para las diferentes estufas, están: velocidad de combustión y potencia de fuego.

Velocidad de Combustión. Es la medida de los gramos promedio de leña quemada por minuto durante la prueba. Cuando se compara entre las pruebas, se compara la consistencia con que el usuario estaba operando la estufa. Cuando se compara entre fogones, esta medida indica la rapidez con que la estufa consume combustible.

Potencia de fuego. Es una medida de qué tan rápido se quema el combustible, expresado en vatios. Se ve afectada tanto por la estufa (tamaño de la entrada de combustible/cámara de combustión) y la operación del usuario (tasa de alimentación de combustible). Por lo general, es una medida útil de la salida de calor de la estufa, y un indicador de la consistencia del operador de la estufa en varias pruebas. Un valor más alto o más bajo no es necesariamente preferible, sino más bien es un indicador del tamaño de la estufa.

Los indicadores de eficiencia a estudiar son: tiempo de ebullición, temperatura de ebullición corregida, eficiencia térmica, consumo especifico de combustible, consumo especifico-temperatura del tiempo de ebullición corregida y consumo de energía-temperatura del tiempo de ebullición corregida.

Tiempo de ebullición. Tiempo que le tomó a la primera olla en llegar al punto de ebullición desde la temperatura inicial.

Tiempo de ebullición corregido. El tiempo que le tomó a la olla #1 en llegar a la temperatura de ebullición, corregida para reflejar un aumento de temperatura de 75 °C de inicio a ebullición. Esta medida se puede comparar con otras pruebas y estufas para determinar la velocidad de la estufa en alta potencia.

Eficiencia térmica. Es una medida de la fracción de calor producido por el combustible que llegó directamente al agua en la olla. La energía restante se pierde en el ambiente. Por lo tanto, una eficiencia térmica más alta indica una mayor capacidad para transferir el calor producido hacia la olla.

Consumo específico de combustible. Esta es una medida de la cantidad de combustible requerido para hervir 1 litro de agua. Se calcula por el combustible seco equivalente utilizado menos la energía en el carbón restante, dividido por los litros de agua restantes al final de la prueba. De esta manera, se toma en cuenta el combustible utilizado para producir un litro útil de "alimentos" y, esencialmente, el tiempo necesario para ello.

Consumo especifico-Temperatura del tiempo de ebullición corregida. El tiempo que le tomó a la olla #1 en llegar a la temperatura de ebullición, corregida para reflejar un aumento de temperatura de 75°C de inicio a ebullición. Esto es para comparar diferentes pruebas que han tenido diferentes temperaturas de inicio o ebullición. A mayor consumo específico-temperatura corregida, más combustible es necesario para completar la misma tarea de producir un litro de agua hirviendo.

Consumo de Energía- Temperatura del tiempo de ebullición corregida. Esta es la misma medida que la anterior, pero ésta se reporta en energía (kilo-Joules) en vez de combustible (gramos). Esto permite una comparación directa entre los combustibles como distintos tipos de leña, carbón, etc.

Valores de referencia. Los valores de referencia combinan las fases de inicio en frío, inicio en caliente y cocción a fuego lento en un solo valor para la prueba general. Es el promedio de consumo específico de temperatura corregida (o emisión) en el inicio en frío y caliente, más la cocción a fuego lento. Tener un valor global puede ser útil en la comparación de un gran número de diseños de estufas.

3.1.1 Procedimiento para toma de datos para pruebas en cocina tradicional y mejorada tipo rocket.

Para la toma de datos durante las pruebas, datos que arrojen valor a la investigación, el operador debe estar familiarizado con el proceso y haber

realizado pruebas previas con el fin de conocer la estufa y saber cómo manejarla mejor. Puede usarse el instructivo para cada fase de la prueba para efectos de conocer el paso a paso a ejecutar, también para las primeras pruebas puede anotar los datos en los espacios designados en el instructivo y luego consolidar las mediciones de las variables en el formato de toma de datos. En el cual se contemplan la toma de datos de hasta 4 ollas en simultáneo, en caso de estudiarse modelos de cocina de ollas múltiples.

La figura 3.1 muestra las dimensiones de la cocina mejorada que es uno de los objetos de prueba para este procedimiento.

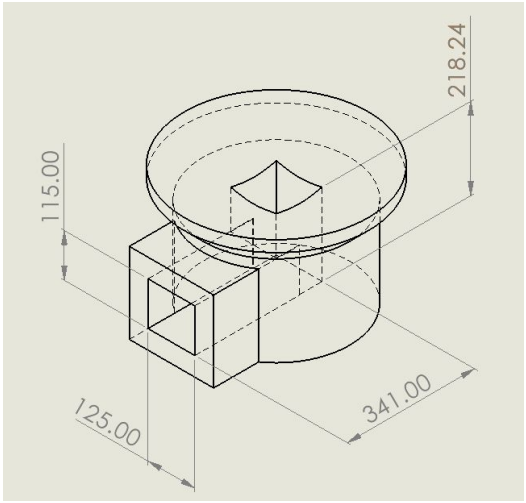


Figura 3.1. Dimensiones de la cocina mejorada tipo “rocket” empleada para las pruebas. (elaboración propia).

Los pasos que se proponen para una adecuada toma de datos son:

1. Registrar los datos preliminares (condiciones del ambiente y valores iniciales para las pruebas), en el formato en el anexo 3, por lo que el primer paso es tener a la mano el formato en digital para introducir directamente los datos o imprimirlo e ir anotando las mediciones.
2. Preparar la olla, registrando el peso (482 g). Luego llenar con 2.5 L de agua (aproximadamente 2.5 kg). Se usó la misma cantidad de agua para cada fase y para cada prueba. Al tener una sola olla disponible del mismo tamaño, los volúmenes necesarios para las fases restantes se midieron y se reservaron en bolsas. Se registran estas mediciones en el formato de toma de datos.
3. Preparar lotes de leña de 2kg aproximadamente, al menos 3 lotes para cada prueba. Se registra el peso de la leña para cada fase en el formato de toma de datos.
4. Registrar y medir, en el formato de toma de datos, las condiciones ambientales: temperatura del aire (°C), las condiciones de viento.
5. Asegurar que antes de iniciar, la cocina esté a temperatura ambiente, limpia y libre de cenizas. (La figura 3.2 muestra la cocina tipo rocket previo a la verificación de este paso).
6. Preparar arena en un balde para apagar la leña y medir masa sobrante al final de las fases. Preparar también espátula para trasladar el carbón de la cocina hacia la arena y el recipiente para trasladarlo a la balanza y medirlo.

Figura 3.2. Fotografía de la cocina mejorada empleada para las pruebas. (Fuente propia).

7. Colocar dentro de la cámara de combustión, astillas delgadas de ocote y papel para el encendido de la leña. (La figura 3.3 es representativa para este paso)

Figura 3.3. Cocina tradicional durante el proceso de encendido del fuego. (Fuente propia).

8. Iniciar el fuego y cuando visualmente la llama es constante, se coloca la olla con agua sobre la cocina.
9. Seguir los pasos e instrucciones para cada fase, según el formato en el apartado 2.6 para la obtención de los datos para la prueba.

3.2 Cálculos y resultados.

Dado que solo se puede hacer comparaciones entre cocinas con cierto grado de confianza, los resultados individuales para cada prueba, serán evaluados según el método de Grubbs, para detectar valores atípicos. Se evaluarán con valores críticos para un intervalo de confianza de 95%.

$$G_{cal} = \frac{s_i}{s} \; ; \; s_i = |x_i - \bar{x}| \;\; ec.15$$

$$G_{cal} > G_{crit}: rechazar\ el\ dato\ como\ atípico$$

Tabla 3.1. Gcrit para el método de Grubbs.

N	0.1	0.075	0.05	0.025	0.01	
3	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15	
4	1.42	1.44	1.46	1.48	1.49	
5	1.6	1.64	1.67	1.71	1.75	
6	1.73	1.77	1.82	1.89	1.94	
7	1.83	1.88	1.94	2.02	2.1	
8	1.91	1.96	2.03	2.13	2.22	
9	1.98	2.04	2.11	2.21	2.32	
10	2.03	2.1	2.18	2.29	2.41	

Para ambas cocinas se calcularán estas características e indicadores de desempeño: velocidad de combustión, potencia, tiempo de ebullición, temperatura de tiempo corregida, eficiencia térmica y consumo específico.

3.2.1 Cálculos y resultados prueba de ebullición de agua para cocina tradicional (fabricada localmente)

Velocidad de combustión: es la medida de la tasa de consumo de combustible al hervir el agua. Se calcula dividiendo el combustible seco equivalente consumido, entre el tiempo de duración de la fase.

$$(r_{cd})_t = \frac{f_{cd}}{\Delta t_c}; para\ la\ fase\ de\ inicio\ frio\ (alta\ potencia)\ ec. 16$$

$$(r_{hd})_t = \frac{f_{hd}}{\Delta t_h}; para\ la\ fase\ de\ inicio\ caliente\ (alta\ potencia)\ ec. 17$$

$$(r_{sd})_t = \frac{f_{sd}}{\Delta t_s}; para\ la\ fase\ de\ hervir\ a\ fuego\ lento\ (baja\ potencia)\ ec. 18$$

Los resultados para la velocidad de combustión de la prueba 1, 2 y 3 se presentan en la tabla 3.2 a continuación:

Tabla 3.2. Cálculo de la velocidad de combustión para pruebas en cocina tradicional. Aplicación del test de Grubbs para identificar valores atípicos. (Elaboración propia).

