



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

**ANÁLISIS DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA DE CINCO ESTUFAS AHORRADORAS DE
ESTRUCTURA METÁLICA UTILIZANDO EL PROTOCOLO DE PRUEBA DE EBULLICIÓN
DE AGUA (WBT)**

Kimberly Pammela Lavicount Sandoval

Asesorado por el Ing. Jorge Emilio Godínez Lemus y
Coasesorado por el Ing. Mauricio Valentino Rivera Tello

Guatemala, agosto de 2018

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**ANÁLISIS DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA DE CINCO ESTUFAS AHORRADORAS DE
ESTRUCTURA METÁLICA UTILIZANDO EL PROTOCOLO DE PRUEBA DE EBULLICIÓN
DE AGUA (WBT)**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

KIMBERLY PAMMELA LAVICOUNT SANDOVAL

ASESORADO POR EL ING. JORGE EMILIO GODÍNEZ LEMUS Y
COASESORADO POR EL ING. MAURICIO VALENTINO RIVERA TELLO

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERA QUÍMICA

GUATEMALA, AGOSTO DE 2018

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL I	Ing. Angel Roberto Sic García
VOCAL II	Ing. Pablo Christian de León Rodríguez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Oscar Humberto Galicia Nuñez
VOCAL V	Br. Carlos Enrique Gómez Donis
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
EXAMINADOR	Ing. Jaime Domingo Carranza González
EXAMINADORA	Inga. Hilda Piedad Palma Ramos
EXAMINADOR	Ing. Manuel Gilberto Galván Estrada
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:

ANÁLISIS DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA DE CINCO ESTUFAS AHORRADORAS DE ESTRUCTURA METÁLICA UTILIZANDO EL PROTOCOLO DE PRUEBA DE EBULLICIÓN DE AGUA (WBT)

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Química con fecha 19 de junio de 2017.

Kimberly Pammela Lavicount Sandoval

Guatemala, julio de 2018

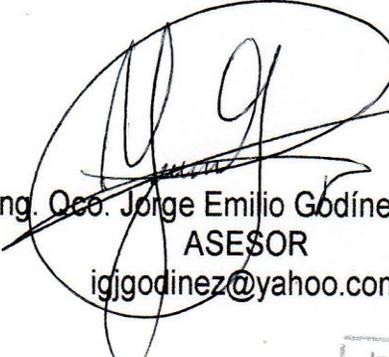
Ingeniero
Carlos Salvador Wong Davi
Director de Escuela de Ingeniería Química
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos de Guatemala
Presente

Ingeniero Carlos Wong:

Por medio de la presente **HAGO CONSTAR** que he revisado y aprobado el trabajo de graduación titulado "**ANÁLISIS DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA DE CINCO ESTUFAS AHORRADORAS DE ESTRUCTURA METÁLICA UTILIZANDO EL PROTOCOLO DE PRUEBA DE EBULLICIÓN DE AGUA (WBT)**", de la estudiante de Ingeniería Química **Kimberly Pammela Lavicount Sandoval** quien se identifica con el **carné 2011-14484** y **DPI 2136 06755 0117**.

Sin otro particular me suscribo a usted.

Atentamente,



Ing. Qco. Jorge Emilio Godínez Lemus
ASESOR
igjgodinez@yahoo.com

Ing. Jorge Emilio Godínez Lemus
INGENIERO QUÍMICO
Colegado 874



USAC
TRICENTENARIA
Universidad de San Carlos de Guatemala

FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERIA QUIMICA

Edificio T-5, Ciudad Universitaria, Zona 12, Guatemala, Centroamérica
EIQD-REG-TG-008

Guatemala, 04 de julio de 2018.
Ref. EIQ.TG-IF.022.2018.

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 **011-2017** 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 la estudiante universitaria: **Kimberly Pammela Lavicount Sandoval**.
Identificada con número de carné: **2136 06755 0117**.
Identificada con registro académico: **2011-14484**.
Previo a optar al título de **INGENIERA QUÍMICA**.

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:

**ANÁLISIS DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA DE CINCO ESTUFAS AHORRADORAS
DE ESTRUCTURA METÁLICA UTILIZANDO EL PROTOCOLO DE PRUEBA DE
EBULLICIÓN DE AGUA (WBT)**

El Trabajo de Graduación ha sido asesorado por el Ingeniero Químico: **Jorge Emilio Godínez Lemus**.

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 Paul De León De Paz
COORDINADOR DE TERNA
Tribunal de Revisión
Trabajo de Graduación



C.c.: archivo



Agencia Centroamericana de Acreditación de
Programas de Ingeniería y de Ingeniería



Formando Ingenieros Químicos en Guatemala desde 1939



USAC
TRICENTENARIA
Universidad de San Carlos de Guatemala

FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA

Edificio T-5, Ciudad Universitaria, Zona 12, Guatemala, Centroamérica
EIQD-REG-SG-004

Ref.EIQ.TG.016.2018

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 de la estudiante, **KIMBERLY PAMMELA LAVICOUNT SANDOVAL** titulado: **"ANÁLISIS DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA DE CINCO ESTUFAS AHORRADORAS DE ESTRUCTURA METÁLICA UTILIZANDO EL PROTOCOLO DE PRUEBA DE EBULLICIÓN DE AGUA (WBT)"**.
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, julio de 2018 **FACULTAD DE INGENIERIA USAC**
ESCUELA DE INGENIERIA QUIMICA
DIRECTOR

Cc: Archivo
CSWD/ale



Formando Ingenieros Quimicos en Guatemala desde 1939

Universidad de San Carlos
De Guatemala



Facultad de Ingeniería
Decanato

Ref. DTG.267.2018

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: **ANÁLISIS DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA DE CINCO ESTUFAS AHORRADORAS DE ESTRUCTURA METÁLICA, UTILIZANDO EL PROTOCOLO DE PRUEBA DE EBULLICIÓN DE AGUA (WBT)**, presentado por la estudiante universitaria: **Kimberly Pammela Lavicount Sandoval**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, se autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.

Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
Decano

Guatemala, agosto de 2018



/cc

ACTO QUE DEDICO A:

Dios

Por sus infinitas bendiciones en mi vida, por ser la fuente de sabiduría y fortaleza, porque por su gracia y gloria me permite culminar esta meta.

Mis padres

José Lavicount y Verónica Sandoval por ser las personas más importantes y admirables de mi vida, gracias por estar conmigo, este triunfo es por ustedes, les debo todo y más, los amo mucho.

Mis hermanos

Kandy, Selena y Luis Lavicount Sandoval por su amor, comprensión y apoyo durante todo este proceso, espero ser un buen ejemplo de hermana mayor, los amo mucho.

AGRADECIMIENTOS A:

Universidad de San Carlos de Guatemala	Por ser mi casa de estudios y por brindarme la oportunidad de formarme como profesional.
Facultad de Ingeniería	Por ser el centro de enseñanza diaria durante estos años, porque además de llenarme de conocimiento, me brindó la oportunidad de conocer a personas especiales.
Mi novio	José Vides, gracias por acompañarme en este camino. Te quiero.
Mis compañeros de la Facultad	Por el apoyo y amistad que me brindaron, por todos los momentos que compartimos y por formar parte de este sueño.
Sección de Tecnología de la Madera	Especialmente a los ingenieros Mauricio Rivera, Jorge Godínez, Jessiel Enríquez y Fredy Contreras por brindarme su apoyo, tiempo, asesoría y conocimiento para la realización de esta tesis.
TECNILUSA	Por la comprensión y apoyo brindado durante mi carrera universitaria.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	V
LISTA DE SÍMBOLOS.....	VII
GLOSARIO.....	IX
RESUMEN.....	XI
OBJETIVOS.....	XIII
HIPÓTESIS.....	XIV
INTRODUCCIÓN.....	XVII
1. ANTECEDENTES.....	1
1.1. Justificación.....	4
1.2. Determinación del problema.....	4
1.2.1. Definición.....	4
1.2.2. Delimitación.....	5
2. MARCO TEÓRICO.....	11
2.1. Estufa ahorradora.....	11
2.1.1. Beneficios.....	11
2.1.2. Componentes de una estufa ahorradora.....	12
2.1.2.1. Cámara de combustión.....	12
2.1.2.2. Planchas.....	13
2.1.2.3. Túnel.....	13
2.1.2.4. Chimenea.....	14
2.2. Leña.....	15
2.2.1. Criterios para escoger leña para estufas ahorradoras.....	16

2.2.2.	Combustión de la leña	17
2.2.2.1.	Etapa 1: calentamiento (secado)	17
2.2.2.2.	Etapa 2: pirolisis	17
2.2.2.3.	Etapa 3: combustión del carbón.....	18
2.2.2.4.	Productos de la combustión.....	19
2.3.	<i>Quercus spp.</i>	19
2.4.	Alianza Global para Estufas Mejoradas (Global Alliance for Clean Cookstoves).....	20
2.5.	Certificación de estufas limpias	22
2.5.1.	IWAII:2012	22
2.5.2.	Comité Técnico ISO/TC 285.....	22
2.6.	Pruebas estufas ahorradoras	23
2.6.1.	Prueba de ebullición de agua (Water Boiling Test, WBT)	23
2.6.1.1.	Beneficios	24
2.6.1.2.	Desventajas	24
2.6.1.3.	Eficiencia energética.....	25
2.6.1.4.	Inicio en frío de alto poder	25
2.6.1.5.	Inicio en caliente de alto poder	26
2.6.1.6.	Hervir a fuego lento	26
2.6.1.7.	Potencia de fuego.....	27
2.6.1.8.	Emisiones de gases de combustión.....	27
2.6.1.9.	Contaminantes medidos durante la combustión	27
3.	MARCO METODOLÓGICO	29
3.1.	Variables del método.....	29
3.2.	Delimitación del campo de estudio	30
3.2.1.	Área de conocimiento.....	30

3.2.2.	Proceso.....	30
3.2.3.	Lugar	30
3.3.	Recursos humanos disponibles	30
3.4.	Recursos y materiales disponibles.....	31
3.4.1.	Equipo	31
3.4.2.	Instrumentos de medición	31
3.4.3.	Insumos	31
3.4.4.	Materiales	32
3.5.	Técnicas cualitativas o cuantitativas	32
3.6.	Recolección de información	32
3.6.1.	Diseño experimental	32
3.6.2.	Datos generales.....	33
3.6.2.1.	Información general.....	33
3.6.3.	Preparación de cada fase	36
3.6.3.1.	Fase I.....	36
3.6.3.2.	Fase II.....	37
3.6.3.3.	Fase III.....	38
3.6.4.	Medición de las emisiones CO y PM _{2,5}	38
3.6.5.	Poder calorífico	39
3.6.6.	Punto de ebullición de agua local.....	39
3.6.7.	Hoja de datos originales.....	39
3.7.	Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información.....	41
3.7.1.	Tabulación y ordenamiento.....	41
3.7.2.	Procesamiento.....	41
3.8.	Análisis estadístico	42
3.9.	Plan de análisis de los resultados	44
3.9.1.	Métodos y modelos de los datos según tipo de variables	44

3.9.2.	Programas por utilizar para el análisis de datos	44
4.	RESULTADOS	45
4.1.	Resultados para las tres fases de las estufas ahorradoras	45
5.	INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS	51
	CONCLUSIONES	57
	RECOMENDACIONES	59
	BIBLIOGRAFIA	61
	APÉNDICES	65
	ANEXOS	87

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Estufa A	6
2.	Estufa B	7
3.	Estufa C	8
4.	Estufa D	9
5.	Estufa E	10
6.	Componentes principales de la estufa ahorradora Lorena	14
7.	Estufa ahorradora tipo Patsari	15
8.	Etapas de la combustión de la leña	18
9.	Árbol <i>Quercus spp.</i>	20
10.	Equipo internacional de estufas, dando apoyo en Guatemala	21
11.	Fases de mediciones de temperatura, prueba WBT	26
12.	Información general	34
13.	Información general (descripción del combustible)	35
14.	Hoja de toma de datos	40
15.	Hoja de toma de datos para las tres fases	40
16.	Eficiencia energética del arranque en frío	45
17.	Eficiencia energética del arranque en caliente	46
18.	Eficiencia energética hervir a fuego lento (45 min)	47
19.	Potencia de fuego, tres fases de la prueba WBT	48

TABLAS

I.	Caracterización estufa A.....	6
II.	Caracterización estufa B.....	7
III.	Caracterización estufa C.....	8
IV.	Caracterización estufa D.....	9
V.	Caracterización estufa E.....	10
VI.	Descripción de las variables de procedimiento	29
VII.	Eficiencia energética.....	41
VIII.	Potencia de fuego.....	42
IX.	Emisiones y material particulado	42
X.	Datos para el análisis de varianza	43
XI.	Tiempo de ebullición arranque en frío, hornilla principal	46
XII.	Tiempo de ebullición arranque en caliente, hornilla principal	47
XIII.	Emisiones de CO y PM 2,5.....	49
XIV.	Desviación estándar, eficiencia energética	49
XV.	Desviación estándar, potencia de fuego	50

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
H₂O	Agua
CO₂	Dióxido de carbono
°C	Grados Celsius
g	Gramo
kg	Kilo gramo
kJ	Kilo Jule
PM	Materia particulado
m³	Metro cúbico
µg	Microgramo
min	Minuto
CO	Monóxido de carbono
%	Porcentaje
CCT	Prueba de cocinado controlado
KPT	Prueba de desempeño de cocina
WBT	<i>Water Boiling Test</i> (prueba de ebullición de agua)
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.
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 forma 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 l 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.
IWA	<i>International Workshop Agreements</i> (Acuerdo de Estufa Internacional).
Hervir	Dicho de un líquido: producir burbujas por la acción del calor, manteniendo la temperatura de ebullición.
Hollín	Partículas sólidas de tamaño pequeño, de color negro.
Hornillas	Discos en donde se colocan sartenes y ollas. Son removidas para realizar limpieza interior.
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.

RESUMEN

En el presente trabajo de graduación se analizó la eficiencia energética, potencia de fuego, emisiones de CO y PM 2,5 de cinco estufas ahorradoras de leña base metálica (A, B, C, D, y E) utilizando el protocolo de prueba de ebullición de agua (WBT).

El análisis se realizó en tres etapas: arranque en frío, arranque en caliente y hervir a fuego lento. Las primeras dos fases trabajaron en alta potencia y la tercera en baja potencia. Para cada una se preparó la cantidad de leña solicitada por el protocolo (4.0 kg) para llevar a ebullición 5 L de agua. Las primeras dos fases concluían cuando la olla principal alcanzaba la temperatura de ebullición, mientras que la última fase terminaba cuando se completaban 45 minutos.

La tabulación y análisis de datos de eficiencia energética y potencia de fuego se realizó con base en el documento WBT HOJA DE CÁLCULO 4.2.4 ya que, este documento es avalado por La Alianza Global para Estufas Limpias, la Organización Internacional de Normalización (ISO) y el Acuerdo de Taller Internacional (IWA).

La cuantificación de emisiones de CO y PM 2,5, se determinaron con base en la hoja de Excel IAP Procesamiento del Medidor 5,0. Dicho documento fue proporcionado por los creadores del aparato IAP, el cual se utilizó para las muestras de emisiones y material particulado.

Con este resultado se determinó cual o cuales estufas tienen mayor eficiencia energética y potencia de fuego en las tres distintas fases analizadas, además de la cantidad de emisiones y PM 2,5 que pueden evitar inhalar las personas.

OBJETIVOS

General

Analizar la eficiencia energética de cinco estufas ahorradoras de estructura metálica utilizando el protocolo de Prueba de Ebullición de Agua (WBT).

