



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Química

**EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA DE UNA ESTUFA AHORRADORA DE
CÁMARA ABIERTA A TRAVÉS DEL PROTOCOLO PRUEBA DE EBULLICIÓN DE AGUA
(WBT) VARIANDO EL CONTENIDO DE HUMEDAD DE LA LEÑA UTILIZADA (*Quercus
subspathulata*)**

Bernardo Yuri Osorio Ceballos

Asesorado por el Ing. Mauricio Valentino Rivera Tello

Guatemala, enero de 2019

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA DE UNA ESTUFA AHORRADORA DE
CÁMARA ABIERTA A TRAVÉS DEL PROTOCOLO PRUEBA DE EBULLICIÓN DE AGUA
(WBT) VARIANDO EL CONTENIDO DE HUMEDAD DE LA LEÑA UTILIZADA (*Quercus
subspathulata*)**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

BERNARDO YURI OSORIO CEBALLOS

ASESORADO POR EL ING. MAURICIO VALENTINO RIVERA TELLO

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO QUÍMICO

GUATEMALA, ENERO DE 2019

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL I	Ing. José Francisco Gómez Rivera
VOCAL II	Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Luis Diego Aguilar Ralón
VOCAL V	Br. Christian Daniel Estrada Santizo
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
EXAMINADOR	Ing. Julio David Vargas García
EXAMINADORA	Inga. Cinthya Patricia Ortiz de Pérez
EXAMINADORA	Inga. Adela María Marroquín González
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA DE UNA ESTUFA AHORRADORA DE CÁMARA ABIERTA A TRAVÉS DEL PROTOCOLO PRUEBA DE EBULLICIÓN DE AGUA (WBT) VARIANDO EL CONTENIDO DE HUMEDAD DE LA LEÑA UTILIZADA
(Quercus subspathulata)

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Química, con fecha 21 de mayo de 2018.



Bernardo Yuri Osorio Ceballos



USAC
TRICENTENARIA
Universidad de San Carlos de Guatemala

Guatemala, Septiembre de 2018

Ingeniero
Carlos Salvador Wong Davi
Director Escuela de Ingeniería Química
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos de Guatemala
Presente

Estimado Ingeniero Wong:

Por medio de la presente HAGO CONSTAR que he revisado y dado mi aprobación al Informe final del Trabajo de Graduación "EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA DE UNA ESTUFA AHORRADORA DE CÁMARA ABIERTA A TRAVÉS DEL PROTOCOLO PRUEBA DE EBULLICIÓN DE AGUA (WBT) VARIANDO EL CONTENIDO DE HUMEDAD DE LA LEÑA UTILIZADA (*Quercus subspatulata*)."

del estudiante de Ingeniería Química Bernardo Yuri Osorio Ceballos quien se identifica con el carné número 2436 14950 0115 y Registro Académico 2013-14581.

Sin otro particular me suscribo de usted.

Atentamente,



Mauricio Valentino
Rivera Tello
INGENIERO QUIMICO
Colegiado. No. 2089

Ing. Qco. Mauricio Valentino Rivera Tello.
Asesor



Guatemala, 08 de octubre de 2018.
Ref. EIQ.TG-IF.045.2018.

Ingeniero
Carlos Salvador Wong Davi
DIRECTOR
Escuela de Ingeniería Química
Facultad de Ingeniería

Estimado Ingeniero Wong:

Como consta en el registro de evaluación del informe final EIQ-PRO-REG-007 correlativo **006-2018** le informo que reunidos los Miembros de la Terna nombrada por la Escuela de Ingeniería Química, se practicó la revisión del:

INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADUACIÓN
-Modalidad Seminario de Investigación-

Solicitado por el estudiante universitario: **Bernardo Yuri Osorio Ceballos**.
Identificado con el CUI: **2436 14950 0115**.
Identificado con registro académico: **2013-14581**.
Previo a optar al título de **INGENIERO QUÍMICO**.

Siguiendo los procedimientos de revisión interna de la Escuela de Ingeniería Química, los Miembros de la Terna han procedido a **APROBARLO** con el siguiente título:

EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA DE UNA ESTUFA AHORRADORA DE CÁMARA ABIERTA A TRAVÉS DEL PROTOCOLO PRUEBA DE EBULLICIÓN DE AGUA (WBT) VARIANDO EL CONTENIDO DE HUMEDAD DE LA LEÑA UTILIZADA (*Quercus subspathulata*).

El Trabajo de Graduación ha sido asesorado por el Ingeniero Químico: **Mauricio Valentino Rivera Tello**.

Habiendo encontrado el referido informe final del trabajo de graduación **SATISFACTORIO**, se autoriza al estudiante, proceder con los trámites requeridos de acuerdo a las normas y procedimientos establecidos por la Facultad para su autorización e impresión.

"ID Y ENSEÑAD A TODOS"


Ing. Otto Raúl De León De Paz
COORDINADOR DE TERNA
Tribunal de Revisión
Trabajo de Graduación



C.c.: archivo



Agencia Centroamericana de Acreditación de
Programas de Arquitectura y de Ingeniería





Ref.EIQ.TG.007.2019

El Director de la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor y de los Miembros del Tribunal nombrado por la Escuela de Ingeniería Química para revisar el Informe del Trabajo de Graduación del estudiante, **BERNARDO YURI OSORIO CEBALLOS** titulado: **"EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA DE UNA ESTUFA AHORRADORA DE CÁMARA ABIERTA A TRÁVES DEL PROTOCOLO PRUEBA DE EBULLICIÓN DE AGUA (WBT) VARIANDO EL CONTENIDO DE HUMEDAD DE LA LEÑA UTILIZADA (*Quercus subspatulata*)"**.
Procede a la autorización del mismo, ya que reúne el rigor, la secuencia, la pertinencia y la coherencia metodológica requerida.

"Id y Enseñad a Todos"

Ing. Carlos Salvador Wong Davi
Director
Escuela de Ingeniería Química

Guatemala, enero 2019

FACULTAD DE INGENIERIA USAC
ESCUELA DE INGENIERIA QUIMICA
DIRECTOR

Cc: Archivo
CSWD/ale



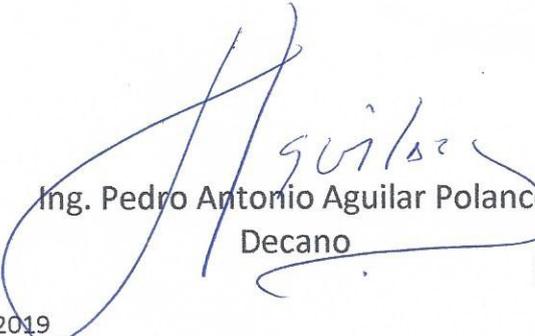
Agencia Centroamericana de Acreditación
Institucional de Ingeniería y Ciencias





El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Química, al Trabajo de Graduación titulado: **EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA DE UNA ESTUFA AHORRADORA DE CÁMARA ABIERTA A TRAVÉS DEL PROTOCOLO PRUEBA DE EBULLICIÓN DE AGUA (WBT) VARIANDO EL CONTENIDO DE HUMEDAD DE LA LEÑA UTILIZADA (*Quercus subspathulata*)**, presentado el estudiante universitario: **Bernardo Yuri Osorio Ceballos**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:


Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
Decano

Guatemala, enero de 2019



/gdech

ACTO QUE DEDICO A:

Mis padres

Bernardo de Jesús Osorio Ramírez y Maritza Ceballos Velásquez de Osorio, por brindarme todo en la vida y ser los mejores ejemplos de responsabilidad, disciplina y bondad. Por darme su amor y apoyo incondicional ya que sin ellos no estaría aquí. Por ser quienes me enseñaron a vivir.

Mis hermanos

Jim, Rosy y Dayan Osorio, por ser los mejores amigos de vida, y brindarme risas, enojos, sustos y todas las emociones que han dado a mi vida desde pequeños. Por brindarme apoyo y ser unidos en las situaciones que nos ha tocado vivir.

Mi familia

Primos, primas, tíos, tías, abuelos, abuelas, los que están en el País, y los que están en el extranjero; pues todos me han enseñado que la familia, por más lejos que se encuentre, siempre estará para apoyarte.

Mi novia

Diana Lizama, porque me ha brindado su apoyo y su amor durante este tiempo juntos. Por ser mi mejor amiga y confidente en la vida.

Mis amigos

Los de la U, los del colegio y los que he conocido a lo largo de la vida, por estar allí en las etapas de mi vida, apoyando y molestando pero siempre presentes. Por darme los mejores recuerdos.

AGRADECIMIENTOS A:

**Universidad de San
Carlos de Guatemala**

Por ser mi casa de estudio, y brindarme las enseñanzas necesarias para convertirme en profesional; por darme las herramientas y facilidades de adquirir conocimientos y lograr ser un profesional que aporte y sea factor de cambio de la sociedad guatemalteca.

Facultad de Ingeniería

Por ser la Facultad que me ayudó a desarrollar un pensamiento crítico mediante la ciencia y sus aplicaciones, con el cual pueda ser un profesional cuyas decisiones favorezcan el desarrollo del país.

**Asesor Ing. Mauricio
Valentino Rivera Tello**

Por brindar su conocimiento y su experiencia.
Por su amabilidad y paciencia para la resolución de dudas en la realización de este trabajo.

**Laboratorio de
Prefabricados, Sección
de Tecnología de la
Madera, Centro de
Investigaciones de
Ingeniería (CII).**

Por brindarme sus instalaciones y apoyo para realizar la parte experimental de este trabajo de investigación.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	V
LISTA DE SÍMBOLOS	VII
GLOSARIO	IX
RESUMEN.....	XI
OBJETIVOS.....	XIII
HIPÓTESIS.....	XV
INTRODUCCIÓN	XVII
1. MARCO CONCEPTUAL	1
1.1. Antecedentes	1
1.2. Justificación.....	4
1.3. Determinación del problema	6
1.3.1. Definición	6
1.3.2. Delimitación.....	7
2. MARCO TEÓRICO	9
2.1. Fenómenos de transferencia de calor	9
2.1.1. Transferencias de calor por conducción.....	9
2.1.2. Transferencia de calor por convección.....	10
2.1.3. Transferencia de calor por radiación	11
2.2. Temperatura.....	12
2.3. Calor sensible y latente	13
2.3.1. Capacidad calorífica.....	15
2.4. Combustión	15
2.4.1. Calor de combustión	16

2.4.2.	Proceso de combustión	18
2.4.3.	Aire teórico y relación aire combustible	19
2.4.4.	Productos de la combustión.....	20
2.5.	Combustión de biomasa	21
2.5.1.	Características químicas.....	21
2.5.2.	Características físicas.....	22
2.5.3.	Proceso de combustión de leña.....	24
2.6.	Estufa ecológica.....	25
2.6.1.	Prueba de ebullición de Agua	27
2.6.2.	Prueba de emisiones	28
2.6.3.	Material particulado.....	29
3.	DISEÑO METODOLÓGICO	31
3.1.	Localización	31
3.2.	Variables.....	31
3.3.	Delimitación del campo de estudio	32
3.4.	Obtención de las muestras	32
3.4.1.	Obtención de materia prima.....	32
3.4.1.1.	Recolección de leña	32
3.5.	Diseño de tratamientos	32
3.6.	Recursos humanos	33
3.7.	Recursos materiales	33
3.7.1.	Materia prima e insumos.....	33
3.7.2.	Equipos.....	33
3.7.3.	Instrumentos de medición.....	33
3.7.4.	Materiales	33
3.8.	Técnicas cuantitativas y cualitativas	34
3.9.	Recolección y ordenamiento de la información.....	34
3.9.1.	Datos generales.....	34

	3.9.1.1.	Información general	35
	3.9.2.	Preparación de cada fase	39
	3.9.2.1.	Medición de las emisiones de CO y PM	41
	3.9.2.2.	Punto de ebullición de agua local	41
	3.9.3.	Hoja de datos originales	41
3.10.		Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información.....	43
	3.10.1.	Tabulación y ordenamiento	43
	3.10.2.	Procesamiento de la información	43
3.11.		Análisis estadístico.....	44
	3.11.1.	Media muestral.....	45
	3.11.2.	Varianza	45
	3.11.3.	Desviación estándar.....	46
	3.11.4.	Coefficiente de variación de Pearson.....	46
3.12.		Plan de análisis de los resultados	46
	3.12.1.	Programas a utilizar para el análisis de datos	47
4.		RESULTADOS.....	49
5.		INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS	59
		CONCLUSIONES	65
		RECOMENDACIONES.....	67
		BIBLIOGRAFÍA.....	69
		APÉNDICES.....	71

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Estufa ahorradora de cámara abierta	7
2.	Sustancias presentes en los humos de combustión.....	21
3.	Estufa ahorradora de leña	26
4.	Proceso involucrados en una estufa ecológica	27
5.	Distribución de partículas suspendidas en el aire.	30
6.	Toma de datos de información general	36
7.	Información general (descripción del combustible)	37
8.	Datos de operación durante el proceso.....	38
9.	Hoja de toma de datos	42
10.	Hoja de toma de datos para las tres fases	42
11.	Eficiencia vs humedad de leña en fase de inicio en frío.....	49
12.	Eficiencia vs humedad de leña en fase de inicio en caliente.....	50
13.	Eficiencia vs humedad de leña en fase de fuego lento.	50
14.	Tasa de combustión vs humedad de leña en fase de inicio en frío.	51
15.	Tasa de combustión vs humedad de leña en fase de inicio en caliente.....	52
16.	Tasa de combustión vs humedad de leña en fase de fuego lento.....	52
17.	Agua evaporada vs humedad de leña en fase de inicio en frío.....	53
18.	Agua evaporada vs humedad de leña en fase de inicio en caliente.....	54
19.	Agua evaporada vs humedad de leña en fase de fuego lento.....	54
20.	Emisiones de co vs humedad de leña en fase de inicio en frío.....	55
21.	Emisiones de material particulado vs humedad de leña en fase de inicio en frío... ..	56

22.	Emisiones de co vs humedad de leña en fase de inicio en caliente	56
23.	Emisiones de material particulado vs humedad de leña en fase de inicio en caliente.	57
24.	Emisiones de co vs humedad de leña en fase de fuego lento	57
25.	Emisiones de material particulado vs humedad de leña en fase fuego lento.....	58

TABLAS

I.	Calores específicos de combustión.....	17
II.	Reacciones para la combustión de leña.....	24
III.	Descripción de parámetros dependientes e independientes.....	31
IV.	Eficiencia energética	43
V.	Emisiones y material particulado.....	44
VI.	Datos para el análisis de varianza	44

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
H₂O	Agua
CO₂	Dióxido de carbono
°C	Grados Celsius
g	Gramo
kg	Kilogramo
kJ	Kilojule
PM	Materia particulado
m³	Metro cúbico
µg	Microgramo
CO	Monóxido de carbono
%H	Porcentaje de Humedad
T_{eb}	Temperatura de ebullición
t	tiempo
W	Watts

GLOSARIO

Biomasa	Grupo de productos energéticos y materia primas de tipo renovable que se originan a partir de materia orgánica formada por vía biológica.
Buitrón	Tubo a través del cual circula el aire para generar la combustión.
Carbón	Tipo de roca, fuente de energía, formada por la sustancia química carbono mezclado con otras sustancias.
CCT	Prueba de cocinado controlado (<i>Controlled Cooked Test</i>).
Ceniza	Polvo de color gris claro que queda después de una combustión completa, formado generalmente por sales alcalinas y térreas, sílice y óxidos.
Combustión	Proceso químico de oxidación rápida que va acompañado de desprendimiento de energía bajo en formar de luz y calor.
Concentración de fondo	Concentración de un contaminante en aire debido al aporte de otras fuentes distintas a las analizadas.

Creosota	Residuo altamente inflamable, es el residuo de la leña mojada que se acumula y es muy inflamable.
Eficiencia Térmica	Medida de la fracción de calor producido por el combustible que llegó directamente al agua en la olla.
Emisiones Intradomiciliarias	Toda emisión de sustancia y/o compuestos dentro de casas, colegios y oficinas que puedan afectar la salud de quienes habitan en ellas.
Hollín	Partículas sólidas de tamaño pequeño, de color negro.
IWA	<i>International Workshop Agreements</i> (Acuerdo de Estufa Internacional)
Pirolisis	Descomposición química de materia orgánica y de todo tipo de materiales, excepto vidrios y metales, causada por el calentamiento en ausencia de aire.
Potencia	Energía desarrollada por unidad de tiempo. Rapidez con que se realiza un trabajo.
Punto de Ebullición	Temperatura que provoca que la presión del vapor de un líquido, iguale la presión del vapor.
WBT	<i>Water Boiling Test</i> (Prueba de ebullición de agua)

RESUMEN

En el presente trabajo de graduación se analizó el efecto que genera la variación del contenido de humedad en la leña utilizada como combustible en una estufa ahorradora, en la eficiencia y las emisiones de monóxido de carbono y material particulado siguiendo los procedimientos del protocolo de Prueba de Ebullición de agua (WBT4.2.2).

El análisis se realizó en tres fases: arranque en frío, arranque en caliente y hervir a fuego lento, las primeras dos fases son de alta potencia y la tercera es de baja potencia; el procedimiento se hizo al variar el contenido de humedad de la leña en seis valores diferentes para cada una de las tres fases. Se utilizó la cantidad de leña y agua requerida por el protocolo; el procedimiento consiste en ajustar el valor de humedad de la leña que será utilizada en la estufa por medio de la utilización de hornos de secado; posteriormente la leña fue utilizada en las estufas para llevar a punto de ebullición agua en ollas de un volumen establecido, y se controló la temperatura del proceso y el tiempo en el que se llega al punto de ebullición.

La tabulación de datos y análisis de resultados de eficiencia energética se realizó con base en el documento WBT SPREADSHEET 4.2.4 el cual es el documento avalado por La Alianza Global para Estufas Limpias, la Organización Internacional de Normalización (ISO) y el Acuerdo de Taller Internacional (IWA). La tabulación de datos y análisis de resultados de las emisiones de monóxido de carbono y de material particulado se realizó con base en la hoja de Excel *Indoor Air Pollution (IAP) Meter Processing 5.0*; dicho documento es proporcionado por los creadores del aparato IAP.

La realización del experimento se hizo bajo las condiciones operatorias del Área de Prefabricados de la Sección de Tecnología de la Madera del Centro de Investigaciones de Ingeniería (CII), FIUSAC, debido a que dicho laboratorio posee los instrumentos analíticos adecuados para la determinación de los resultados.

OBJETIVOS

Objetivo general

Evaluar la eficiencia energética de una estufa ahorradora de leña de cámara abierta a través del protocolo de prueba de ebullición de agua (WBT) variando el contenido de humedad de la leña utilizada (*Quercus subspathulata*) en 5 %, 10 %, 15 %, 20 %, 25 %, 30 %.

Objetivos específicos

1. Evaluar la eficiencia energética de una estufa ahorradora de leña de cámara abierta en la fase de inicio en frío variando el contenido de humedad de la leña 5 %, 10 %, 15 %, 20 %, 25 %, 30 %.
2. Evaluar la eficiencia energética de una estufa ahorradora de leña de cámara abierta en la fase de inicio en Caliente variando el contenido de humedad de la leña en 5 %, 10 %, 15 %, 20 %, 25 %, 30 %.
3. Evaluar la eficiencia energética de una estufa ahorradora de leña de cámara abierta en la fase de fuego lento variando el contenido de humedad de la leña en 5 %, 10 %, 15 %, 20 %, 25 %, 30 %.
4. Determinar las emisiones de Monóxido de Carbono (CO) y Material Particulado de una estufa ahorradora de leña de cámara abierta variando el contenido de humedad de la leña en 5 %, 10 %, 15 %, 20 %, 25 %, 30 %.

HIPÓTESIS

Hipótesis

Es posible realizar un análisis de eficiencia energética a una estufa ahorradora de leña de cámara abierta, utilizando el protocolo de Prueba de Ebullición de Agua (WBT), realizando la medición de la eficiencia en tres fases distintas de operación al ir variando el contenido de humedad de la leña utilizada en 0 %, 5 %, 10 %, 15 %, 20 %, 25 %, al mismo tiempo que se determina emisiones de CO y material particulado.