Características de la cocina tradicional:												
Velocidad de combustión (g/min)												
Numero de prueba	Inicio frío	Desviación	Gcal	Gcrit(n=3 <95%>)=1.15	Inicio caliente	Desviación	Gcal	Gcrit(n=3 <95%>)=1.15	Hervir a fuego lento	Desviación	Gcal	Gcrit(n=3 <95%>)=1.1
#1	29.74	5.75	1.34	NO	32.22	6.12	1.39	NO	9.16	0.16	0.27	SI
#2	22.79	1.20	0.28	SI	24.12	1.98	0.45	SI	8.83	0.49	0.84	SI
#3	19.44	4.55	1.06	SI	21.96	4.14	0.94	SI	9.97	0.65	1.11	SI
Promedio	**23.99**				**26.10**				**9.32**			
Desviación estándar	4.29				4.42				0.59			

Potencia de fuego: es la energía del combustible consumida para hervir el agua dividida entre el tiempo de ebullición. Es decir, la potencia promedio de salida de la estufa (en Watts) durante la prueba de alta potencia.

$$(FP_c)_t = \frac{f_{cd} * LVH}{\Delta t_c * 60}; para\ la\ fase\ de\ inicio\ frio\ (alta\ potencia)\ ec. 19$$

$$(FP_h)_t = \frac{f_{hd} * LVH}{\Delta t_h * 60}; para\ la\ fase\ de\ inicio\ caliente\ (alta\ potencia)\ ec. 20$$

$$(FP_s)_t = \frac{f_{sd} * LVH}{\Delta t_s * 60}; para\ la\ fase\ de\ hervir\ a\ fuego\ lento\ (baja\ potencia)\ ec. 21$$

Los resultados obtenidos para la potencia en la prueba 1, 2 y 3 se presentan en la tabla 3.3:

Tabla 3.3. Cálculo de la potencia para pruebas en cocina tradicional. Aplicación del test de Grubbs para identificar valores atípicos. (Elaboración propia).

Características de la cocina tradicional:												
Potencia (W)												
Numero de prueba	Inicio frío	Desviación	Gcal	Gcrit(n=3 <95%>)=1.15	Inicio caliente	Desviación	Gcal	Gcrit(n=3 <95%>)=1.15	Hervir a fuego lento	Desviación	Gcal	Gcrit(n=3 <95%>)=1.15
#1	9548.03	1846.52	1.34	NO	10341.41	1963.26	1.39	NO	2940.22	52.32	0.28	SI
#2	7315.22	386.29	0.28	SI	7743.50	634.65	0.45	SI	2835.44	157.10	0.83	SI
#3	6241.27	1460.24	1.06	SI	7049.55	1328.60	0.94	SI	3201.96	209.42	1.11	SI
Promedio	**7701.51**				**8378.15**				**2992.54**			
Desviación estándar	1377.34				1416.84				188.78			

Tiempo de ebullición: es el tiempo que tardó el agua de la primera olla en hervir, es la diferencia entre el tiempo de inicio y final.

$$(\Delta t_c)_t = t_{c,f} - t_{c,i}; para\ la\ fase\ de\ inicio\ frio\ (alta\ potencia)\ ec. 22$$

$$(\Delta t_h)_t = t_{h,f} - t_{h,i}; para\ la\ fase\ de\ inicio\ caliente\ (alta\ potencia) ec. 23$$

$$(\Delta t_s)_t = t_{s,f} - t_{s,i} = 45\ min; para\ la\ fase\ de\ hervir\ a\ fuego\ lento\ (baja\ potencia)\ ec. 24$$

La tabla 3.4 muestra los resultados obtenidos para el tiempo de ebullición en la prueba 1, 2 y 3:

Tabla 3.4. Cálculo de la velocidad del tiempo de ebullición para pruebas en cocina tradicional. Aplicación del test de Grubbs para identificar valores atípicos. (Elaboración propia).

Indicadores de desempeño de la cocina tradicional:								
Tiempo de ebullición (min)								
Numero de prueba	Inicio frío	Desviación	Gcal	Gcrit(n=3 <95%>)=1.15	Inicio caliente	Desviación	Gcal	Gcrit(n=3 <95%>)=1.15
#1	22.00	7.67	1.09	SI	20.00	7.00	1.22	NO
#2	28.00	1.67	0.24	SI	27.00	0.00	0.00	SI
#3	39.00	9.33	1.33	NO	34.00	7.00	1.22	NO
Promedio	29.67				27.00			
Desviación estándar	7.04				5.72			

Tiempo de ebullición corregido: es el mismo tiempo de ebullición anterior pero ajustado a un cambio de temperatura estándar de 75°C (25°C a 100°C). Este ajuste estandariza los resultados y facilita una comparación entre pruebas que pueden haber utilizado agua con temperaturas iniciales más altas o más bajas.

$$(\Delta {t_c}^{\tau})_t = \Delta t_c * \frac{75}{t1_{c,f} - t1_{c,i}}; para\ la\ fase\ de\ inicio\ frio\ (alta\ potencia)\ ec. 25$$

$$(\Delta {t_h}^{\tau})_t = \Delta t_h * \frac{75}{t1_{h,f} - t1_{h,i}}; para\ la\ fase\ de\ inicio\ caliente\ (alta\ potencia) ec. 26$$

La tabla 3.5 muestra los resultados obtenidos del tiempo de ebullición corregido en las tres pruebas realizadas en la cocina tradicional:

Tabla 3.5. Cálculo de temperatura del tiempo de ebullición corregida para pruebas en cocina tradicional. Aplicación del test de Grubbs para identificar valores atípicos. (Elaboración propia).

Indicadores de desempeño de la cocina tradicional: Temperatura del tiempo de ebullición corregida (min)								
Numero de prueba	Inicio frío	Desviación	Gcal	Gcrit(n=3 <95%>)=1.15	Inicio caliente	Desviación	Gcal	Gcrit(n=3 <95%>)=1.15
#1	24.00	7.67	1.09	SI	22.00	7.00	1.22	NO
#2	30.00	1.67	0.24	SI	29.00	0.00	0.00	SI
#3	41.00	9.33	1.33	NO	36.00	7.00	1.22	NO
Promedio	31.67				29.00			
Desviación estándar	7.04				5.72			

Eficiencia térmica: es la relación entre el trabajo realizado al calentar y evaporar agua y la energía consumida al quemar combustible. Es una estimación de la energía total producida por el fuego, que se utiliza para calentar el agua en la olla.

$$(h_c)_t = \frac{\Delta E_{H2O,heat} + \Delta E_{H2O,evap}}{E_{released,c}}; para\ la\ fase\ de\ inicio\ frio\ (alta\ potencia)\ ec.27$$

$$(h_h)_t = \frac{\Delta E_{H2O,heat} + \Delta E_{H2O,evap}}{E_{released,h}}; para\ la\ fase\ de\ inicio\ caliente\ (alta\ potencia)\ ec.28$$

$$(h_s)_t = \frac{\frac{4.186\left(t1_{s,f} - t1_{s,i}\right)\left(P1_{s,i} - P1 + w_{sr}\right)}{2} + 2260 * w_{sv}}{E_{released,s}}; fase\ baja\ potencia\ ec.29$$

La tabla 3.6 recopila los resultados de la eficiencia térmica en cada una de las pruebas realizadas en la cocina tradicional:

Tabla 3.6 Cálculo de la eficiencia térmica para pruebas en cocina tradicional. Aplicación del test de Grubbs para identificar valores atípicos. (Elaboración propia).

Indicadores de desempeño de la cocina tradicional: Eficiencia térmica (%)												
Numero de prueba	Inicio frío	Desviación	Gcal	Gcrit(n=3 <95%>)=1.15	Inicio caliente	Desviación	Gcal	Gcrit(n=3 <95%>)=1.15	Hervir a fuego lento	Desviación	Gcal	Gcrit(n=3 <95%>)=1.15
#1	16.24	0.97	0.52	SI	16.30	1.35	0.82	SI	23.12	0.63	0.42	SI
#2	16.93	1.66	0.88	SI	15.91	0.96	0.59	SI	23.58	1.09	0.72	SI
#3	12.63	2.64	1.40	NO	12.63	2.32	1.41	NO	20.76	1.73	1.14	SI
Promedio	**15.27**				**14.95**				**22.49**			
Desviación estándar	1.89				1.65				1.51			

Consumo específico de combustible: es una medida de la cantidad de leña necesaria para producir un litro (o kilo) de agua hirviendo empezando con la estufa fría.

$$(sc_c)_t = \frac{f_{cd}}{w_{cr}}; para\ la\ fase\ de\ inicio\ frio\ (alta\ potencia)\ ec.30$$

$$(sc_h)_t = \frac{f_{hd}}{w_{hr}}; para\ la\ fase\ de\ inicio\ caliente\ (alta\ potencia)\ ec.31$$

$$(sc_s)_t = \frac{f_{sd}}{w_{sr}}; fase\ baja\ potencia\ \ ec.32$$

El consumo específico obtenido para las tres pruebas, se muestra en la tabla 3.7.

Tabla 3.7. Cálculo del consumo específico para pruebas en cocina tradicional. Aplicación del test de Grubbs para identificar valores atípicos. (Elaboración propia).

Indicadores de desempeño de la cocina tradicional: Consumo específico (g/L)												
Numero de prueba	Inicio frío	Desviación	Gcal	Gcrit(n=3 <95%>)=1.15	Inicio caliente	Desviación	Gcal	Gcrit(n=3 <95%>)=1.15	Hervir a fuego lento	Desviación	Gcal	Gcrit(n=3 <95%>)=1.15
#1	352.56	8.60	0.43	SI	342.19	12.45	0.73	SI	377.80	8.24	0.74	SI
#2	342.23	18.93	0.95	SI	343.12	11.52	0.68	SI	356.81	12.75	1.14	SI
#3	388.69	27.53	1.38	NO	378.62	23.98	1.41	NO	374.06	4.50	0.40	SI
Promedio	**361.16**				**354.64**				**369.56**			
Desviación estándar	19.92				16.96				11.20			

En el gráfico 1 se muestra la variabilidad de velocidad de combustión y potencia, como características de la cocina. También se visualiza la variabilidad de los indicadores de eficiencia en las pruebas, tiempo de ebullición, tiempo de ebullición corregido, eficiencia térmica y consumo especifico.