Específicos

1. Determinar la eficiencia energética en el arranque en frío de cinco estufas ahorradoras: estufa A, estufa B, estufa C, estufa D y estufa E.
2. Determinar la eficiencia energética en el arranque en caliente de cinco estufas ahorradoras: estufa A, estufa B, estufa C, estufa D y estufa E.
3. Determinar la eficiencia energética en hervir a fuego lento de cinco estufas ahorradoras: estufa A, estufa B, estufa C, estufa D y estufa E.
4. Determinar y comparar la potencia de fuego para cinco estufas ahorradoras en las tres fases de la prueba de ebullición de agua (WBT).
5. Determinar la cantidad de emisiones de CO y PM 2.5 de cinco estufas ahorradoras: estufa A, estufa B, estufa C, estufa D y estufa E.

Hipótesis

Es posible analizar la eficiencia energética a cinco estufas de estructura metálica por medio del protocolo de Prueba de Ebullición de Agua (WBT). La medición de la eficiencia se realiza en tres fases distintas de operación, al mismo tiempo que se determina la potencia de fuego y emisiones de CO y material particulado 2,5.

Hipótesis nula:

H_{0,1}: no existen diferencias significativas entre los resultados de eficiencia energética de las cinco estufas, para el arranque en frío.

H_{0,2}: no existen diferencias significativas entre los resultados de eficiencia energética de las cinco estufas, para el arranque en caliente.

H_{0,3}: no existen diferencias significativas entre los resultados de eficiencia energética de las cinco estufas, para la fase hervir a fuego lento.

H_{0,4}: no existen diferencias significativas entre los resultados de potencia de fuego de las cinco estufas, para el arranque en frío.

H_{0,5}: no existen diferencias significativas entre los resultados de potencia de fuego de las cinco estufas, para el arranque en caliente.

H_{0,6}: no existen diferencias significativas entre los resultados de potencia de fuego de las cinco estufas, para la fase hervir a fuego lento.

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

Hipótesis alternativa:

H_{a,1}: si existen diferencias significativas entre los resultados de eficiencia energética de las cinco estufas, para el arranque en frío.

H_{a,2}: si existen diferencias significativas entre los resultados de eficiencia energética de las cinco estufas, para el arranque en caliente.

H_{a,3}: si existen diferencias significativas entre los resultados de eficiencia energética de las cinco estufas, para la fase hervir a fuego lento.

H_{a,4}: si existen diferencias significativas entre los resultados de potencia de fuego de las cinco estufas, para el arranque en frío.

H_{a,5}: si existen diferencias significativas entre los resultados de potencia de fuego de las cinco estufas, para el arranque en caliente.

H_{a,6}: si existen diferencias significativas entre los resultados de potencia de fuego de las cinco estufas, para la fase hervir a fuego lento.

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

Criterio con base en un análisis ANOVA

$F < F_c$: Se acepta la hipótesis nula

$F > F_c$: Se rechaza la hipótesis nula

INTRODUCCIÓN

El uso de fogones de leña para la cocción de alimentos, son utilizados en gran medida por las personas en el área rural y urbana, causando distintos problemas entre los que destacan el uso excesivo de leña, la contaminación del aire y los problemas de salud (respiratorios) en las familias; debido a esto se diseñaron estufas ahorradoras de leña o estufas limpias.

Con el uso de las estufas limpias para la cocción de alimentos se aumenta la eficiencia energética. Además, evita que las personas se enfermen ya que, cuentan con una chimenea para que expulse los gases de combustión y material particulado, incrementando la calidad de vida.

Actualmente, Guatemala forma parte de la Alianza Global para Estufas Limpias, con lo cual se busca que cada vez sean más las familias se beneficien con ellas. Además, en la actualidad uno de los objetivos es adoptar normas para la fabricación y distribución de estufas ahorradoras en el país, esto se hace a partir de distintas pruebas (WBT, CCT, KPT) y la prueba de seguridad y permite la comparación y evaluación de las distintas clases de estufas ahorradoras. De esta manera, se determina si cumplen con los parámetros necesarios de calidad.

Con la prueba de ebullición de agua (WBT) se mide la eficiencia de una estufa al utilizar leña para calentar agua, en una o varias ollas y en tres distintas fases. Además, cuantifica las emisiones producidas durante la cocción.

1. ANTECEDENTES

La deforestación ha ido en aumento en los últimos años ya que, en gran parte del país, especialmente en las áreas rurales, las familias preparan sus alimentos en fogones alimentados con leña; además, las emisiones de gases son mayores.

Ante este problema ambiental se han creado estufas ahorradoras de leña que disminuyen hasta en un 60% la utilización de la biomasa (leña). Además, contribuyen a la economía de las personas. En Guatemala se creó la primera estufa ahorradora después del terremoto en 1976. Distintas universidades e investigadores han trabajado en conjunto para crear una estufa ahorradora de leña adecuada para el cocimiento de alimentos y el medio ambiente.

En el año 2006, en la Universidad de San Carlos de Guatemala, Herbert Estuardo Aché Ortiz, presentó 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 Fundación Sierra Madre, con el Ing. Agr. José Esaú Guerra Samayoa como consultor, presento en el año 2,009 el *Informe final del Estudio de Sistematización de estufas ahorradoras de leña en ocho municipios del altiplano occidental de Guatemala*, donde se presentaron los resultados de las entrevistas 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). Se obtuvieron distintos datos, como que la estufa tipo Onil consume menos leña, pero por ser muy pequeña las usuarias no la prefieren. Estos datos y la información para mejores técnicas de uso sirvieron para proponer el modelo de estufa tipo plancha mejorada que ahorra hasta un 50% del uso de leña.

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

Javier Darío Aristizábal Hernández, publicó en el año 2010 el artículo de investigación denominado *Estufas mejoradas y bancos de leña: una alternativa de autoabastecimiento energético a nivel de finca para comunidades dependientes de los bosques de roble de la cordillera oriental*, donde se construyeron tres prototipos de estufas mejoradas, para lo cual se efectuaron modificaciones a la cámara de combustión; se realizó el ensayo PCC y se compararon una estufa testigo tradicional. El rendimiento promedio fue de

14,66% a favor de las estufas mejoradas respecto al consumo de leña. Además, se propuso un arreglo de leña endoenergético para reducir la dependencia de leña de los bosques de roble disminuyendo así las emisiones de CO₂.

Estudiantes de la carrera de ingeniería mecánica de la universidad de Antioquia, en el año 2012, realizaron un experimento denominado: *Caracterización energética de estufas de cocción utilizando biomasa como combustible mediante pruebas de ebullición de agua: comparación experimental de una estufa eco-eficiente con una tradicional (“3 piedras”)*, donde a partir de la prueba WBT, se obtuvo una mayor eficiencia en la eco-estufa (20%-25%), así mismo la potencia en fuego fue más alto lo cual provoca que se cocinen más rápido los alimentos.

En la Universidad de Antioquia en Medellín Colombia, en el año 2,013, se realizó un trabajo denominado “*Caracterización energética y emisiones de una estufa de cocción ecoeficiente con biomasa a diferentes altitudes*”. Realizaron las pruebas CCT y WBT a las estufas mejoradas para obtener el diseño adecuado, aumentar el desempeño energético y disminuir emisiones de gases. El resultado fue 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 aprovechan mejor la energía suministrada debido a la disminución de pérdidas de calor, además disminuyen las emisiones de gases.

En mayo de 2014, se publicó un documento denominado: *Plan de acción nacional de Guatemala para estufas y combustibles limpios*. Recibió el patrocinio de varias instituciones nacionales e internacionales. Su objetivo fue 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).

1.1. Justificación

El presente trabajo nace de la necesidad de crear normas sobre la base de normas internacionales ya establecidas que regulen la implementación de estufas ahorradoras con base metálica y puedan tener certificaciones para cumplir con las condiciones técnicas necesarias para mejorar la calidad de vida humana, disminuyendo así mismo la contaminación por emisión de gases de combustión, material particulado y el uso excesivo de leña.

La investigación que se realizará es parte del proyecto *Evaluación de la eficiencia energética y emisiones intradomiciliarias de monóxido de carbono, material particulado 2.5 de las principales estufas ahorradoras de leña fabricadas y distribuidas en Guatemala* 4.8.63.4.11 el cual está financiado por la Dirección General de Investigación (DIGI) y avalado por Centro de Investigaciones de Ingeniería (CII) ambas pertenecientes a la Universidad de San Carlos de Guatemala.

1.2. Determinación del problema

1.2.1. Definición

Actualmente, los bosques en Guatemala se encuentran en peligro debido a la tala excesiva de árboles para leña. Una nota publicada en el año 2013 por *Prensa Libre* estimó que, al menos, 2,1 millones de familias utilizan leña para

cocinar, además corren peligro ya que al menos el 60% no tiene chimeneas para la extracción de humo. Esto les provoca infecciones en el oído, cataratas y, sobre todo, problemas respiratorios.

Dado lo anterior, se construyen estufas ahorradoras, reduciendo así el consumo de leña (hasta en un 60%) por año para cocinar y evitando daños a la salud de los seres vivos. Así mismo disminuye la emisión de CO₂ ya que se reduce la combustión.

En el presente trabajo se realizará la prueba WBT para determinar qué tan eficiente es una estufa al utilizar biomasa como combustible al calentar agua en una olla, así como la cantidad de emisiones que se producen, identificando que estufa tiene mejores resultados para mitigar la contaminación ambiental y consumo de leña excesivo para poder cocinar.

1.2.2. Delimitación

La delimitación del estudio son las pruebas realizadas a las siguientes estufas. Dicha caracterización se basó en observaciones cualitativas, mediciones y con el Plan de Acción Nacional de Guatemala para estufas y Combustibles Limpios, http://cleancookstoves.org/resources_files/guatemala-plan-de-accion-anexos.pdf.

Tabla I. **Caracterización estufa A**

Dimensiones	Plancha	71 x 35 x 3 cm
	Cámara de combustión	58.5 x 16 x 16 cm
Material	Plancha	Metal con dos hornillas de discos extraíbles
	Cámara de combustión	Metal con aislamiento de ladrillo grueso, posee una ventana para protegerla
Tiempo de vida útil	15 años	
Combustible	Leña / biomasa	
Costo	Q1 400,00	
Características	<ul style="list-style-type: none"> • Tiene a los lados recubrimientos de azulejo • Adecuada para familias entre 8-10 personas • Ideal para nixtamal • Fabricada en Guatemala, para Quiché, Huehuetenango, Sololá y Jutiapa 	
Aplicación	Rural, periurbano y rural	
Foto	<p style="text-align: center;">Figura 1. Estufa A</p>  <p style="text-align: center;">Fuente: Laboratorio Multipropósito de Sección de Tecnología de la Madera. CII. USAC.</p>	

Fuente: elaboración propia.

Tabla II. **Caracterización estufa B**

Dimensiones	Plancha	73 x 40 x 2 cm
	Cámara de combustión	56 x 18.5 x 14 cm
Material	Plancha	Tipo comal calibre 10
	Cámara de combustión	Metal con fibra de vidrio como aislante
Tiempo de vida útil	10 años con buen mantenimiento	
Combustible	Leña / biomasa	
Costo	Q1 700,00	
Características	<ul style="list-style-type: none"> • Mamparas laterales para evitar pérdidas por radiación. • Cuenta con una bandeja en la parte inferior para colocar utensilios o leña. • Fabricada en México, para regiones de C.A. 	
Aplicación	Rural, periurbano y urbano.	
Fotografía	<p style="text-align: center;">Figura 2. Estufa B</p>  <p style="text-align: center;">Fuente: Laboratorio Multipropósito de Sección de Tecnología de la Madera. CII. USAC.</p>	

Fuente: elaboración propia.

Tabla III. **Caracterización estufa C**

Dimensiones	Plancha	60 x 40 x 2 cm
	Cámara de combustión	9 x 13 x 29 cm
Material	Plancha	Hierro fundido o metal con tres hornillas.
	Cámara de combustión	Acero inoxidable con ladrillo como aislante.
Tiempo de vida útil	10 años.	
Combustible	Leña / biomasa.	
Costo	Q2 669,00	
Características	<ul style="list-style-type: none"> • Adecuada para familias de 10 personas y pequeños negocios. • Superficie de trabajo extendida. • Acreditación de carbono. • Fabricadas por empresa privada, para toda Guatemala. 	
Aplicación	Rural, periurbana, urbana (semi profesional)	
Fotografía	<p style="text-align: center;">Figura 3. Estufa C</p>  <p style="text-align: center;">Fuente: Laboratorio Multipropósito de Sección de Tecnología de la Madera. CII. USAC.</p>	

Fuente: elaboración propia.

Tabla IV. **Caracterización estufa D**

Dimensiones	Plancha	63 x 44 x 2 cm
	Cámara de combustión	27 x 17 x 12 cm
Material	Plancha	Hierro fundido o metal.
	Cámara de combustión	Caja metálica cemento y metal.
Tiempo de vida útil	4-7 años	
Combustible	Leña / biomasa.	
Costo	Q1 800,00	
Características	<ul style="list-style-type: none"> • Adecuada para familias de 10 personas y pequeños negocios. • Superficie de trabajo extendida. • Fabricadas por empresa privada, para toda Guatemala. 	
Aplicación	Rural, periurbana, urbana.	
Fotografía	<p style="text-align: center;">Figura 4. Estufa D</p>  <p style="text-align: center;">Fuente: Laboratorio Multipropósito de Sección de Tecnología de la Madera. CII. USAC.</p>	

Fuente: elaboración propia.

Tabla V. **Caracterización estufa E**

Dimensiones	Plancha	80.5 x 50.5 x 5 cm
	Cámara de combustión	32.5 x 15 x 19 cm / θ 45°
Material	Plancha	Hierro fundido con tres hornillas
	Cámara de combustión	Metálica
Tiempo de vida útil	Más de 7 años	
Combustible	Leña / biomasa.	
Costo	Q2 200,00	
Características	<ul style="list-style-type: none"> • Adecuada para familias de 5 personas. • Cámara de combustión tipo <i>rocket</i>. • Fabricada por empresa privada para Guatemala, El Salvador y Honduras. 	
Aplicación	Rural, periurbana, urbana	
Fotografía	<p style="text-align: center;">Figura 5. Estufa E</p>  <p style="text-align: center;">Fuente: Laboratorio Multipropósito de Sección de Tecnología de la Madera. CII. USAC.</p>	

Fuente: elaboración propia.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Estufa ahorradora

Es un equipo que permite minimizar el consumo de leña durante la preparación de alimentos, disminuyendo la emisión de gases de combustión y material particulado. La construcción de estas genera un bajo costo y es de fácil instalación.

Las estufas ahorradoras tienen otras ventajas en comparación con el fogón tradicional, utilizado anteriormente por la mayoría de familias guatemaltecas, especialmente del área rural, ya que permiten reducir el tiempo de cocción de los alimentos, el humo en la cocina y el tiempo que las familias emplean para recolectar la leña.

2.1.1. Beneficios

- “Ahorro de leña: Se reduce el consumo de 2 a 3 cargas por semana a 1 a 1.5 cargas por semana. Se estima que una familia de cinco personas consume al año 104 cargas de leña con un fogón tradicional, mientras que, con una estufa mejorada puede llegar a consumir menos de 78 cargas al año.
- Ahorro de dinero: Los gastos por compra de leña por año disminuyen de Q. 2,275.05 a Q. 1,706.28 o menos.
- Funcionamiento. Puede funcionar con leña, ramas, hojas secas y astillas.
- Construcción. Es fácil de construir, los materiales se encuentran en la comunidad.