Hipótesis estadística

Hipótesis nula

Ho,1: no existen diferencias significativas en la eficiencia energética en arranque en frío, al variar el contenido de humedad.

Ho,1: no existen diferencias significativas en la eficiencia energética en arranque en caliente, al variar el contenido de humedad.

Ho,1: no existen diferencias significativas en la eficiencia energética en arranque a fuego lento, al variar el contenido de humedad.

Ho,1: no existen diferencias significativas entre las emisiones de CO y material particulado, al variar el contenido de humedad.

$$\mu_1 = \mu_2 = \mu_3$$

Hipótesis alternativa

Ho,1: sí existen diferencias significativas en la eficiencia energética en arranque en frío, al variar el contenido de humedad.

Ho,1: sí existen diferencias significativas en la eficiencia energética en arranque en caliente, al variar el contenido de humedad.

Ho,1: sí existen diferencias significativas en la eficiencia energética en arranque a fuego lento, al variar el contenido de humedad.

Ho,1: sí existen diferencias significativas entre las emisiones de CO y material particulado, al variar el contenido de humedad.

$$\mu_1 \neq \mu_2 \neq \mu_3$$

Criterio con base a un análisis ANOVA.

$F < F_c$: Se acepta la hipótesis nula

$F > F_c$: Se rechaza la hipótesis nula

INTRODUCCIÓN

De acuerdo al Instituto Nacional de Bosques, en Guatemala actualmente, el 64 % de la población depende de la leña como fuente de energía, el 67 % de ella se encuentra en el área rural, la gran mayoría de comunidades rurales del interior del país utiliza los fogones de leña como la forma más utilizada para la preparación de los alimentos y como fuente de calefacción, pues no cuentan con la economía ni la tecnología de una estufa tradicional eléctrica para el efecto.

La producción natural (oferta) anual de leña es de 17,96 millones de metros cúbicos mientras que la demanda anual se estima en 27,98 millones de metros cúbicos por lo que en balance se extraen 10,02 millones de metros cúbicos de leña más de lo que crece en el bosque, esto indica que el consumo de leña a nivel nacional no es sostenible. Por tanto, ambientalmente la quema de leña como recurso energético no está siendo sostenible en el país, y se debe considerar de igual manera el impacto que genera en la salud de las personas y el ambiente la liberación de monóxido de carbono y material particulado de la combustión de dicho recurso.

De acuerdo a la estrategia nacional de leña “Existen diferentes maneras de asignar valor a la leña; como generador de riqueza, como generador de empleo y por la sustitución de importaciones, que lamentablemente no se consideran dentro de las cuentas nacionales”¹. La implementación de estufas

¹ Instituto Nacional de Bosques, *Estrategia nacional de producción Sostenible y Uso eficiente de la leña* 2013-2014. Guatemala. p. 43

ahorradoras, o ecológicas ha sido la iniciativa tomada para la mejora de la eficiencia energética en la quema de leña pues éstas reducen el consumo de leña utilizada en relación a un fogón sencillo de leña. Así como también contribuyen a la reducción de enfermedades respiratorias de las personas, puesto que cuentan chimeneas que permiten dirigir las emisiones de monóxido de carbono y material particulado a través de ella.

El Instituto Nacional de Bosques –INAB en conjunto con Fundación Solar, la Municipalidad de Jutiapa, el Proyecto Manejo Sostenible de los Bosques y Múltiples Beneficios Ambientales Globales y el Proyecto Pequeñas Donaciones del Fondo para el Medio Ambiente Mundial inauguraron el Primer Centro Demostrativo de Estufas Ahorradoras en el Mercado Municipal del Barrio Latino del departamento de Jutiapa, esto con el objetivo de reducir el consumo de leña, las emisiones de gases de efecto invernadero –GEI– y mejorar el bienestar de las familias del Sur-Oriente.

Actualmente, Guatemala forma parte de la Alianza Global para Estufas Limpias, con lo cual se busca que cada vez sean más las familias beneficiadas con este tipo de estufas; además de esto, uno de los objetivos que se tiene actualmente es el adoptar normas para la fabricación y distribución de estufas ahorradoras en nuestro país, esto se hace a partir de distintas pruebas (WBT, CCT, KPT) y la prueba de seguridad, que permiten la comparación y evaluación de distintas estufas.

La Prueba de Ebullición de Agua (WBT) es utilizada para determinar la eficiencia de una estufa ecológica, la cual consiste en calentar agua a ebullición en tres fases de uso: arranque en frío, arranque en caliente y hervir a fuego lento. Además permite la cuantificación de emisiones de la estufa en el proceso, dicho protocolo es el que se utilizará para este trabajo.

1. MARCO CONCEPTUAL

1.1. Antecedentes

La Mayoría de las comunidades rurales del interior de la República utilizan fogones de leña para la cocción de sus alimentos, así como para la calefacción de sus hogares; el uso de las estufas o fogones convencionales no aprovecha en su totalidad la capacidad calorífica de la leña, por lo que se pierde energía en forma de calor y además libera emisiones que perjudican el ambiente y la salud de las personas que las utilizan.

Es por ello que se han implementado las estufas ecológicas o estufas ahorradoras de leña. La primera estufa ahorradora de leña fue presentada en 1976; La utilización de estufas ahorradoras de leña ha ido en aumento pues estas reducen el consumo de leña y las emisiones al ambiente que son producto de la combustión de la biomasa.

En 2005 en la Universidad de San Carlos de Guatemala, Sebastián del Valle Rosales, realizó un trabajo de graduación denominado "*Determinación de la eficiencia termodinámica máxima y de combustión de la estufa mejorada Doña Justa*", en el cual se evaluó la eficiencia de un modelo de estufa mejorada la cual fue introducida a Guatemala recientemente. Se determinó que la estufa, Doña Justa, tiene una eficiencia termodinámica elevada cuando se utiliza biomasa como combustible, pero se recomienda una readecuación de cámara de combustión. Se pudo obtener un procedimiento para determinar la eficiencia máxima termodinámica y de combustión susceptible de réplica en condiciones similares a equipos de combustión de biomasa, con una metodología

experimental que puede aplicarse sin mayores cambios a otros modelos y aplicaciones de estufas mejoradas.

En 2006, en la Universidad de San Carlos de Guatemala, Herbert Estuardo Aché Ortiz, realizó un trabajo de graduación denominado, *“Experiencias en la construcción de estufas economizadoras de leña en el área rural del país”*, en el cual se planteó la necesidad de evaluar el beneficio de implementar estufas ahorradoras en departamentos de clima frío y cálido, entre los beneficios está mejorar la eficiencia en el aprovechamiento de energía calorífica. En dicho trabajo se realizaron encuestas, enfocándose en la adaptación, cuidado, mantenimiento, disminución del uso de leña, entre otros, dando como resultado una mejor adaptación en clima frío, ya que en el clima cálido, la chimenea se deteriora más rápidamente; además no se brindó apoyo e información suficiente.

La secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) mediante el Instituto Nacional de Ecología en México realizó el *“Estudio comparativo de estufas mejoradas para sustentar un programa de intervención masiva en México”*. A nivel mundial 1,5 millones de personas mueren al año por enfermedades relacionadas con el humo de estufas de leña por lo cual este estudio tuvo el fin el solventar este problema para los hogares mexicanos en donde 1 de 5 utilizan una estufa de este tipo. Esto mediante el estudio y evaluación de estufas mejoradas que reducen el impacto de la salud y cumple con el estándar establecido en México de 2,5 P.M. Se determinaron los parámetros de las estufas mejoradas como eficiencia energética, concentración de contaminantes en interiores de cocinas y emisión de gases de efecto invernadero de cuatro estufas mejoradas y de un fogón abierto.

La Fundación Sierra Madre, con el Ing. Agr. José Esaú Guerra Samayoa como consultor, presento en el año 2009 el "*Informe final del estudio de sistematización de estufas ahorradoras de leña en ocho municipios del altiplano occidental de Guatemala*" en donde se presentó los resultados a las entrevistas que se realizaron a las usuarias de cuatro modelos de estufas (estufa de plancha tradicional, estufa de plancha mejorada, estufa de plancha tipo Onil y estufa mejorada Eco-comal), obteniendo datos importantes como por ejemplo, que la estufa tipo Onil tiene un menor consumo de leña, sin embargo debido a su pequeño tamaño no es la favorita entre las usuarias; con estos datos y brindado información para mejores técnicas de uso, se realizó una propuesta del modelo de estufa tipo plancha mejorada en donde se ahorran hasta un 50 % del uso de leña.

En 2012 el Instituto Nacional de Ecología de México, presento el informe final del "*Estudio comparativo de estufas mejoradas para sustentar un programa de intervención masiva en México*", teniendo como objetivos la evaluación de eficiencia energética, reducción de gases de efecto invernadero y contaminantes interiores, análisis estadístico socioeconómico de estufas ahorradoras mejoradas; los resultados presentan mejorías comparados con las de fogones la reducción de contaminantes en interiores por debajo de los límites, por lo que se busca la creación de normas de control de calidad para asegurar calidad de vida de las personas.

En 2012, en la Universidad de San Carlos de Guatemala, Hilda Portillo Cruz, realizó un trabajo de graduación denominado "*Lineamiento para la elaboración de estufas ecológicas ahorradoras de leña, en la aldea Tablones del municipio de Zacapa, departamento de Zacapa*". Este estudio se hizo para reducir el consumo de leña en la cocción de los alimentos en los hogares, así como disminuir la deforestación. Así mismo, el trabajo de investigación

contribuye a minimizar las enfermedades en los ojos y en las vías respiratorias de la población, a causa de las grandes cantidades de humo que se produce en los fogones.

En la Universidad de Antioquia en Medellín Colombia, en el año 2013, se realizó el trabajo denominado “*Caracterización energética y emisiones de una estufa de cocción eco-eficiente con biomasa a diferentes altitudes*” realizando a las estufas mejoradas las pruebas CCT y WBT con el fin de obtener el diseño adecuado para aumentar el desempeño energético disminuyendo emisiones de gases. Como resultado se obtuvo que, a menor altura tomando como referencia el nivel de mar, las estufas ahorradoras mejoran su rendimiento (entre 6,8 %-23,3 % WBT arranque en frío a WBT arranque en caliente) ya que se aprovecha mejor la energía suministrada debido a la disminución de pérdidas de calor, además disminuyen las emisiones de gases.

En 2014, se realizó un documento con el nombre “*Plan de acción nacional de Guatemala para estufas y combustibles limpios*”, con el apoyo de varias instituciones nacionales e internacionales, teniendo como objetivo, organizar la información e identificar las actividades relevantes para todos los actores del sector (fabricantes, implementadores, gobierno, universidades y donantes). Además de esto se tienen varios objetivos a corto plazo entre los que destacan la creación de normas y pruebas, medidas institucionales y monitoreo y evaluación (M&E).

1.2. Justificación

Guatemala es un país que utiliza diversas fuentes para la producción de la energía utilizable en el país. De acuerdo a las estadísticas del Consejo Nacional de Energía Eléctrica, del total de energía producida, un 71,50 % es producida

a partir de energía renovable; si se toma en cuenta la producción de energía a partir de la quema de combustibles, el 32,65 % es producida por la quema de biomasa, entre la cual encontramos la leña. Es decir que Guatemala es un país que tiene un gran consumo de leña en el ámbito energético, sin tomar en cuenta la leña que es utilizada como fuente de energía para la preparación de alimentos o para la calefacción en las comunidades de escasos recursos del país.

Conociendo la demanda de leña que existe en nuestro País, es de tomar en cuenta que Guatemala tiene un 39,9 % de su territorio cubierto por bosques y el 36,5 % de la producción forestal está destinado a producción de leña. Esto se debe a que, como se mencionó anteriormente la utilización de leña como fuente de energía es una alternativa más económica y además es ambientalmente factible, principalmente para las comunidades del interior del país.

Este trabajo de investigación se enfoca en la determinación de la eficiencia de una estufa ahorradora que utiliza leña como combustible, dato que permitirá tener conocimiento sobre la reducción en el consumo de leña debido a la utilización de dicha estufa. El consumo de leña de la estufa puede ser optimizado al conocer las condiciones necesarias en las que se puede utilizar dicha estufa.

La finalidad de este trabajo de investigación se enfoca en analizar el efecto que genera sobre la eficiencia de la estufa el contenido de humedad de la leña que se utiliza, para así determinar las condiciones óptimas de humedad de la leña que permitan obtener la mejor eficiencia en la estufa y de esa manera reducir el consumo de combustible de la misma, mejorando de igual forma, la rentabilidad de la estufa, pues estará consumiendo menor cantidad de combustible.

Al mismo tiempo se realizó un análisis de las emisiones de monóxido de carbono y de material Particulado que dicha estufa libera hacia el ambiente, pues se sabe que la quema de combustibles aparte de la producción de gases de efecto invernadero, produce monóxido de carbono y material particulado que pueden afectar la salud de las personas aledañas al lugar donde se libera el gas y el material particulado.

Por dicha razón, en este estudio también se determinó el efecto que tiene la variación del contenido de humedad de la leña utilizada en la estufa, en las emisiones de monóxido de carbono y de material particulado, puesto que al conocer dicha información cuantitativa se puede determinar condiciones óptimas de humedad en el combustible para que la emisión sea reducida, y así también reducir el daño a la salud que ocasiona la utilización de la estufa ahorradora.

El estudio se enfocó en variar el contenido de humedad de la leña utilizada como combustible de la estufa, y de esa manera determinar las mejores condiciones de trabajo del combustible, para así reducir el consumo del mismo y poder obtener valores óptimos de la eficiencia energética y emisiones de monóxido de carbono y material particulado, lo cual podrá reflejar resultados rentables y positivos en el ámbito económico en la utilización de dicha estufa.

1.3. Determinación del problema

Esta sección define y delimita el problema del trabajo de investigación.

1.3.1. Definición

Es necesario realizar el análisis de la eficiencia de una estufa ahorradora de leña, utilizando el protocolo de Prueba de Ebullición de Agua (WBT), realizando la medición de la eficiencia en tres fases distintas de operación de la estufa: la fase de arranque en frío, la fase de arranque en caliente y la fase de fuego lento, al ir variando el contenido de humedad de la biomasa utilizada en 0 %, 5 %, 10 %, 15 %, 20 %, 25 %, y de esa manera brindar resultados cuantitativos exactos, para poder determinar si la variación en el contenido de humedad de la biomasa utilizada aporta un cambio significativo en el valor de la eficiencia de la estufa y en las emisiones de CO y PM.

1.3.2. Delimitación

Se realizó el análisis de la eficiencia utilizando una estufa ahorradora de cámara abierta. Las dimensiones de la estufa son ancho: 77,5 cm, largo 71 cm y alto 80 cm, con áreas de plancha y de hornilla de 3,763 cm² y 1,000 cm² respectivamente, las pruebas se realizaron en el área de Prefabricados de la sección de Tecnología de la Madera del Centro de Investigaciones de Ingeniería, utilizando leña de Encino Blanco y variando los contenidos de humedad en 0 %, 5 %, 10 %, 15 %, 20 % y 25 %; se trabajará con el protocolo, Prueba de Ebullición de Agua (WBT).

Figura 1. **Estufa ahorradora de cámara abierta**



Fuente: Laboratorio Multipropósito de Sección de Tecnología de la Madera. CII. USAC.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Fenómenos de transferencia de calor

El flujo de calor es la transferencia de energía desde un cuerpo a mayor temperatura que otro con el simple objeto de llegar a un equilibrio térmico entre los dos cuerpos. En el siglo XVIII y comienzos del XIX, los científicos imaginaban que todos los cuerpos contenían un fluido invisible al cual llamaron calórico. Al calórico se le asignó una variedad de propiedades, algunas que probaron ser inconsistentes con la naturaleza. Pero su más importante propiedad era que fluía de cuerpos calientes a fríos. Era una manera útil de pensar acerca del calor. Hoy en día, en la física, a este flujo de calor, más propiamente transferencia de calor, se le define como el proceso por el que se intercambia energía en forma de calor entre distintos cuerpos, o entre diferentes partes de un mismo cuerpo que están a distinta temperatura. El calor se puede transferir por convección, radiación o conducción. Aunque estos tres procesos pueden tener lugar simultáneamente, puede ocurrir que uno de los mecanismos predomine sobre los otros dos.

2.1.1. Transferencias de calor por conducción

En los sólidos, la única forma de transferencia de calor es la conducción. Si se calienta un extremo de una varilla metálica, de forma que aumente su temperatura, el calor se transmite hasta el extremo más frío por conducción. No se comprende en su totalidad el mecanismo exacto de la conducción de calor en los sólidos, pero se cree que se debe, en parte, al movimiento de los electrones libres que transportan energía cuando existe una diferencia de temperatura. Esta teoría explica por qué los buenos conductores eléctricos

también tienden a ser buenos conductores del calor. En 1822, el matemático francés Joseph Fourier dio una expresión matemática precisa que hoy se conoce como ley de Fourier de la conducción del calor. Esta ley afirma que la velocidad de conducción de calor a través de un cuerpo por unidad de sección transversal es proporcional al gradiente de temperatura que existe en el cuerpo. Cuando un sistema trabaja en estado estable, entonces la transferencia de calor por conducción se expresa de la siguiente manera:

$$Q = \frac{k * A * \Delta t}{L}$$

Dónde: Q= flujo de calor (J/s)

k= conductividad térmica, (J/(s*m²*K/m))

A = área de flujo de calor, m²

L= grosor de la pared, m

t= temperatura, K

2.1.2. Transferencia de calor por convección

Si existe una diferencia de temperatura en el interior de un líquido o un gas, es casi seguro que se producirá un movimiento del fluido. Este movimiento transfiere calor de una parte del fluido a otra por un proceso llamado convección. El movimiento del fluido puede ser natural o forzado. Si se calienta un líquido o un gas, su densidad (masa por unidad de volumen) suele disminuir. Si el líquido o gas se encuentra en el campo gravitatorio, el fluido más caliente y menos denso asciende, mientras que el fluido más frío y más denso desciende. Este tipo de movimiento, debido exclusivamente a la no uniformidad de la temperatura del fluido, se denomina convección natural. La convección forzada se logra sometiendo el fluido a un gradiente de presiones, con lo que se fuerza su movimiento de acuerdo a las leyes de la mecánica de fluidos.

Para describir la transferencia de calor (Q) por convección natural se tiene la siguiente expresión:

$$Q = h_i * A_i * \Delta t_i$$

Donde: h_i = coeficiente de película. $J/(s \cdot m^2 \cdot K)$

A_i = área interna de transferencia. M^2

t_i = temperatura de la parte interna de la pared. M^2

2.1.3. Transferencia de calor por radiación

La radiación presenta una diferencia fundamental respecto a la conducción y la convección: las sustancias que intercambian calor no tienen que estar en contacto, sino que pueden estar separadas por un vacío. La radiación es un término que se aplica genéricamente a toda clase de fenómenos relacionados con ondas electromagnéticas. Algunos fenómenos de la radiación pueden describirse mediante la teoría de ondas, pero la única explicación general satisfactoria de la radiación electromagnética es la teoría cuántica. En 1905, Albert Einstein sugirió que la radiación presenta a veces un comportamiento cuantizado: en el efecto fotoeléctrico, la radiación se comporta como minúsculos proyectiles llamados fotones y no como ondas.

La naturaleza cuántica de la energía radiante se había postulado antes de la aparición del artículo de Einstein, y en 1900 el físico alemán Max Planck empleó la teoría cuántica y el formalismo matemático de la mecánica estadística para derivar una ley fundamental de la radiación. La cual relaciona la intensidad de la energía radiante que emite un cuerpo en una longitud de onda determinada con la temperatura del cuerpo. Para cada temperatura y cada longitud de onda existe un máximo de energía radiante. Sólo un cuerpo ideal (cuerpo negro) emite radiación ajustándose exactamente a la ley de Planck. Los cuerpos reales emiten con una intensidad algo menor.