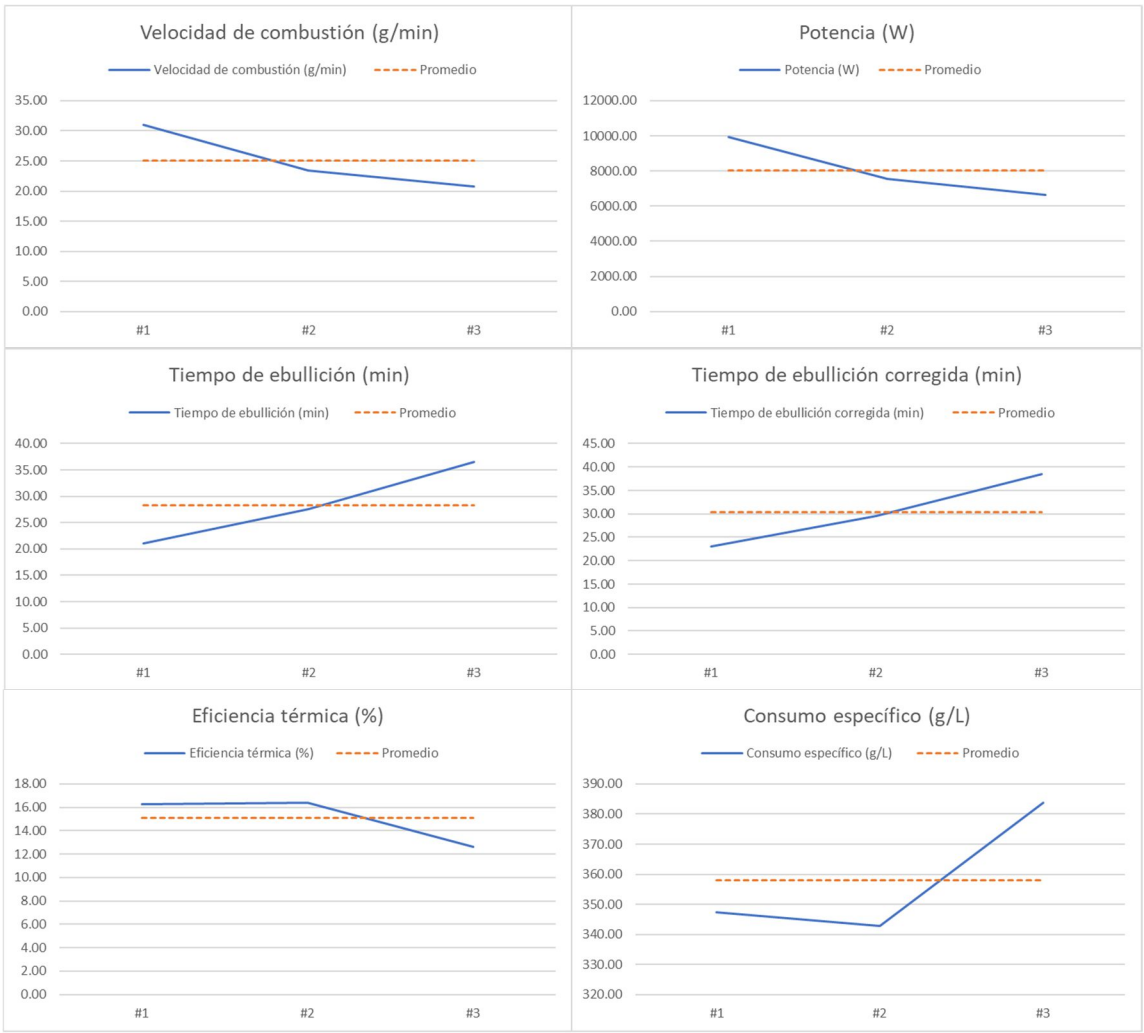


Gráfico 1. Variabilidad de las características e indicadores de eficiencia en la prueba de ebullición del agua para la cocina tradicional usando leña de madrecacao. (Elaboración propia)

3.2.2 Cálculos y resultados prueba de ebullición de agua para cocina mejorada tipo Rocket.

Al igual que las características e indicadores a calcular para la cocina tradicional, las mediciones y cálculos son idénticos. Las variables a calcular comparten la misma definición.

Velocidad de combustión:

$$(r_{cd})_m = \frac{f_{cd}}{\Delta t_c}; para\ la\ fase\ de\ inicio\ frio\ (alta\ potencia)\ ec. 33$$

$$(r_{hd})_m = \frac{f_{hd}}{\Delta t_h}; para\ la\ fase\ de\ inicio\ caliente\ (alta\ potencia)\ ec. 34$$

$$(r_{sd})_m = \frac{f_{sd}}{\Delta t_s}; para\ la\ fase\ de\ hervir\ a\ fuego\ lento\ (baja\ potencia)\ ec. 35$$

Los resultados para la velocidad de combustión de las 5 pruebas se presentan en la tabla 3.8 a continuación:

Tabla 3.8. Cálculo de la velocidad de combustión para pruebas en cocina mejorada. Aplicación del test de Grubbs para identificar valores atípicos. (Elaboración propia).

Caracteristicas de la cocina mejorada: Velocidad de combustión (g/min)												
Numero de prueba	Inicio frío	Desviación	Gcal	Gcrit(n=5 <95%>)=1.67	Inicio caliente	Desviación	Gcal	Gcrit(n=5 <95%>)=1.67	Hervir a fuego lento	Desviación	Gcal	Gcrit(n=4 <95%>)=1.46
#1	11.81	0.46	0.28	SI	11.43	0.04	0.03	SI	-	-	-	-
#2	11.75	0.40	0.24	SI	11.38	0.09	0.07	SI	10.50	0.52	0.66	SI
#3	13.27	1.92	1.14	SI	12.16	0.69	0.48	SI	9.20	0.78	0.98	SI
#4	11.25	0.10	0.06	SI	13.14	1.67	1.17	SI	9.40	0.58	0.72	SI
#5	8.65	2.70	1.60	SI	9.26	2.21	1.55	SI	10.80	0.82	1.04	SI
Promedio	**11.35**				**11.47**				**9.98**			
Desviación estándar	1.69				1.43				0.79			

Potencia de fuego:

$$(FP_c)_m = \frac{f_{cd} * LVH}{\Delta t_c * 60}; para\ la\ fase\ de\ inicio\ frio\ (alta\ potencia)\ ec. 36$$

$$(FP_h)_m = \frac{f_{hd} * LVH}{\Delta t_h * 60}; para\ la\ fase\ de\ inicio\ caliente\ (alta\ potencia)\ ec. 37$$

$$(FP_s)_m = \frac{f_{sd} * LVH}{\Delta t_s * 60}; para\ la\ fase\ de\ hervir\ a\ fuego\ lento\ (baja\ potencia)\ ec. 38$$

Los resultados para la potencia de las 5 pruebas se detallan en la tabla 3.9 a continuación:

Tabla 3.9. Cálculo de la potencia para pruebas en cocina mejorada. Aplicación del test de Grubbs para identificar valores atípicos. (Elaboración propia).

Caracteristicas de la cocina mejorada:												
Potencia (W)												
Numero de prueba	Inicio frío	Desviación	Gcal	Gcrit(n=5 <95%>)=1.67	Inicio caliente	Desviación	Gcal	Gcrit(n=5 <95%>)=1.67	Hervir a fuego lento	Desviación	Gcal	Gcrit(n=4 <95%>)=1.46
#1	3790.12	148.08	0.27	SI	3670.09	28.05	0.05	SI	-	-	-	-
#2	3770.68	128.64	0.24	SI	3652.23	10.19	0.02	SI	3374.66	178.88	0.70	SI
#3	4260.19	618.15	1.14	SI	3901.76	259.72	0.48	SI	2953.69	242.09	0.95	SI
#4	3611.95	30.09	0.06	SI	4217.36	575.32	1.06	SI	3002.95	192.83	0.76	SI
#5	2777.27	864.77	1.60	SI	2971.81	670.23	1.24	SI	3451.81	256.03	1.01	SI
Promedio	**3642.04**				**3682.65**				**3195.78**			
Desviación estándar	540.68				458.34				253.86			

Tiempo de ebullición:

$$(\Delta t_c)_m = t_{c,f} - t_{c,i}; para\ la\ fase\ de\ inicio\ frio\ (alta\ potencia)\ ec. 39$$

$$(\Delta t_h)_m = t_{h,f} - t_{h,i}; para\ la\ fase\ de\ inicio\ caliente\ (alta\ potencia)\ ec. 40$$

$$(\Delta t_s)_m = t_{s,f} - t_{s,i} = 45\ min; para\ fase\ de\ hervir\ a\ fuego\ lento\ (baja\ potencia)\ ec. 41$$

Los tiempos de ebullición obtenidos para las pruebas realizadas en la cocina mejorada se muestran en la tabla 3.10:

Tabla 3.10. Cálculo del tiempo de ebullición para pruebas en cocina mejorada. Aplicación del test de Grubbs para identificar valores atípicos. (Elaboración propia).