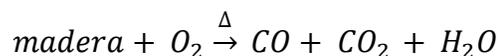
- En el hogar. Se mejora la presentación y la higiene.
- La plancha metálica. Dura aproximadamente de 8 a 10 años.
- Salud de la familia. Se reduce el riesgo de contraer enfermedades respiratorias.
- Al cocinar. Se pueden preparar varios alimentos al mismo tiempo.
- Bajo costo. Los costos estimados y los insumos utilizados dependen de la marca, tipo de estufa y región, pero son relativamente bajos”¹.
(Q. 300.00 – Q. 2,000.00) aproximadamente.

2.1.2. Componentes de una estufa ahorradora

El diseño de las estufas ahorradoras puede variar dado que en la actualidad existen distintos tipos, además, el cuerpo se puede construir de distintos materiales, como lodo y arena, cerámica, ladrillo o de metal, pero básicamente la mayoría se compone de las siguientes partes:

2.1.2.1. Cámara de combustión

También conocida como “caja de fuego”. Dentro de ella se quema la leña (combustible) al entrar en contacto con el carburante (aire) se da una reacción de combustión que casi siempre es incompleta.



¹ Global Alliance for Clean Cookstoves. *WBT Protocol 4.2.4 Spreadsheet*. www.cleancookstoves.org/technology-and-fuels/testing/protocols.html. Consulta: febrero de 2017.

La leña que se utiliza para la cocción de alimentos es el único combustible que genera material particulado MP 10 y MP 2.5 (siendo este el más dañino para la salud).

El material de construcción de este componente es, generalmente, ladrillo refractario porque resiste altas temperaturas, abrasión y evita pérdidas de calor por conducción.

2.1.2.2. Planchas

Generalmente, se les llama comales. Se componen de una plancha principal y una secundaria. Cada una tiene una o dos hornillas para cocinar los alimentos contenidos en la olla o sartenes. En la mayoría de las estufas ahorradas, el comal es una plancha de metal reforzada que facilita la transferencia de calor.

La plancha principal tiene la ventaja de realizar la cocción en menor tiempo que la plancha secundaria debido a que la cámara de combustión se encuentra debajo de esta lo que facilita la transferencia de calor.

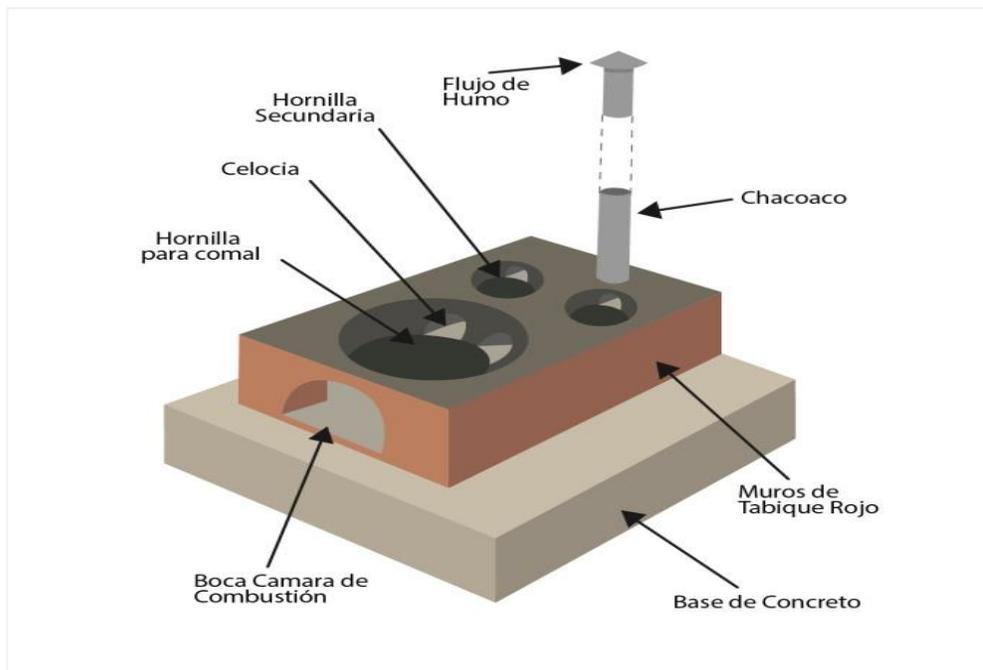
2.1.2.3. Túnel

Es un componente importante en las estufas ahorradoras porque conecta la cámara de combustión con las hornillas. Este túnel se encuentra en desnivel para tener un mejor flujo de calor hacia la parte posterior de la estufa. Para la creación de este túnel o túneles se utiliza, generalmente, lata.

2.1.2.4. Chimenea

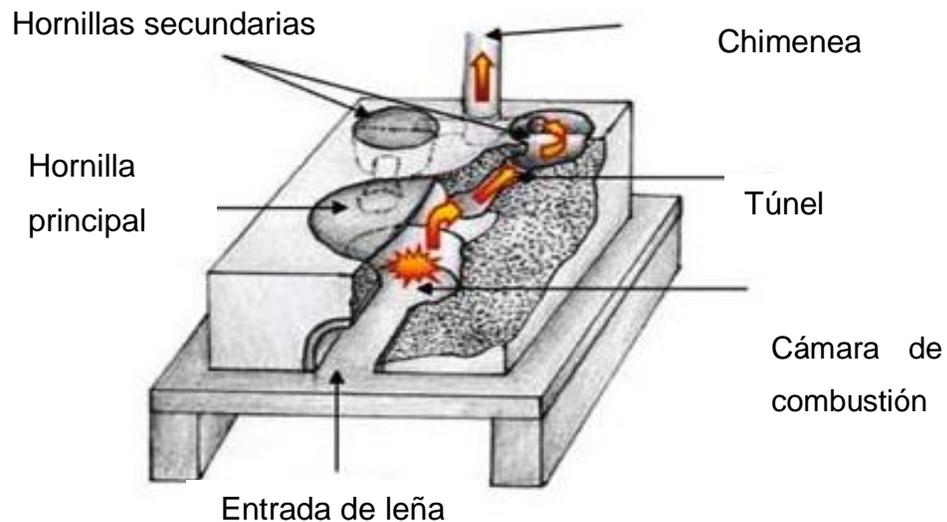
Uno de los propósitos de las estufas ahorradas es evitar que las personas inhalen el humo y gases producido por la combustión directamente. Por ello, se incluye la chimenea para evitar que suceda esto. La chimenea es un tubo de lámina galvanizada a la cual se le adhiere un capuchón del mismo material para protegerla de la lluvia u otros materiales entrantes.

Figura 6. Componentes principales de la estufa ahorradora Lorena



Fuente: ¿Cómo funciona la Estufa Patsari de Vamos a Dar?
www.vamosadar.org.mx/noticias/?p=1119. Consulta 4 de febrero de 2017.

Figura 7. **Estufa ahorradora tipo Patsari**



Fuente: *De la "Lorena" a la "Patsari": proceso de mejoramiento e innovación de tecnología rural.* www.conanp.gob.mx/dcei/entorno/notas/not24/int2401.htm. Consulta 4 de febrero de 2017.

2.2. Leña

La madera es la primera fuente de energía que el ser humano utilizó como combustible para la cocción de alimentos. Además, es renovable y favorece el medio ambiente.

“Los combustibles de la madera comprenden toda la biomasa leñosa (truncos, ramas, estaquillas, etc.), aserrín y otros residuos de las actividades de la tala y procesamiento, así como el carbón y otros combustibles derivados en dependencia del proceso de conversión. Las fuentes primarias de combustibles de la madera son los bosques y otras tierras no boscosas”².

² YAUMURA, Miñono. *La energía de la madera.* www.cubasolar.cu/biblioteca/energia/Energia30/HTML/articulo08.htm. Consulta: febrero de 2017.

Desde el punto de vista económico la leña es fuente de ingreso de muchas familias, principalmente en el área rural, donde tiene una gran comercialización; y comparado con otros combustibles especialmente derivados del petróleo es de mayor factibilidad.

El problema de utilizar leña es la poca o nula educación ambiental que poseen las personas. Por ello, ha aumentado la deforestación en demérito del medio ambiente.

2.2.1. Criterios para escoger leña para estufas ahorradoras

“Una estufa de leña no puede ser mejor que la leña que quemamos en ella. Distintos tipos de leña tienen distintos comportamientos - algunos arden casi sin llama y se convierten en carbones, otros tipos arden rápidamente y con intensidad, pero todos tienen un factor en común, la leña debe estar lo más seca posible. Este factor es el que nos garantiza el mejor calor, la mayor facilidad de encendido del fuego, y facilita quemar la leña con mayor respeto por el medio ambiente, *Artículo de Lars Mytting, autor de "Hel ved" ("Madera maciza" - El libro de la madera)*”.³

Es importante utilizar leña de buena calidad. Una leña de mala calidad durará poco tiempo durante la cocción de alimentos, además, puede dañar el funcionamiento de la chimenea ya que se ensuciará más al provocar de ceniza.

- La leña no debe estar húmeda, ya que provoca pérdida de la energía calorífica al utilizarla para evaporar el agua contenida en ella y crea

³ BARDARLES, Marco Tulio. *¡Construyamos la estufa ahorradora de leña!* www.corazonverdeguate.files.wordpress.com/2011/05/estufaahorradora.pdf Consulta: febrero de 2017.

creosota (la cual al mezclarse con el hollín formará grumos viscosos cerrando el paso de humo por la tubería) y producen mucho humo.

- Evitar utilizar leña de árboles como el pino, ciprés o abeto ya que estas, pertenecen al grupo de leña blanda; tienen bajo poder calorífico, combustionan rápidamente y las brasas que dejan no son buenas para poder volver a cocinar alimentos. Otra desventaja de estos es que, arden muy rápido desprendiendo mucho calor provocando dilataciones y contracciones a los materiales rajándolos y/o doblándolos.
- Almacenar la leña en un lugar adecuada evitando la humedad y lluvia, En el lugar debe existir flujo de aire para la leña y no estar en contacto con el suelo.

2.2.2. Combustión de la leña

Durante la combustión se genera calor debido a la reacción del carburante con el combustible (biomasa de la madera, leña). La combustión de la leña se da principalmente en tres etapas.

2.2.2.1. Etapa 1: calentamiento (secado)

En esta fase, la madera pierde el agua contenida, en forma de vapor. Es preferible que tenga aproximadamente un 20% de humedad para para que rinda porque aprovecha mejor la energía. Esto ocurre a una temperatura entre 150-200 °C en esta etapa la madera.

2.2.2.2. Etapa 2: pirolisis

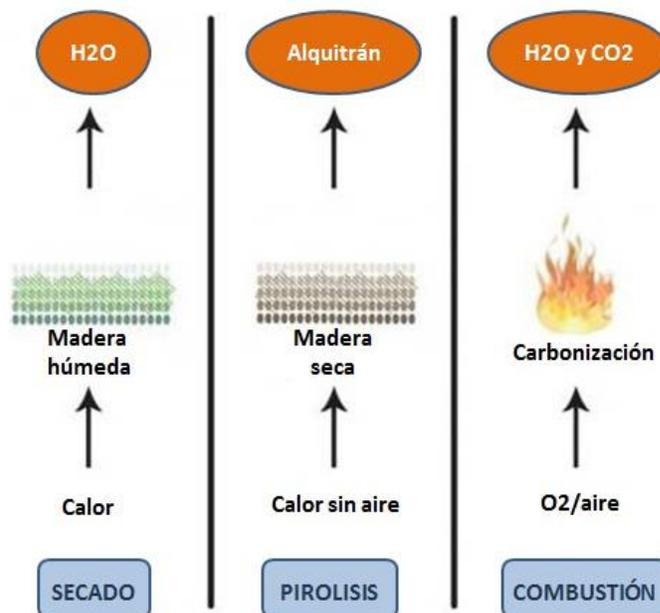
En la etapa dos ocurre la descomposición de la leña en gases volátiles, vapores y carbón sólido a una temperatura entre 220-270 °C; al alcanzar una

temperatura entre 550-590 °C los gases liberados poseen poco oxígeno y necesitan entrar en contacto con el aire que se encuentra en la cámara de combustión para dar origen a la llama.

2.2.2.3. Etapa 3: combustión del carbón

A temperaturas mayores a los 590 °C el carbón vegetal se quema por completo y libera gran cantidad de calor (dependiendo del tipo de leña). Deja cenizas como residuo. En esta etapa se genera H_2O , CO y CO_2 como resultado de la oxidación donde el oxidante es el aire y el combustible el reductor.

Figura 8. Etapas de la combustión de la leña



Fuente: *¿En qué consiste la gasificación de la madera?*

www.calderasgasificacion.blogspot.com/2012/11/la-gasificacion-no-es-un-proceso-nuevo.html.

Consulta 4 de febrero de 2017.

2.2.2.4. Productos de la combustión

- Luz: es una forma de energía que se propaga en forma de ondas, no es peligrosa como producto de la combustión, aunque dependiendo de cuál es el tipo de madera utilizada puede ser muy fuerte, dañando la vista.
- Calor: es una forma de energía cuya intensidad se mide en grados de temperatura, y que actúa como catalizador positivo de la combustión, ayudando a la formación de los gases que continúan e incrementan la velocidad del proceso al quemarse y generar más calor. También es responsable de la propagación del fuego por conducción, convección o radiación, y produce en los seres vivos lesiones en la piel, vías respiratorias y pulmones denominadas quemaduras. Además de estas quemaduras, el calor produce deshidratación y agotamiento.
- Humo: está compuesto de restos carbonosos sin quemar y de gases como monóxido y dióxido de carbono, anhídrido sulfuroso, cianógeno, ácido cianhídrico, vapor de agua, dioxinas, sulfuro de hidrógeno, cloruro de hidrógeno, etc. El tipo y cantidad de estos gases estará dado por el material que se quema, la temperatura que registra la combustión y el nivel de oxigenación del proceso.”⁴

2.3. *Quercus spp.*

Es un género de árboles. Son los más grande de la familia Fagaceae, a este pertenece el encino. Estos árboles se utilizan, principalmente, para leña debido a su alto poder calorífico y duración de brasas. También, se suelen utilizar en la construcción de barcos, y todo tipo de muebles ya que son fuertes y duraderos.

⁴ DR. RAVIGNANI, Emilio. Química y comportamiento del fuego. <http://www.hazmatargentina.com/descargas/incendio/quimicaycomportamiento.pdf>. Consulta: febrero de 2017.

El uso de estos árboles es muy amplio en distintos países, ya que, puede servir desde alimento para los cerdos y ganado (las bellotas) hasta fertilizante para los campos (las hojas) y tinte para textil (la corteza), las cenizas de la quema de esta madera se usan como lejía para los jabones.

Figura 9. **Árbol *Quercus spp.***



Fuente: STAINES, Tamara. *Guía de Alérgenos*. www.dratamarastaines.com/guia-de-alergenos/. Consulta 5 de febrero de 2017.

2.4. Alianza Global para Estufas Mejoradas (Global Alliance for Clean Cookstoves)

Fundada en el año 2010, es una alianza de carácter público y privado sin fines de lucro, la cual tiene como objetivos salvar y mejorar vidas, dar autonomía (empoderamiento) a las mujeres y ayudar a la protección del medio ambiente, creando estufas limpias, mejoradas y eficientes. La alianza tiene

como misión el fomentar la adopción de cocinas limpias en 100 millones de hogares del área rural y urbana para el año 2020.