La contribución de todas las longitudes de onda a la energía radiante emitida se denomina poder emisor del cuerpo, y corresponde a la cantidad de energía emitida por unidad de superficie del cuerpo y por unidad de tiempo. Como puede demostrarse a partir de la ley de Planck, el poder emisor de una superficie es proporcional a la cuarta potencia de su temperatura absoluta. El factor de proporcionalidad entre el poder emisor y la temperatura se denomina constante de Stefan-Boltzman. Según la ley de Planck, todas las sustancias emiten energía radiante sólo por tener una temperatura superior al cero absoluto. Cuanto mayor es la temperatura, mayor es la cantidad de energía emitida. Además de emitir radiación, todas las sustancias son capaces de absorberla. Por eso, aunque un cubito de hielo emite energía radiante de forma continua, se funde si se ilumina con una lámpara incandescente porque absorbe una cantidad de calor mayor de la que emite.

2.2. Temperatura

En general, lo común es medir la temperatura con termómetros de vidrio llenos de líquido, en los que el líquido se expande cuando se calienta. Así es como un tubo uniforme, lleno parcialmente con mercurio, alcohol o algún otro fluido, puede indicar el grado de calentamiento por la longitud de la columna de fluido. Sin embargo, la asignación de valores numéricos al grado de calentamiento se hace mediante una definición arbitraria. Para la escala Celsius, el punto del hielo fundente (punto de congelación del agua saturada con aire a presión atmosférica estándar) es cero, y el punto de vapor (punto de ebullición del agua pura a presión atmosférica estándar) es 100.

Al termómetro se le puede dar una escala numérica sumergiéndolo en un baño de hielo y poniendo una marca para el cero en el nivel donde se encuentra el fluido, y después colocándolo en agua hirviendo y haciendo una marca para

el 100 a este mayor nivel del fluido. La distancia entre las dos marcas se divide en 100 espacios iguales denominados grados.

Pueden marcarse otros espacios de igual tamaño por debajo de cero y por encima de 100 para extender el rango del termómetro. Todos los termómetros, sin importar el fluido, proporcionan la misma lectura en 0 y 100 si se calibran con el método descrito, pero lo usual es que en los demás puntos las lecturas no correspondan debido a que los fluidos cambian en cuanto a sus características de dilatación. Puede hacerse una selección arbitraria del fluido y para muchos propósitos será completamente satisfactoria. Sin embargo, como se mostrará, la escala de temperatura del sistema SI, con el kelvin, símbolo K, como unidad, está basada en el gas ideal como fluido termométrico. Nótese que como escala absoluta, esta depende del concepto de un límite inferior de temperatura. Las temperaturas Kelvin tienen el símbolo T. Las temperaturas Celsius, con símbolo t, están relacionadas con las temperaturas Kelvin por:

$$T\text{ }^{\circ}\text{C} = T\text{ K} - 273,15$$

2.3. Calor sensible y latente

El cambio de temperatura de una sustancia conlleva una serie de cambios físicos. Casi todas las sustancias aumentan de volumen al calentarse y se contraen al enfriarse. El comportamiento del agua entre 0 y 4 °C constituye una importante excepción a esta regla. Se denomina fase de una sustancia a su estado, que puede ser sólido, líquido o gaseoso.

Los cambios de fase en sustancias puras tienen lugar a temperaturas y presiones definidas. El paso de sólido a gas se denomina sublimación, de sólido a líquido fusión, y de líquido a vapor vaporización. Si la presión es constante,

estos procesos tienen lugar a una temperatura constante. La cantidad de calor necesaria para producir un cambio de fase se llama calor latente; existen calores latentes de sublimación, fusión y vaporización. Si se hierve agua en un recipiente abierto a la presión de 1 atmósfera, la temperatura no aumenta por encima de los 100 °C por mucho calor que se suministre.

El calor que se absorbe sin cambiar la temperatura del agua es el calor latente; no se pierde, sino que se emplea en transformar el agua en vapor y se almacena como energía en el vapor. Cuando el vapor se condensa

para formar agua, esta energía vuelve a liberarse. Del mismo modo, si se calienta una mezcla de hielo y agua, su temperatura no cambia hasta que se funde todo el hielo. El calor latente absorbido se emplea para vencer las fuerzas que mantienen unidas las partículas de hielo, y se almacena como energía en el agua. Así que el calor latente que acompaña a un cambio de fase es una función sólo de la temperatura, y esta relacionada con otras propiedades del sistema mediante una ecuación termodinámicamente exacta:

$$\Delta H = T * \Delta V * \frac{dP^{sat}}{dT}$$

Donde para una especie pura a temperatura dada T,

ΔH = calor latente (Btu/lb)

ΔV = cambio de volumen (gal)

P^{sat} = presión de vapor (psi)

2.3.1. Capacidad calorífica

La capacidad calorífica de un cuerpo es la razón de la cantidad de calor que se le cede a dicho cuerpo en una transformación cualquiera con la correspondiente variación de temperatura. Depende de la masa del cuerpo, de su composición química, de su estado termodinámico y del tipo de transformación durante la cual se le cede el calor. Sus unidades son $J \cdot K^{-1}$.

$$Cv = \left(\frac{dU}{dT} \right)_v$$

Si el proceso se está llevando a volumen (v) constante, entonces se tiene la siguiente expresión que involucra la energía interna (U) y temperatura (T):

$$Cp = \left(\frac{dH}{dT} \right)_p$$

Análogamente si se está trabajando a presión (p) constante, se tiene la siguiente expresión que involucra la entalpía (H) y temperatura (T):

Nótese que en el caso de volumen constante se expresa la capacidad calorífica como función directamente proporcional a la energía interna (U) molar o específica y en el caso de presión constante es directamente proporcional a la entalpía (H) molar o específica.

2.4. Combustión

Se entiende por combustión, a la combinación violenta, con desprendimiento de luz y calor, del Oxígeno (O_2) del aire con el Carbono C, Hidrógeno (H), Azufre (S) y Nitrógeno (N).

La combustión del Oxígeno con el Carbono, Hidrógeno, Azufre, se efectúa en proporciones de peso bien determinadas, así pues por cada átomo de Carbono se necesitan 2 átomos de Oxígeno para llegar a la combustión perfecta formando CO_2 (dióxido de carbono), el Carbono que se quema con

deficiencia de aire forma el gas CO (monóxido de carbono), que representa solo el 30 % de una combustión perfecta, por lo tanto la combustión al formarse CO es incompleta.

El Hidrógeno se combina siempre en proporción de 2 átomos de Hidrógeno con uno de Oxígeno formando vapor de agua H_2O , y el azufre es de proporción 1:2 es decir un átomo de Azufre por 2 de Oxígeno, este gas es perjudicial porque al enfriarse los productos de la combustión, el agua que se forma en la combustión y la que está presente en la humedad del combustible se condensan y reaccionan con el gas anhídrido H_2 formando ácido sulfúrico SO_4H_2 , sumamente corrosivo además ataca los conductos metálicos de escape.

2.4.1. Calor de combustión

Durante la combustión de los cuerpos, el desprendimiento de calor se realiza de forma diferente de acuerdo con las características físicas y químicas del cuerpo en cuestión. Una magnitud que permite caracterizar cuantitativamente el desprendimiento de calor de los cuerpos durante la combustión, es el denominado calor específico de combustión.

Se define el calor específico de combustión (I) como la cantidad de calor (Q) que cede la unidad de masa del cuerpo al quemarse totalmente. El calor específico de combustión (I) se expresa en unidades de energía (J) por unidades de masa (kg) y depende del tipo de combustible. Iguales masas de combustibles diferentes, desprenden diferentes cantidades de calor (Q) al quemarse totalmente. De otro modo, masas diferentes del mismo combustible desprenden, también, diferentes cantidades de calor (Q). La cantidad de calor

(Q) desprendida por cierta masa (m) de combustible, al quemarse totalmente, puede ser calculada mediante la fórmula:

$$Q = I \cdot m.$$

Tabla I. **Calores específicos de combustión**

Material combustible	Kcal/Kg	MJ/Kg
Hidrógeno	33915,9	142
Gas metano	13136,4	55
Gasolina	11225,7	47
Petroleo crudo	11225,7	47
Queroseno	10986,8	46
Carbón butiminoso	8598,4	36
Antracita	8359,5	35
Coque	8120,7	34
Alcohol etílico	7165,3	30
Carbón vegetal	7165,3	30
Alcohol metílico	5254,5	22
Madera de pino	5015,7	21
Cascaron de coco	4776,9	20
Turba seca	4776,9	20
Leña seca	4299,2	18
Turba humedad	3821,5	16
Aserrín seco	3582,6	15
Cascara de arroz	3582,6	15
Lignito	3104,9	13
Bagazo de caña seco	2149,6	9
Leña verde	2149,6	9
Planta de maíz seca	2149,6	9
Aserrín húmedo	1910,7	8

Fuente: PÉREZ, Omar. VILLEGAS, Antonio.

<http://www.cubasolar.cu/biblioteca/energia/Energia20/HTML/articulo06.htm>. Consulta: 24 febrero de 2018.

2.4.2. Proceso de combustión

La mayoría de los procesos de combustión se realizan con aire (Oxígeno + Nitrógeno + Argón) y no con Oxígeno puro.

Este proceso se traduce en la oxidación de los componentes de un combustible, en cuya ecuación química representativa, la masa permanece inalterable. Para los cálculos se desprecia el Argón y se toma 21 % de Oxígeno y 79 % de Nitrógeno. Pero los dispositivos de combustión no queman necesariamente todo el combustible que se les suministra, teniendo las siguientes reacciones:



El CO₂ se forma a menor temperatura y sin duda es el producto deseado; el CO se forma a mayores temperaturas, y no es tan deseado debido a que su formación va acompañada por una menor liberación de calor. La característica especial del carbono como combustible es que su presión de vapor es despreciablemente pequeña. Es por eso que se puede describir la velocidad de combustión por medio de la relación de Nusselt:

$$\frac{G_o * r_o}{t_{ox}} = \frac{m_{ox}}{s}$$

En donde: G_o = velocidad de combustión

m_{ox} = masa que se oxida

t_{ox} = temperatura

s = constante de Nusselt

r_o = radio de la partícula de carbono

2.4.3. Aire teórico y relación aire combustible

Aire teórico es la cantidad mínima de aire capaz de proporcionar el Oxígeno suficiente para la combustión completa del Carbono. Cuando se obtiene combustión completa no puede haber Oxígeno en los productos de la combustión. En la práctica, no es posible tener una combustión completa ni con las proporciones “ideales” químicamente correctas, a menos que se administre una cantidad mayor de aire teórico. Esto se debe a que probabilísticamente no es posible que cada una de las extraordinariamente numerosas moléculas del combustible encuentre una molécula de oxígeno para combinarse con ella. Por lo tanto, la oxidación total del combustible se logra utilizando en la mezcla exceso de aire.

La relación aire combustible es la razón teórica entre masa o moles de aire teórico y la masa o moles de combustible. Para calcular el número de moles necesarios de aire se aplica la siguiente ecuación:

$$n_{a.st.} = \frac{1}{0,21} \left[\left(1 - \frac{1}{2} + f\right) \times \frac{[c]}{12} - \frac{y}{32} \right]$$

Donde:

f= % de madera que se convierte en CO

c= % de carbono en la madera.

y= % de oxígeno presente en la madera menos ocho veces el porcentaje de hidrógeno.

Si la cantidad de aire suministrado en una combustión es inferior al aire teórico necesario, la combustión será incompleta y habrá presencia de CO.

La combustión incompleta se debe a tres causas:

- Insuficiencia de oxígeno

- Mezcla imperfecta entre el Oxígeno y el combustible
- Temperatura demasiado baja para mantener la combustión

Debido a la naturaleza heterogénea del proceso de combustión de biomasa sólida, solo parte del aire que entra a la cámara de combustión será utilizado, el resto no. Entonces es necesario agregar más aire que lo que teóricamente se definió. La relación aire/combustible que se recomienda es un factor de 1,2 a 1,5.

2.4.4. Productos de la combustión

Los humos o productos de combustión están formados por los gases resultantes de las reacciones; dióxido de carbono, vapor de agua y óxido de azufre cuando lo tiene el combustible, así como el nitrógeno correspondiente al volumen de aire utilizado. También se puede encontrar oxígeno y nitrógeno procedentes del aire no utilizado, óxidos de nitrógeno y a veces otros gases que pudieran formar parte del aire aportado. Se puede dar el caso en que el combustible esté formado por una mezcla de sustancias, entre las cuales hay una o más que no reaccionan con el O_2 , por ejemplo SO_2 . En este caso, estas sustancias también pasarán en forma completa a los humos. Otro caso en que parte de algún reactivo pasa al producto es cuando hay más aire del que se necesita para la combustión; el O_2 que no se utiliza en la reacción formará parte de los humos. Se habla entonces de reacciones con exceso de aire. Por último, es útil indicar que los humos pueden contener parte del combustible que no haya reaccionado y sustancias con un grado de oxidación incompleto, como el CO.

Figura 2. **Sustancias presentes en los humos de combustión**

Fórmula Química	Nombre	Procedencia principal	Otras procedencias
CO ₂	Dióxido De carbono	Combustión de sustancias que contienen C.	Componente no combustible del combustible.
H ₂ O	Vapor de agua	Combustión de sustancias que contienen H ₂ .	Combustible húmedo
N ₂	Nitrógeno	Aire.	Componente no combustible del combustible.
O ₂	Oxígeno	Combustión realizada con aire en exceso.	Un gas combustible puede tener O ₂ en su composición.
CO	Monóxido de carbono	Combustión realizada con aire en defecto.	Un gas combustible puede tener CO en su composición.
H ₂	Hidrógeno	Combustión realizada con aire en defecto.	
C	Carbono (hollín)	Combustión realizada con aire en defecto.	
SO ₂	Dióxido De Azufre	Presencia de S en el combustible.	Un gas combustible puede tener SO ₂ en su composición.

Fuente: BRIZUELA, Eduardo. ROMANO, Silvia. *Manual de Combustión* p.26.

2.5. Combustión de biomasa

La biomasa se forma por un proceso llamado fotosíntesis, una reacción química que combina agua, CO₂ y energía solar. La reacción opuesta de la anterior es la combustión, que es la descomposición de la biomasa, liberando energía que se puede utilizar para cocinar, secar, calentar, etc. A continuación se expondrán las características químicas y físicas de la biomasa.

2.5.1. Características químicas

La biomasa consiste en tres elementos químicos: hemicelulosa, celulosa e ignita. También contiene agua, pequeñas cantidades de resinas y minerales. Según los análisis proximales de madera, la composición de esta es de aproximadamente 50 % de C y 45 % de O. La composición de la biomasa es considerada en términos de carbono, materia volátil y cenizas producidas cuando se calienta en ausencia de aire

2.5.2. Características físicas

Son cuatro las variables físicas más importantes: tamaño/forma, densidad/estructura, contenido de humedad y valor calorífico.

- Tamaño y forma. A mayor área superficial expuesta a las cantidades necesarias de oxígeno y calor, más rápido será el proceso de quemado por lo tanto, habrá mayor potencia. Por ejemplo, pequeños pedazos de madera y astillas, se quemarán más rápido que leños grandes del mismo tipo de madera. El tamaño de la leña siempre influenciará el diseño de una estufa, sobre todo de la cámara de combustión.
- La densidad y la estructura de la biomasa están íntimamente relacionadas por la proporción y el tamaño de los poros. A medida que la proporción de poros de un sólido incrementa, la densidad disminuye. Estos poros que mantienen aire y humedad, tienen el efecto de facilitar el escape de gases volátiles y hacer más fácil que la materia se queme.

La mayoría de combustibles biomásicos son higroscópicos (atraen moléculas de agua; por lo tanto, mantienen un nivel constante de humedad). De todos los combustibles biomásicos el menos higroscópico es el carbón, pero por sus grandes poros puede retener grandes cantidades de agua si se le moja. Biomasa recientemente cortada posee niveles de humedad entre 80-90 %, en un período; dependiendo de la clase de biomasa que sea y factores climáticos, gran parte de esa humedad se evaporará, pero se llega a un punto en que ya no se puede perder más humedad. El contenido de humedad en la biomasa que se ha secado al aire está entre 10 % al 26 %.

El contenido de humedad en un combustible tiene gran importancia en la combustión del mismo. Después que la humedad en el combustible se ha calentado a 100°C, la humedad se evapora y esa energía que se utilizó para evaporarla se pierde completamente y no se puede recuperar. Un combustible con menor porcentaje de humedad que otro, será más eficiente y aprovechará mejor la energía que uno con mayor porcentaje de humedad. El efecto que tiene la humedad sobre el valor calorífico de la biomasa se describe de esta manera:

$$B = \frac{B_o}{1 + [m]} - [m] \times (C_p \times T + L)$$

Donde: m = contenido de humedad (%)

L = calor latente de evaporación

B = calor de combustión de biomasa

Bo = calor de combustión de biomasa seca

El valor calorífico de un combustible es una de las propiedades que afecta significativamente el diseño de una estufa. Este valor dependerá de la composición química del material carburante y el contenido de humedad. El valor calorífico será la máxima cantidad de energía que se puede liberar cuando el combustible reacciona con el aire, es decir, el calor por unidad de masa que se produce en la combustión completa de la sustancia determinada. Se mide en KJ/Kg y en calorías.

2.5.3. Proceso de combustión de leña

La combustión de leña lleva consigo cambios químicos debido a la presencia de calor. Al principio del proceso de combustión se desprende dióxido de carbono y agua sin presencia de llamas; la temperatura al aumentar libera gases de combustión de resinas que se involucran en la reacción. Este primer proceso de la degradación de la leña se le llama pirolisis. Cuando la temperatura supera los 280°C la porción de gases inflamables que emite es lo suficientemente caliente para empezar a arder. La combustión únicamente ocurrirá en presencia de oxígeno y a temperaturas sobre la de ignición del combustible; la temperatura promedio de ignición de la madera es de 600°C. Es aquí cuando los gases arden por efecto de calor radiante de las otras piezas de madera ya ardiendo. Una vez ardiendo, los gases pirolizados se quemarán a temperaturas de 1,100°C; estas llamas luego proveerán de calor radiante que mantiene y acelera la pirolisis. Las llamas que se miran en un fuego son estos gases quemándose. Es probable en muchos casos que las llamas no toquen la superficie de la leña. El flujo de gases, que se incrementa con el aumento de temperatura de las llamas, previene que el oxígeno llegue a la superficie de la leña.

Tabla II. Reacciones para la combustión de leña

No.	Reacción
1	$\text{C} + \text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2 + 178,430 \text{ KJ}$ <p style="text-align: center;">grafítico gas gas</p>
2	$\text{C} + \text{CO}_2 \rightarrow 2\text{CO} - 78,210 \text{ KJ}$ <p style="text-align: center;">grafítico gas gas</p>
3	$2\text{C} + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{CO} + 100,230 \text{ KJ}$ <p style="text-align: center;">gas gas gas</p>

Continuación tabla II.

4	2CO gas	+	O₂ gas	→	2CO₂ gas	+	256,640 KJ
5	2H ₂ gas	+	O ₂ gas	→	2H ₂ O gas	+	219,300 KJ
6	C grafítico	+	H ₂ O gas	→	CO gas	+	H ₂ gas
						-	59,450 KJ
7	C grafítico	+	2H ₂ O gas	→	CO ₂ gas	+	2H ₂ gas
						-	40,870 KJ

Fuente: elaboración propia.