Indicadores de desempeño de la cocina mejorada:								
Tiempo de ebullición (min)								
Numero de prueba	Inicio frío	Desviación	Gcal	Gcrit(n=5 <95%>)=1.67	Inicio caliente	Desviación	Gcal	Gcrit(n=5 <95%>)=1.67
#1	37.00	7.60	0.94	SI	33.00	6.20	1.12	SI
#2	38.00	8.60	1.06	SI	32.00	5.20	0.94	SI
#3	19.00	10.40	1.29	SI	21.00	5.80	1.05	SI
#4	25.00	4.40	0.54	SI	22.00	4.80	0.87	SI
#5	28.00	1.40	0.17	SI	26.00	0.80	0.14	SI
Promedio	**29.40**				**26.80**			
Desviación estándar	8.08				5.54			

Temperatura del tiempo de ebullición corregida:

$$(\Delta {t_c}^{\tau})_m = \Delta t_c * \frac{75}{t1_{c,f} - t1_{c,i}}; para\ la\ fase\ de\ inicio\ frio\ (alta\ potencia)\ ec. 42$$

$$(\Delta {t_h}^{\tau})_m = \Delta t_h * \frac{75}{t1_{h,f} - t1_{h,i}}; para\ la\ fase\ de\ inicio\ caliente\ (alta\ potencia) ec. 43$$

En la tabla 3.11 se presentan los resultados de la corrección del tiempo en las 5 pruebas realizadas.

Tabla 3.11. Cálculo de la temperatura del tiempo de ebullición corregida para pruebas en cocina mejorada. Aplicación del test de Grubbs para identificar valores atípicos. (Elaboración propia).

Indicadores de desempeño de la cocina mejorada: Temperatura del tiempo de ebullición corregida (min)								
Numero de prueba	Inicio frío	Desviación	Gcal	Gcrit(n=5 <95%>)=1.67	Inicio caliente	Desviación	Gcal	Gcrit(n=5 <95%>)=1.67
#1	40.00	8.60	1.05	SI	35.00	6.20	1.03	SI
#2	39.00	7.60	0.93	SI	35.00	6.20	1.03	SI
#3	21.00	10.40	1.27	SI	23.00	5.80	0.96	SI
#4	26.00	5.40	0.66	SI	23.00	5.80	0.96	SI
#5	31.00	0.40	0.05	SI	28.00	0.80	0.13	SI
Promedio	**31.40**				**28.80**			
Desviación estándar	8.20				6.02			

Eficiencia térmica:

$$(h_c)_m = \frac{\Delta E_{H2O,heat} + \Delta E_{H2O,evap}}{E_{released,c}}; para\ la\ fase\ de\ inicio\ frio\ (alta\ potencia)\ ec.44$$

$$(h_h)_m = \frac{\Delta E_{H2O,heat} + \Delta E_{H2O,evap}}{E_{released,h}}; para\ la\ fase\ de\ inicio\ caliente\ (alta\ potencia)\ ec.45$$

$$(h_s)_m = \frac{\frac{4.186\left(t1_{s,f} - t1_{s,i}\right)\left(P1_{s,i} - P1 + w_{sr}\right)}{2} + 2260 * w_{sv}}{E_{released,s}}; fase\ baja\ potencia\ \ ec.46$$

La tabla 3.12 muestra los valores obtenidos de la eficiencia térmica para cada una de las 5 pruebas efectuadas:

Tabla 3.12. Cálculo de la eficiencia térmica para pruebas en cocina mejorada. Aplicación del test de Grubbs para identificar valores atípicos. (Elaboración propia).

Indicadores de desempeño de la cocina mejorada: Eficiencia térmica (%)												
Numero de prueba	Inicio frío	Desviación	Gcal	Gcrit(n=5 <95%>)=1.67	Inicio caliente	Desviación	Gcal	Gcrit(n=5 <95%>)=1.67	Hervir a fuego lento	Desviación	Gcal	Gcrit(n=5 <95%>)=1.67
#1	23.00	7.80	1.13	SI	27.00	6.60	1.09	SI	-	-	-	-
#2	24.00	6.80	0.98	SI	27.00	6.60	1.09	SI	20.00	1.25	0.83	SI
#3	36.00	5.20	0.75	SI	39.00	5.40	0.89	SI	23.00	1.75	1.17	SI
#4	33.00	2.20	0.32	SI	37.00	3.40	0.56	SI	22.00	0.75	0.50	SI
#5	38.00	7.20	1.04	SI	38.00	4.40	0.73	SI	20.00	1.25	0.83	SI
Promedio	**30.80**				**33.60**				**21.25**			
Desviación estándar	6.91				6.07				1.50			

Consumo específico de combustible:

$$(sc_c)_m = \frac{f_{cd}}{w_{cr}}; para\ la\ fase\ de\ inicio\ frio\ (alta\ potencia)\ ec.47$$

$$(sc_h)_m = \frac{f_{hd}}{w_{hr}}; para\ la\ fase\ de\ inicio\ caliente\ (alta\ potencia)\ ec.48$$

$$(sc_s)_m = \frac{f_{sd}}{w_{sr}}; fase\ baja\ potencia\ ec.49$$

La tabla 3.13 recopila los resultados obtenidos desde la prueba 1 hasta la 5 para el consumo específico:

Tabla 3.13. Cálculo del consumo específico para pruebas en cocina mejorada. Aplicación del test de Grubbs para identificar valores atípicos. (Elaboración propia)

Indicadores de desempeño de la cocina mejorada:												
Consumo específico (g/L)												
Numero de prueba	Inicio frío	Desviación	Gcal	Gcrit(n=5 <95%>)=1.67	Inicio caliente	Desviación	Gcal	Gcrit(n=3 <95%>)=1.15	Hervir a fuego lento	Desviación	Gcal	Gcrit(n=5 <95%>)=1.67
#1	228.62	61.03	1.17	SI	195.90	38.14	1.14	SI	-	-	-	-
#2	219.97	52.38	1.00	SI	187.90	30.14	0.90	SI	415.71	24.54	0.98	SI
#3	125.50	42.09	0.80	SI	131.55	26.21	0.78	SI	358.50	32.67	1.31	SI
#4	141.39	26.20	0.50	SI	153.48	4.28	0.13	SI	385.86	5.31	0.21	SI
#5	122.48	45.11	0.86	SI	119.97	37.79	1.13	SI	404.60	13.43	0.54	SI
Promedio	**167.59**				**157.76**				**391.17**			
Desviación estándar	52.35				33.53				25.02			

En el gráfico 2 se ve como han ido variando la velocidad de combustión y la potencia, también los indicadores de rendimiento para la cocina mejorada.

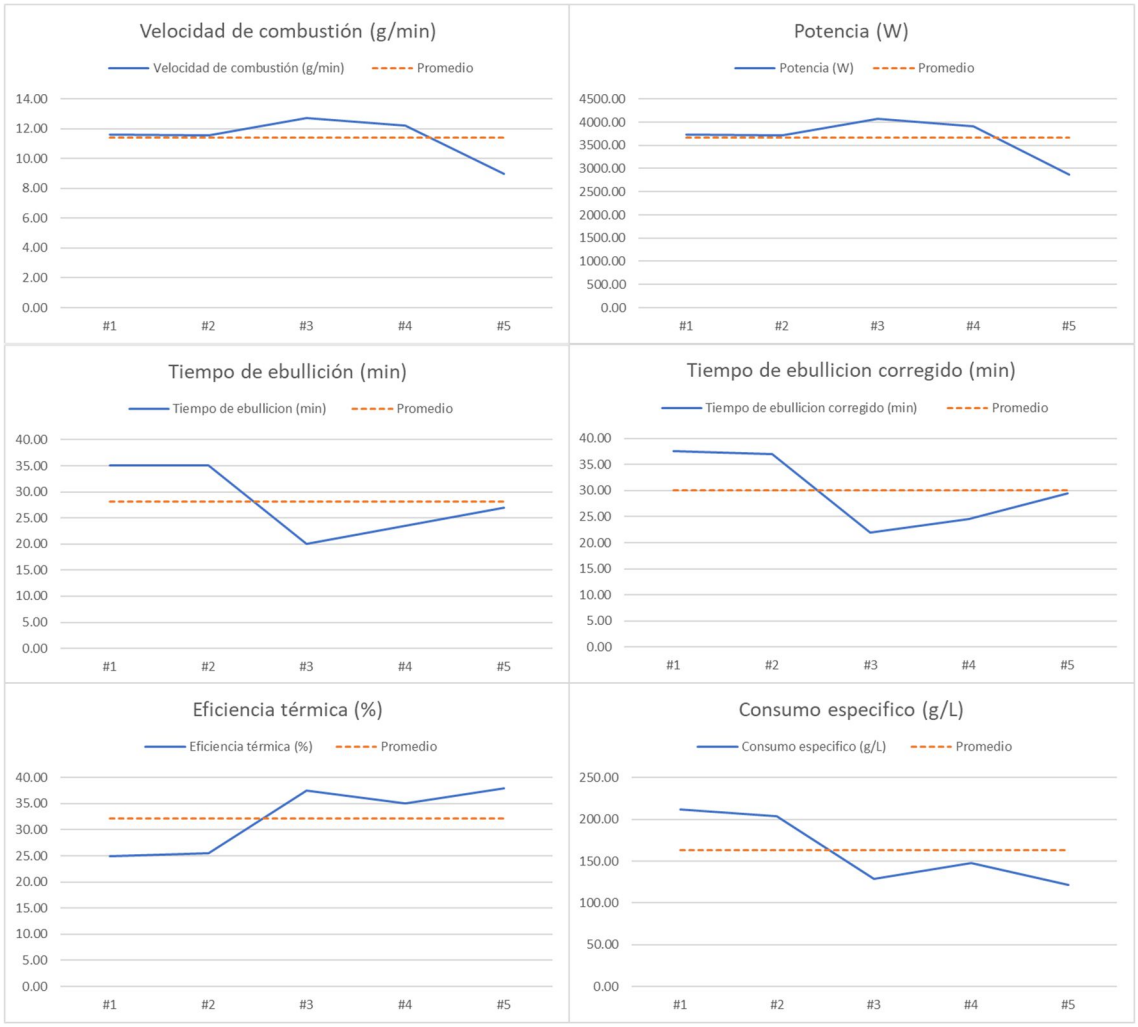


Gráfico 2. Variabilidad de las características e indicadores de eficiencia en la prueba de ebullición del agua para la cocina mejorada tipo rocket usando leña de madrecacao. (Elaboración propia)

3.3 Comparación de aprovechamiento y eficiencia energética de cocina a leña de la EEP con cocina mejorada.

Las pruebas para ambas cocinas se llevaron a cabo durante la época seca 2022-2023, entre el 25 de noviembre y el 21 de abril. Durante esta temporada la humedad relativa oscila entre 50-70% y temperaturas medias entre 19°C hasta 38°C (MARN, 2017).