En el año 2014, Guatemala e India entraron a la alianza de los países prioritarios junto con Bangladesh, China, Ghana, Kenia, Nigeria y Uganda estos últimos seis ya se encontraban en la Fase I desde el año 2011. Desde entonces, en Guatemala se han unido distintas instituciones para colaborar con la Alianza Global de Estufas Mejoradas; se han desarrollado planes y estrategias para poder consolidar los distintos proyectos. Con la ayuda de la alianza se logra conseguir consultoría, asistencia técnica, recursos específicos y conjunto de herramientas.

Actualmente, el proyecto se encuentra en la fase II y se buscan donaciones de distintas entidades públicas y privadas en el país, así como brindar información y capacitaciones a las personas consumidoras de estufas de leña.

Figura 10. **Equipo internacional de estufas, dando apoyo en Guatemala**



Fuente: <https://www.one.org/us/2015/01/27/for-millions-of-women-dfaround-the-world-cooking-is-anything-but-safe/>. Consulta 5 de febrero de 2017.

2.5. Certificación de estufas limpias

2.5.1. IWA_{II}:2012

El Convenio Internacional de Trabajo de ISO presento las directrices iniciales para evaluar el desempeño de las estufas ahorradoras de leña (niveles de rendimiento para la eficiencia, emisiones y seguridad). Este es el primer documento escrito que respalda una organización internacional. El objetivo primordial es el de establecer estándares para los fabricantes de estufas brindando a los consumidores productos de calidad (eficientes, saludables y amigables con el ambiente).

El convenio fue organizado por *Global Alliance for Clean Cookstoves, Partnership for Clean Indoor Air* y *National Standards Institute*, en él participaron 23 países interesados en el tema.

2.5.2. Comité Técnico ISO/TC 285

Actualmente, Guatemala carece de parámetros para certificar la calidad de estufas fabricadas por distintas empresas y asociaciones. Por ello, la Comisión Guatemalteca de Normas (COGUANOR) se incorporó al Comité Técnico ISO/TC 285 "*Clean cookstoves and clean cooking solutions*" para crear normas para estufas limpias en Guatemala. De esta forma ayuda a que las personas tengan mejor calidad de vida y proteger al medio ambiente. Este comité surgió de la necesidad de dar seguimiento al convenio IWA_{II}: 2012 donde las instituciones encargadas funcionan como secretarias del comité.

El Ministerio de Energía y Minas, en un informe elaborado el 30 de noviembre de 2014 comunicó el apoyo brindado para la elaboración de propuestas, estrategias, planes de acción, normas, entre otros, para dar seguimiento al evento del Comité Técnico 285 de la ISO desarrollado para la normalización de las estufas ahorradoras de leña.

2.6. Pruebas estufas ahorradoras

Para determinar el rendimiento de las cocinas mejoradas se han desarrollado varias pruebas, las cuales permiten realizar comparaciones entre distintos tipos con el fin de determinar la más adecuada para su utilización. Las tres pruebas típicas para evaluar el rendimiento son:

- CCT.
- WBT.
- KPT.
- Prueba de seguridad.

En el presente trabajo se trabajará solamente con la prueba WBT.

2.6.1. Prueba de ebullición de agua (Water Boiling Test, WBT)

“Es una simulación simplificada del proceso de cocinado. Sirve para comparar el desempeño de estufas en condiciones controladas en el laboratorio y en óptimo funcionamiento”.⁵

⁵ Global Alliance for Clean Cookstoves. *WBT Protocol 4.2.3 Español*. www.cleancookstoves.org/technology-and-fuels/testing/protocols.html. Consulta: febrero de 2017.

2.6.1.1. Beneficios

Los beneficios que más destacan en la prueba WBT son las mediciones de rendimiento tales como:

- Consumo de leña.
- Eficiencia térmica.
- Cantidad de emisiones de gases de combustión generados.
- Evaluar cambios en las estufas durante su desarrollo.
- Asegura que las estufas mejoradas cumplan con los estándares para asegurar la calidad de vida humana y ambiental.
- Comparar el rendimiento de cada tipo de estufa realizando el mismo proceso de cocción.

2.6.1.2. Desventajas

La desventaja principal de esta prueba es que se realiza en forma controlada dentro de un laboratorio, ya que no, representa el proceso de cocción real de las familias. Por eso, esta prueba es adecuada para comparar y evaluar estufas desde el punto de vista de diseño y desempeño.

“Aunque el WBT es una herramienta útil por 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”.⁶

2.6.1.3. Eficiencia energética

Es el cociente de la energía útil otorgada a la olla con agua entre la energía total de entrada. Se determina en tres fases:

- Inicio en frío de alto poder
- Inicio en caliente de alto poder
- Hervor a fuego lento

Las estufas ahorradoras jamás podrán tener una eficiencia de 100% ya que se estaría violando el enunciado de Kelvin-Planck en la Segunda Ley de la Termodinámica, *“Es imposible construir una máquina que, operando en un ciclo, produzca como único efecto la extracción de calor de un foco y la realización de una cantidad equivalente de trabajo”*⁷

2.6.1.4. Inicio en frío de alto poder

Se refiere a la eficiencia energética con la estufa a temperatura ambiente y se utiliza combustible de un paquete previamente pesado para hervir una cantidad medida de agua en una olla estándar.

⁶ Global Alliance for Clean Cookstoves. *WBT Protocol 4.2.3 English*. www.cleancookstoves.org/technology-and-fuels/testing/protocols.html. Consulta: febrero de 2017.

⁷ *Capítulo 15. Segunda Ley de la termodinámica y entropía*. www.old.dgeo.udec.cl/~juaninzunza/docencia/fisica/cap15.pdf. Consulta: febrero de 2017.

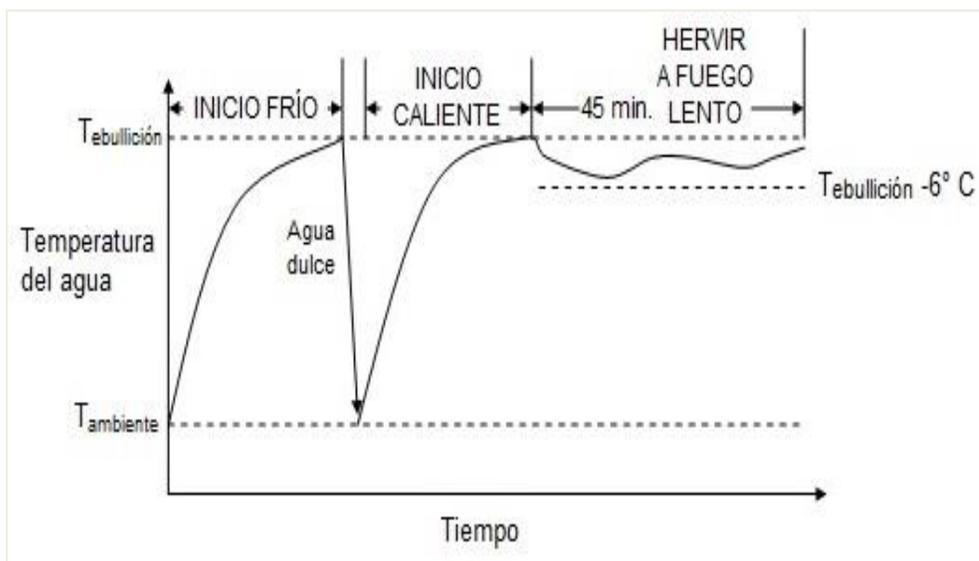
2.6.1.5. Inicio en caliente de alto poder

Se lleva a cabo después de la primera fase, mientras la estufa está caliente, se utiliza combustible de un paquete previamente pesado para hervir una cantidad medida de agua en una olla normal. Esto se realiza porque puede que una estufa tenga un mejor rendimiento en el inicio, en frío, pero no así cuando ya está caliente o viceversa.

2.6.1.6. Hervir a fuego lento

En esta fase se hierve agua a fuego lento para simular la cocción de legumbres. Se realiza por debajo del punto de ebullición con la cantidad mínima de combustible (leña) durante 45 minutos.

Figura 11. Fases de mediciones de temperatura, prueba WBT



Fuente: Global Alliance for Clean Cookstoves. *WBT Protocol Español* 4.2.3. p. 7.

2.6.1.7. Potencia de fuego

Es una medida de qué tan rápido se quema el combustible, expresado en vatios. La afecta la estufa y la operación del usuario. Depende del tamaño de la cámara de combustión y de la tasa de alimentación de leña. No es necesario un valor más alto o bajo, ya que nos indica el tamaño de la estufa.

2.6.1.8. Emisiones de gases de combustión

Uno de los objetivos principales de las pruebas que se realizan a las estufas ahorradoras es la cuantificación de emisión de gases de combustión, se realizan con equipo especial. Debido a que el tipo de equipo de combustión utilizado es un factor clave en la emisión de gases, es necesario comparar las estufas mejoradas utilizadas con el fin de identificar la que menores emisiones genera.

Las emisiones de gases en una combustión de leña varían respecto al tiempo y el espacio. Por esto, no es recomendable medirlas en un solo lugar y en pocos minutos. Se recurre, entonces, a métodos para promediar los resultados de las mediciones de gases en distintos tiempos y tener datos más precisos.

2.6.1.9. Contaminantes medidos durante la combustión

El monóxido de carbono (CO) y el material particulado (PM) son los contaminantes más importantes que se deben medir en las estufas ahorradoras; ambos causan daños a la salud y el medio ambiente.

- Material particulado (PM): partículas finas compuestas por contaminantes adheridos a pequeñísimos pedazos de cenizas y carbono. Estas partículas pueden ser tan pequeñas que entran hasta el fondo de los pulmones y causan problemas en éstos y el corazón.
- Monóxido de carbono (CO): gas sin olor y sin color que reduce la habilidad de la sangre para transportar oxígeno. Es muy venenoso y en altas concentraciones puede causar la muerte.

Además de estos dos contaminantes, durante la quema de leña, se forman compuestos como: la acroleína, hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP), benceno y dioxinas. Todos estos en cantidades menores.

3. MARCO METODOLÓGICO

3.1. Variables del método

Las variables a utilizar se describen en la siguiente tabla.

Tabla VI. Descripción de las variables de procedimiento

Variable	uds.	Factor de diseño		Tipo de variable	
		Constante	Variable	Independiente	Dependiente
Peso agua (inicial)	g	X		X	
Peso leña (inicial)	g	X		X	
Dimensiones combustible	cm	X		X	
Humedad	%		X	X	
Tiempo	min	X		X	
Temperatura de ebullición	°C		X	X	
Peso agua (final)	g		X	X	
Peso leña (final)	g		X	X	
Eficiencia	%		X		X
Peso de carbón	g		X		X
Peso de la ceniza			X		X
Poder calorífico	kJ/kg		X		X
CO	ppm		X		X
MP	µg/m ³		X		X
Watts	W		X		X

Fuente: elaboración propia.

3.2. Delimitación del campo de estudio

La delimitación del campo de estudio se describe a continuación.

3.2.1. Área de conocimiento

El presente trabajo de graduación está delimitado al campo de balance de masa y energía (IQ-1) transferencia de calor (IQ-3), transferencia de masa (IQ-4), ecología, química ambiental, química orgánica I, termodinámica 3, estadística.

3.2.2. Proceso

Se comparará la eficiencia energética de cinco estufas ahorradoras (Estufa A, Estufa B, Estufa C, Estufa D y Estufa E, siguiendo los lineamientos del protocolo de la prueba de ebullición de agua (WBT) en un entorno controlado a nivel laboratorio.

3.2.3. Lugar

El presente trabajo de graduación se realizará en la Sección de Tecnología de la Madera del Centro de Investigaciones de la facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

3.3. Recursos humanos disponibles

- Investigador: Kimberly Pammela Lavicount Sandoval
- Asesor: Ing. Qco. Jorge Emilio Godínez Lemus
- Coasesor: Ing. Qco. Mauricio Valentino Rivera Tello

3.4. Recursos y materiales disponibles

Los recursos y materiales se describen a continuación.

3.4.1. Equipo

- Estufa Ahorradora estufa A (Manos para la Paz)
- Estufa Ahorradora estufa B
- Estufa Ahorradora estufa D
- Estufa Ahorradora estufa C
- Estufa Ahorradora estufa E
- Horno
- Indoor Air Pollution Meter (IAP Meter)

3.4.2. Instrumentos de medición

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

3.4.3. Insumos

- Combustible (Quercus spp.)
- H₂O (Temperatura ambiente)
- Material de ignición del fuego

3.4.4. 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

3.5. Técnicas cualitativas o cuantitativas

La técnica de este trabajo de investigación es cuantitativa, ya que se obtendrán datos de valores experimentales para evaluar los resultados de cinco estufas ahorradoras, distribuidas en Guatemala.

3.6. Recolección de información

La recolección de información se describe a continuación.

3.6.1. Diseño experimental

Análisis de eficiencia energética, potencia de fuego, CO y PM_{2.5} de cinco estufas ahorradoras de base metálica, con tres repeticiones por estufa para cada fase (inicio en frío, inicio en caliente y hervir a fuego lento).

3.6.2. Datos generales

Para la recolección de datos generales de las estufas ahorradoras se utilizará 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>

3.6.2.1. Información general

Cada hoja contiene 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, especialmente adición de combustible, durante las pruebas de alta potencia y cocción a fuego lento pesar las ollas secas sin tapa y el recipiente para carbón.

Figura 12. 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: Global Alliance for Clean Cookstoves. *WBT Protocol 4.2.4 Spreadsheet*, p. 1.

- 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 13. 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	✓	-	HHV, kJ/kg
Net calorific value	✓	-	LHV, kJ/kg
Char calorific value		-	LHV, kJ/kg
Char carbon content			95% by mass

If possible, enter a calorific value from measurements of local fuel below.

Check box if you have a measured calorific value

Measured gross calorific value	<input type="text"/>	HHV measured, kJ/kg
Measured net calorific value	<input type="text"/>	LHV, kJ/kg
Assumed net calorific value		LHV, kJ/kg

Values to be used for tests

Gross calorific value	✓	-	HHV, kJ/kg
Net calorific value	✓	-	LHV, kJ/kg
Fuel carbon content	✓	-	by mass

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

Fuente: Global Alliance for Clean Cookstoves. *WBT Protocol 4.2.4 Spreadsheet*, p. 1.

- 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?
 - ¿Se controla el aire por encima o por debajo del fuego? Si es así, ¿qué hace?

- 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)?
 - ¿Se controla el aire por encima o por debajo del fuego? Si es así, ¿qué hace?

3.6.3. Preparación de cada fase

La preparación para cada fase se detalla a continuación.

3.6.3.1. Fase I

- Tomar el peso inicial de la leña (*Quercus* spp.).
- Colocar las ollas en la estufa con un termómetro en cada olla (deben estar a temperatura ambiente).
- Encender el fuego y registrar el tiempo.
- Verificar la temperatura de las ollas cada 1 o 2 minutos.

- Cuando la olla 1 o 2 tenga alcance los 91 °C:
 - Registrar el tiempo y temperatura.
 - Quitar toda la leña de la estufa y apagar las llamas.
 - Eliminar todo el carbón suelto de los extremos en la cámara de combustión.
 - Pesar la leña sin quemar junto con la leña sobrante.
 - Extraer todo el carbón que queda de la estufa. Pesar el carbón y ceniza.
 - Registrar la temperatura del agua en la otra olla.
 - Registrar el peso de las ollas.
 - Retirar el agua caliente de cada olla.
 - Iniciar lo antes posible la fase II.