Para describir matemáticamente el tiempo que una partícula de carbono estará combustionando se aplica la siguiente relación:

$$\frac{dr_o}{dt} = \frac{-G_o}{\rho_c}$$

Donde:

ρ_c = densidad del carbono

r_o = diámetro inicial de la partícula de carbono

G_o = velocidad de combustión

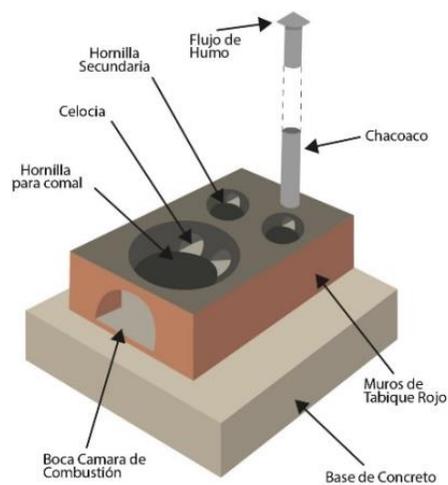
t = tiempo de combustión de la partícula

2.6. Estufa ecológica

Las estufas ecológicas son estufas que aprovechan el calor liberado de la combustión de leña o algún material orgánico seleccionado, de manera que la concentra y la conduce. El esquema general de una estufa eficiente consta de una cámara de combustión, un canal o canales de paso para humo, una o más superficies de cocción y una chimenea. La cámara de combustión tiene forma de codo, con las paredes de la estufa aisladas de la cámara de combustión y el paso de los gases por medio de ceniza. El cuerpo de la estufa

es construido con ladrillos. La estufa tiene una plancha de hierro que se pone encima de una caja de ladrillos y una chimenea que lleva el humo hacia el exterior. Sobre la plancha de hierro se colocan los recipientes con los alimentos.

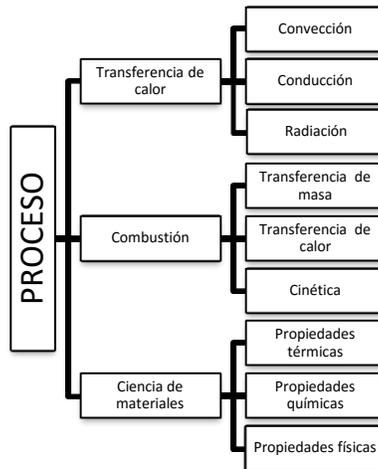
Figura 3. **Estufa ahorradora de leña**



Fuente: GIRAL, José. <http://5cdsgiraljose.blogspot.com/2015/11/ecotecnias-estufa-ahorradora-de-leña.html>. Consulta 24 de febrero de 2018.

Las principales ventajas de una estufa ecológica es su eficiencia. Por lo cual necesita menos cantidad de leña para calentar lo mismo que una estufa convencional de leña; reducen la emisión de gases contaminantes y mejora la calidad de vida de los usuarios y sus familias.

Figura 4. **Proceso involucrados en una estufa ecológica**



Fuente: elaboración propia.

2.6.1. Prueba de ebullición de agua

La prueba de ebullición de agua es una simulación simple del proceso de cocción, con la finalidad de medir qué tan eficiente es una estufa al utilizar combustible para calentar el agua en una olla y la cantidad de emisiones producidas durante el proceso.

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 el 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. Para entender cómo funcionan las estufas con alimentos locales, prácticas de cocina y combustibles, los evaluadores de estufas pueden utilizar la Prueba de Cocción Controlada (CCT) que se ha desarrollado en paralelo con el WBT. El CCT es todavía una prueba de laboratorio, pero se lleva a cabo mediante la preparación de una versión normalizada de la comida local. La prueba de cocción No Controlada (UCT), se lleva a cabo en el campo durante la cual los cocineros eligen cualquier comida que quieren, operan la estufa de manera que sientan más apropiada, usando ollas aptas para las tareas de cocción.

2.6.2. Prueba de emisiones

La eficiencia del combustible es un factor principal para los programas de estufas. Ahora sabemos que los contaminantes atmosféricos emitidos por el uso de combustibles sólidos tienen muchas repercusiones sanitarias y medioambientales. Este documento contiene las instrucciones para la medición de los contaminantes emitidos por la estufa durante la cocción, pero estos pasos pueden omitirse para quienes no tienen el equipo necesario. 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.

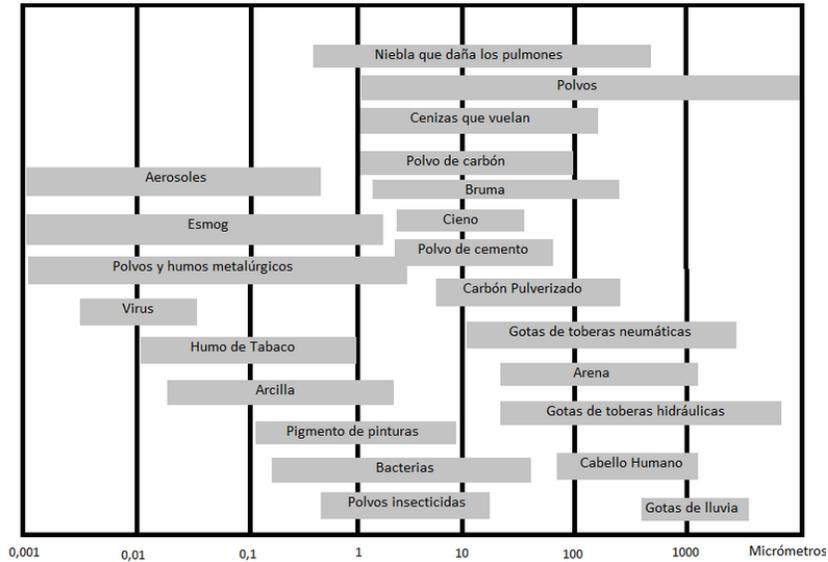
Mientras que el consumo de combustible es una medida relativamente simple, la determinación de las mediciones de contaminantes es significativamente más complicada. Además de las directrices para la medición

de la eficiencia de combustible, el WBT también proporcionan directrices para medir los contaminantes y la obtención de medidas de rendimiento de la estufa. Combinando estas mediciones con las mediciones de eficiencia, podemos determinar un parámetro útil: Emisiones por tarea. Las medidas de emisiones del WBT: 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. Otras organizaciones han desarrollado protocolos importantes para determinar las exposiciones interiores. Los modelos computacionales también se han desarrollado para estimar las concentraciones de aire en el interior, sobre la base de las emisiones de la estufa y otros parámetros.

2.6.3. Material particulado

Son una serie de diminutos cuerpos sólidos o de gotitas de líquidos dispersos en la atmósfera. Son generadas a partir de alguna actividad antropogénica (la quema de carbón para producir electricidad) o natural (como por ejemplo la actividad volcánica). Las características comunes de las partículas son ocho: tamaño, distribución de tamaños, forma, densidad, adhesividad, corrosividad, reactividad y toxicidad. La más importante es la distribución de tamaños. Por lo general, como medida del tamaño se utiliza el diámetro aerodinámico de las partículas. Esta dimensión se mide comúnmente en micrómetros (10^{-6} m). La unidad de medida mencionada recibe también el nombre de micra. Es muy adecuada para la descripción de la contaminación por partículas, porque los diámetros de muchos de estos corpúsculos que permanecen suspendidos en el aire e implican peligro varían de 0,1 a 10 μm .

Figura 5. **Distribución de partículas suspendidas en el aire**



Fuente: Wikiwand.

http://www.wikiwand.com/es/Part%C3%ADculas_en_suspensi%C3%B3n.

Consulta: 25 de febrero de 2018.

3. DISEÑO METODOLÓGICO

3.1. Localización

La parte experimental de la investigación se realizó en las instalaciones del Área de Prefabricados de la Sección de Tecnología de la Madera del Centro de Investigaciones de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala FIUSAC.

3.2. Variables

Se presentan las variables de trabajo del experimento

Tabla III. Descripción de parámetros dependientes e independientes

No.	Variable	Unidad	Factor de diseño		Tipo de variable	
			Constante	Variable	Independiente	Dependiente
1	Peso agua (inicial)	G	X		X	
2	Peso combustible (inicial)	G	X		X	
4	Humedad del combustible	%		X	X	
5	Tiempo	Min	X		X	
6	Temperatura de ebullición	°C		X	X	
7	Peso agua (final)	G		X	X	
8	Peso combustible (final)	G		X	X	
9	Eficiencia	%		X		X
10	Peso de carbón	G		X		X
12	Poder calorífico	kJ/kg		X		X
13	CO	Ppm		X		X

Fuente: elaboración propia.

3.3. Delimitación del campo de estudio

Se evaluó la eficiencia energética de una estufa ahorradora de cámara abierta mediante el protocolo Prueba de Ebullición de Agua (WBT) para determinar si existe un cambio significativo al variar el contenido de humedad de la biomasa en 5 %, 10 %, 15 %, 20 %, 25 %, 30 %, La biomasa a utilizar será Encino Blanco (*Quercus subspathulata*).

3.4. Obtención de las muestras

Se describe la obtención de materia prima y el diseño de tratamientos del experimento.

3.4.1. Obtención de materia prima

La única materia prima utilizada fue leña de encino blanco.

3.4.1.1. Recolección de Leña

Se Compraron 2 cargas de leña de encino Blanco (*Quercus subspathulata*) de Chimaltenango, cada carga contiene 80 leños con corteza..

3.5. Diseño de tratamientos

Se realizó un análisis con un tipo de estufa ahorradora de cámara abierta, realizando la prueba a 6 contenidos de humedad diferentes de la leña realizando la prueba 3 veces para cada humedad, dando un total de 18 tratamientos.

3.6. Recursos humanos

Investigador: Br. Bernardo Yuri Osorio Ceballos
Asesor:
Ing. Qco. Mauricio Valentino Rivera Tello.

3.7. Recursos materiales

Se describe todo el material y equipo utilizado en la realización del experimento.

3.7.1. Materia prima e insumos

- Leña de Encino Blanco
- H₂O (Temperatura ambiente)
- Material de ignición del fuego

3.7.2. Equipos

- Estufa ahorradora de cámara abierta
- Horno
- Indoor Air Pollution Meter (IAP Meter)

3.7.3. Instrumentos de medición

- Balanza analítica digital con capacidad mayor a 6 kg.
- Cronómetro
- Higrómetro
- Termómetro

3.7.4. Materiales

- Atizador
- Escobilla
- Fósforos
- Guantes térmicos

- Lentes de protección
- Mascarilla de gases
- Ollas estándar sin tapadera, capacidad mayor de 5L
- Recipiente para el carbón
- Removedor de cenizas
- Tenazas para retirar el carbón

3.8. Técnicas cuantitativas y cualitativas

La técnica de este trabajo de investigación es cuantitativa, ya que se obtuvo datos de valores experimentales de temperatura y masa, con el fin de evaluar los resultados de seis contenidos de humedad, en una estufa ahorradora de cámara abierta.

3.9. Recolección y ordenamiento de la información

Esta sección describe como se organizará la información recolectada.

3.9.1. Datos generales

Se hizo un análisis de eficiencia energética y emisiones intradomiciliarias de una estufa ahorradora de cámara abierta, en las seis variaciones del contenido de humedad de la biomasa, con tres repeticiones para cada fase (inicio en frío, inicio en caliente y hervir a fuego lento):

Para la recolección de datos generales de las estufas ahorradoras se utilizó el documento WBT 4.2.4 SPREADSHEET; este Excel fue creado por la Alianza Global para Estufas Limpias y se pueden encontrar en la siguiente dirección: <http://cleancookstoves.org/technology-andfuels/testing/protocols.html>.

3.9.1.1. Información general

Cada hoja tiene la siguiente información

- Prueba y Descripción de la Estufa
 - Número de Prueba
 - Fecha
 - Nombre del Evaluador
 - Lugar
 - Repetir la cantidad de pruebas
 - Altitud
 - Modelo de Estufa
 - Fabricante
 - Descripción y Notas acerca de la estufa
 - Descripción del(de los) hornillo(s)
- Condiciones ambientales
 - Humedad relativa del aire (%)
 - Punto de ebullición local del agua
- Evaluación de emisiones
 - Presión atmosférica (kPa)
 - Pitot delta-P
 - Rango del flujo de chimenea o campana (m³/hr)
- Notas o descripción sobre la estufa o la operación que no se incluyen en otra parte de este formulario

Figura 6. Toma de datos de información general

Water Boiling Test - General Information

Test & stove description

Name of Tester(s) _____

Test Number or Code _____

Test Dates _____

Test Year _____

Test Location _____

Replicate Test Number _____

Altitude/Elevation (m) _____

Stove Type/Model _____

Manufactured by _____

Description and Notes _____

Description of Pot(s) _____

Ambient conditions

Air relative humidity (%) _____

Local boiling point (C) _____

Emission testing

Atmospheric P (kPa) _____

Pitot delta-P _____

Hood flow rate (m3/hr) _____

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

Fuente: Clean Cooking Alliance. <https://cleancookstoves.org/binary-data/DOCUMENT/file/000/000/399-1.pdf>. Consulta: 24 de febrero de 2018.

- Descripción del Combustible
 - Descripción general del combustible
 - Tipo de Combustible
 - Descripción de combustible
 - Longitud promedio (cm)
 - Dimensiones transversales (cm x cm)
 - Los valores caloríficos netos y brutos y el contenido de carbón (por su propia medida o relleno de forma automática basándose en el tipo de combustible seleccionado)
 - Descripción del material para iniciar el fuego, astillas o leña pequeña.

Figura 7. Información general (descripción del combustible)

Version 4.2.4

Fuel description

Your general description

Fuel type

Fuel description

Average length (cm)

Cross-sectional dimensions (cm x cm)

Default values (looked up)

Gross calorific value	<input type="text"/>	-	HHV, kJ/kg
Net calorific value	<input type="text"/>	-	LHV, kJ/kg
Char calorific value	<input type="text"/>	-	LHV, kJ/kg
Char carbon content	<input type="text" value="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	<input type="text"/>	HHV measured, kJ/kg
Measured net calorific value	<input type="text"/>	LHV, kJ/kg
Assumed net calorific value	<input type="text"/>	LHV, kJ/kg

Values to be used for tests

Gross calorific value	<input type="text"/>	-	HHV, kJ/kg
Net calorific value	<input type="text"/>	-	LHV, kJ/kg
Fuel carbon content	<input type="text"/>	-	by mass

Description of firestarter (e.g. paper, fluid) and small wood or kindling
(note: Kindling should be weighed and reported with wood)

Fuente: Clean Cooking Alliance. <https://cleancookstoves.org/binary-data/DOCUMENT/file/000/000/399-1.pdf>. Consulta: 24 de febrero de 2018.

- Descripción de la operación de prueba de alta potencia
 - ¿Cómo se inició el fuego?
 - ¿Cuándo se agrega nueva leña al fuego?
 - ¿Cuánto combustible se agrega a la vez?
 - ¿Con qué frecuencia usted alimenta el fuego sin la adición de combustible
- Descripción del funcionamiento durante la prueba a fuego lento
 - ¿Cómo se inició el fuego?

- ¿Cuándo se agrega nueva leña al fuego?
- ¿Cuánto combustible se agrega a la vez?
- ¿Con qué frecuencia usted alimenta el fuego sin la adición de combustible (por ejemplo, empujando los palitos)?

Figura 8. Datos de operación durante el proceso

<i>Description of operation during the high-power test</i>		<i>Description of operation during the simmering test</i>	
How is fire started?	<input type="text"/>	How is fire started?	<input type="text"/>
When do you add new fuel to the fire?	<input type="text"/>	When do you add new fuel to the fire?	<input type="text"/>
How much fuel do you add at one time?	<input type="text"/>	How much fuel do you add at one time?	<input type="text"/>
How often do you feed the fire without adding fuel (e.g. push sticks)?	<input type="text"/>	How often do you feed the fire without adding fuel (e.g. push sticks)?	<input type="text"/>
Do you control the air above or below the fire? If so, what do you do?	<input type="text"/>	Do you control the air above or below the fire? If so, what do you do?	<input type="text"/>

Fuente: Clean Cooking Alliance. <https://cleancookstoves.org/binary-data/DOCUMENT/file/000/000/399-1.pdf>. Consulta: 24 de febrero de 2018.

3.9.2. Preparación de cada fase

Fase I, Arranque en frío

- Se tomó el peso inicial de la leña (*Quercus* spp.)
- Se tomó el contenido inicial de humedad de la leña
- Se colocó las ollas en la estufa con un termómetro en cada olla (deben estar a temperatura ambiente).
- Se encendió el fuego y registró el tiempo.
- Se verificó la temperatura de las ollas cada 1 o 2 minutos.
- Cuando la olla 1 o 2 alcanzó los 91 °C:
 - Se registró el tiempo y temperatura.
 - Se quitó toda la leña de la estufa y apagar las llamas.
 - Se eliminó todo el carbón suelto de los extremos en la cámara de combustión.
 - Se pesó la leña sin quemar junto con la leña sobrante.
 - Se extrajo todo el carbón que queda de la estufa. Pesar el carbón.
 - Se registró la temperatura del agua en la otra olla.
 - Se registró el peso de las ollas.
 - Se retiró el agua caliente de cada olla.
 - Se inició lo antes posible la fase II.

Fase II, Arranque en Caliente

- Se tomó el peso inicial de la leña (*Quercus* spp.)
- Se tomó el contenido inicial de humedad de la leña
- Se colocó las ollas en la estufa con un termómetro en cada olla (debe estar a temperatura ambiente).

- Se encendió el fuego y registrar el tiempo.
- Se verificó la temperatura de las ollas cada 1 o 2 minutos.
- Cuando la olla 1 o 2 alcanzó los 91 °C:
 - Se registró el tiempo y temperatura en ambas ollas.
 - Se quitó toda la leña de la estufa y apagar las llamas.
 - No se pesó carbón ni ceniza.
 - Se colocó la leña quemada otra vez dentro de la estufa.
 - Se procedió inmediatamente con la prueba de baja potencia.

Fase III, Cocción a Fuego lento

- Se colocó las ollas con agua de la fase II sobre las hornillas, anotar el peso y temperatura.
- Se anotó el peso del combustible sobrante de la segunda fase.
- Se colocó la leña caliente de la fase II en el horno e iniciar el cronometro.
- Durante 45 minutos se mantuvo el fuego a un nivel que mantiene la temperatura del agua lo más cerca posible del punto de ebullición.
- Después de 45 minutos realizar lo siguiente:
 - Se anotó el tiempo.
 - Se registró la temperatura final del agua que todavía debe ser de 3 °C por debajo del punto de ebullición establecido.
 - Se quitó toda la leña de la estufa y apagar las llamas.
 - Se eliminó todo el carbón suelto de los extremos de la leña en el recipiente para carbón.
 - Se pesó la leña sin quemar retirada de la estufa junto con la leña restante del segundo bulto pesado previamente.

3.9.2.1. Medición de las emisiones de CO y PM

La medición de emisión de gases y material particulado se realizó con el equipo de analizador correspondiente, CO y PM.

- Se colocó dentro de la cámara de mezcla el equipo, antes de iniciar la prueba.
- Al terminar la prueba se retiró el equipo y se anotó en la hoja de datos los resultados (promedio).

3.9.2.2. Punto de ebullición de agua local

- Se colocó en una Estufa Ahorradora, una olla con 5 kg de agua.
- Se colocó un termómetro en la olla.
- Se midió la temperatura cada 30 segundos.
- Continuar hasta que se observe la primera burbuja y la temperatura se mantenga constante por un intervalo.
- Se registró temperatura.
- Se registró tiempo.

3.9.3. Hoja de datos originales

Debido a que los datos obtenidos se registraron de forma manual, es necesaria la impresión de una hoja de entrada de prueba, la cual es parte del documento WBT 4.2.4 SPREADSHEET.

Figura 9. Hoja de toma de datos

Water Boiling Test - Test Entry Form Version 4.2.4
 These values are not linked to the Test sheets. This sheet is provided so you can print an easy data entry form. You will have to enter these values in each Test sheet to obtain the calculations.

Air Temperature	<input type="text"/>	Name of Testers Date Stove Type/Model Test Number Location Fuel Type Notes
Wind Conditions	<input type="text"/>	
Fuel Dimensions	<input type="text"/>	
Moisture Content (wet basis)	<input type="text"/>	
Dry Weight Pot 1	<input type="text"/>	
Dry Weight Pot 2	<input type="text"/>	
Dry Weight Pot 3	<input type="text"/>	
Dry Weight Pot 4	<input type="text"/>	
Weight Container for Char	<input type="text"/>	
Local Boiling Point * * enter on General Information	<input type="text"/>	
Background CO2 (ppm)**	<input type="text"/>	
Background CO (ppm)**	<input type="text"/>	
Background PM (ug/m3)**	<input type="text"/>	
** For emission testing only		

Fuente: Clean Cooking Alliance. <https://cleancookstoves.org/binary-data/DOCUMENT/file/000/000/399-1.pdf>. Consulta: 24 de febrero de 2018.