La tabla 3.14 compara los resultados entre la cocina tradicional y cocina mejorada para la fase de alta potencia de inicio frío. La cocina mejorada presenta una reducción aproximada del 19% de tiempo requerido para llevar el agua al punto de ebullición. De igual manera la eficiencia térmica de la cocina tradicional se ve superada en un 20% por la eficiencia de la cocina mejorada tipo rocket y el indicador más relevante en esta prueba, el consumo específico, es para la cocina mejorada 64% menos que el consumo para la tradicional.

Tabla 3.14. Características entre fases de alta potencia (inicio frio) para prueba de ebullición de agua. (Elaboración propia).

COMPARACIÓN ENTRE FASES DE ALTA POTENCIA (INICIO FRÍO) PARA PRUEBA DE EBULLICIÓN DE AGUA			
CARACTERISTICA/INDICADOR	UNIDADES	Cocina tradicional	Cocina mejorada "rocket"
		Valor	Valor
Leña seca equivalente consumida	g	683.33	327.00
Tiempo para ebullir 2.5 litros de agua	min	31.78	29.00
Eficiencia termica	%	15.27	30.80
Velocidad de combustion	g/min	23.99	11.35
Consumo especifico	g/liter	361.16	167.59
Potencia del fuego	kW	7.70	3.66

Para la fase de inicio caliente, se obtuvieron los resultados que se muestran en la tabla 3.15. En esta fase, la cocina mejorada, tanto para el tiempo

de ebullición, eficiencia térmica y consumo especifico tiene mejores valores, presentando una ventaja del 14%, 23% y 62%, respectivamente.

Tabla 3.15. Características entre fases de alta potencia (inicio caliente) para prueba de ebullición de agua. (Elaboración propia).

COMPARACIÓN ENTRE FASES DE ALTA POTENCIA (INICIO CALIENTE) PARA PRUEBA DE EBULLICIÓN DE AGUA			
CARACTERISTICA/INDICADOR	UNIDADES	Cocina tradicional	Cocina mejorada "rocket"
		Valor	Valor
Leña seca equivalente consumida	g	680.67	240.71
Tiempo para ebullir 2.5 litros de agua	min	28.93	26.80
Eficiencia termica	%	14.95	33.60
Velocidad de combustion	g/min	26.10	11.47
Consumo especifico	g/liter	354.64	157.76
Potencia del fuego	kW	8.38	3.68

Finalmente, para la fase de ebullición a fuego lento, los valores para la eficiencia térmica y consumo especifico no varían significativamente, y en este caso, la cocina tradicional presenta un mejor desempeño, tal como muestra la tabla 3.16.

Tabla 3.16. Características entre fases de baja potencia (ebullir a fuego lento) para prueba de ebullición de agua. (Elaboración propia).

COMPARACIÓN ENTRE FASES DE BAJA POTENCIA (EBULLIR A FUEGO LENTO) PARA PRUEBA DE EBULLICIÓN DE AGUA			
CARACTERISTICA/INDICADOR	UNIDADES	Cocina tradicional	Cocina mejorada "rocket"
		Valor	Valor
Leña seca equivalente consumida	g	419.33	448.00
Eficiencia termica	%	22.49	21.25
Velocidad de combustion	g/min	9.32	9.98
Consumo especifico	g/liter	369.56	391.17
Potencia del fuego	kW	2.99	3.20

3.4 Oportunidades de mejora y trabajos futuros.

Tras evaluar los resultados de las pruebas en las cocinas, se tiene a bien proponer las siguientes mejoras con el fin de aumentar el aprovechamiento que tienen actualmente las cocinas:

- ✓ Modificar las cocinas artesanales con cámaras de combustión de área más reducida, de tal manera que entre la llama y la superficie de los elementos de cocina (ollas o plancha) la distancia sea menor y la transferencia de calor se dé forma más eficiente.
- ✓ Aislar físicamente las cocinas, específicamente en la entrada y contorno de la cámara de combustión, con el fin de que las condiciones del viento no tengan mayor influencia sobre la estabilidad de la llama y las pérdidas de calor a través de las paredes sea menor.
- ✓ Usar leña cortada en trozos pequeños, como se evidenció en esta investigación, al usar trozos pequeños de 6x6 cm, no se tuvo mayor problema con la estabilidad de la llama. Además de remarcar el hecho que la alimentación de leña oportuna por parte del operador también es un factor importante y se tiene mejor control al usar leña de estas dimensiones.
- ✓ En futuras investigaciones se propone considerar todas aquellas afectaciones reales que tienen las cocinas. Por ejemplo, en el balance de energía no se considera la transferencia de calor por convección, conducción, y radiación. La energía transferida al agua es de hecho la suma de calor latente, calor sensible y las perdidas por los tres modos de

transferencia. Por lo que se anima para futuras investigaciones, la inclusión de estas variables para realizar el balance energético completo.

CONCLUSIONES

- ✓ Se realizó la prueba estandarizada para evaluación de desempeño de estufas: prueba de ebullición del agua versión 4.2.3. El consumo específico para la cocina mejorada es en promedio para las fases de alta potencia, 162.68 g/L con una desviación estándar de 41.77 g/L en promedio y para la cocina tradicional tiene un valor promedio de 357.90 g/L con una desviación estándar de 20.58 g/L en promedio, es decir que se requiere de 195.22 gramos más de leña en una cocina tradicional para hervir el mismo litro de agua que en una cocina mejorada tipo rocket. Los resultados indican que, en promedio, la cocina tradicional presenta una eficiencia térmica para las fases de alta potencia del 15.11% con una desviación estándar de 1.95% y la cocina mejorada tipo rocket presenta también en promedio para estas fases, un valor de 32.20% con una desviación de 6.3% en promedio. La tasa de incineración o velocidad de combustión, tuvo un mejor desempeño para la cocina mejorada, presentando un valor de 25.05 g/min, con 4.91 g/min de desviación estándar en promedio versus un 11.41 g/min para la cocina tradicional, con un valor de 1.47 g/min para la desviación estándar en promedio. Para el caso del tiempo de ebullición corregido, se tuvo un lapso de 30 minutos para la cocina mejorada y 31 minutos para la cocina tradicional, los valores para ambas cocinas son similares.

- ✓ Las emisiones producto de la combustión en las pruebas no fue posible obtenerlas debido a averías en el equipo de medición, sin embargo, en estudios realizados en laboratorio la generación de CO_2 ronda

aproximadamente entre 820 g para la cocina tradicional y entre 840 para la cocina tipo rocket (Partnership for Clean Indoor Air, 2012).

- ✓ Uno de los factores que se identificó que tiene mayor afectación en el desarrollo de este tipo de pruebas, es la condición del viento (la velocidad). Para ambos estudios, las pruebas se realizaron al aire libre para simular las condiciones reales de trabajo. Tomando de referencia la tercera prueba hecha en la cocina tradicional, donde se presentaba una condición de vientos fuertes se tuvieron valores de 12% en la eficiencia térmica, una disminución de aproximadamente 4 puntos porcentuales. De igual forma, el consumo específico, tuvo un aumento significativo, comparado con las primeras dos pruebas para esta cocina.

- ✓ En esta investigación se comprueba el hecho que la construcción de la cámara de combustión de una cocina, está directamente relacionada con el aprovechamiento de la energía transmitida mediante los tres modos de transferencia. La cocina tradicional tiene una cámara de combustión abierta que solo aprovecha el calor de las llamas, mientras que la cocina tipo Rocket aprovecha también a su vez, el calor de los gases de combustión, reflejándose en una disminución del tiempo de ebullición y un mayor porcentaje de eficiencia térmica. Lo cual se comprobó con los datos obtenidos para ambas cocinas, se presentó un aumento en el agua evaporada en la cocina mejorada tipo rocket, lo cual se traduce en una ventaja de aprovechamiento térmico de 17.09%.

- ✓ En la aplicación del método de Grubbs, en algunas pruebas realizadas para las dos cocinas, encontramos valores atípicos. Estos podrían ser corregidos al realizar más pruebas y ajustar el valor del número de Grubbs. Aun así, al ser pruebas de campo, difícilmente se tiene control, por ejemplo: de las condiciones climáticas, las cuales tienen un gran efecto en estos procesos.

- ✓ La investigación concluye contrastando los datos de las tres fases entre la cocina tradicional y la cocina mejorada. De los datos se puede inferir que, en la fase de baja potencia, el consumo especifico es más elevado. Y que en esta fase la cocina mejorada tipo rocket se comporta de manera similar a la cocina tradicional.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Wang, X., Franco, J., & Masera, O. (2013). ¿Qué hemos aprendido del uso de biomasa para cocinar en los hogares de América Central? Centro América: ESMAP.