3.6.3.2. Fase II

- Tomar el peso inicial de la leña (Quercus spp.).
- Colocar las ollas en la estufa con un termómetro en cada olla (debe estar a temperatura ambiente).
- Encender el fuego y registrar el tiempo.
- Verificar la temperatura de las ollas cada 1 o 2 minutos.
- Cuando la olla 1 o 2 alcance los 91 °C:
 - Registrar el tiempo y temperatura en ambas ollas.
 - Quitar toda la leña de la estufa y apagar las llamas.
 - No pesar carbón ni ceniza.
 - Colocar la leña quemada otra vez dentro de la estufa.
 - Proceder inmediatamente con la prueba de baja potencia.

3.6.3.3. Fase III

- Colocar las ollas con agua de la fase II sobre las hornillas, anotar el peso y temperatura.
- Anotar el peso del combustible sobrante de la segunda fase.
- Colocar la leña caliente de la fase II en el horno e iniciar el cronometro.
- Durante 45 minutos mantener 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:
 - Anotar el tiempo.
 - Registrar la temperatura final del agua que todavía debe ser de 3 °C por debajo del punto de ebullición establecido.
 - Quitar toda la leña de la estufa y apagar las llamas.
 - Eliminar todo el carbón suelto de los extremos de la leña en el recipiente para carbón.
 - Pesar la leña sin quemar retirada de la estufa junto con la leña restante del segundo bulto pesado previamente.
 - Extraer todo el carbón que queda de la estufa. Pesar el carbón restante junto con el carbón de las puntas de los leños.
 - Pesar y tomar temperatura de las ollas con el agua que ha quedado.

3.6.4. Medición de las emisiones CO y PM_{2,5}

La medición de emisión de gases y material particulado se realizará con el equipo de analizador correspondiente, CO y PM 2,5.

- Colocar dentro de la cámara de mezcla el equipo, antes de iniciar la prueba.

- Al terminar la prueba retirar el equipo y anotar en la hoja de datos los resultados (promedio).

3.6.5. Poder calorífico

El dato del poder calorífico del combustible utilizado será determinado y proporcionado por La Sección de Tecnología de la Madera del Centro de Investigaciones de Ingeniería.

3.6.6. Punto de ebullición de agua local

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

3.6.7. Hoja de datos originales

Debido a que los datos obtenidos se registrarán 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 14. 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: Global alliance for clean cookstoves. WBT Protocol 4.2.4 Spreadsheet, p. 2.

Figura 15. 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: Global alliance for Clean Cookstoves. WBT Protocol 4.2.4 Spreadsheet, p. 2.

3.7. Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información

A continuación, se describen los métodos a utilizar para la tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información recolectada.

3.7.1. Tabulación y ordenamiento

La información recolectada en la hoja de toma de datos se ingresará 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*.

3.7.2. Procesamiento

En el documento *WBT 4.2.4 SPREADSHEET*, se encuentra una pestaña en donde se muestra el resultado promediado de cada estufa, sin embargo, esta nos proporciona varios parámetros, y para este trabajo son solo necesarios la eficiencia y potencia de fuego.

Tabla VII. **Eficiencia energética**

Estufa	Arranque en frío (%)	Arranque en caliente (%)	Hervir a fuego lento (%)
Estufa A			
Estufa B			
Estufa C			
Estufa D			
Estufa E			

Fuente: elaboración propia.

Tabla VIII. **Potencia de fuego**

Estufa	Arranque en frío (Watt)	Arranque en caliente (Watt)	Hervir a fuego lento (Watt)
Estufa A			
Estufa B			
Estufa C			
Estufa D			
Estufa E			

Fuente: elaboración propia.

Tabla IX. **Emisiones y material particulado**

Estufa	Arranque en frío (%)		Arranque en caliente (%)		Hervir a fuego lento (%)	
	CO (ppm)	PPM (ug/m ³)	CO (ppm)	PPM (ug/m ³)	CO (ppm)	PPM (ug/m ³)
Estufa A						
Estufa B						
Estufa C						
Estufa D						
Estufa E						

Fuente: elaboración propia.

3.8. Análisis estadístico

Se realizará la prueba WBT a cinco estufas ahorradoras, cada una con tres repeticiones, por lo que se utilizará un análisis de varianza para cada uno de ellos.

Tabla X. Datos para el análisis de varianza

Tratamiento	Repeticiones			
	1	2	3	Promedio
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
Promedio	X ₁ promedio	X ₂ promedio	X ₃ promedio	X

Fuente: elaboración propia.

- Media aritmética

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{N} \quad (\text{Ecuación 1})$$

Donde:

\bar{x} = Media aritmética.

x_i = Valores obtenidos.

N = Número de datos.

- Desviación estándar

$$\sigma = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{N-1} \quad (\text{Ecuación 2})$$

Donde:

σ = Desviación estándar

3.9. Plan de análisis de los resultados

A continuación, se describen los métodos y programas a utilizar para obtener los resultados.

3.9.1. Métodos y modelos de los datos según tipo de variables

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

3.9.2. Programas por utilizar para el análisis de datos

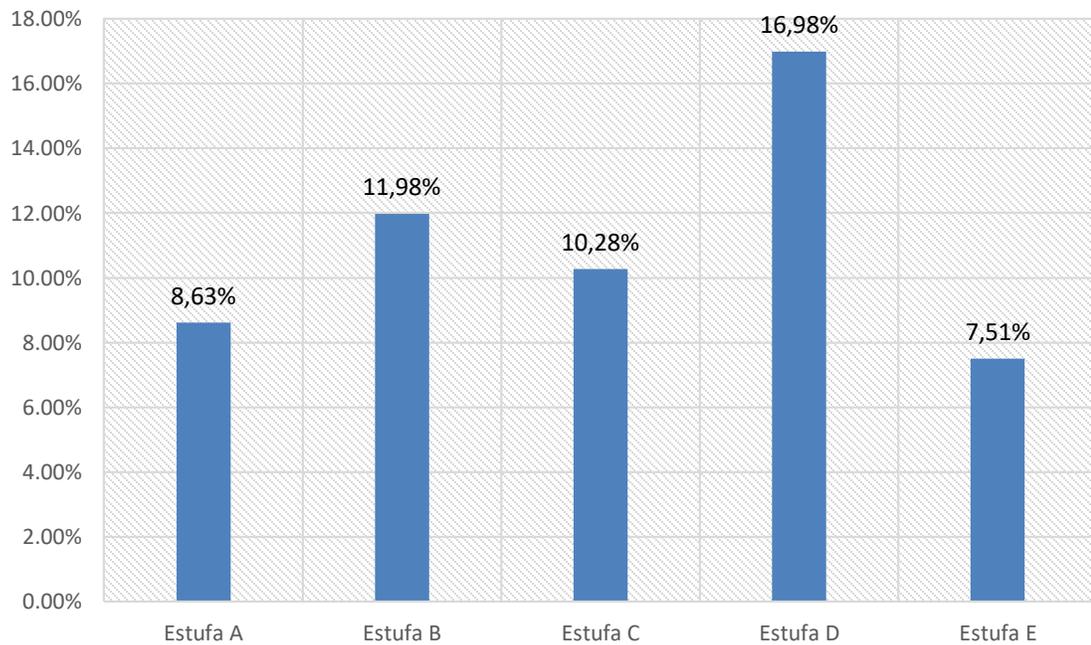
- Microsoft Word 2010
- Microsoft Excel 2010
- *WBT 4.2.4 SPREADSHEET* (<http://cleancookstoves.org/technology-and-fuels/testing/protocols.html>).

4. RESULTADOS

4.1. Resultados para las tres fases de las estufas ahorradoras

Los resultados obtenidos en la investigación se presentan a continuación.

Figura 16. **Eficiencia energética del arranque en frío**



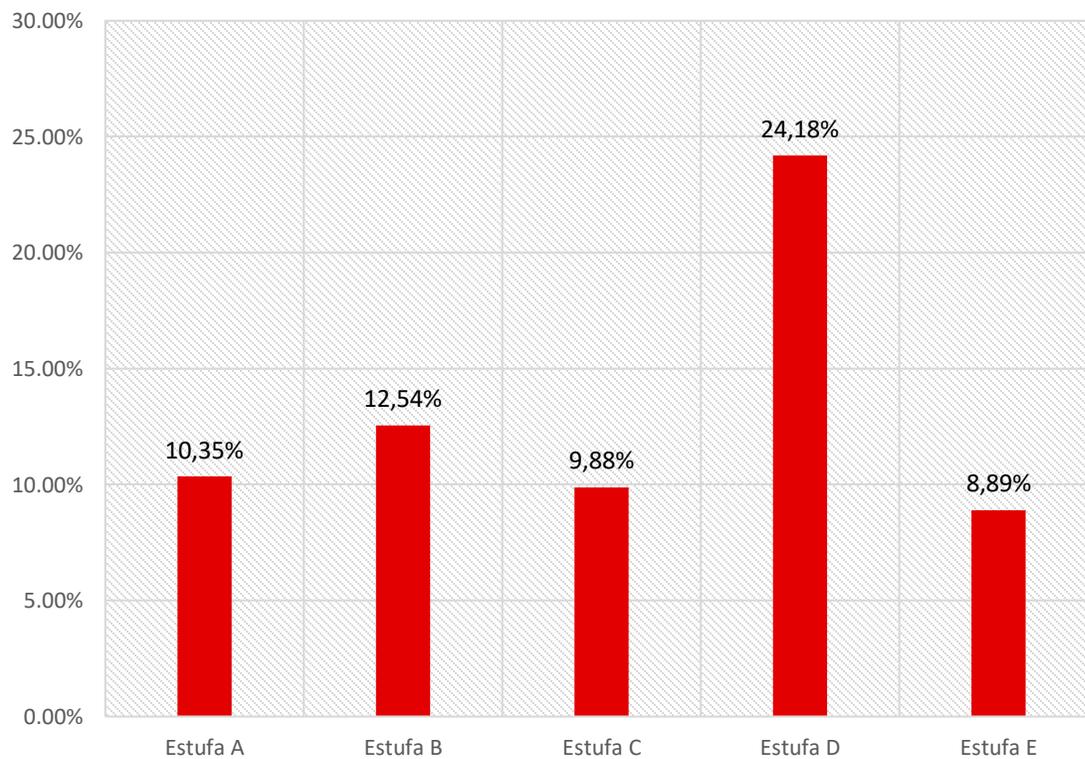
Fuente: elaboración propia, con base a los resultados del apéndice 5,6,7,8 y 9.

Tabla XI. **Tiempo de ebullición arranque en frío, hornilla principal**

Estufa	Arranque en frío (min)
Estufa A	84,67
Estufa B	84,70
Estufa C	51,00
Estufa D	71,00
Estufa E	100,00

Fuente: elaboración propia, con base a los resultados del apéndice 5,6,7,8 y 9.

Figura 17. **Eficiencia energética del arranque en caliente**



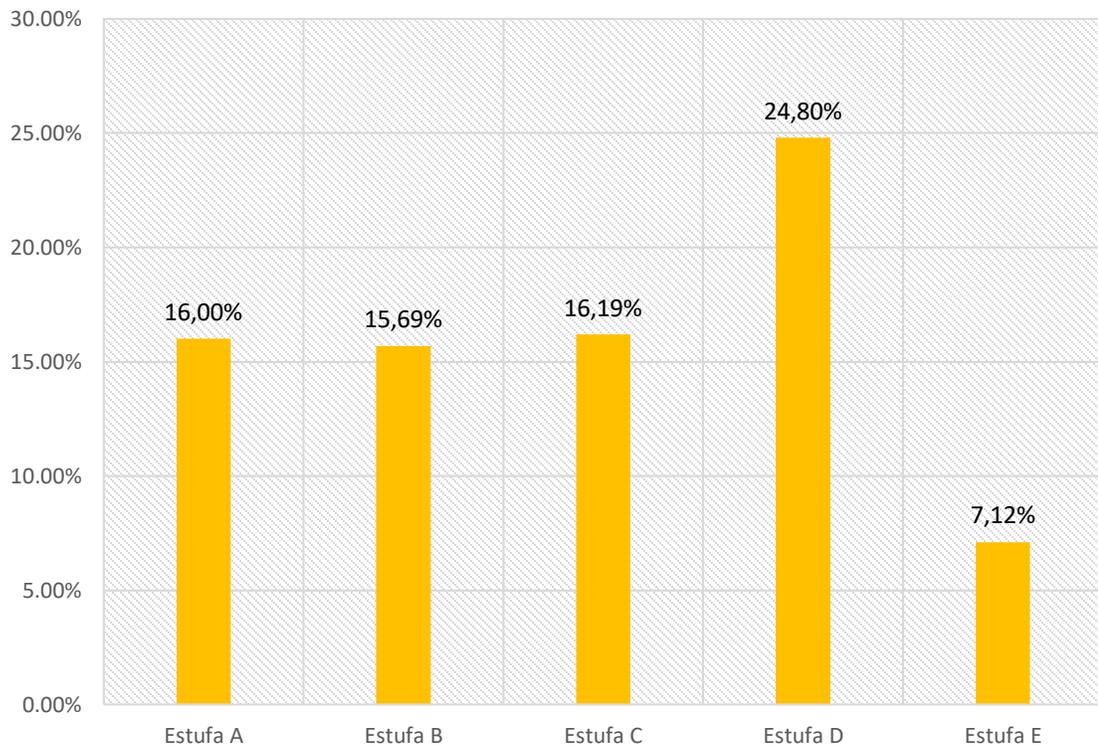
Fuente: elaboración propia, con base a los resultados del apéndice 5,6,7,8 y 9.

Tabla XII. **Tiempo de ebullición arranque en caliente, hornilla principal**

Estufa	Arranque en caliente (min)
Estufa A	57,33
Estufa B	45,33
Estufa C	31,33
Estufa D	42,00
Estufa E	84,67

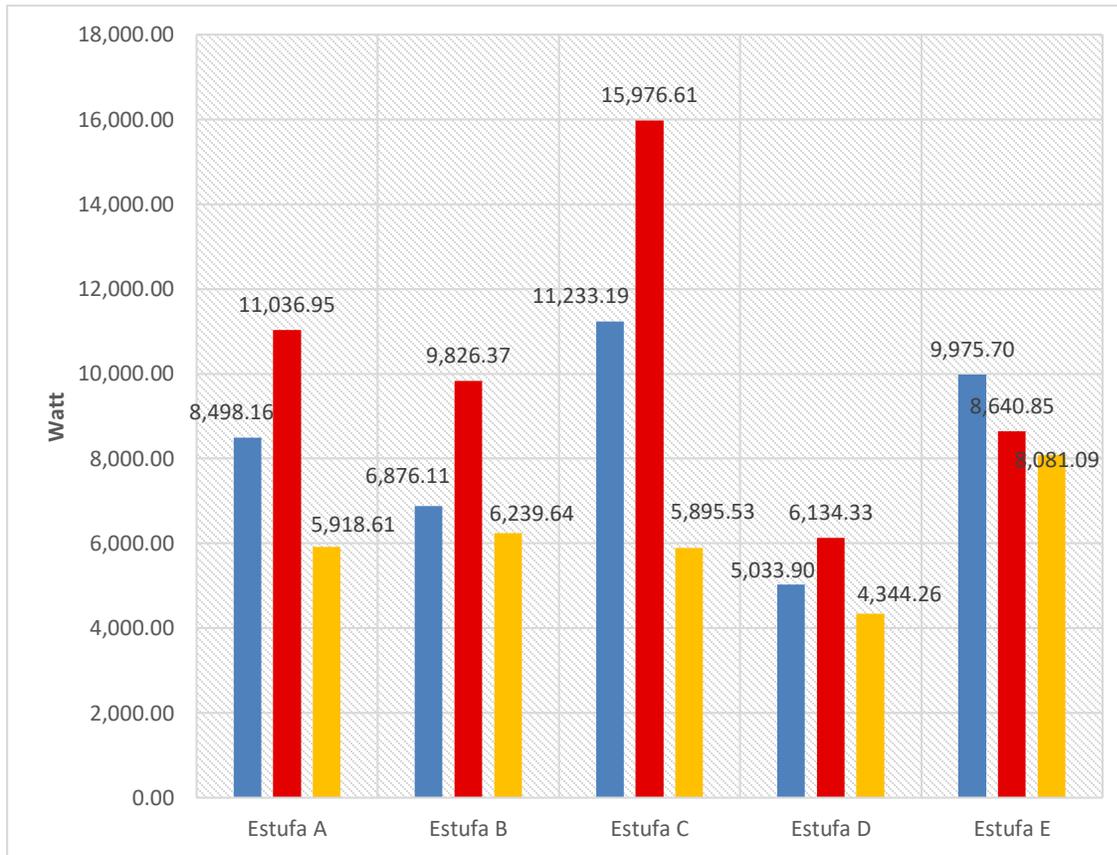
Fuente: elaboración propia, con base a los resultados del apéndice 5,6,7,8 y 9.