Figura 10. Hoja de toma de datos para las tres fases

	Cold Start		Hot Start		Simmer	
	Start	End	Start	End	Start	End
Time	<input type="text"/>					
Weight of Fuel	<input type="text"/>					
Water Temperature, Pot 1	<input type="text"/>					
Water Temperature, Pot 2	<input type="text"/>					
Water Temperature, Pot 3	<input type="text"/>					
Water Temperature, Pot 4	<input type="text"/>					
Weight of Pot 1 with water	<input type="text"/>					
Weight of Pot 2 with water	<input type="text"/>					
Weight of Pot 3 with water	<input type="text"/>					
Weight of Pot 4 with water	<input type="text"/>					
Fire Starting Materials	<input type="text"/>		<input type="text"/>		<input type="text"/>	
Average CO2 (ppm)		<input type="text"/>		<input type="text"/>		<input type="text"/>
Average CO (ppm)		<input type="text"/>		<input type="text"/>		<input type="text"/>
Average PM (ug/m3)		<input type="text"/>		<input type="text"/>		<input type="text"/>
Average Duct Temperature		<input type="text"/>		<input type="text"/>		<input type="text"/>

Fuente: Clean Cooking Alliance. <https://cleancookstoves.org/binary-data/DOCUMENT/file/000/000/399-1.pdf>. Consulta: 24 de febrero de 2018.

3.10. Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información

Esta sección describe la manera en que se tabuló y proceso la información.

3.10.1. Tabulación y ordenamiento

La información recolectada en la hoja de toma de datos, se ingresó al Excel (WBT 4.2.4 SPREADSHEET). Debido a que se realizarán 3 repeticiones se los datos se registrarán en las pestañas: Test-1, Test-2 y Test-3.

3.10.2. Procesamiento de la información

En el documento WBT 4.2.4 SPREADSHEET, se encuentra una pestaña donde se muestra varios parámetros, este trabajo necesita únicamente la eficiencia en cada fase, para cada variación del contenido de humedad de la biomasa.

Tabla IV. **Eficiencia energética**

Contenido Humedad (%)	Arranque en frío (%)	Arranque en caliente (%)	Hervir a fuego lento (%)
5			
10			
15			
20			
25			
30			

Fuente: elaboración propia.

Tabla V. **Emisiones y material particulado**

Contenido de Humedad	Arranque en frío		Arranque en caliente		Hervir a fuego lento	
	CO (ppm)	P M (ug/m3)	CO (ppm)	P M (ug/m3)	CO (ppm)	P M (ug/m3)
5						
10						
15						
20						
25						
30						

Fuente: elaboración propia.

3.11. Análisis estadístico

Se realizó la prueba WBT a una estufa ahorradora, variando en seis humedades la biomasa utilizada, cada una con tres repeticiones, por lo que se utilizó un análisis de varianza para cada uno de ellos.

Tabla VI. **Datos para el análisis de varianza**

Tratamiento	Repeticiones			
1	$X_{1,1}$	$X_{1,2}$	$X_{1,3}$	X_1 promedio
2	$X_{2,1}$	$X_{2,2}$	$X_{2,3}$	X_2 promedio
3	$X_{3,1}$	$X_{3,2}$	$X_{3,3}$	X_3 promedio
4	$X_{4,1}$	$X_{4,2}$	$X_{4,3}$	X_4 promedio
5	$X_{5,1}$	$X_{5,2}$	$X_{5,3}$	X_5 promedio
Promedio	X_1 promedio	X_2 promedio	X_3 promedio	X

Fuente: elaboración propia.

Donde:

$x_{i,j}$: Total de las observaciones bajo el i, j-ésimo test

\bar{x} : Promedio total de las observaciones bajo el i, j-ésimo test

$x_{a,b}$: Datos obtenidos para cada observación bajo cada test

3.11.1. Media muestral

Es el centro de gravedad de toda la distribución, representando a todos los valores observados. Es única y todos los valores intervienen en la distribución.

$$\bar{x} = \frac{\sum_I^N X_I}{N} \quad \text{Ecuación no.1 (referencia 11)}$$

Donde:

\bar{x} = media

$\sum_I^N X_I$ = sumatoria de valores

N = número de datos

3.11.2. Varianza

Mide la mayor o menor dispersión de los valores de la variable respecto a la media aritmética. Cuanto mayor sea la varianza mayor dispersión existirá y por tanto, menor representatividad tendrá la media aritmética.

$$\sigma^2 = \frac{\sum(x_i - \bar{x})^2}{N} \quad \text{Ecuación no.2 (referencia 11)}$$

Donde:

σ^2 = varianza

x = valor promedio

x_i = valor de la muestra

N = número de datos

3.11.3. Desviación estándar

Indica la dispersión de los valores para una misma medición con relación al valor promedio de una forma cuantitativa.

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum(x_i - \bar{x})^2}{N}} \text{ Ecuación no.3 (referencia 11)}$$

Donde:

σ = desviación estándar

\bar{x} = valor promedio

x_i = valor de la muestra

N = número de datos

3.11.4. Coeficiente de variación de Pearson

Indica la relación existente entre la desviación típica de una muestra y su media. Si comparamos la dispersión en varios conjuntos de observaciones tendrá menor dispersión aquella que tenga menor coeficiente de variación.

$$CV = \frac{\sigma}{\bar{x}} \text{ Ecuación no.4 (referencia 11)}$$

Donde:

CV = coeficiente de variación

σ = desviación estándar

x = valor promedio

3.12. Plan de análisis de los resultados

Debido a que los datos serán de carácter cuantitativos, se realizará un análisis de varianza (ANOVA) con una confiabilidad de 95 %.

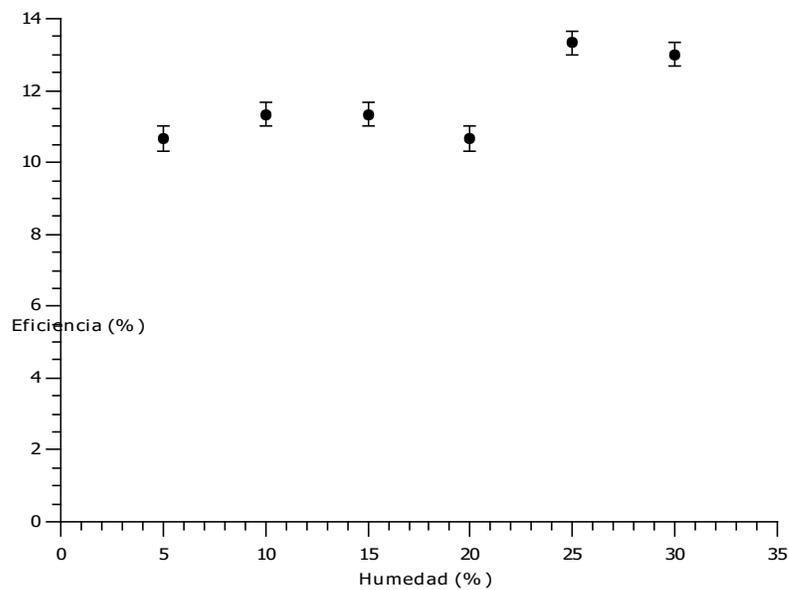
3.12.1. Programas a utilizar para el análisis de datos

- Microsoft Word 2013 y Microsoft Excel 2013
- WBT4.2.4SPREADSHEET

4. RESULTADOS

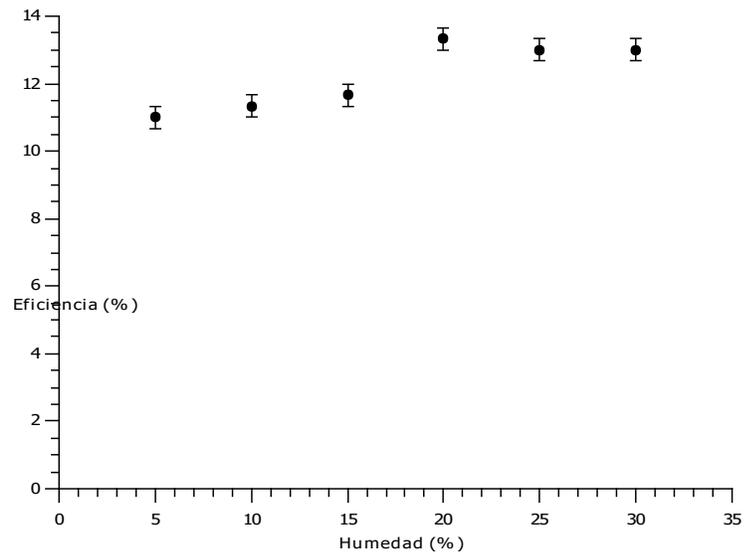
En las figuras 11 a la 13 se presenta el comportamiento obtenido de las eficiencias en las tres fases de trabajo respecto a la variación del contenido de humedad de la leña.

Figura 11. **Eficiencia vs humedad de leña en fase de inicio en frío**



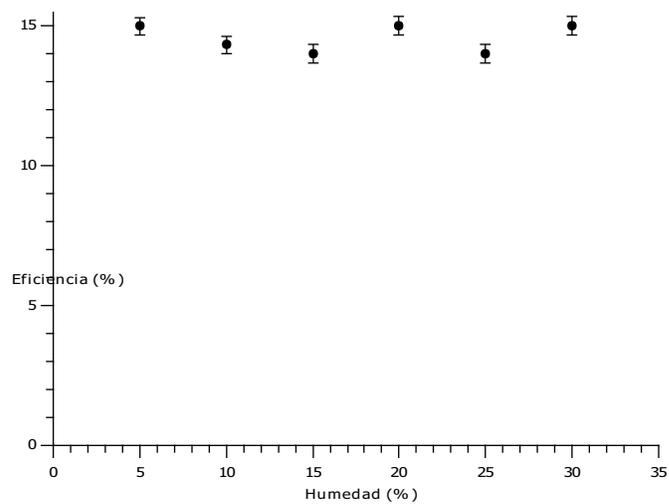
Fuente: elaboración propia, con base en datos calculados.

Figura 12. **Eficiencia vs humedad de leña en fase de inicio en caliente**



Fuente: elaboración propia, con base en datos calculados.

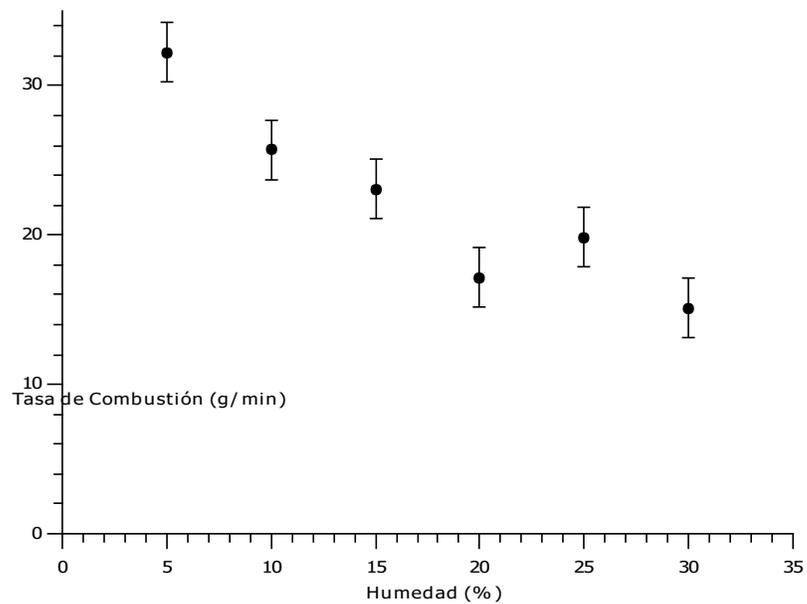
Figura 13. **Eficiencia vs Humedad de leña en fase de Fuego lento**



Fuente: elaboración propia, con base en datos calculados.

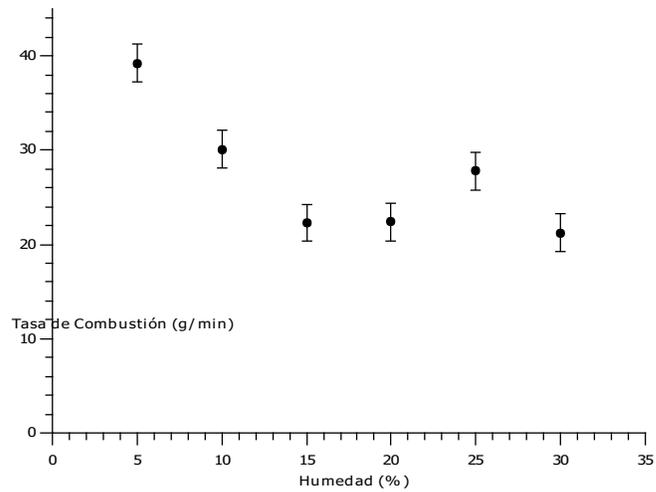
En las figuras de la 14 a la 16 se presenta el comportamiento de la tasa de combustión de la leña respecto a la variación del contenido de humedad de la leña para cada fase.

Figura 14. **Tasa de combustión vs humedad de leña en fase de inicio en frío**



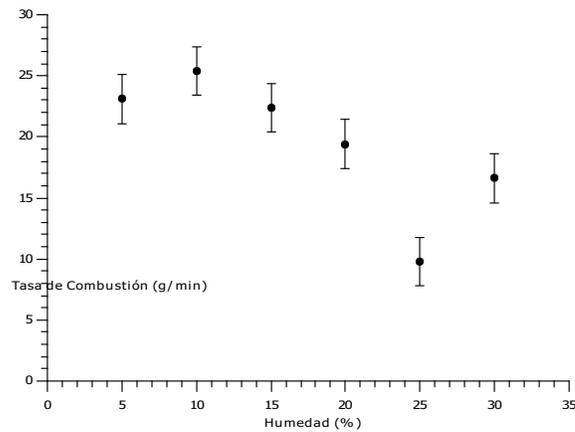
Fuente: elaboración propia, con base en datos calculados.

Figura 15. **Tasa de combustión vs humedad de leña en fase de inicio en caliente**



Fuente: elaboración propia, con base en datos calculados.

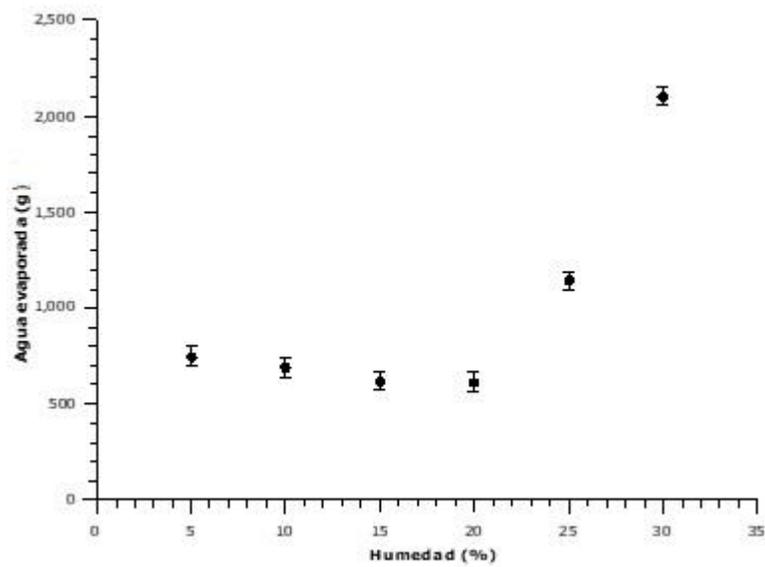
Figura 16. **Tasa de combustión vs humedad de leña en fase de fuego lento**



Fuente: elaboración propia, con base en datos calculados.

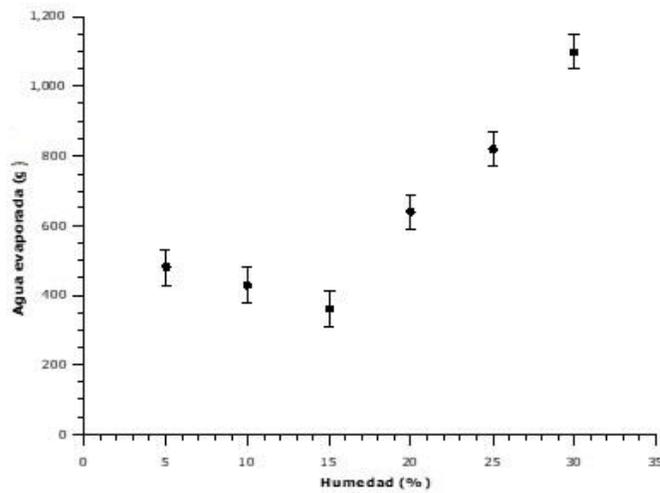
Se presenta en las figuras de la 17 a la 19 el comportamiento del agua evaporada respecto a la variación del contenido de humedad de la leña para cada fase.

Figura 17. **Agua evaporada vs humedad de leña en fase de inicio en frío**



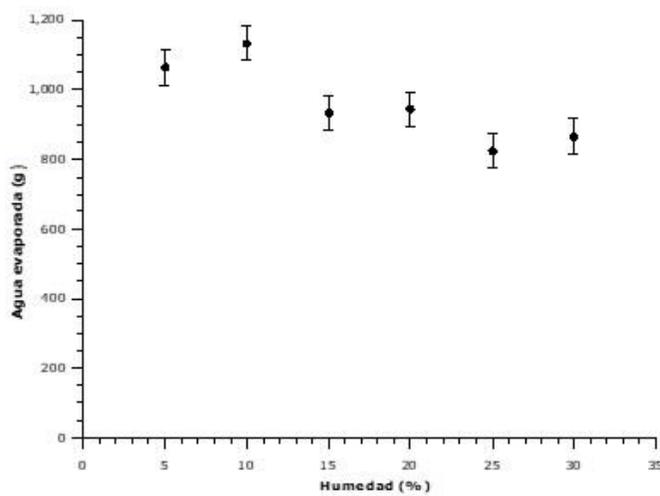
Fuente: elaboración propia, con base en datos calculados.

Figura 18. **Agua evaporada vs humedad de leña en fase de inicio en caliente**



Fuente: elaboración propia, con base en datos calculados.

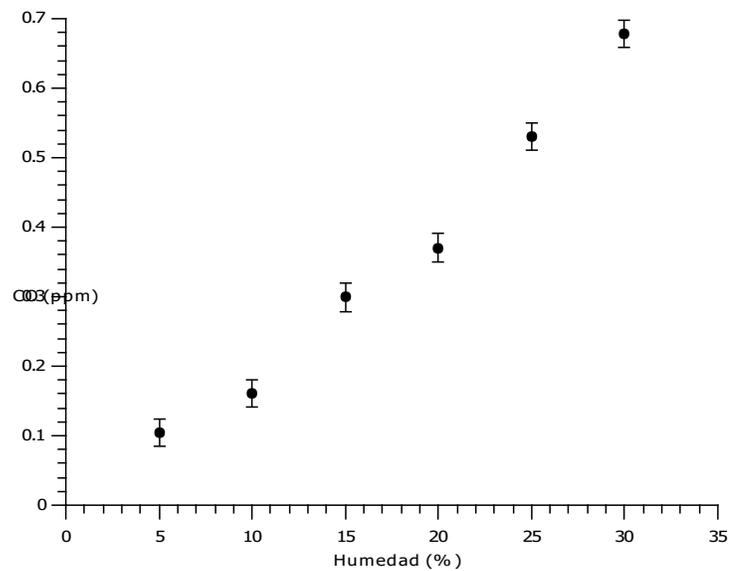
Figura 19. **Agua evaporada vs humedad de leña en fase de fuego lento**



Fuente: elaboración propia, con base en datos calculados.