Aprovecho Research Center. (2012). Test Results of Cook Stove Performance. U.S.: Partnership for Clean Indoor Air.

Agudelo, D., & Martinez, J. (2018). Determinación de la eficiencia del sistema de aprovechamiento y uso energético de la madera, en estufas ecológicas implementadas por Corpoguavio, en el municipio de Gachala, Cundinamarca (especialista ambiental). Universidad libre.

BUN-CA. (2012). Estufas mejoradas de leña en Centroamérica. Centroamérica: BUN-CA & HIVOS.

Subero, E. (2010). *Caracterización de los combustibles sólidos* (Técnico). Escuela Universitaria Ingeniería Técnica Industrial Zaragoza.

TRANSBIOMA FP. (2012). Biomasa, biocombustibles y sostenibilidad. Madrid: Graficolor-Palencia.

David Barber. (2018). Las diferencias entre los biocombustibles y los combustibles fósiles. 2022, de Leaf Group Media Sitio web: https://www.cuidatudinero.com/13166338/salares-mas-grandes-del-mundo

Garg, A., Kazunari, K., & Pulles, T. (2006). Directrices del IPCC de 2006 para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero. Introducción: capítulo 1 (pp 1-30). India.

K.R. Smith. (2006). Health impacts of household fueelwood use in developing countries. Unasylva 224, 57, 41-44.

Our World in Data. (2017). Global direct primary energy consumption. 10/08/2020, de Global Change Data Lab Sitio web: https://ourworldindata.org/grapher/global-primary-energy?time=2000..latest

GIZ HERA. (2011). Facts on cooking energy. 19/10/2020, de Energypedia Sitio web: https://energypedia.info/wiki/Facts_on_Cooking_Energy

Ministerios para la transición ecológica y el reto demográfico. (-). Partículas en suspensión., de Gobierno de España Sitio web: https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/atmosfera-y-calidad-del-aire/emisiones/prob-amb/particulas.aspx#:~:text=La%20contaminaci%C3%B3n%20atmosf%C3%A9rica%20por%20material,del%20hombre%20(causas%20antropog%C3%A9nicas).

ENVIRA IOT. (2019). ¿Qué son las partículas PM10 y PM2.5?. 10/06/2019, de ENVIRA Sitio web: https://enviraiot.es/que-son-particulas-contaminantes-pm/

Dirección General de Observatorio Ambiental. (2017). Resultados de Monitoreo de Material Particulado, PM2.5, en el AMSS. El Salvador.

Worl Health Organization. (2005). OMS guías de calidad del aire actualización mundial 2005. Washington.

WHO. (2021). Contaminación del aire doméstico y salud. 2022, de OMS Sitio web: https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/household-air-pollution-and-health

Portal de transparencia. Ministerio de medio ambiente. Marco legal y formativo., de gobierno de El Salvador Sitio web: https://marn.gob.sv/marco-institucional/

Repositorio institucional. (2002). les forestal. 27/06/2018, de Gobierno de El Salvador Sitio web: http://rcc.marn.gob.sv/handle/123456789/289?show=full

Francisco Chávez y Lidia Salamanca. (-). Gestión ambiental pública: historia, estado y desafíos. ECA Estudios Centroamericanos, 62, 263-280.

Y. A. Cengel & M. A. Boles. (2011). Termodinámica. New York, U.S.A: Mc Graw Hill.

D. J. Zube. (2010). Heat transfer efficiency of biomass cookstoves. Tesis para grado de maestría en ciencias. Universidad de Colorado, U.S.A.

Schallenberg, J.. (2008). Energías renovables y eficiencia energética. -: Instituto Tecnológico de Canarias, S.A.

MARN. (2017). Modelos de simulación y escenarios climáticos para El Salvador. San Salvador.

Clean Cooking Alliance. (-). Protocols Overview. -, de CCA Sitio web: https://cleancooking.org/research-evidence-learning/standards-testing/protocols/

ANEXOS

Anexo A. Procedimiento de construcción de cocina tradicional

Se fabricó cocina tradicional siguiendo procedimiento propio de la región, además tomando en cuenta lo que se mencionó en el capítulo uno: las recomendaciones para que estas cocinas hagan uso más eficiente de la energía. La cocina fabricada es tipo u, con una cámara de combustión de 30x30x15 cm. Se optaron por estas dimensiones para que la influencia del viento no fuese tan alta y para que el fondo de la olla esté en mayor contacto con el fuego.

Los materiales a usar para la fabricación de este tipo de cocina tradicional local son los siguientes:

- ✓ 4 ladrillos rojo (dimensiones: 27x13.5x7 cm)

Figura A. 1. Ladrillo rojo, con sección de 27x13.5x7 cm.

- ✓ Tierra blanca, como material refractante
- ✓ Heno, como material aglutinante
- ✓ Agua
- ✓ 7 Varillas de hierro de 3/8”x35cm

Y el paso a paso para su construcción es el siguiente:

1. Recolección de aproximadamente 10kg de tierra blanca y una cantidad considerable de heno.

Figura A. 2. Proceso de recolección de tierra blanca.

2. Mezclar la tierra con agua y adicionar heno, de tal manera que al contacto tenga una consistencia manejable y que sea capaz de fijar los ladrillos.

Figura A. 3. Preparación de la mezcla para fabricación de cocina tradicional.

3. Colocar una base de la mezcla formando una u y posicionar tres ladrillos. Para las esquinas, cortar partes más pequeñas de ladrillo y colocarlos de tal manera que se cierre la u.

Figura A. 4. Colocación de mezcla y ladrillos durante el proceso de fabricación de cocina tradicional.

4. Forrar de mezcla los ladrillos, ir alisando las paredes e ir dando la forma final de u.
5. Con una esponja húmeda se puede dar el acabado final.
6. Colocar las varillas de hierro a travesadas sobre las paredes de la cocina.
7. Dejar secar la cocina por aproximadamente una semana.

Figura A. 5. Cocina tradicional fabricada con prácticas locales.

Anexo B. Datos tomados para pruebas en cocina tradicional

	Inicio frío		Inicio caliente		Hervir a fuego lento	
	Inicio	Fin	Inicio	Fin	Inicio	Fin
Hora (h:min)	10:37	10:59	11:12	11:32	11:39	12:24
Peso del combustible (g)	2504	1577	2515	1601	4100	3492
Temperatura del agua, olla 1 (°C)	31	99.1	31	99.5	92.5	96.5
Peso de la olla 1 con agua (g)	2952	2358	2955	2374	2374	1573
Material de ignición: ocote (g)	100		100			

Figura A. 6. Datos para las tres fases de la prueba A1 en cocina tradicional.

	Inicio frío		Inicio caliente		Hervir a fuego lento	
	Inicio	Fin	Inicio	Fin	Inicio	Fin
Hora (h:min)	09:05	09:33	09:50	10:17	10:23	11:08
Peso del combustible (g)	2502	1592	2507	1589	4101	3504
Temperatura del agua, olla 1 (°C)	30	99.7	30	99.5	93.6	95.7
Peso de la olla 1 con agua (g)	2952	2350	2954	2389	2389	1596
Material de ignición: ocote (g)	100		100			

Figura A. 7. Datos para las tres fases de la prueba A2 en cocina tradicional.

	Inicio frío		Inicio caliente		Hervir a fuego lento	
	Inicio	Fin	Inicio	Fin	Inicio	Fin
Hora (h:min)	09:25	10:04	10:23	10:57	11:04	11:49
Peso del combustible (g)	2515	1412	2503	1415	3920	3314
Temperatura del agua, olla 1 (°C)	29	99	29	99.3	93.6	96
Peso de la olla 1 con agua (g)	2952	2456	2951	2469	2469	1682
Material de ignición: ocote (g)	100		100			

Figura A. 8. Datos para las tres fases de la prueba A3 en cocina tradicional.

Anexo C. Datos tomados para pruebas en cocina mejorada tipo rocket.

	Inicio frío		Inicio caliente		Hervir a fuego lento	
	Inicio	Fin	Inicio	Fin	Inicio	Fin
Hora	10:35	11:12	11:25	11:58		
Peso del combustible	2006	1273	2012	1356		
Temperatura del agua, olla 1	30.2	99.5	29	99.5		
Temperatura del agua, olla 2						
Temperatura del agua, olla 3						
Temperatura del agua, olla 4						
Peso de la olla 1 con agua	2955	2402	2955	2417		
Peso de la olla 2 con agua						
Peso de la olla 3 con agua						
Peso de la olla 4 con agua						

Figura A. 9. Datos para las tres fases de la prueba B1 en cocina mejorada.

	Inicio frío		Inicio caliente		Hervir a fuego lento	
	Inicio	Fin	Inicio	Fin	Inicio	Fin
Hora	13:20	13:56	14:10	14:42	14:50	15:35
Peso del combustible	2012	1305	2003	1372	1372	709
Temperatura del agua, olla 1	30	99.7	31	99.5	94.5	95
Temperatura del agua, olla 2						
Temperatura del agua, olla 3						
Temperatura del agua, olla 4						
Peso de la olla 1 con agua	2954	2408	2954	2429	2429	1620
Peso de la olla 2 con agua						
Peso de la olla 3 con agua						
Peso de la olla 4 con agua						

Figura A. 10. Datos para las tres fases de la prueba B2 en cocina mejorada.