Figura 18. **Eficiencia energética hervir a fuego lento (45 min)**



Fuente: elaboración propia, con base a los resultados del apéndice 5,6,7,8 y 9.

Figura 19. **Potencia de fuego, tres fases de la prueba WBT**



Fuente: elaboración propia, con base a los resultados del apéndice 5,6,7,8 y 9.

Barras color azul: fase arranque en frío.

Barras color rojo: fase arranque en caliente.

Barras color amarillo: fase hervir a fuego lento.

Tabla XIII. **Emisiones de CO y PM 2,5**

Estufa	Arranque en frío		Arranque en caliente		Hervir a fuego lento	
	CO (ppm)	PM 2,5 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	CO (ppm)	PM 2,5 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	CO (ppm)	PM 2,5 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
Estufa A	3,80	297,05	2,70	104,00	1,50	40,00
Estufa B	2,00	320,56	1,84	298,32	1,22	98,53
Estufa C	2,36	127,98	1,96	62,64	0,75	28,74
Estufa D	0,70	50,00	0,40	21,00	0,20	13,00
Estufa E	6,20	820,56	3,77	263,64	1,16	83,74

Fuente: Hoja EXCEL IAP 5000 SERIES.

Tabla XIV. **Desviación estándar, eficiencia energética**

Estufa	Arranque en frío (%)	Arranque en caliente (%)	Hervir a fuego lento (%)
Estufa A	1,02E-02	5,24E-03	2,21E-02
Estufa B	6,87E-03	8,08E-03	5,94E-03
Estufa C	2,90E-03	7,06E-03	2,70E-02
Estufa D	9,59E-03	1,39E-02	2,80E-03
Estufa E	5,27E-03	1,77E-03	4,01E-02

Fuente: elaboración propia, con base a los resultados del apéndice 10,11 y 12.

Tabla XV. **Desviación estándar, potencia de fuego**

Estufa	Arranque en frío (W)	Arranque en caliente (W)	Hervir a fuego lento (W)
Estufa A	539,66	855,74	599,78
Estufa B	865,25	2279,07	655,82
Estufa C	2568,01	3043,66	960,21
Estufa D	447,98	2279,96	1154,39
Estufa E	1652,96	2507,74	5142,73

Fuente: elaboración propia, con base a los resultados del apéndice 13,14 y 15.

5. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

Se determinó la eficiencia, potencia de fuego y emisiones de CO y PM 2,5 de cinco estufas ahorradoras de leña siguiendo las instrucciones del protocolo de Ebullición de Agua (WBT) las cuales son distribuidas en Guatemala para personas del área rural y urbana.

Para tener resultados específicos del funcionamiento de la estufa durante la prueba se realiza en tres distintas fases; dos en alta potencia y una baja potencia. La fase de arranque en frío (alta potencia) es la más crítica y en la que se utiliza la mayor cantidad de combustible. Por esta razón se obtiene la menor eficiencia y mayor cantidad de emisiones, aunque no en todas las estufas, como se mostrará más adelante.

En la figura 16 se muestra la eficiencia energética de las cinco estufas en el arranque en frío, la estufa D alcanzo mayor eficiencia con un 16,98% de eficiencia, mientras que la estufa E tuvo el menor valor con un 7,51%. La estufa E tardó 100 minutos en alcanzar la temperatura de ebullición, como se muestra en la tabla XI, esto afecto en gran medida la baja eficiencia. Otro factor que se debe tomar en cuenta es el tipo de material del cual está hecha. Como se sabe, para la transferencia de calor un mal conductor afecta significativamente la tasa de flujo de energía en forma de calor transferida a la olla principal.

El tiempo en que se alcanza la temperatura de ebullición es un factor importante, aunque no define la eficiencia de una estufa, ya que como se muestra en la tabla XI, la estufa D tardó 20 minutos más que la estufa C, sin embargo, la eficiencia de esta última fue de 10,28%, esto debido a que se debe

considerar el consumo específico de combustible. En el apéndice 7 se muestra el resultado de 207 g/L para la estufa C mientras que para la estufa D, en el apéndice 8, se muestra que este valor fue significativamente menor con 126 g/L lo cual aumentó la eficiencia de esta última.

Las estufas A y estufa B tuvieron una eficiencia en arranque en frío de 8,63% y 11,98% respectivamente. Aunque el tiempo en que llegaron a la temperatura de ebullición varió solo por milésimas de segundos la estufa B tuvo un menor consumo específico de combustible. El diseño de la cámara de combustión juega un papel crucial en el consumo de combustible ya que la cámara de combustión en la estufa A es muy larga lo cual provoca que se pierda calor para calentar la olla principal y se necesite agregar más combustible para llegar a la temperatura de ebullición. Con base en los resultados de la figura 16, se rechaza la hipótesis nula ($H_{0,1}$).

En la figura 17 se representan las eficiencias de arranque en caliente. Como se observa estas son mayores que las de la primera fase, porque la olla principal llegó a la temperatura de ebullición en un tiempo menor. La estufa D tuvo el valor más alto con un 24,18% y la estufa E tuvo el más bajo con 8,89%. Entre la primera fase y segunda para la estufa D tuvo un incremento alto (7,2%) mientras que la estufa E aumentó solamente un 1,38%. Durante la prueba esta estufa requirió más leña de la solicitada por el protocolo WBT. Uno de los principales problemas de esta estufa puede ser el diseño de la cámara de combustión ya que se encuentra a un lado, no al frente como las otras, esto dificulta la entrada de aire para realizar una buena combustión.

El comportamiento de las estufas estufa A y estufa B aumentó de igual forma que las dos anteriores, para la segunda fase de la prueba. Sin embargo, la estufa C disminuyó la eficiencia a 9.88% en comparación con la fase de

arranque en frío, esto es posiblemente porque en el arranque en caliente la olla 2 no alcanzó una temperatura mayor a la alcanzada en la fase 1. La cámara de combustión de la estufa C no proporciona un flujo uniforme de transferencia de calor en toda el área de la plancha; con ello, se provoca que la hornilla secundaria no aumente su temperatura en un tiempo menor. Con base en los resultados de la figura 17, se rechaza la hipótesis nula ($H_{0,2}$).

En la tabla XII es posible observar una disminución de tiempo de ebullición para las cinco estufas estudiadas. Este factor ayudó en el aumento de la eficiencia en la segunda fase.

La figura 18 muestra la eficiencia de hervir a fuego lento. Esta fase es de baja potencia ya que no se requiere fuego intenso. En su lugar se requiere fuego lento, la temperatura requiere de mayor control ya que se evitó que esta descendiera 6 °C por debajo de la temperatura de ebullición de la olla principal. La eficiencia de la estufa D fue la mayor con 24,80%. Para este cambio de fase no existió un incremento tan marcado como el que se obtuvo de la fase 1 a la fase 2, sin embargo, esta estufa fue la más eficiente en las tres fases. La estufa E tuvo la menor eficiencia con un 7,12%, este dato es menor al alcanzado en la fase de alta potencia en el arranque en caliente.

La eficiencia de la fase de baja potencia de la estufa A, estufa B y estufa C aumentó respecto a la fase 2. Esto demuestra que son capaces de mantener una temperatura alta utilizando la cantidad mínima de combustible. Sin embargo, estos valores de eficiencia no son altos ya que se encuentran entre un 15,69-16,29%. Uno de los factores que pueden afectar estos valores es el tamaño de la cámara de combustión, la estufa A cuenta con una muy larga, por consiguiente, afecta en gran medida la distribución de flujo de calor en la plancha ya que esto requiere que se agregue mayor cantidad de leña, cuando

esto no es necesario. Con base en los resultados de la figura 18, se rechaza la hipótesis nula ($H_{0,3}$).

En la figura 19 se encuentra la potencia de fuego de las tres fases de la prueba, en el arranque en frío, la estufa C es el que tiene el valor más alto con 11 233,19 W mientras que la estufa D tiene el menor valor con 5 033,90 W, si bien esta última tiene una mayor eficiencia en las tres fases, el trabajo que realiza por unidad de tiempo es bajo. Esto es un indicador del tamaño de la cámara de combustión, la cual para esta última es pequeña. Además, esta misma cuenta con una compuerta en la entrada lo cual evita la entrada excesiva de O_2 realizando así una mejor combustión.

La potencia es directamente proporcional al aumento de combustible, por eso es posible observar que la estufa E tiene una potencia de fuego en arranque en frío de 9 975,70 W, debido a la gran cantidad de combustible que esta requiere para llegar a la temperatura de ebullición, es decir, una mayor potencia de fuego no significa que la estufa sea más eficiente, el valor de la potencia de las estufas A y B fue de 8 498,16 W y 6 876,11 W respectivamente. La estufa B fue la que logró por debajo de la Estufa D mejor eficiencia y menor potencia de fuego en comparación con las demás.

En el arranque en caliente se tiene un aumento de la potencia de fuego, excepto para la estufa E. El aumento corresponde a que, aunque el consumo de combustible es menor en esta fase, en el arranque en caliente las estufas alcanzan un momento puntual de funcionamiento, ya que minutos antes han llegado a la temperatura de ebullición. La estufa C alcanzó la mayor potencia de fuego con 15 976,61 W. Sin embargo, la eficiencia de esta disminuyó en la segunda fase de la prueba WBT. La estufa D tiene la menor potencia con 6

134,33 W porque fue la que menor cantidad de combustible requirió en esta fase.

La estufa E disminuyó la potencia de fuego en la segunda fase. Esta estufa no logró llegar a un punto máximo de su funcionamiento, por lo cual no fue posible que esta alcanzará un valor más alto.

Así mismo en la figura 19 se observa una clara disminución de la potencia de fuego porque a fuego lento se requiere de menor potencia para hervir alimentos, es decir, el consumo de combustible en esta fase es menor. Con esto aumenta también la eficiencia de las estufas. La estufa E refleja la mayor potencia de fuego con 8 081,09 W y debido a que se necesitó más combustible la eficiencia de esta fue la menor.

Las hipótesis ($H_{0,4}$ y $H_{0,5}$) son rechazadas, ya que, sí existe diferencia significativa entre los resultados de las estufas, la hipótesis nula ($H_{0,6}$) se acepta con lo cual, para la potencia de fuego en la de fase de hervir a fuego lento no existen diferencias significativas en las cinco estufas estudiadas.

Con base en lo anterior, se observa que las estufas sí trabajan en las dos primeras fases a alta potencia y en la tercera a baja potencia, consiguiendo en la última fase un aumento de la eficiencia energética.

La tabla XIII indica los valores de emisiones CO y material particulado 2,5 promedio que se obtuvieron por cada fase y estufa durante la prueba WBT. La estufa E reportó las cantidades más alta en la primera fase, la cantidad de combustible que requirió respecto a las otras estufas es un parámetro que afecto en gran medida el aumento de emisiones (820 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ $\text{PM}_{2,5}$ y 6,2 CO ppm) mientras que la Estufa C reportó los valores más bajos (50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ $\text{PM}_{2,5}$ y

0,70 CO ppm), es significativa la menor cantidad de leña que necesito para alcanzar la temperatura de ebullición.

En la fase de arranque en caliente la estufa B reportó los valores más altos de emisiones (288 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ $\text{PM}_{2,5}$ y 1,8 CO ppm) sin embargo, este dato no es consistente puesto que no fue la estufa que requirió más combustible en esta fase. Las emisiones en la segunda fase disminuyeron en todas las estufas, debido al menor requerimiento de leña. El menor valor lo tiene la estufa D con (21 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ $\text{PM}_{2,5}$ y 0,4 CO ppm).

La disminución de emisiones en la fase de hervir a fuego lento disminuyó considerablemente debido al menor uso de combustible durante 45 minutos. En esta fase la estufa B emitió la mayor cantidad (98 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ $\text{PM}_{2,5}$ y 1,2 CO ppm) y la estufa D tiene el menor valor (13 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ $\text{PM}_{2,5}$ y 0,2 CO ppm).

Con base en la discusión anterior, la estufa D, para este estudio es la mejor opción ya que en las tres fases fue la que obtuvo mayor eficiencia energética, además, el precio es de Q 1 800.00 el cual es menor al de las demás.

Además, las estufas analizadas son fáciles de transportar y ocupan un espacio mínimo, dado el material con el cual se construyeron. Esto es ventajoso para los usuarios. La estufa A es más pesada y grande que las otras, sin embargo, esto no implica mayores complicaciones y esfuerzo.

CONCLUSIONES

1. Se analizó la eficiencia de cinco estufas ahorradoras utilizando el protocolo WBT, bajo condiciones controladas en un laboratorio.
2. La eficiencia energética de las estufas estufa A, estufa B, estufa C, estufa D y estufa E en el arranque en frío son: 8,63%, 11,98%, 10,28%, 16,98% y 7,51% respectivamente.
3. La eficiencia energética de las estufas A, B, C, D y E en el arranque en caliente son: 10,35%, 12,54%, 9,88%, 24,18% y 8,89% respectivamente.
4. La eficiencia energética de las estufas A, B, C, D y E en la fase hervir a fuego lento son: 16,00%, 15,69%, 16,19%, 24,80% y 7,12% respectivamente.
5. La potencia de fuego de las estufas A, B, C, D y E en el arranque en frío son: 8 498,16 W; 6 876,11 W; 11 233,19 W; 5 033,90 W y 9 975,70 W, respectivamente.
6. La potencia de fuego de las estufas A, B, C, D y E en el arranque en caliente son: 11 036,95 W; 9 826,37 W; 15 976,61 W; 6 134,33 W y 9 640,85 W, respectivamente.
7. La potencia de fuego de las estufas A, B, C, D y E en el arranque en la fase hervir a fuego lento son: 5 918,61 W; 6 239,64 W; 5 895,53 W; 4 344,26 W y 8 081,09 W, respectivamente.

8. Las emisiones de CO y PM_{2,5} son más altas en la fase en frío debido a que se tiene mayor consumo de combustible.
9. La estufa D tuvo la mejor eficiencia en las tres fases estudiadas siguiendo el protocolo WBT.
10. La estufa C fue la que alcanzó en menor tiempo la temperatura de ebullición en las fases de arranque en frío y caliente.
11. El menor consumo específico de leña lo obtuvo la estufa D en las tres fases (126, 92 y 97) g/L respectivamente.
12. Una familia puede ahorrar al año Q 949,82 al sustituir el fogón abierto tradicional por una estufa D.