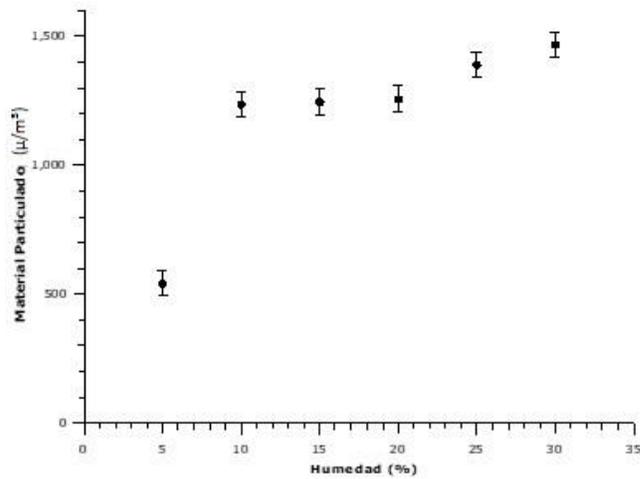
Se presenta en las figuras de la 20 a la 25 el comportamiento de las Emisiones Intradomiciliarias respecto a la variación de humedad del contenido de la leña para cada una de las fases de trabajo.

Figura 20. **Emisiones de CO vs humedad de leña en fase de inicio en frío**



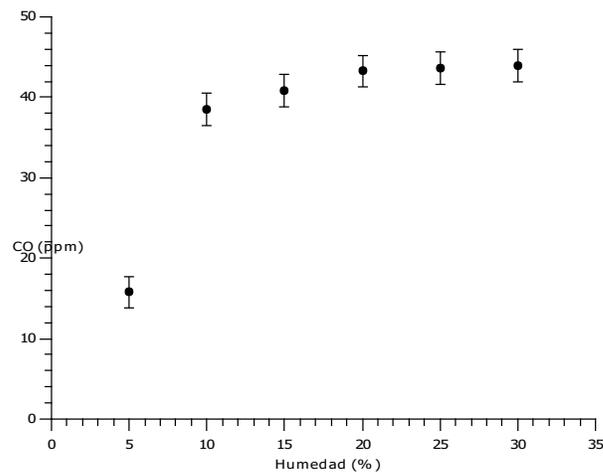
Fuente: elaboración propia, con base en datos calculados.

Figura 21. **Emisiones de material particulado vs humedad de leña en fase de inicio en frío**



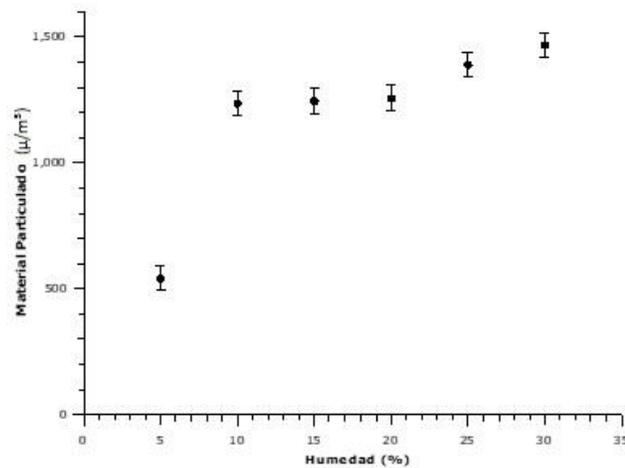
Fuente: elaboración propia, con base en datos calculados.

Figura 22. **Emisiones de CO vs humedad de leña en fase de inicio en caliente**



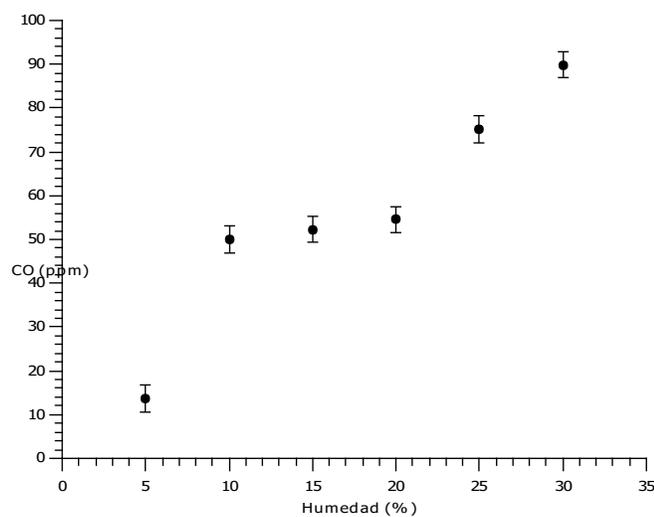
Fuente: elaboración propia, con base en datos calculados.

Figura 23. **Emisiones de material particulado vs humedad de leña en fase de inicio en caliente**



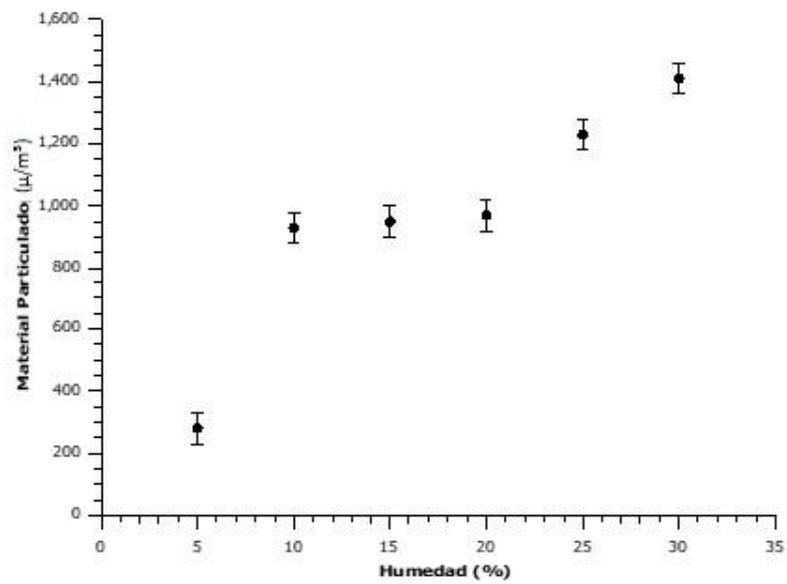
Fuente: elaboración propia, con base a datos calculados.

Figura 24. **Emisiones de CO vs humedad de leña en fase de fuego lento**



Fuente: elaboración propia, con base a datos calculados.

Figura 25. **Emisiones de material particulado vs humedad de la leña en fase de fuego lento**



Fuente: elaboración propia, con base en datos calculados.

5. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

La prueba de ebullición de agua (WBT) realizada con la estufa ahorradora de cámara abierta consistió en llevar 5kg de agua a su punto de ebullición mediante la combustión de una masa inicial establecida por el protocolo de 4kg de leña de Encino Blanco, dicha prueba consta de tres fases: inicio en frío, inicio en caliente y ebullición a fuego lento. La prueba se realizó variando el contenido de humedad de la leña de encino blanco utilizada, los contenidos de humedad fueron 5 %,10 %,15 %,20 %, 25 % y 30 %.

Con los datos obtenidos se determinó la eficiencia energética utilizando la energía aprovechada por la estufa sobre la energía suministrada por la leña, la tasa de combustión utilizando la cantidad total de leña quemada sobre el tiempo que tardó en llegar al punto de ebullición, el agua evaporada mediante la masa de agua inicial sobre la masa de agua al final y las emisiones de monóxido de carbono y material particulado, para cada una de las tres fases mencionadas, por lo que los resultados obtenidos en esta sección se analizaron por cada fase por separado.

- Eficiencia energética

En la figura 11 se puede observar el efecto que tiene la humedad de la leña sobre la eficiencia de la estufa en la fase de inicio en frío; el valor de la eficiencia se mantiene relativamente constante entre las humedades del 5 % al 20 %, a partir del 25 % de humedad se nota un leve aumento en valor de la eficiencia, mostrando un valor cercano en la humedad posterior de 30 %, por lo cual se podría deducir que para la estufa utilizada en este experimento, con la

leña de encino blanco se presentan eficiencias levemente mayores con humedades por encima del 25 % para la fase de inicio en frío.

Seguidamente se tiene la figura 12, la cual presenta el efecto que tiene la humedad de la leña sobre la eficiencia de la estufa en la fase de inicio en caliente, se puede observar un comportamiento similar a la eficiencia de la fase anterior, se tienen valores de eficiencia relativamente constantes en las humedades de 5 % a 15 %, en ésta gráfica se puede observar que a partir de la humedad del 20 % se da un leve aumento en el valor de la eficiencia de la estufa para la fase en caliente, y sigue con valores similares hasta una humedad del 30 %, por lo cual se deduce que de la misma manera para esta estufa utilizada con leña de encino blanco, la eficiencia en la fase de inicio en caliente aumenta levemente a partir de una humedad del 20 %.

Por último, la figura 13 presenta el efecto que tiene la humedad de la leña en la eficiencia de la estufa en la fase de fuego lento, se observa que en esta fase la eficiencia no presenta un cambio significativo en sus valores debido al cambio de la humedad, pues desde la humedad más baja del 5 % hasta la más alta del 30 %, el valor de la eficiencia se mantiene entre los valores del 14 % y 15 %, por lo que se deduce de la figura que en la fase de fuego lento para ésta estufa al variar el contenido de humedad de la leña de encino blanco, la eficiencia permanecerá en valores relativamente constantes.

De las tres gráficas se puede determinar que en las fases de inicio en frío e inicio en caliente a partir de cierta humedad si se brinda un aporte pequeño en la eficiencia de la estufa, mientras que para la fase de fuego lento no, pues la estufa en esa fase ya se encuentra caliente y ha llegado a un equilibrio térmico, debido a que se ha alcanzado la temperatura máxima a la que llegará tanto la

estufa como el agua. Esto implica que la humedad no brinde un efecto significativo en la eficiencia de dicha fase.

- Tasa de combustión

Se puede observar en la figura 14 la relación entre la tasa de combustión y la humedad de la leña para la fase de inicio en frío, la tendencia que presentan los puntos es descendente, lo que quiere decir que a mayor contenido de humedad habrá una tasa de combustión más baja, lo que quiere decir que la leña se quema más lento, puesto a que se encuentra más humedad; una tasa de combustión más baja demuestra un aprovechamiento mayor de la energía disponible que brinda la leña puesto que de acuerdo a las eficiencias determinadas a mayores humedades la eficiencia de la fase en frío presenta un aumento leve en su valor.

De igual manera, para la gráfica 15 se puede observar el efecto de la humedad sobre la tasa de combustión para la fase de inicio en caliente, se observa que a mayor contenido de humedad en la leña, la tasa de combustión es más baja, la leña en la fase de inicio en caliente se quema más lento que con menor contenido de humedad, lo que hace que la prueba dure más tiempo pero que la energía sea aprovechada de mejor manera, puesto que de igual manera que en la fase en frío, la eficiencia de la estufa es levemente mayor a contenidos de humedad mayores del 20 %, la prueba tarda unos minutos más pero aprovecha un poco más el poder calorífico disponible de la leña.

Por último, la figura 16 presenta el efecto de la humedad sobre la tasa de combustión para la fase de fuego lento. El comportamiento sigue siendo descendente conforme se va aumentando el contenido de humedad de la leña, es decir que para las tres fases de prueba utilizando esta estufa, mientras más

húmeda se encuentre la leña de encino blanco, más bajas serán las tasas de combustión, por lo que las pruebas serán un poco más lentas pero relativamente más eficientes.

- Masa de agua evaporada

En la figura 17 se observa el efecto de la humedad de la leña en el agua evaporada para la fase de inicio en frío, se observan valores cercanos en las humedades de 5 % a 20 %, a partir de una humedad del 25 % y de 30 % se observa que la cantidad de agua evaporada es significativamente mayor, lo cual concuerda con las tasas de combustión analizadas en las previas gráficas, es decir que las tasas de combustión son más lentas en humedades mayores por tanto el proceso se vuelve más largo, y de esa manera el agua pasa un tiempo prolongado al fuego por lo que habrá mayor tiempo disponible para la evaporación de masa de agua.

Posteriormente se observa en la figura 18 el efecto de la humedad de la leña sobre la masa de agua evaporada para la fase de inicio en caliente, de igual manera se puede observar un aumento en la masa de agua evaporada a partir de la humedad del 20 % hasta llegar al 30 %, lo que indica que en la fase de inicio en caliente se evapora mayor cantidad de agua a mayores humedades en la leña, esto debido a que las tasas de combustión para esta fase disminuyen cuando aumenta la humedad de la leña, por lo tanto el proceso se hace más lento dando lugar a un periodo más extenso de evaporación de agua.

Finalmente se observa en la figura 19 el efecto de la humedad de la leña sobre la masa de agua evaporada para la fase de fuego lento, como se puede observar el cambio en esta fase no es tan definido como en las otras dos, pues los valores de agua evaporada son regularmente similares. Si bien las tasas de

combustión de leña son menores a mayores humedades para esta fase, el efecto no es tan notorio como en las otras dos fases, pues independientemente de la tasa de combustión, la fase de fuego lento dura siempre 45 minutos, sin importar la humedad a la que se trabaja; es decir se mantiene el agua en el fuego la misma cantidad de tiempo para todas las humedades; por lo tanto, los valores de masa de agua evaporada no son tan variantes en esta fase.

Es de considerar que el total de la energía administrada por la leña, naturalmente no es aprovechada en su totalidad para la evaporación del agua de las ollas, se debe tomar en cuenta que mucha de la energía disponible del combustible se disipa como calor hacia el ambiente; otra porción de la energía se pierde por fenómenos de transferencia con el ambiente, como el de secado, debido a que corre aire con cierta humedad por la estufa y la superficie de la misma se encuentra a altas temperaturas, también la energía necesaria para calentar la plancha de la estufa en la fase de inicio en frío requiere de energía para su efecto. Dichas pérdidas de energía sean unas considerables y otras despreciables afectan en la eficiencia con la que se aprovecha el calor en la estufa para la evaporación de agua.

- Emisiones de CO y material particulado

En las figuras 20 y 21 se muestra la relación de las emisiones de CO y material particulado en relación a la humedad de la leña para la fase de inicio en frío; se ve que el comportamiento de las emisiones va en aumento de acuerdo al aumento de la humedad de la leña, esto quiere decir que la calidad de la combustión va disminuyendo de acuerdo al aumento de la humedad; por lo tanto, a menores humedades se tienen mayor calidad de combustión. El mismo comportamiento ascendente muestra las gráficas 22 y 23, las cuales son las emisiones de CO y material particulado para las fases de inicio en caliente,

por lo que de igual manera la calidad de la combustión se ve afectada por el contenido de humedad en la leña; a mayor contenido de humedad, menor será la calidad de la combustión.

Por último, las figuras 24 y 25 muestran el comportamiento de las emisiones de CO y material particulado en función de la humedad para la fase de fuego lento, en estas se puede observar que existe una fase de transición entre las humedades de 10 %, 15 % y 20 %, pues presentan valores de emisiones cercanos, sin embargo al aumentar la humedad en valores o iguales al 25 % la calidad de la combustión vuelve a disminuir, pues las emisiones son más altas.

Todos los datos medidos en la estufa Aller de cámara abierta fueron obtenidos a condiciones de humedad relativa del aire, comprendidos entre el rango de (55 %-80 %), rangos de temperatura de ambiente comprendidos entre (20-25)°C y a una presión de aproximadamente 0,84 atmósferas a la altura de la ciudad capital.

CONCLUSIONES

1. La eficiencia energética de la estufa ahorradora de cámara abierta en la fase de inicio en frío, no muestra un cambio significativo respecto a la variación del contenido de humedad de la leña; sin embargo, se observa un ligero aumento en los valores de la eficiencia a partir de humedades mayores al 25 %.
2. La eficiencia energética de la estufa ahorradora de cámara abierta en la fase de inicio en caliente, no muestra un cambio significativo respecto a la variación del contenido de humedad de la leña; sin embargo, se observa un ligero aumento en los valores de eficiencia a partir de humedades mayores al 20 %.
3. La eficiencia energética de la estufa ahorradora de cámara abierta en la fase de fuego lento no muestra un cambio significativo respecto a la variación del contenido de humedad de la leña. No se observó una tendencia de aumento a partir de ninguna de las humedades medidas.
4. La tasa de combustión de la leña disminuye conforme se aumenta su contenido de humedad; por lo tanto, a mayores humedades de la leña, la prueba tarda tiempos más prolongados que a humedades menores.
5. Las emisiones de monóxido de carbono y material particulado muestran un cambio significativo por el efecto de la variación del contenido de humedad de la leña; a mayores humedades habrá mayores emisiones de CO y material particulado, para las tres fases de la prueba.

6. La masa de agua evaporada muestra un cambio significativo por el efecto de la variación del contenido de humedad para las fases de inicio en frío e inicio en caliente; a mayores humedades mayor será el agua evaporada, mientras que en la fase de fuego lento el agua evaporada no se ve afectada por la variación de humedad de la leña.

7. Las eficiencias para la fase de inicio en frío e inicio en caliente muestran un aumento leve a partir de ciertas humedades, mientras que la eficiencia para la fase de fuego lento no muestra cambio significativo respecto a la variación de humedad, debido a que en esta fase la estufa ya se encuentra caliente y a equilibrio térmico con el ambiente y el tiempo de la fase es siempre el mismo, independientemente de la humedad de la leña.

RECOMENDACIONES

1. Almacenar la leña en un área seca y cerrada en la cual no se vea afectada su humedad debido al ambiente.
2. Efectuar los ensayos en un área donde el viento pueda ser controlado, ya que puede afectar la realización de la prueba.
3. Realizar las pruebas con humedades relativas del ambiente, menores al 60 % para que el iniciar y mantener el fuego no se dificulte.
4. Asegurarse que las ollas no estén oxidadas, no tengan agujeros, y no tengan algún obstáculo físico para la transferencia de calor entre la plancha y la olla.
5. Mantener un constante fuego ardiente con llama intensa para que la transferencia de calor sea relativamente constante.
6. No suministrar aire al fuego para avivar la llama, por ningún medio, ni bucal ni mediante algún soplador, para evitar la generación de humo y afectar las emisiones de la combustión.
7. Realizar el mismo análisis con Leña de pino, pues es otra especie de leña de las más utilizadas a nivel nacional.
8. Utilizar rajas de leño de diámetros comprendidos entre 2 cm a 4 cm y que no tengan cáscara.

BIBLIOGRAFÍA

1. BLANCO, Salvador. CÁRDENAS Beatriz y CRUZ Jhepté. *Estudio comparativo de estufas mejoradas para sustentar un Programa de Intervención Masiva en México Informe Final*. México: Instituto Nacional de Ecología, 2012. 61 p.
2. BRIZUELA, Eduardo. 67.30 *Combustión*. [en línea]. <<http://www.celing.net/ingenieria/=/c1220080205.pdf>> [Consulta: febrero de 2018].
3. CATIE. *Estufas ahorradoras de leña para el hogar rural. Validación y Construcción*, Costa Rica. [en línea]. <<http://orton.catie.ac.cr/repdoc/A6133e/A6133e.pdf>> [Consulta: febrero de 2018].
4. DÍAZ JIMÉNEZ, Rodolfo. BERRUETA SORIANO, Víctor y MASERA CERUTTI, Omar. *Estufas de Leña. Cuaderno Temático No. 3*. México: Red Mexicana de Bioingeniería, AC., 2011. 36 p.
5. Global Alliance For Clean Cookstoves. *WBT PROTOCOL 4.2.3 ESPAÑOL*. [en línea]. <<http://cleancookstoves.org/technology-and-fuels/testing/protocols.html>> [Consulta: febrero de 2018].