	Inicio frío		Inicio caliente		Hervir a fuego lento	
	Inicio	Fin	Inicio	Fin	Inicio	Fin
Hora	11:45	12:04	12:11	12:32	12:37	13:22
Peso del combustible	2011	1596	2000	1581	1581	931
Temperatura del agua, olla 1	31.1	99.6	31	99.7	94	96
Temperatura del agua, olla 2						
Temperatura del agua, olla 3						
Temperatura del agua, olla 4						
Peso de la olla 1 con agua	2954	2498	2953	2426	2426	1637
Peso de la olla 2 con agua						
Peso de la olla 3 con agua						
Peso de la olla 4 con agua						

Figura A. 11. Datos para las tres fases de la prueba B3 en cocina mejorada.

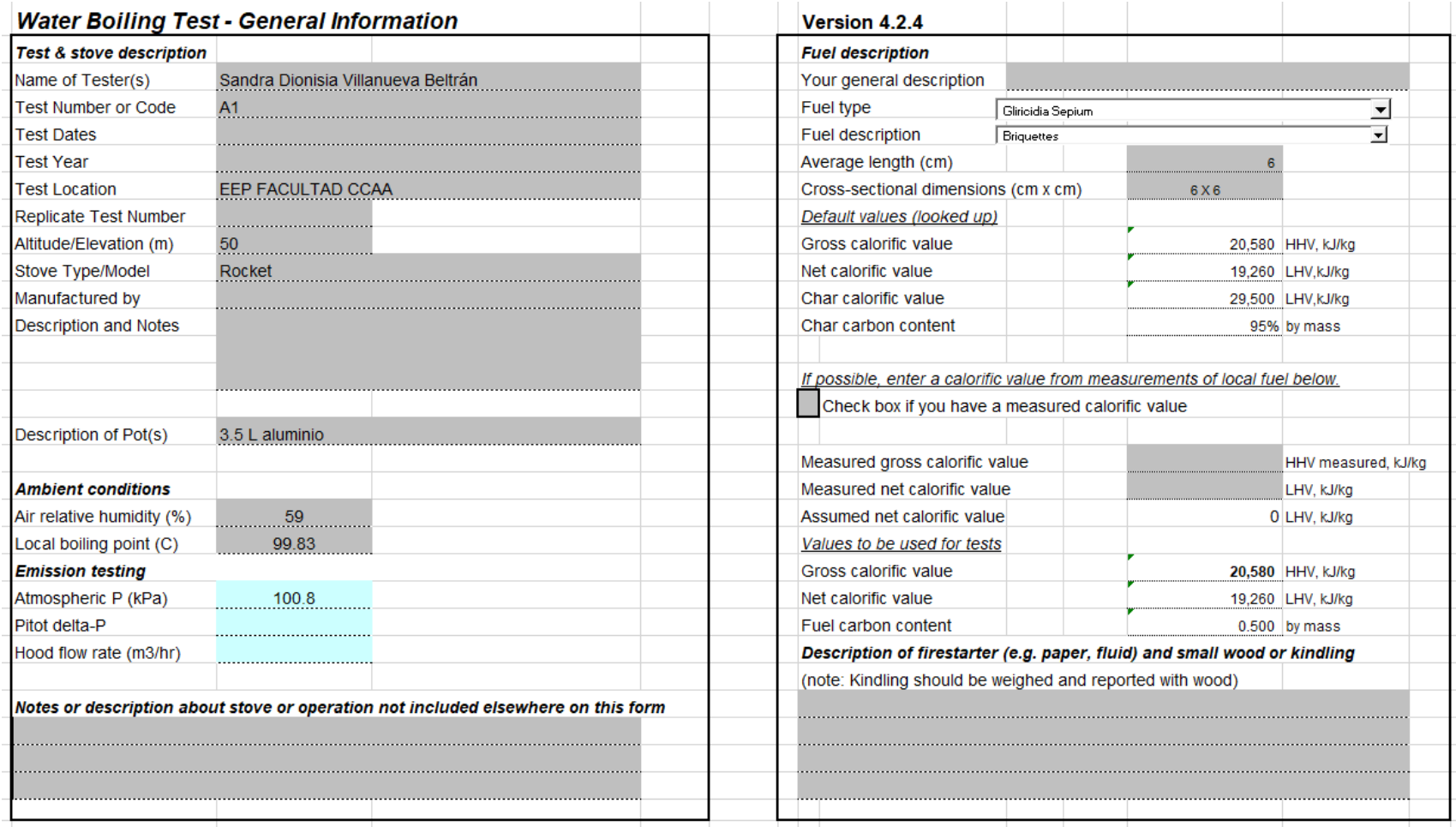
	Inicio frío		Inicio caliente		Hervir a fuego lento	
	Inicio	Fin	Inicio	Fin	Inicio	Fin
Hora	10:12	10:37	10:45	11:07	11:17	12:02
Peso del combustible	2002	1577	2015	1580	1580	921
Temperatura del agua, olla 1	28	99.1	29	99.5	94.5	96
Temperatura del agua, olla 2						
Temperatura del agua, olla 3						
Temperatura del agua, olla 4						
Peso de la olla 1 con agua	2952	2492	2955	2374	2374	1573
Peso de la olla 2 con agua						
Peso de la olla 3 con agua						
Peso de la olla 4 con agua						

Figura A. 12. Datos para las tres fases de la prueba B4 en cocina mejorada.

	Inicio frío		Inicio caliente		Hervir a fuego lento	
	Inicio	Fin	Inicio	Fin	Inicio	Fin
Hora	09:50	10:18	10:26	12:52	11:00	11:45
Peso del combustible	1995	1569	2008	1584	1584	909
Temperatura del agua, olla 1	31	99	31	99.5	93	95
Temperatura del agua, olla 2						
Temperatura del agua, olla 3						
Temperatura del agua, olla 4						
Peso de la olla 1 con agua	2955	2484	2954	2498	2498	1678
Peso de la olla 2 con agua						
Peso de la olla 3 con agua						
Peso de la olla 4 con agua						

Figura A. 13. Datos para las tres fases de la prueba B5 en cocina mejorada.

Anexo D. Hoja de cálculo WBT versión 4.2.4



Water Boiling Test - General Information

Test & stove description	
Name of Tester(s)	Sandra Dionisia Villanueva Beltrán
Test Number or Code	A1
Test Dates	
Test Year	
Test Location	EEP FACULTAD CCAA
Replicate Test Number	
Altitude/Elevation (m)	50
Stove Type/Model	Rocket
Manufactured by	
Description and Notes	
Description of Pot(s)	3.5 L aluminio
Ambient conditions	
Air relative humidity (%)	59
Local boiling point (C)	99.83
Emission testing	
Atmospheric P (kPa)	100.8
Pitot delta-P	
Hood flow rate (m3/hr)	

Notes or description about stove or operation not included elsewhere on this form

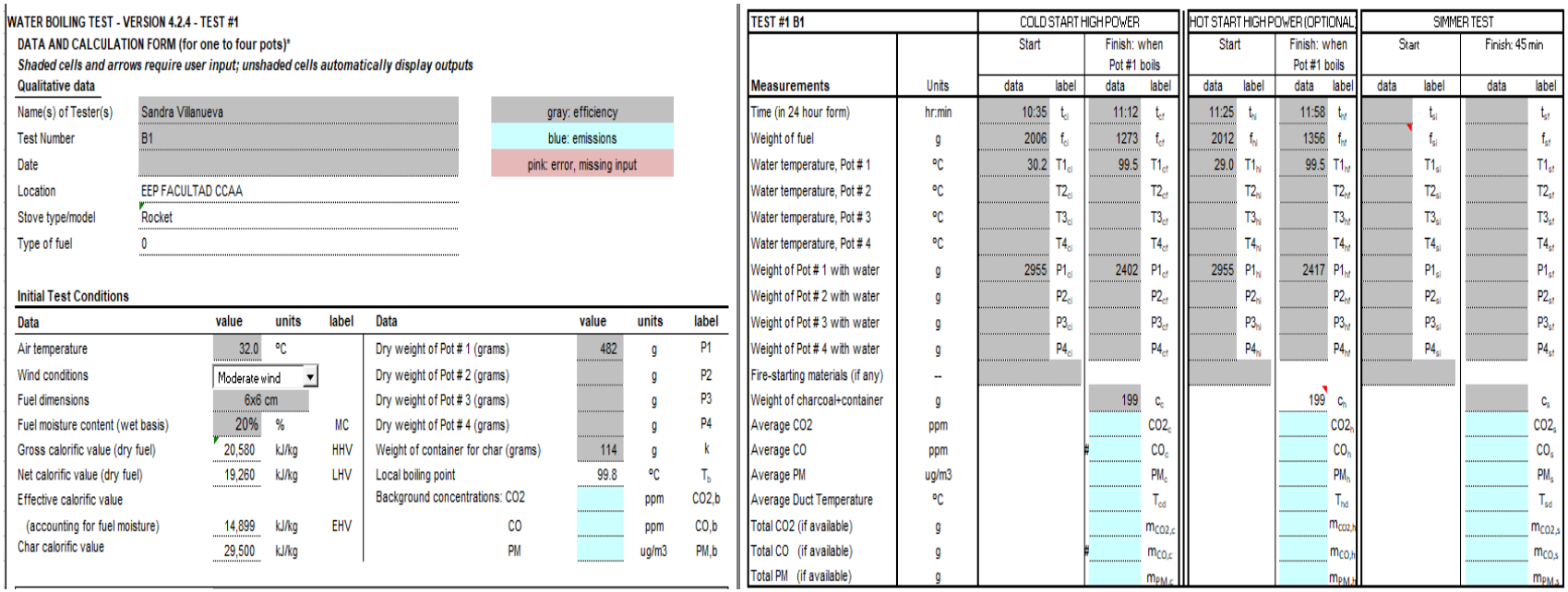
Version 4.2.4

Fuel description		
Your general description		
Fuel type	Gliricidia Sepium	
Fuel description	Briquettes	
Average length (cm)	6	
Cross-sectional dimensions (cm x cm)	6 X 6	
Default values (looked up)		
Gross calorific value	20,580	HHV, kJ/kg
Net calorific value	19,260	LHV,kJ/kg
Char calorific value	29,500	LHV,kJ/kg
Char carbon content	95%	by mass
If possible, enter a calorific value from measurements of local fuel below.		
Check box if you have a measured calorific value		
Measured gross calorific value		HHV measured, kJ/kg
Measured net calorific value		LHV, kJ/kg
Assumed net calorific value	0	LHV, kJ/kg
Values to be used for tests		
Gross calorific value	**20,580**	HHV, kJ/kg
Net calorific value	19,260	LHV, kJ/kg
Fuel carbon content	0.500	by mass

Description of firestarter (e.g. paper, fluid) and small wood or kindling

(note: Kindling should be weighed and reported with wood)

Figura A. 12. Hoja de cálculo de WBT versión 4.2.4. para información general. [Captura de pantalla].