RECOMENDACIONES

1. Evitar realizar las pruebas muy temprano, ya que la humedad del ambiente a esas horas siempre fue mayor, lo cual afecta considerablemente la eficiencia especialmente en el arranque en frío.
2. Secar a temperatura ambiente uno o dos días antes la leña cortada en tamaños aproximadamente igual, para evitar utilizar secarlas en el horno.
3. Realizar el experimento utilizando otros tipos de leña, para comparar el grado en que afecta la eficiencia, potencia de fuego y emisiones el tipo de combustible utilizado.
4. Realizar el experimento en un lugar completamente cerrado, evitar las ventanas y espacios abiertos en las paredes, ya que esto influye significativamente en las mediciones de emisiones de CO y PM_{2,5}.
5. La humedad de la leña es un factor importante, se recomienda realizar el experimento variando la humedad de la leña (5%, 10%, 15%, 25%) con el fin de determinar el nivel en que esta afecta la eficiencia.
6. Realizar un estudio de la eficiencia energética, evaluando el diseño del tiro de la chimenea ya que es un factor que interfiere en gran medida en el funcionamiento y rendimiento de esta.

BIBLIOGRAFÍA

1. BARDARLES, Marco Tulio. *¡Construyamos la estufa ahorradora de leña!* [en línea]. <<https://corazonverdeguate.files.wordpress.com/2011/05/estufaahorradora.pdf>>. [Consulta: febrero de 2017].
2. BLANCO, Salvador. et. al. *Estudio comparativo de estufas mejoradas para sustentar un Programa de Intervención Masiva en México Informe Final*. México: Instituto Nacional de Ecología, 2012, 61 p.
3. *Capítulo 15. Segunda Ley de la termodinámica y entropía*. [en línea]. <<http://old.dgeo.udec.cl/~juaninzunza/docencia/fisica/cap15.pdf>>. [Consulta, febrero de 2017].
4. 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 2017].
5. DÍAZ JIMÉNEZ, Rodolfo. BERRUETA, Víctor. MASERA, Omar. *Estufas de Leña. Cuaderno Temático No. 3*. México: Red Mexicana de Bioingeniería, AC., 2011, 36 p.
6. 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 2017].

7. Global Alliance for Clean Cookstoves. *WBT Protocol 4.2.3 English*. [en línea]. <<http://cleancookstoves.org/technology-and-fuels/testing/protocols.html>>. [Consulta, febrero de 2017].
8. Global Alliance for Clean Cookstoves. *WBT Protocol 4.2.4 Spreadsheet*. [en línea]. <<http://cleancookstoves.org/technology-and-fuels/testing/protocols.html>>. [Consulta: febrero de 2017].
9. LARS, Mytting. *Claves para tener la mejor leña*. [en línea]. <http://jotul.com/es/inicio/claves-buena-le%C3%B1a>. [Consulta: febrero de 2017].
10. Minambiente. *Lineamientos para un programa Nacional de Estufas Eficientes para cocción con leña*. [en línea]. <http://www.minambiente.gov.co/images/cambioclimatico/pdf/mitigacion_/LINEAMIENTOS_ESTUFAS_MEJORADAS_PARA_COCCION_CON_LE%C3%93N_CON_LE%C3%91A.pdf>. [Consulta: febrero de 2017].
11. 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 2017].
12. _____ . *Estufa ahorradora de plancha metálica*. [en línea]. <[www.mem.gob.gt/wp-content/uploads/2015/06/Estufa-de-Plancha-Metálica.pdf](http://www.mem.gob.gt/wp-content/uploads/2015/06/Estufa-de-Plancha-Met%C3%A1lica.pdf)>. [Consulta: febrero de 2017].

13. Prensa Libre. *El asesino de la cocina*. [en línea]. <http://www.prensalibr.com/noticias/Titulo-articulo-edicion-impres_0_1048095205.html>. [Consulta: febrero de 2017].
14. RAVIGNANI, Emilio. *Química y comportamiento del fuego*. [en línea]. <<http://www.hazmatargentina.com/descargas/incendio/quimicaycomportamiento.pdf>>. [Consulta: febrero de 2017].
15. WACKERLY, Denis. *Estadística Matemática Con Aplicaciones*. 7ª ed. México D.F., México: Cengage Learning Editores, S.A., Apéndice 2. 2008, 853 p.
16. YAUMURA, Miñono. *La energía de la madera*. [en línea]. <[Http://www.cubasolar.cu/biblioteca/energia/Energia30/HTML/articulo08.htm](http://www.cubasolar.cu/biblioteca/energia/Energia30/HTML/articulo08.htm)>. [Consulta: febrero de 2017].

APÉNDICES

Apéndice 1. **Muestra de cálculo**

- Determinación punto de ebullición local

El procedimiento para determinar el valor fue realizado por la Sección De Tecnología de la Madera del Centro de Investigaciones de Ingeniería. Se obtuvo un dato oficial de **91 °C** con el material y equipo que se tiene el laboratorio.

- Determinación del poder calorífico de la leña utilizada

El poder calorífico proporcionado fue de 19 520 HHV kJ/kg, dicho dato fue de un trabajo previo, el análisis fue realizado por el Ministerio de Energía y Ambiente.

- Cálculo de la eficiencia y potencia

Las ecuaciones que se utilizan en la Hoja de Excel WBT 4.4.4 se detallan a continuación, (estas mismas pueden ser consultadas en <http://cleancookstoves.org/technology-and-fuels/testing/protocols.html> WBT 4.2.3 PROTOCOL (ENGLISH)).

Continuación apéndice 1.

- Datos constantes en las tres fases
 - Promedio humedad base húmeda

$$H_H = \frac{H_{H1} + H_{H2} + H_{H3}}{3} \quad [Ec. 1]$$

Donde:

H_H = % de humedad en base húmeda

Datos estufa A, corrida 1

H_{H1} = 11,4%

H_{H2} = 12,5%

H_{H3} = 11,5%

$$H_H = \frac{11,4 + 12,5 + 11,5}{3}$$
$$H_H = 12\%$$

- Humedad en base seca

$$H_S = \left(\frac{H_H}{1 + H_H} \right) * 100 \quad [Ec. 2]$$

Donde:

H_H = % de humedad en base húmeda

H_S = % de humedad en base seca

Continuación apéndice 1.

Datos: estufa A, arranque en frío, corrida 1

$H_H = 12\%$

$$H_S = \left(\frac{0,12}{1 + 0,12} \right) * 100$$

$$H_S = 11\%$$

- Cálculos para las fases WBT
 - Tiempo de ebullición, olla 1

$$\Delta t = t_f - t_o \text{ [Ec. 3]}$$

Donde:

Δt = tiempo de ebullición (min).

t_o = tiempo inicio (min).

t_f = tiempo final (agua llega a la temperatura de ebullición) (min).

Datos: estufa A, arranque en frío, corrida 1

$t_o = 9:45 \text{ h}$

$t_f = 11:13 \text{ h}$

$$\Delta t = 11:13 \text{ h} - 9:45 \text{ h}$$

$$\Delta t = 88 \text{ min}$$

- Combustible Consumido

Continuación apéndice 1.

$$m_{comb} = m_{ci} - m_{cf} \text{ [Ec. 4]}$$

Donde:

m_{comb} = combustible consumido (g).

m_{ci} = tiempo inicio (g).

m_{cf} = tiempo final (agua llego a la temperatura de ebullición) (g).

Datos: estufa A, arranque en frío, corrida 1

m_{ci} = 4 040 g

m_{cf} = 1 410 g

$$m_{comb} = 4\ 040\ g - 1\ 040\ g$$

$$m_{comb} = 2\ 630\ g$$

- Peso neto de carbón y cenizas

$$\Delta C_c = C_c - k \text{ [Ec. 5]}$$

Donde:

ΔC_c = Peso neto de carbón y cenizas (g).

k = peso del contenedor (g).

Datos: estufa A, arranque en frío, corrida 1

C_c = 650 g

k = 420 g

$$\Delta C_c = 650 - 420$$

$$\Delta C_c = 230\ kg$$

Continuación apéndice 1.

- Masa de agua vaporizada

$$w_{cv} = P1_{ci} - P1_{cf} \quad [Ec. 6]$$

Donde:

w_{cv} = Agua vaporizada (g).

$P1_{ci}$ = Olla con agua antes de la prueba (g).

$P1_{cf}$ = Olla con agua después de la prueba (g).

Datos: estufa A, arranque en frío, corrida 1. (Cálculo para las dos ollas).

P_{ci1} = 5 730 g

P_{ci2} = 5 730 g

P_{cf1} = 5 040 g

P_{cf2} = 5 240 g

$$w_{cv} = 10\,740 - 10\,280$$

$$w_{cv} = 460 \text{ g}$$

- Masa efectiva de agua hervida (múltiples ollas)

$$w_{cr} = \sum_{j=1}^2 \left((P_{j_{cf}} - P_j) * \left(\frac{T_{j_{cf}} - T_{j_{ci}}}{T_b - T_{j_{ci}}} \right) \right) \quad [Ec. 7]$$

Donde:

$P_{j_{cf}}$ = masa de la olla después de la prueba (g).

P_j = masa de la olla vacía (g).

$T_{j_{cf}}$ = temperatura del agua antes de la prueba (°C).

$T_{j_{ci}}$ = temperatura del agua después de la prueba (°C).

Continuación apéndice 1.

Datos: estufa A, arranque en frío, corrida 1. (Cálculo para las dos ollas).

Pcf1= 5 040 g

Pcf2 = 5 240 g

Tci1= 17,8 °C

Tci2= 17,6 °C

Tcf1= 91 ° C

Tcf2= 72, 7 °C

P1 = 370 g

P2 = 370 g

Teb = 91 °C

$$w_{cr} = 8\,326,00\text{ g}$$

- Temperatura del tiempo de ebullición corregida

Esta corrección se realiza con el fin de facilitar la comparación entre las pruebas, que pueden haber usado temperaturas iniciales más altas o más bajas. Es corregida para reflejar un aumento de temperatura de 75 °C de inicio a ebullición.

$$\Delta t_c^T = \Delta t_c * \frac{75}{T_{eb} - T_{1ci}} \quad [Ec. 8]$$

Donde:

Δt_c^T = tiempo corregido, olla 1 (min).

Δt_c = diferencia tiempo inicio y de ebullición (min).

Continuación apéndice 1.

T_{eb} = temperatura de ebullición (°C).

T_{1ci} = temperatura inicio (°C).

Datos: estufa A, arranque en frío, corrida 1.

$\Delta t_c = 88$ min

$T_{eb} = 91$ °C

$T_{1ci} = 17,8$ °C

$$\Delta t_c^T = 88 \text{ min} * \frac{75 \text{ }^\circ\text{C}}{91^\circ\text{C} - 17,8 \text{ }^\circ\text{C}}$$

$$\Delta t_c^T = 90 \text{ min}$$

- Consumo específico de combustible

$$m_{comb1} = \frac{m_{comb}(LHV(1 - H_s) - H_s(4,186(T_{eb} - T_{amb}) + 2,257)) - \Delta C_h * LVH_c}{LHV}$$

m_{comb} = combustible consumido (g).

LHV = valor calorífico neto (kJ/kg). *

H_s = humedad en base seca. (%).

T_{eb} = temperatura de ebullición (°C).

T_{amb} = temperatura ambiente (°C).

ΔC_c = peso neto de carbón y cenizas (g).

*En el caso de los combustibles de madera, el LHV típicamente difiere del HHV en 1,32 MJ / kg².

Datos: estufa A, arranque en frío, corrida 1.

Continuación apéndice 1.

$$m_{\text{comb}} = 2\,630 \text{ g}$$

$$\text{LHV} = 18,200 \text{ kJ/kg.}$$

$$H_s = 11\%.$$

$$T_{\text{eb}} = 91^\circ\text{C.}$$

$$T_{\text{amb}} = 20.9^\circ\text{C.}$$

$$\Delta C_c = 230 \text{ g.}$$

$$m_{\text{comb1}} = 2300 \text{ g}$$

- Eficiencia térmica

$$h_c = \frac{4.186 * \sum_{j=1}^2 (P_{jci} - P_j) * (T_{jcf} - T_{jci}) + 2260 * w_{cv}}{m_{\text{comb1}} * \text{LHV}} \quad [\text{Ec. 10}]$$

Datos: estufa A, arranque en frío, corrida 1.

$$P_{\text{ci1}} = 5\,730 \text{ g}$$

$$P_{\text{ci2}} = 5\,730 \text{ g}$$

$$T_{\text{cf1}} = 91^\circ\text{C}$$

$$T_{\text{cf2}} = 72,7^\circ\text{C}$$

$$P_1 = 370 \text{ g}$$

$$P_2 = 370 \text{ g}$$

$$w_{\text{cv}} = 460 \text{ g}$$

$$m_{\text{comb1}} = 2\,300 \text{ g}$$

$$\text{LHV} = 18200 \text{ kJ/kg}$$

$$h_c = 9\%$$

Continuación apéndice 1.

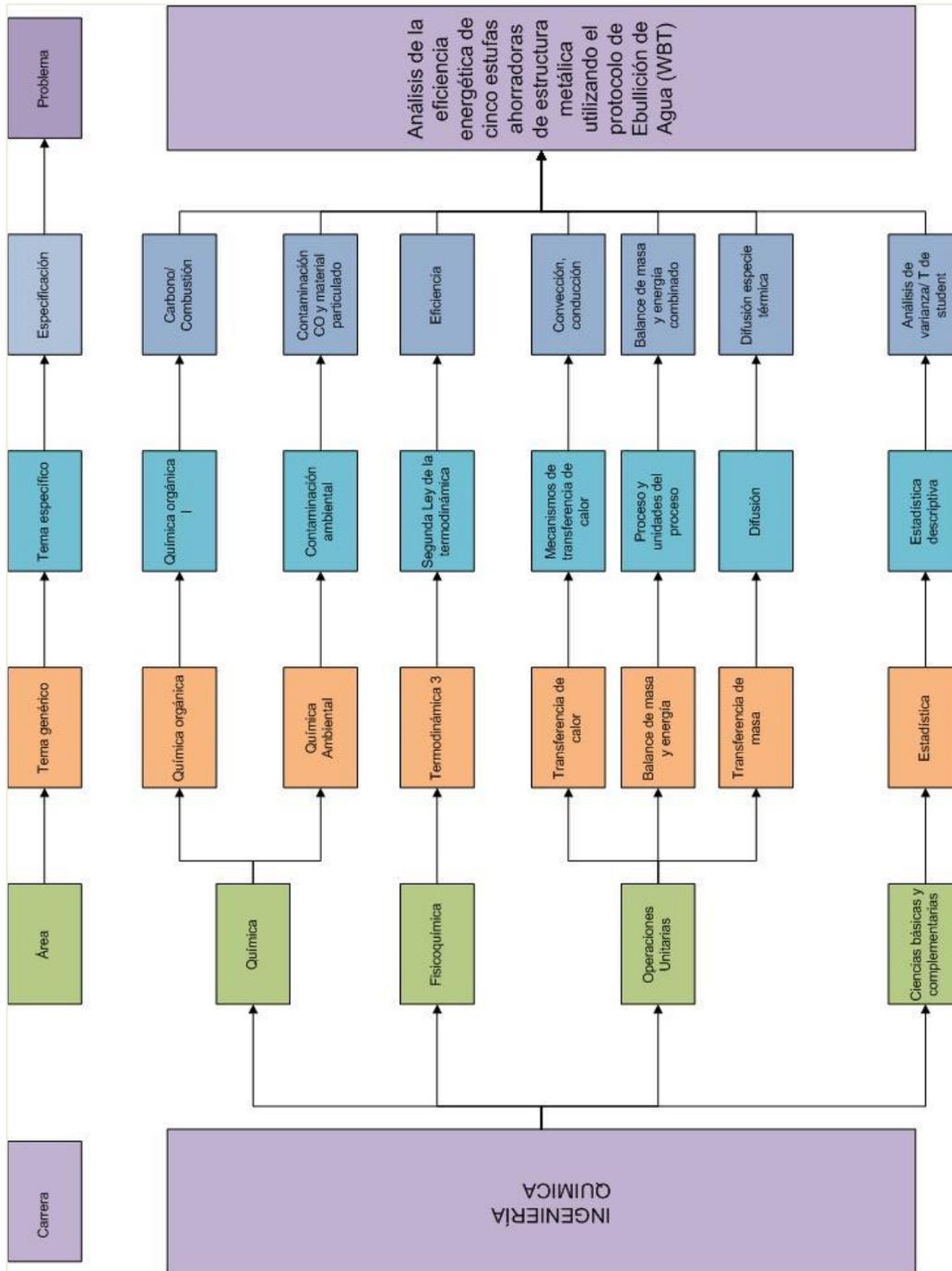
- Potencia de fuego

$$P_t = \frac{m_{comb1} * LHV}{\Delta t * 60} \text{ [Ec. 11]}$$

Datos: estufa A, arranque en frío, corrida 1.