6. _____ .*WBT PROTOCOL 4.2.3 ESPAÑOL*. [en línea]. <<http://cleancookstoves.org/technology-and-fuels/testing/protocols.html>>. [Consulta, febrero de 2018].
7. _____ .*WBT PROTOCOL 4.2.3 ESPAÑOL*. [en línea]. <<http://cleancookstoves.org/technology-and-fuels/testing/protocols.html>>. [Consulta: febrero de 2018].
8. Instituto Nacional de Bosques. *Estrategia nacional de producción Sostenible y Uso eficiente de la leña 2013-2014*. Serie Institucional ES-002(2015) Guatemala, 2015. 43 p.
9. Ministerio de Energía y Minas. *Cumplimiento Cláusula Octava del Contrato Número DGE-05-2014*. [en línea]. <<http://www.mem.gob.gt/wp-content/uploads/2015/06/DGE-05-2014-HUGO-ROLANDO-TENI-POP3.pdf>> [Consulta: febrero de 2018].
10. SMITH, Van Ness. *Introducción a la termodinámica en Ingeniería Química*. Iztapalapa, México: McGraw-Hill, 1997. 845 p.
11. RONALD Walpole, RAYMOND Myers. *Probabilidad y estadística para ingeniería y ciencias*. 9a ed. México: Pearson Educación, 2012. 816 p. ISBN: 978-607-32-1417-9.

APÉNDICES

Apéndice 1. Datos calculados

Toma de datos de prueba al 5% de humedad de leña

TEST #7	Units	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	
		data	label	data	label	data	label	data	label	data	label	data	label
Time (in 24 hour form)	hr:min	9:10	t _{ci}	10:38	t _{cr}	10:50	t _{hi}	11:39	t _{hr}	11:41	t _{si}	12:26	t _{sr}
Weight of fuel	g	4000	f _{ci}	150	f _{cr}	4000	f _{hi}	1000	f _{hr}	1000	f _{si}	-	f _{sr}
Water temperature, Pot # 1	°C	20.8	T1 _{ci}	85.4	T1 _{cr}	25.0	T1 _{hi}	83.0	T1 _{hr}	83.0	T1 _{si}	93.0	T1 _{sr}
Water temperature, Pot # 2	°C	21.6	T2 _{ci}	93.6	T2 _{cr}	24.2	T2 _{hi}	94.6	T2 _{hr}	94.6	T2 _{si}	94.6	T2 _{sr}
Water temperature, Pot # 3	°C		T3 _{ci}		T3 _{cr}		T3 _{hi}		T3 _{hr}		T3 _{si}		T3 _{sr}
Water temperature, Pot # 4	°C		T4 _{ci}		T4 _{cr}		T4 _{hi}		T4 _{hr}		T4 _{si}		T4 _{sr}
Weight of Pot # 1 with water	g	5370	P1 _{ci}	4790	P1 _{cr}	5370	P1 _{hi}	5220	P1 _{hr}	5220	P1 _{si}	4720	P1 _{sr}
Weight of Pot # 2 with water	g	5370	P2 _{ci}	4590	P2 _{cr}	5370	P2 _{hi}	5090	P2 _{hr}	5090	P2 _{si}	4570	P2 _{sr}
Weight of Pot # 3 with water	g		P3 _{ci}		P3 _{cr}		P3 _{hi}		P3 _{hr}		P3 _{si}		P3 _{sr}
Weight of Pot # 4 with water	g		P4 _{ci}		P4 _{cr}		P4 _{hi}		P4 _{hr}		P4 _{si}		P4 _{sr}
Fire-starting materials (if any)	--	50				50							
Weight of charcoal+container	g			820	c _c			820	c _h			850	c _s

Fuente: elaboración propia.

Toma de datos de prueba al 10% de humedad de leña

TEST #1	Units	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	
		data	label	data	label	data	label	data	label	data	label	data	label
Time (in 24 hour form)	hr:min	9:32	t _{ci}	10:56	t _{cr}	11:00	t _{hi}	11:54	t _{hr}	11:55	t _{si}	12:35	t _{sr}
Weight of fuel	g	4000	f _{ci}	1080	f _{cr}	4000	f _{hi}	1420	f _{hr}	1420	f _{si}	-	f _{sr}
Water temperature, Pot # 1	°C	19.6	T1 _{ci}	73.1	T1 _{cr}	25.6	T1 _{hi}	74.2	T1 _{hr}	74.2	T1 _{si}	88.1	T1 _{sr}
Water temperature, Pot # 2	°C	19.8	T2 _{ci}	92.9	T2 _{cr}	23.0	T2 _{hi}	91.9	T2 _{hr}	91.9	T2 _{si}	92.9	T2 _{sr}
Water temperature, Pot # 3	°C		T3 _{ci}		T3 _{cr}		T3 _{hi}		T3 _{hr}		T3 _{si}		T3 _{sr}
Water temperature, Pot # 4	°C		T4 _{ci}		T4 _{cr}		T4 _{hi}		T4 _{hr}		T4 _{si}		T4 _{sr}
Weight of Pot # 1 with water	g	5370	P1 _{ci}	5050	P1 _{cr}	5370	P1 _{hi}	5190	P1 _{hr}	5190	P1 _{si}	4820	P1 _{sr}
Weight of Pot # 2 with water	g	5370	P2 _{ci}	4800	P2 _{cr}	5370	P2 _{hi}	5170	P2 _{hr}	5170	P2 _{si}	4490	P2 _{sr}
Weight of Pot # 3 with water	g		P3 _{ci}		P3 _{cr}		P3 _{hi}		P3 _{hr}		P3 _{si}		P3 _{sr}
Weight of Pot # 4 with water	g		P4 _{ci}		P4 _{cr}		P4 _{hi}		P4 _{hr}		P4 _{si}		P4 _{sr}
Fire-starting materials (if any)	--	50				50							
Weight of charcoal+container	g			800	c _c			800	c _h			900	c _s

Fuente: elaboración propia.

Continuación apéndice 1

Toma de datos de prueba al 15% de humedad en la leña

TEST #1	Units	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	
		data	label	data	label	data	label	data	label	data	label	data	label
Time (in 24 hour form)	hr:min	9:00	t _{ci}	11:20	t _{cf}	11:20	t _{hi}	12:32	t _{hr}	12:32	t _{si}	13:17	t _{sf}
Weight of fuel	g	4000	f _{ci}	700	f _{cf}	4170	f _{hi}	1120	f _{hr}	1120	f _{si}	-	f _{sf}
Water temperature, Pot # 1	°C	19.4	T1 _{ci}	79.8	T1 _{cf}	21.5	T1 _{hi}	81.7	T1 _{hr}	81.7	T1 _{si}	87.2	T1 _{sf}
Water temperature, Pot # 2	°C	20.1	T2 _{ci}	90.0	T2 _{cf}	20.7	T2 _{hi}	91.9	T2 _{hr}	91.9	T2 _{si}	89.0	T2 _{sf}
Water temperature, Pot # 3	°C		T3 _{ci}		T3 _{cf}		T3 _{hi}		T3 _{hr}		T3 _{si}		T3 _{sf}
Water temperature, Pot # 4	°C		T4 _{ci}		T4 _{cf}		T4 _{hi}		T4 _{hr}		T4 _{si}		T4 _{sf}
Weight of Pot # 1 with water	g	5370	P1 _{ci}	5120	P1 _{cf}	5370	P1 _{hi}	5120	P1 _{hr}	5120	P1 _{si}	4690	P1 _{sf}
Weight of Pot # 2 with water	g	5370	P2 _{ci}	5030	P2 _{cf}	5370	P2 _{hi}	5030	P2 _{hr}	5030	P2 _{si}	4400	P2 _{sf}
Weight of Pot # 3 with water	g		P3 _{ci}		P3 _{cf}		P3 _{hi}		P3 _{hr}		P3 _{si}		P3 _{sf}
Weight of Pot # 4 with water	g		P4 _{ci}		P4 _{cf}		P4 _{hi}		P4 _{hr}		P4 _{si}		P4 _{sf}
Fire-starting materials (if any)	-	50				50							
Weight of charcoal+container	g			750	c _c			750	c _h			730	c _s

Fuente: elaboración propia.

Toma de datos de prueba al 20% de humedad en la leña

TEST #1	Units	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	
		data	label	data	label	data	label	data	label	data	label	data	label
Time (in 24 hour form)	hr:min	9:00	t _{ci}	11:20	t _{cf}	11:20	t _{hi}	12:32	t _{hr}	12:32	t _{si}	13:17	t _{sf}
Weight of fuel	g	4000	f _{ci}	700	f _{cf}	4170	f _{hi}	1120	f _{hr}	1120	f _{si}	-	f _{sf}
Water temperature, Pot # 1	°C	19.4	T1 _{ci}	79.8	T1 _{cf}	21.5	T1 _{hi}	81.7	T1 _{hr}	81.7	T1 _{si}	87.2	T1 _{sf}
Water temperature, Pot # 2	°C	20.1	T2 _{ci}	90.0	T2 _{cf}	20.7	T2 _{hi}	91.9	T2 _{hr}	91.9	T2 _{si}	89.0	T2 _{sf}
Water temperature, Pot # 3	°C		T3 _{ci}		T3 _{cf}		T3 _{hi}		T3 _{hr}		T3 _{si}		T3 _{sf}
Water temperature, Pot # 4	°C		T4 _{ci}		T4 _{cf}		T4 _{hi}		T4 _{hr}		T4 _{si}		T4 _{sf}
Weight of Pot # 1 with water	g	5370	P1 _{ci}	5120	P1 _{cf}	5370	P1 _{hi}	5120	P1 _{hr}	5120	P1 _{si}	4690	P1 _{sf}
Weight of Pot # 2 with water	g	5370	P2 _{ci}	5030	P2 _{cf}	5370	P2 _{hi}	5030	P2 _{hr}	5030	P2 _{si}	4400	P2 _{sf}
Weight of Pot # 3 with water	g		P3 _{ci}		P3 _{cf}		P3 _{hi}		P3 _{hr}		P3 _{si}		P3 _{sf}
Weight of Pot # 4 with water	g		P4 _{ci}		P4 _{cf}		P4 _{hi}		P4 _{hr}		P4 _{si}		P4 _{sf}
Fire-starting materials (if any)	-	50				50							
Weight of charcoal+container	g			750	c _c			750	c _h			730	c _s

Fuente: elaboración propia.

Continuación apéndice 1.

Toma de datos de prueba al 25% de humedad en la leña

TEST #5		COLD START HIGH POWER				HOT START HIGH POWER (OPTIONAL)				SIMMER TEST			
Measurements	Units	Start		Finish: when Pot #1 boils		Start		Finish: when Pot #1 boils		Start		Finish: 45 min	
		data	label	data	label	data	label	data	label	data	label	data	label
Time (in 24 hour form)	hr:min	9:00	t _{ci}	10:45	t _{cf}	10:55	t _{hi}	11:55	t _{hf}	11:55	t _{si}	12:40	t _{sf}
Weight of fuel	g	4000	f _{ci}	600	f _{cf}	4000	f _{hi}	700	f _{hf}	700	f _{si}		f _{sf}
Water temperature, Pot # 1	°C	20.0	T1 _{ci}	74.2	T1 _{cf}	21.3	T1 _{hi}	72.0	T1 _{hf}	72.0	T1 _{si}	75.0	T1 _{sf}
Water temperature, Pot # 2	°C	21.0	T2 _{ci}	94.0	T2 _{cf}	21.6	T2 _{hi}	93.5	T2 _{hf}	93.5	T2 _{si}	93.5	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	5370	P1 _{ci}	5180	P1 _{cf}	5370	P1 _{hi}	5160	P1 _{hf}	5160	P1 _{si}	5060	P1 _{sf}
Weight of Pot # 2 with water	g	5370	P2 _{ci}	4900	P2 _{cf}	5370	P2 _{hi}	4840	P2 _{hf}	4840	P2 _{si}	4500	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)	--	50				50							
Weight of charcoal+container	g			790	c _c			790	c _h			830	c _s

Fuente: elaboración propia.

Toma de datos de prueba al 30% de humedad en la leña

TEST #7		COLD START HIGH POWER				HOT START HIGH POWER (OPTIONAL)				SIMMER TEST			
Measurements	Units	Start		Finish: when Pot #1 boils		Start		Finish: when Pot #1 boils		Start		Finish: 45 min	
		data	label	data	label	data	label	data	label	data	label	data	label
Time (in 24 hour form)	hr:min	10:00	t _{ci}	14:02	t _{cf}	14:02	t _{hi}	16:18	t _{hf}	16:20	t _{si}	17:05	t _{sf}
Weight of fuel	g	5270	f _{ci}	290	f _{cf}	4980	f _{hi}	212	f _{hf}	2120	f _{si}	850	f _{sf}
Water temperature, Pot # 1	°C	20.3	T1 _{ci}	91.0	T1 _{cf}	21.6	T1 _{hi}	85.0	T1 _{hf}	84.0	T1 _{si}	84.5	T1 _{sf}
Water temperature, Pot # 2	°C	19.8	T2 _{ci}	84.0	T2 _{cf}	23.4	T2 _{hi}	91.0	T2 _{hf}	85.0	T2 _{si}	81.0	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	5370	P1 _{ci}	4050	P1 _{cf}	5370	P1 _{hi}	4410	P1 _{hf}	4410	P1 _{si}	3960	P1 _{sf}
Weight of Pot # 2 with water	g	5370	P2 _{ci}	4340	P2 _{cf}	5370	P2 _{hi}	4530	P2 _{hf}	4530	P2 _{si}	4130	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)	--	50				50							
Weight of charcoal+container	g			780	c _c			780	c _h			820	c _s

Fuente: elaboración propia.

Continuación apéndice 1.

Resultados de prueba a 5% de humedad en leña

Calculations/Results	Units	COLD START		HOT START		SIMMER TEST (CALCULATIONS DIFFER FROM HIGH POWER TEST)			
		data	label	data	label	Calculations/Results	Units	data	label
Fuel consumed (moist)	g	3,750	f _{cm}	2,900	f _{hm}	Fuel consumed during the simmer phase (n	g	1,100	f _{sm}
Net change in char during test	g	370	ΔC _c	370	ΔC _h	Net change in char during test phase	g	40	ΔC _s
Equivalent dry fuel consumed	g	2915	f _{cd}	2114	f _{hd}	Equivalent dry fuel consumed	g	970	f _{sd}
Water vaporized from all pots	g	1,230	w _{cv}	570	w _{hv}	Water vaporized	g	1,050	w _{sv}
Effective mass of water boiled	g	8,160	w _{cr}	8,696	w _{hr}	Water remaining at end - All Pots	g	8,350	w _{sr}
Time to boil Pot # 1	min	88	Δt _c	60	Δt _h	Time of simmer (should be ~45 minutes)	min	45	Δt _s
Temp-corr time to boil Pot # 1	min	88	Δt _c ^T	63	Δt _h ^T	Thermal efficiency	%	15%	h _s
Thermal efficiency	%	11%	h _c	11%	h _h	Burning rate	g/min	21.6	r _{so}
Burning rate	g/min	33.1	r _{co}	35.2	r _{ho}	Specific fuel consumption	g/liter remainin	116.2	SC _s
Specific fuel consumption	g/liter boiled	357.2384698	SC _c	243.0619	SC _h	Firepower	watts	6321	FP _s
Temp-corr sp consumption	g/liter	357.2384698	SC _c ^T	256.7555	SC _h ^T	Turn down ratio	--	1.54	TDR
Temp-corr sp energy consumpt.	kJ/liter	6,286	SE _c ^T	4,518	SE _h ^T	Specific Energy Consumption	kJ/liter	2,044	SE _s
Firepower	watts	9714	FP _c	10331	FP _h	Fuel Benchmark to Complete 5L WBT	g	2,116	BF
						Energy Benchmark to Complete 5L WBT	kJ	37,229	BE

Fuente: elaboración propia.

Resultados de prueba a 10% de humedad en la leña

Calculations/Results	Units	COLD START		HOT START		SIMMER TEST (CALCULATIONS DIFFER FROM HIGH POWER TEST)			
		data	label	data	label	Calculations/Results	Units	data	label
Fuel consumed (moist)	g	2,920	f _{cm}	2,580	f _{hm}	Fuel consumed during the simmer phase (n	g	1,420	f _{sm}
Net change in char during test	g	360	ΔC _c	360	ΔC _h	Net change in char during test phase	g	100	ΔC _s
Equivalent dry fuel consumed	g	1982	f _{cd}	1681.051	f _{hd}	Equivalent dry fuel consumed	g	1090	f _{sd}
Water vaporized from all pots	g	890	w _{cv}	380	w _{hv}	Water vaporized	g	1,050	w _{sv}
Effective mass of water boiled	g	7,730	w _{cr}	8,083	w _{hr}	Water remaining at end - All Pots	g	8,504	w _{sr}
Time to boil Pot # 1	min	84	Δt _c	54	Δt _h	Time of simmer (should be ~45 minutes)	min	40	Δt _s
Temp-corr time to boil Pot # 1	min	85	Δt _c ^T	59	Δt _h ^T	Thermal efficiency	%	14%	h _s
Thermal efficiency	%	13%	h _c	11%	h _h	Burning rate	g/min	27.2	r _{so}
Burning rate	g/min	23.6	r _{co}	31.1	r _{ho}	Specific fuel consumption	g/liter remainin	128.1	SC _s
Specific fuel consumption	g/liter boiled	256	SC _c	207.9797	SC _h	Firepower	watts	7990	FP _s
Temp-corr sp consumption	g/liter	258.4990031	SC _c ^T	228.048	SC _h ^T	Turn down ratio	--	0.87	TDR
Temp-corr sp energy consumpt.	kJ/liter	4,549	SE _c ^T	4,013	SE _h ^T	Specific Energy Consumption	kJ/liter	2,255	SE _s
Firepower	watts	6920	FP _c	9130	FP _h	Fuel Benchmark to Complete 5L WBT	g	1,857	BF
						Energy Benchmark to Complete 5L WBT	kJ	32,677	BE

Fuente: elaboración propia.

Continuación apéndice 1.

Resultados de prueba al 15% de humedad en la leña

Calculations/Results	Units	COLD START		HOT START		SIMMER TEST (CALCULATIONS DIFFER FROM HIGH POWER TEST)			
		data	label	data	label	Calculations/Results	Units	data	label
Fuel consumed (moist)	g	3,900	f _{cm}	2,960	f _{hm}	Fuel consumed during the simmer phase (n	g	1,300	f _{sm}
Net change in char during test	g	400	ΔC _c	400	ΔC _n	Net change in char during test phase	g	110	ΔC _s
Equivalent dry fuel consumed	g	2604	f _{cd}	1815	f _{hd}	Equivalent dry fuel consumed	g	907	f _{sd}
Water vaporized from all pots	g	1,520	w _{ov}	360	w _{nv}	Water vaporized	g	950	w _{sv}
Effective mass of water boiled	g	7,747	w _{or}	9,013	w _{nr}	Water remaining at end - All Pots	g	8,410	w _{sr}
Time to boil Pot # 1	min	114	Δt _c	85	Δt _n	Time of simmer (should be ~45 minutes)	min	45	Δt _s
Temp-corr time to boil Pot # 1	min	115	Δt _c ^T	90	Δt _n ^T	Thermal efficiency	%	13%	h _s
Thermal efficiency	%	14%	h _c	11%	h _n	Burning rate	g/min	20.2	r _{so}
Burning rate	g/min	22.8	r _{ob}	21.4	r _{nb}	Specific fuel consumption	g/liter remainin	107.9	SC _s
Specific fuel consumption	g/liter boiled	336.1492391	SC _c	201.3592	SC _n	Firepower	watts	5912	FP _s
Temp-corr sp consumption	g/liter	339.7734896	SC _c ^T	214.2119	SC _n ^T	Turn down ratio	--	1.13	TDR
Temp-corr sp energy consumpt.	kJ/liter	5,979	SE _c ^T	3,769	SE _n ^T	Specific Energy Consumption	kJ/liter	1,898	SE _s
Firepower	watts	6699	FP _c	6262	FP _n	Fuel Benchmark to Complete 5L WBT	g	1,924	BF
						Energy Benchmark to Complete 5L WBT	kJ	33,860	BE

Fuente: elaboración propia.