WATER BOILING TEST - VERSION 4.2.4 - TEST #1

DATA AND CALCULATION FORM (for one to four pots)*

Shaded cells and arrows require user input; unshaded cells automatically display outputs

Qualitative data

Name(s) of Tester(s)	Sandra Villanueva	gray: efficiency
Test Number	B1	blue: emissions
Date		pink: error, missing input
Location	EEP FACULTAD CCAA	
Stove type/model	Rocket	
Type of fuel	0	

Initial Test Conditions

Data	value	units	label	Data	value	units	label
Air temperature	32.0	°C		Dry weight of Pot # 1 (grams)	482	g	P1
Wind conditions	Moderate wind			Dry weight of Pot # 2 (grams)		g	P2
Fuel dimensions	6x6 cm			Dry weight of Pot # 3 (grams)		g	P3
Fuel moisture content (wet basis)	20%	%	MC	Dry weight of Pot # 4 (grams)		g	P4
Gross calorific value (dry fuel)	20,580	kJ/kg	HHV	Weight of container for char (grams)	114	g	k
Net calorific value (dry fuel)	19,260	kJ/kg	LHV	Local boiling point	99.8	°C	T_b
Effective calorific value				Background concentrations: CO2		ppm	CO2,b
(accounting for fuel moisture)	14,899	kJ/kg	EHV	CO		ppm	CO,b
Char calorific value	29,500	kJ/kg		PM		ug/m3	PM,b

TEST #1 B1		COLD START HIGH POWER				HOT START HIGH POWER (OPTIONAL				SIMMER TEST			
		Start		Finish: when Pot #1 boils		Start		Finish: when Pot #1 boils		Start		Finish: 45 min	
Measurements	Units	data	label	data	label	data	label	data	label	data	label	data	label
Time (in 24 hour form)	hr:min	10:35	t_{ci}	11:12	t_{cf}	11:25	t_{hi}	11:58	t_{hf}		t_{si}		t_{sf}
Weight of fuel	g	2006	f_{ci}	1273	f_{cf}	2012	f_{hi}	1356	f_{hf}		f_{si}		f_{sf}
Water temperature, Pot # 1	°C	30.2	$T1_{ci}$	99.5	$T1_{cf}$	29.0	$T1_{hi}$	99.5	$T1_{hf}$		$T1_{si}$		$T1_{sf}$
Water temperature, Pot # 2	°C		$T2_{ci}$		$T2_{cf}$		$T2_{hi}$		$T2_{hf}$		$T2_{si}$		$T2_{sf}$
Water temperature, Pot # 3	°C		$T3_{ci}$		$T3_{cf}$		$T3_{hi}$		$T3_{hf}$		$T3_{si}$		$T3_{sf}$
Water temperature, Pot # 4	°C		$T4_{ci}$		$T4_{cf}$		$T4_{hi}$		$T4_{hf}$		$T4_{si}$		$T4_{sf}$
Weight of Pot # 1 with water	g	2955	$P1_{ci}$	2402	$P1_{cf}$	2955	$P1_{hi}$	2417	$P1_{hf}$		$P1_{si}$		$P1_{sf}$
Weight of Pot # 2 with water	g		$P2_{ci}$		$P2_{cf}$		$P2_{hi}$		$P2_{hf}$		$P2_{si}$		$P2_{sf}$
Weight of Pot # 3 with water	g		$P3_{ci}$		$P3_{cf}$		$P3_{hi}$		$P3_{hf}$		$P3_{si}$		$P3_{sf}$
Weight of Pot # 4 with water	g		$P4_{ci}$		$P4_{cf}$		$P4_{hi}$		$P4_{hf}$		$P4_{si}$		$P4_{sf}$
Fire-starting materials (if any)	--												
Weight of charcoal+container	g			199	c_c			199	c_h				c_s
Average CO2	ppm				$CO2_c$				$CO2_h$				$CO2_s$
Average CO	ppm			#	CO_c				CO_h				CO_s
Average PM	ug/m3				PM_c				PM_h				PM_s
Average Duct Temperature	°C				T_{cd}				T_{hd}				T_{sd}
Total CO2 (if available)	g				$m_{CO2,c}$				$m_{CO2,h}$				$m_{CO2,s}$
Total CO (if available)	g			#	$m_{CO,c}$				$m_{CO,h}$				$m_{CO,s}$
Total PM (if available)	g				$m_{PM,c}$				$m_{PM,h}$				$m_{PM,s}$

Figura A. 13. Hoja de cálculo de WBT versión 4.2.4. [Captura de pantalla]

WATER BOILING TEST - VERSION 4.2.4	**TEST #**	**A1**
All cells are linked to data worksheets, no entries are required		
Stove type/model	Rocket	
Location	EEP FACULTAD CCAA	
Fuel description	Gliricidia Sepium	
Wind conditions	Moderate wind; Moderate wind; Moderate wind	
Ambient temperature	32ºC	

1. HIGH POWER TEST (COLD START)	units	Test 1	Test 2	Test 3	Test 4	Test 5	Average	St Dev	COV
Time to boil Pot # 1	min	37	36	19	25	28	29	7.6	26.1%
Temp-corrected time to boil Pot # 1	min	40	39	21	26	31	31	8.2	26.2%
Burning rate	g/min	11.81	11.75	13.27	11.25	8.65	11.35	1.7	14.8%
Thermal efficiency	%	23%	24%	36%	33%	38%	31%	7%	21.8%
Specific fuel consumption	g/liter	228.62	219.97	125.50	141.39	122.48	167.59	52.3	31.2%
Temp-corrected specific consumption	g/liter	246.25	236.26	136.95	147.63	133.46	180.11	56.2	31.2%
Temp-corrected specific energy cons.	kJ/liter	4,742.78	4,550.36	2,637.63	2,843.34	2,570.49	3468.92	1,081.9	31.2%
Firepower	watts	3,790.12	3,770.68	4,260.19	3,611.95	2,777.27	3,642.04	540.7	14.8%

2. HIGH POWER TEST (HOT START)	units	Test 1	Test 2	Test 3	Test 4	Test 5	Average	St Dev	COV
Time to boil Pot # 1	min	33	32	21	22	26	26.8	5.5	20.67%
Temp-corrected time to boil Pot # 1	min	35	35	23	23	28	29	5.9	20.50%
Burning rate	g/min	11.43	11.38	12.16	13.14	9.26	11.47	1.4	12.45%
Thermal efficiency	%	27%	27%	39%	37%	38%	33%	6%	17.76%
Specific fuel consumption	g/liter	195.90	187.90	131.55	153.48	119.97	157.76	33.5	21.25%
Temp-corrected specific consumption	g/liter	207.43	204.74	143.35	162.52	130.73	169.75	35.1	20.65%
Temp-corrected specific energy cons.	kJ/liter	3,995.15	3,943.34	2,760.83	3,130.16	2,517.82	3269.46	675.2	20.65%
Firepower	watts	3,670.09	3,652.23	3,901.76	4,217.36	2,971.81	3682.65	458.3	12.45%

3. LOW POWER (SIMMER)	units	Test 1	Test 2	Test 3	Test 4	Test 5	Average	St Dev	COV
Burning rate	g/min		10.5	9.2	9.4	10.8	9.96	0.79	7.94%
Thermal efficiency	%		20.10%	22.52%	22.44%	20.03%	21.27%	1%	6.56%
Specific fuel consumption	g/liter		415.71	358.50	385.86	404.60	391.17	25.02	6.40%
Temp-corrected specific energy cons.	kJ/liter		8,006.66	6,904.73	7,431.69	7,792.54	7533.90	481.90	6.40%
Firepower	watts		3,374.66	2,953.69	3,002.95	3,451.81	3195.78	253.86	7.94%
Turn down ratio	--		1.12	1.44	1.20	0.80	1.14	0.26	23.08%

BENCHMARK VALUES (for 5L)		Test 1	Test 2	Test 3	Test 4	Test 5	Average	St Dev	COV
Fuel Use Benchmark Value	g		3,181	2,493	2,705	2,683	2766	292.8	10.59%
Energy Use Benchmark Value	kJ		61,268	48,020	52,092	51,683	53266	5,640.0	10.59%

IWA PERFORMANCE METRICS	units	Test 1	Test 2	Test 3	Test 4	Test 5	Average	St Dev	COV
High Power Thermal Efficiency	%	25.1%	25.5%	37.2%	34.7%	37.7%	0.292807759	5.68%	19.38%
Low Power Specific Fuel Consumption	MJ/(min-L)		0.178	0.153	0.165	0.173	0.166	0.01	6.46%

Figura A. 14. Hoja de cálculo de WBT versión 4.2.4. para consolidación de resultados.

[Captura de pantalla]