Resultados de prueba al 20% de humedad en la leña

Calculations/Results	Units	COLD START		HOT START		SIMMER TEST (CALCULATIONS DIFFER FROM HIGH POWER TEST)			
		data	label	data	label	Calculations/Results	Units	data	label
Fuel consumed (moist)	g	3,300	f _{cm}	3,050	f _{hm}	Fuel consumed during the simmer phase (n	g	1,120	f _{sm}
Net change in char during test	g	310	ΔC _c	310	ΔC _n	Net change in char during test phase	g	(20)	ΔC _s
Equivalent dry fuel consumed	g	2025	f _{cd}	1831.97	f _{hd}	Equivalent dry fuel consumed	g	897	f _{sd}
Water vaporized from all pots	g	590	w _{ov}	590	w _{nv}	Water vaporized	g	1,060	w _{sv}
Effective mass of water boiled	g	8,482	w _{or}	8,709	w _{nr}	Water remaining at end - All Pots	g	8,170	w _{sr}
Time to boil Pot # 1	min	140	Δt _c	72	Δt _n	Time of simmer (should be ~45 minutes)	min	45	Δt _s
Temp-corr time to boil Pot # 1	min	145	Δt _c ^T	77	Δt _n ^T	Thermal efficiency	%	16%	h _s
Thermal efficiency	%	11%	h _c	13%	h _n	Burning rate	g/min	19.9	r _{so}
Burning rate	g/min	14.5	r _{ob}	25.4	r _{nb}	Specific fuel consumption	g/liter remainin	109.8	SC _s
Specific fuel consumption	g/liter boiled	239	SC _c	210.3418	SC _n	Firepower	watts	5846	FP _s
Temp-corr sp consumption	g/liter	246.5955994	SC _c ^T	223.7679	SC _n ^T	Turn down ratio	--	0.73	TDR
Temp-corr sp energy consumpt.	kJ/liter	4,339	SE _c ^T	3,937	SE _n ^T	Specific Energy Consumption	kJ/liter	1,932	SE _s
Firepower	watts	4241	FP _c	7462	FP _n	Fuel Benchmark to Complete 5L WBT	g	1,725	BF
						Energy Benchmark to Complete 5L WBT	kJ	30,353	BE

Fuente: elaboración propia.

Continuación apéndice 1.

Resultados de prueba al 25% de humedad en la leña

Calculations/Results	Units	COLD START		HOT START		SIMMER TEST (CALCULATIONS DIFFER FROM HIGH POWER TEST)			
		data	label	data	label	Calculations/Results	Units	data	label
Fuel consumed (moist)	g	3,440	f _{cm}	3,260	f _{hm}	Fuel consumed during the simmer phase (n	g	740	f _{sm}
Net change in char during test	g	340	ΔC _c	340	ΔC _n	Net change in char during test phase	g	40	ΔC _s
Equivalent dry fuel consumed	g	1885	f _{cd}	1756	f _{nd}	Equivalent dry fuel consumed	g	461	f _{sd}
Water vaporized from all pots	g	740	w _{cv}	740	w _{nv}	Water vaporized	g	410	w _{sv}
Effective mass of water boiled	g	7,874	w _{cr}	7,641	w _{nr}	Water remaining at end - All Pots	g	8,820	w _{sr}
Time to boil Pot # 1	min	105	Δt _c	69	Δt _n	Time of simmer (should be ~45 minutes)	min	45	Δt _s
Temp-corr time to boil Pot # 1	min	109	Δt _c ^T	71	Δt _n ^T	Thermal efficiency	%	14%	h _s
Thermal efficiency	%	13%	h _c	13%	h _n	Burning rate	g/min	10.2	r _{so}
Burning rate	g/min	18.0	r _{co}	25.5	r _{no}	Specific fuel consumption	g/liter remainin	52.3	SC _s
Specific fuel consumption	g/liter boiled	239.3906624	SC _c	229.8874	SC _n	Firepower	watts	3005	FP _s
Temp-corr sp consumption	g/liter	248.6745108	SC _c ^T	237.8146	SC _n ^T	Turn down ratio	--	1.75	TDR
Temp-corr sp energy consumpt.	kJ/liter	4,376	SE _c ^T	4,185	SE _n ^T	Specific Energy Consumption	kJ/liter	920	SE _s
Firepower	watts	5265	FP _c	7466	FP _n	Fuel Benchmark to Complete 5L WBT	g	1,478	BF
						Energy Benchmark to Complete 5L WBT	kJ	26,000	BE

Fuente: elaboración propia.

Resultados de prueba al 30% de humedad en la leña

Calculations/Results	Units	COLD START		HOT START		SIMMER TEST (CALCULATIONS DIFFER FROM HIGH POWER TEST)			
		data	label	data	label	Calculations/Results	Units	data	label
Fuel consumed (moist)	g	4,980	f _{cm}	4,768	f _{hm}	Fuel consumed during the simmer phase (n	g	1,270	f _{sm}
Net change in char during test	g	340	ΔC _c	340	ΔC _n	Net change in char during test phase	g	40	ΔC _s
Equivalent dry fuel consumed	g	2815	f _{cd}	2671	f _{nd}	Equivalent dry fuel consumed	g	796	f _{sd}
Water vaporized from all pots	g	2,350	w _{cv}	1,800	w _{nv}	Water vaporized	g	850	w _{sv}
Effective mass of water boiled	g	7,260	w _{cr}	7,851	w _{nr}	Water remaining at end - All Pots	g	6,780	w _{sr}
Time to boil Pot # 1	min	242	Δt _c	136	Δt _n	Time of simmer (should be ~45 minutes)	min	45	Δt _s
Temp-corr time to boil Pot # 1	min	257	Δt _c ^T	147	Δt _n ^T	Thermal efficiency	%	14%	h _s
Thermal efficiency	%	16%	h _c	14%	h _n	Burning rate	g/min	17.7	r _{so}
Burning rate	g/min	11.6	r _{co}	19.6	r _{no}	Specific fuel consumption	g/liter remainin	117.4	SC _s
Specific fuel consumption	g/liter boiled	387.7172999	SC _c	340.1751	SC _n	Firepower	watts	5188	FP _s
Temp-corr sp consumption	g/liter	411.2984087	SC _c ^T	367.6244	SC _n ^T	Turn down ratio	--	0.66	TDR
Temp-corr sp energy consumpt.	kJ/liter	7,237	SE _c ^T	6,469	SE _n ^T	Specific Energy Consumption	kJ/liter	2,066	SE _s
Firepower	watts	3411	FP _c	5759	FP _n	Fuel Benchmark to Complete 5L WBT	g	2,534	BF
						Energy Benchmark to Complete 5L WBT	kJ	44,595	BE

Fuente: elaboración propia.

Continuación apéndice 1.

Eficiencias calculadas en todas las pruebas y repeticiones

Eficiencia Energética vs Humedad						
	5%	10%	15%	20%	25%	30%
Frio	11.0	13.0	14.0	11.0	13.0	16.0
	11.0	10.0	10.0	11.0	13.0	13.0
Promedio	10.0	11.0	10.0	10.0	14.0	10.0
	10.6	11.3	11.3	10.6	13.3	13.0
Caliente	11.0	11.0	11.0	13.0	13.0	14.0
	11.0	11.0	11.0	14.0	14.0	14.0
Promedio	11.0	12.0	13.0	13.0	13.0	11.0
	11.0	11.3	11.6	13.3	13.3	13.0
Fuego lento	16.0	14.0	13.0	16.0	14.0	16.0
	15.0	17.0	14.0	15.0	14.0	14.0
Promedio	14.0	12.0	15.0	14.0	14.0	15.0
	15.0	14.3	14.0	15.0	14.0	15.0

Fuente: elaboración propia.

Tasas de combustión calculadas en todas las pruebas y repeticiones

Tasa de Combustión						
Eficiencia	5%	10%	15%	20%	25%	30%
Frio	34	23.6	22.8	14.5	18	16
	33	29.7	21.8	17.5	24.5	17.6
Promedio	29.7	23.8	24.7	19.5	17	11.7
	32.2	25.7	23.1	17.1	19.8	15.1
Caliente	44.7	31.1	21.4	25.4	25.5	20.9
	35.2	29.9	21.6	24.7	28.5	23.3
Promedio	37.7	29.3	24	17.3	29.5	19.6
	39.2	30.1	22.3	22.4	27.8	21.2
Fuego lento	19.8	27.2	18.1	19.9	10.2	15.6
	21.6	21.2	23.5	19.8	9.6	16.5
Promedio	27.8	28	25.6	18.5	9.6	17.7
	23.0	25.4	22.4	19.4	9.8	16.6

Fuente: elaboración propia.

Continuación apéndice 1

Agua evaporada calculada en todas las pruebas y repeticiones

Agua Evaporada						
Eficiencia	5%	10%	15%	20%	25%	30%
Frio	660.0	890.0	570.0	590.0	1360.0	1020.0
	840.0	570.0	770.0	610.0	1230.0	2930.0
	740.0	600.0	520.0	640.0	840.0	2350.0
Promedio	746.6	686.6	620.0	613.3	1143.3	2100.0
Caliente	430.0	380.0	360.0	590.0	740.0	860.0
	570.0	430.0	470.0	590.0	740.0	800.0
	440.0	430.0	360.0	640.0	820.0	1100.0
Promedio	480.0	413.3	396.6	606.6	766.6	920.0
Fuego lento	1020.0	1050.0	950.0	1060.0	410.0	870.0
	1050.0	1140.0	700.0	850.0	440.0	850.0
	1120.0	1210.0	1150.0	920.0	420.0	880.0
Promedio	1063.3	1133.3	933.3	943.3	423.3	866.6

Fuente: elaboración propia.

Emisiones de CO y PM en las tres fases de operación de la prueba

Humedad	Fases					
	Frío		Caliente		Fuego Lento	
	CO	PM	CO	PM	CO	PM
5	0.10392	55.803	15.776	539.90	13.709	280.93
10	0.16037	147.86	38.497	1235.7	49.961	925.85
15	0.29925	151.33	40.875	1246.5	52.273	946.78
20	0.37065	154.80	43.252	1257.3	54.585	967.70
25	0.53082	166.48	43.600	1388.5	75.146	1230.3
30	0.67785	173.39	43.886	1467.7	89.879	1410.6

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 2. Análisis estadístico

Datos de análisis de varianza de un factor de la eficiencia en función de la humedad para la fase en frío.

<i>Humedad</i>	<i>Cuenta</i>	<i>Suma</i>	<i>Promedio</i>	<i>Varianza</i>
1	3	32	10	0.33
2	3	34	11	2.33
3	3	34	11	5.33
4	3	32	10	0.33
5	3	40	13	0.33
6	3	39	13	9

Fuente: elaboración propia con herramienta de análisis estadístico de Microsoft Excel

Datos de análisis de varianza de un factor de la eficiencia en función de la humedad para la fase en caliente.

<i>Humedad</i>	<i>Cuenta</i>	<i>Suma</i>	<i>Promedio</i>	<i>Varianza</i>
1	3	33	11	0
2	3	34	11.3	0.33
3	3	35	11.6	1.33
4	3	40	13.3	0.33
5	3	40	13.3	0.33
6	3	39	13	3

Fuente: elaboración propia con herramienta de análisis estadístico de Microsoft Excel

Datos de análisis de varianza de un factor de la eficiencia en función de la humedad para la fase de fuego lento.

<i>Humedad</i>	<i>Cuenta</i>	<i>Suma</i>	<i>Promedio</i>	<i>Varianza</i>
1	3	45	15	1
2	3	43	14.3	6.3
3	3	42	14	1
4	3	45	15	1
5	3	42	14	0
6	3	45	15	1

Fuente: Elaboración propia con herramienta de análisis estadístico de Microsoft Excel

Continuación apéndice 2.

Datos de análisis de varianza de un factor de la tasa de combustión en
en función de la humedad para la fase en frío.

<i>Humedad</i>	<i>Cuenta</i>	<i>Suma</i>	<i>Promedio</i>	<i>Varianza</i>
1	3	96.7	32.2	5.1
2	3	77.1	25.7	12.01
3	3	69.3	23.1	2.1
4	3	51.5	17.1	6.3
5	3	59.5	19.8	16.5
6	3	45.3	15.1	9.3

Fuente: elaboración propia con herramienta de análisis estadístico de Microsoft Excel

Datos de análisis de varianza de un factor de la eficiencia en función
de la humedad para la fase en caliente.

<i>Humedad</i>	<i>Cuenta</i>	<i>Suma</i>	<i>Promedio</i>	<i>Varianza</i>
1	3	117.6	39.2	24.25
2	3	90.3	30.1	0.84
3	3	67	22.33	2.09
4	3	67.4	22.46	20.14
5	3	83.5	27.83	4.33
6	3	63.8	21.26	3.52

Fuente: elaboración propia con herramienta de análisis estadístico de Microsoft Excel

Datos de análisis de varianza de un factor de la eficiencia en función
de la humedad para la fase de fuego lento.

<i>Humedad</i>	<i>Cuenta</i>	<i>Suma</i>	<i>Promedio</i>	<i>Varianza</i>
1	3	69.2	23.06	17.61
2	3	76.4	25.46	13.81
3	3	67.2	22.4	14.97
4	3	58.2	19.4	0.61
5	3	29.4	9.8	0.12
6	3	49.8	16.6	1.11

Fuente: elaboración propia con herramienta de análisis estadístico de Microsoft Excel

Continuación apéndice 2.

Resumen de datos de prueba de F de Fisher e hipótesis rechazadas

Variable	F	Probabilidad	F crítica	F > F crítica	Hipótesis rechazada
Eficiencia en frío	1.37	0.29	3.10	No	Alternativa
Eficiencia en caliente	3.81	0.02	3.10	Si	Nula
Eficiencia a fuego lento	0.44	0.81	3.10	No	Alternativa
Tasa de combustión Frio	13.6	0.00013	3.10	Si	Nula
Tasa de Combustión Caliente	15.3	0.00071	3.10	Si	Nula
Tasa de Combustión Fuego lento	11.88	0.00026	3.10	Si	Nula

Fuente: elaboración propia con herramienta de análisis estadístico de Microsoft Excel

Conclusiones Estadísticas

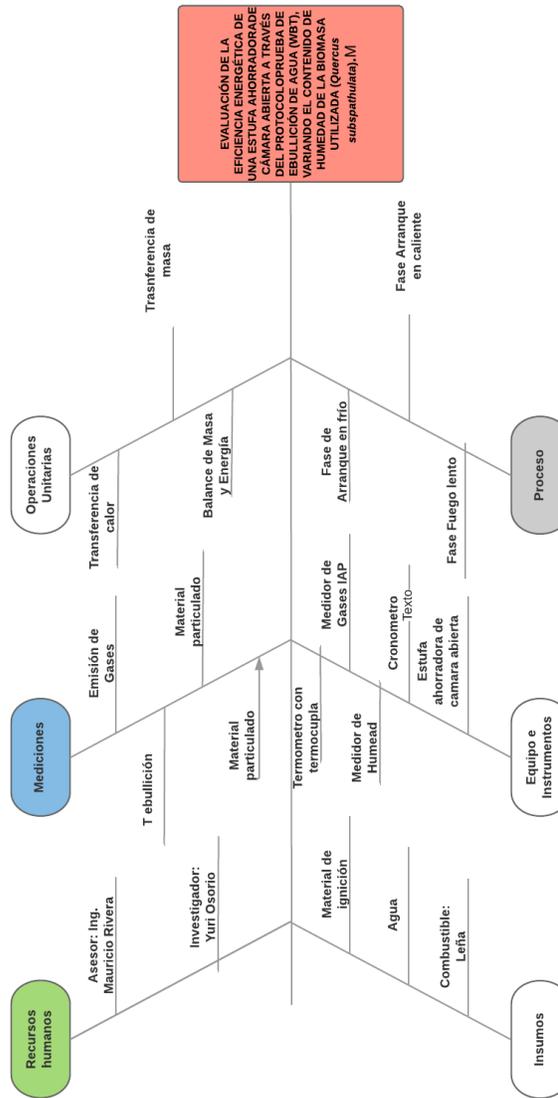
1. Debido a que en la prueba de Fisher de las eficiencias en frío y a fuego lento F es menor a la F crítica, la hipótesis alternativa es rechazada. Es decir que la eficiencia energética en frío y caliente no varía significativamente respecto al contenido de humedad de la leña.
2. Debido a que en la prueba de Fisher de la eficiencia en caliente la F es mayor a la F crítica, la hipótesis nula es rechazada. Es decir que la eficiencia en caliente varía significativamente respecto al contenido de humedad de la leña.
3. Debido a que en la prueba de Fisher para las tasas de combustión en las tres fases la F es mayor a la F crítica, la hipótesis nula es rechazada. Es decir que las tasas de combustión de las tres fases varían significativamente respecto al contenido de humedad de la leña.

Apéndice 3. Requisitos académicos

Carrera	Área	Curso	Temática
Ingeniería Química	Área de Química	Química 3	Estequiometría. Reacciones químicas.
		Química Orgánica	Carbono, combustión
		Química Ambiental	Contaminación Ambiental, Contaminación del Aire, emisiones de CO y material Particulado
		Ecología	Preservación del medio ambiente
	Área de Operaciones Unitarias	Transferencia de Masa (IQ-4)	Difusión, Secado
		Transferencia de Calor (IQ-3)	Mecanismos de Transferencia de calor
		Balance de Materia (IQ-1)	Balances de masa y energía.
	Fisicoquímica	Termodinámica	Eficiencia Térmica, entalpías de vaporización
	Ciencias Básicas y complementarias	Estadística 1	Estadística descriptiva
		Estadística 2	Análisis de Correlación Lineal

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 4. Diagrama de Ishikawa



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 5. Equipo utilizado para la realización de las pruebas
Fotografía del IAP, medidor de CO y PM2.5



Fuente: elaboración propia.

Fotografía del higrómetro



Fuente: elaboración propia.

Continuación apéndice 5.

Fotografía de termómetro digital



Fuente: elaboración propia.

Fotografía de campana de extracción de gases



Fuente: elaboración propia.

Continuación apéndice 5.

Fotografía de balanza digital



Fuente: elaboración propia.

Fotografía de balanza de humedad



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 6. Realización de prueba WBT



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 7. Metodología de cálculo

Cálculo de Calor sensible

$$Qs = Cp * \Delta T * m$$

Donde:

Qs = Calor sensible

Cp = calor específico

ΔT = cambio de temperatura

m = masa

Ejemplo: cálculo de calor para una masa de 890g de agua desde una temperatura de 19.8 C° hasta 92.9 C°, el Cp del agua es de 4.186 J/gC°

$$Qs = Cp * \Delta T * m = 4.186 * (92.9 - 19.8) * 890 = 272336.9 J$$

Cálculo de eficiencia.

$$\eta = \frac{(Qs + Qvap)}{Qd} * 100$$

Donde:

η = eficiencia energética

Qs = calor sensible

Qvap = calor de vaporización del agua

Qd = Calor disponible del combustible

Nota: la hoja de cálculo WBT 4.2.4 SPREADSHEET, desprecia la energía utilizada en el cambio de fase de la humedad de la leña.

Continuación apéndice 7.

Ejemplo: cálculo de la eficiencia para prueba que cuyo calor sensible es de 1, 223,986 J, calor de vaporización de agua de 2, 011,400 J y una energía de leña disponible de 26, 394,000 J, calcule la eficiencia térmica del proceso.

$$\eta = \frac{(Q_s + Q_{vap})}{Q_d} = \left(\frac{1223986 + 2011400}{26394000} \right) * 100 = 12\%$$

Cálculo de Tasa de combustión.

$$T_c = \frac{M_{eq}}{t_{eb}}$$

Donde:

Tc = tasa de combustión

Meq = Masa equivalente de combustible consumido

teb = tiempo en llegar a ebullición.

Ejemplo: cálculo de tasa de combustión con una masa equivalente de combustible consumido de 1982 g en una tiempo de ebullición de 84 minutos.

$$T_c = \frac{M_{eq}}{t_{eb}} = \frac{1982}{84} = 23.59 \text{ g/min}$$

Continuación apéndice 7.

Cálculo de Agua evaporada

$$w = W_o - W_f$$

Donde:

W = agua evaporada

W_o = agua inicial en las ollas

W_f = agua final después de la prueba

Ejemplo; cálculo de agua evaporada con una masa inicial de agua de 5370 g y una masa final de agua de 4800 g.

$$w = W_o - W_f = 5370 - 4800 = 570 \text{ g}$$

Fuente: elaboración propia, con base en datos calculados.