$$P_t = \frac{2\,300\text{ g} * 18\,200\text{ KJ/kg}}{88\text{ min} * 60}$$
$$P_t = 7\,929\text{ watts}$$

Apéndice 2. Tabla de requisitos académicos



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 4. Datos de eficiencia del fogón abierto

Diseño	<ul style="list-style-type: none"> • Fogón abierto de tres piedras. • No posee aislante ni cámara de combustión definida. • La plancha, suele ser un comal o las mismas ollas/sartenes sobre las piedras.
Material	Soporte de piedras, arena y pedrín
Tiempo de vida útil	No aplica
Combustible	Leña/ biomasa
Costo	Mínimo (si se utiliza comal el precio dependiendo del tamaño suele estar entre Q.40.00 –Q90.00).
Características	<p>No tiene chimenea</p> <p>Se construye en el lugar, por las personas que la van a utilizar</p>
Aplicación	Rural, periurbana
Eficiencia energética	No se posee un dato exacto, sin embargo, en el 2014 Javier Darío Aristizábal Hernández 2, publico en un artículo (Validación y evaluación comparativa de la eficiencia de una estufa de leña mejorada bajo condiciones controladas y prueba de campo ¹), que la eficiencia energética es menor del 10% .
Fotografía	 <p>Fuente: http://folklore.panamatipico.com/articulo.php?articulo=278 Consulta, 4 de marzo de 2018.</p>

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 5. Resultados estufa A

1. HIGH POWER TEST (COLD START)		units	Test 1	Test 2	Test 3	Average
Time to boil Pot # 1	min		88	74	92	84.666667
Temp-corrected time to boil Pot # 1	min		90	83	93	89
Burning rate	g/min		26	30	28	28
Thermal efficiency	%		9%	9%	7%	0.0862503
Specific fuel consumption	g/liter		275	255	311	280
Temp-corrected specific consumption	g/liter		282	285	314	294
Temp-corrected specific energy cons.	kJ/liter		5,132	5,179	5,721	5344
Firepower	watts		7,929	9,002	8,564	8498.161
2. HIGH POWER TEST (HOT START)		units	Test 1	Test 2	Test 3	Average
Time to boil Pot # 1	min		55	57	60	57.333333
Temp-corrected time to boil Pot # 1	min		58	62	63	61
Burning rate	g/min		35	40	34	36
Thermal efficiency	%		11%	10%	10%	0
Specific fuel consumption	g/liter		220	245	244	236
Temp-corrected specific consumption	g/liter		231	268	257	252
Temp-corrected specific energy cons.	kJ/liter		4,199	4,884	4,678	4587
Firepower	watts		10,660	12,016	10,435	11037
3. LOW POWER (SIMMER)		units	Test 1	Test 2	Test 3	Average
Burning rate	g/min		18	19	22	20
Thermal efficiency	%		16%	18%	14%	0.1599848
Specific fuel consumption	g/liter		108	113	127	116
Temp-corrected specific energy cons.	kJ/liter		1,961	2,059	2,302	2108
Firepower	watts		5,483	5,671	6,603	5919
Turn down ratio	--		1.45	1.59	1.30	1

Fuente: elaboración propia, empleando *WBT Protocol 4.2.4 spreadsheet*.

Apéndice 6. Resultados estufa B

1. HIGH POWER TEST (COLD START)		units	Test 1	Test 2	Test 3	Average
Time to boil Pot # 1	min	76	84	94	84.666667	
Temp-corrected time to boil Pot # 1	min	84	90	104	93	
Burning rate	g/min	25	23	20	23	
Thermal efficiency	%	12%	13%	11%	0.1197955	
Specific fuel consumption	g/liter	214	210	227	217	
Temp-corrected specific consumption	g/liter	236	225	250	237	
Temp-corrected specific energy cons.	kJ/liter	4,298	4,101	4,547	4315	
Firepower	watts	7,719	6,920	5,990	6876.1136	

2. HIGH POWER TEST (HOT START)		units	Test 1	Test 2	Test 3	Average
Time to boil Pot # 1	min	31	56	49	45.333333	
Temp-corrected time to boil Pot # 1	min	34	62	54	50	
Burning rate	g/min	41	27	29	32	
Thermal efficiency	%	13%	13%	12%	0	
Specific fuel consumption	g/liter	152	174	179	168	
Temp-corrected specific consumption	g/liter	167	192	198	186	
Temp-corrected specific energy cons.	kJ/liter	3,042	3,493	3,607	3381	
Firepower	watts	12,418	8,136	8,925	9826	

3. LOW POWER (SIMMER)		units	Test 1	Test 2	Test 3	Average
Burning rate	g/min	25	24	24	24	
Thermal efficiency	%	15%	16%	16%	0.1569356	
Specific fuel consumption	g/liter	129	133	125	129	
Temp-corrected specific energy cons.	kJ/liter	2,352	2,424	2,272	2350	
Firepower	watts	7,449	7,390	7,158	7332	
Turn down ratio	--	1.04	0.94	0.84	1	

Fuente: elaboración propia, empleando *WBT Protocol 4.2.4 spreadsheet*.

Apéndice 7. Resultados estufa C

1. HIGH POWER TEST (COLD START)		units	Test 1	Test 2	Test 3	Average
Time to boil Pot # 1	min		42	64	47	51
Temp-corrected time to boil Pot # 1	min		46	71	51	56
Burning rate	g/min		45	28	37	37
Thermal efficiency	%		10%	10%	11%	0.1027544
Specific fuel consumption	g/liter		200	222	200	207
Temp-corrected specific consumption	g/liter		218	247	217	227
Temp-corrected specific energy cons.	kJ/liter		3,964	4,491	3,956	4137
Firepower	watts		13,742	8,610	11,348	11233.185
2. HIGH POWER TEST (HOT START)		units	Test 1	Test 2	Test 3	Average
Time to boil Pot # 1	min		27	34	33	31.333333
Temp-corrected time to boil Pot # 1	min		30	38	36	35
Burning rate	g/min		64	46	48	53
Thermal efficiency	%		9%	10%	10%	0
Specific fuel consumption	g/liter		209	194	190	198
Temp-corrected specific consumption	g/liter		231	214	210	218
Temp-corrected specific energy cons.	kJ/liter		4,204	3,890	3,815	3969
Firepower	watts		19,461	13,835	14,634	15977
3. LOW POWER (SIMMER)		units	Test 1	Test 2	Test 3	Average
Burning rate	g/min		24	20	21	21
Thermal efficiency	%		17%	13%	18%	0.1619419
Specific fuel consumption	g/liter		134	117	114	122
Temp-corrected specific energy cons.	kJ/liter		2,433	2,126	2,082	2213
Firepower	watts		7,320	5,973	6,250	6515
Turn down ratio	--		1.88	1.44	1.82	2

Fuente: elaboración propia, empleando *WBT Protocol 4.2.4 spreadsheet*.

Apéndice 8. Resultados estufa D

1. HIGH POWER TEST (COLD START)		units	Test 1	Test 2	Test 3	Average
Time to boil Pot # 1	min		76	102	35	71
Temp-corrected time to boil Pot # 1	min		84	109	39	77
Burning rate	g/min		12	13	25	17
Thermal efficiency	%		18%	16%	17%	0.169801
Specific fuel consumption	g/liter		122	145	111	126
Temp-corrected specific consumption	g/liter		134	155	123	137
Temp-corrected specific energy cons.	kJ/liter		2,443	2,826	2,233	2501
Firepower	watts		3,759	3,792	7,551	5033.8956
2. HIGH POWER TEST (HOT START)						
2. HIGH POWER TEST (HOT START)		units	Test 1	Test 2	Test 3	Average
Time to boil Pot # 1	min		66	31	29	42
Temp-corrected time to boil Pot # 1	min		74	34	32	47
Burning rate	g/min		13	21	28	20
Thermal efficiency	%		22%	23%	21%	0
Specific fuel consumption	g/liter		102	81	93	92
Temp-corrected specific consumption	g/liter		114	89	102	102
Temp-corrected specific energy cons.	kJ/liter		2,071	1,623	1,854	1849
Firepower	watts		3,805	6,235	8,362	6134
3. LOW POWER (SIMMER)						
3. LOW POWER (SIMMER)		units	Test 1	Test 2	Test 3	Average
Burning rate	g/min		11	19	13	14
Thermal efficiency	%		24%	24%	24%	0.2388057
Specific fuel consumption	g/liter		76	135	78	97
Temp-corrected specific energy cons.	kJ/liter		1,387	2,459	1,425	1757
Firepower	watts		3,472	5,653	3,907	4344
Turn down ratio	--		1.08	0.67	1.93	1

Fuente: elaboración propia, empleando *WBT Protocol 4.2.4 spreadsheet*.

Apéndice 9. Resultados estufa E

1. HIGH POWER TEST (COLD START)	units	Test 1	Test 2	Test 3	Average
Time to boil Pot # 1	min	177	61	62	100
Temp-corrected time to boil Pot # 1	min	187	65	68	107
Burning rate	g/min	28	33	39	33
Thermal efficiency	%	7%	8%	8%	0.075086
Specific fuel consumption	g/liter	725	275	308	436
Temp-corrected specific consumption	g/liter	766	295	340	467
Temp-corrected specific energy cons.	kJ/liter	13,944	5,368	6,190	8501
Firepower	watts	8,378	9,869	11,679	9975.6974

2. HIGH POWER TEST (HOT START)	units	Test 1	Test 2	Test 3	Average
Time to boil Pot # 1	min	133	70	51	84.666667
Temp-corrected time to boil Pot # 1	min	139	76	56	90
Burning rate	g/min	23	24	38	28
Thermal efficiency	%	9%	9%	9%	0
Specific fuel consumption	g/liter	456	258	256	323
Temp-corrected specific consumption	g/liter	475	280	282	346
Temp-corrected specific energy cons.	kJ/liter	8,646	5,098	5,136	6293
Firepower	watts	7,021	7,372	11,529	8641

3. LOW POWER (SIMMER)	units	Test 1	Test 2	Test 3	Average
Burning rate	g/min	44	23	15	27
Thermal efficiency	%	4%	6%	12%	0.0711523
Specific fuel consumption	g/liter	321	147	93	187
Temp-corrected specific energy cons.	kJ/liter	5,837	2,671	1,691	3400
Firepower	watts	13,206	7,107	4,477	8263
Turn down ratio	--	0.63	1.39	2.61	2

Fuente: elaboración propia, empleando *WBT Protocol 4.2.4 spreadsheet*.

Apéndice 10. ANOVA de la eficiencia energética, fase I

RESUMEN						
Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza		
Estufa A	3	0,25875079	0,08625026	0,00010407		
Estufa B	3	0,35938639	0,11979546	4,7151E-05		
Estufa C	3	0,30826311	0,10275437	8,4096E-06		
Estufa D	3	0,50940309	0,16980103	9,2008E-05		
Estufa E	3	0,22525811	0,07508604	2,7776E-05		
ANÁLISIS DE VARIANZA						
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	0,01651479	4	0,0041287	73,8799618	2,1925E-07	3,47804969
Dentro de los grupos	0,00055884	10	5,5884E-05			
Total	0,01707363	14				
F>Fc	Se rechaza la hipótesis nula					

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 11. ANOVA de la eficiencia energética, fase II

RESUMEN						
Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza		
Estufa A	3	0,31035479	0,1034516	2,7424E-05		
Estufa B	3	0,37618073	0,12539358	6,5238E-05		
Estufa C	3	0,29647361	0,09882454	4,9811E-05		
Estufa D	3	0,65503858	0,21834619	0,00019423		
Estufa E	3	0,26684351	0,08894784	3,1412E-06		
ANÁLISIS DE VARIANZA						
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	0,03342918	4	0,00835729	122,956283	1,854E-08	3,47804969
Dentro de los grupos	0,0006797	10	6,797E-05			
Total	0,03410887	14				
F>Fc	Se rechaza la hipótesis nula					

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 12. ANOVA de la eficiencia energética, fase III

RESUMEN						
Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza		
Estufa A	3	0,47995434	0,15998478	0,00048804		
Estufa B	3	0,47080684	0,15693561	3,5322E-05		
Estufa C	3	0,48582563	0,16194188	0,00072724		
Estufa D	3	0,71641724	0,23880575	7,8621E-06		
Estufa E	3	0,21345702	0,07115234	0,00160426		
ANÁLISIS DE VARIANZA						
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	0,04227725	4	0,01056931	18,4602981	0,00013044	3,47804969
Dentro de los grupos	0,00572543	10	0,00057254			
Total	0,04800268	14				
F>Fc	Se rechaza la hipótesis nula					

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 13. ANOVA de la potencia de fuego, fase I

RESUMEN						
Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza		
Estufa A	3	25494,4829	8498,16097	291232,012		
Estufa B	3	20628,3409	6876,11365	748650,577		
Estufa C	3	33699,5555	11233,1852	6594675,52		
Estufa D	3	12101,6868	4033,89559	200688,832		
Estufa E	3	29927,0922	9975,6974	2732288,91		
ANÁLISIS DE VARIANZA						
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	94565954,7	4	23641488,7	11,1859042	0,00103458	3,47804969
Dentro de los grupos	21135071,7	10	2113507,17			
Total	115701026	14				
F>Fc	Se rechaza la hipótesis nula					

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 14. ANOVA de la potencia de fuego, fase II

RESUMEN						
Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza		
Estufa A	3	33110,8419	11036,9473	732296,741		
Estufa B	3	29479,1141	9826,37138	5194163,68		
Estufa C	3	47929,843	15976,6143	9263848,25		
Estufa D	3	18402,992	6134,33068	5198234,44		
Estufa E	3	25922,5637	8640,85455	6288748,88		
ANÁLISIS DE VARIANZA						
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	159282839	4	39820709,8	7,4634093	0,00471991	3,47804969
Dentro de los grupos	53354584	10	5335458,4			
Total	212637423	14				
F>Fc	Se rechaza la hipótesis nula					

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 15. ANOVA de la potencia de fuego, fase III

RESUMEN						
Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza		
Estufa A	3	17755,8181	5918,60605	359730,216		
Estufa B	3	18718,9065	6239,63549	430104,598		
Estufa C	3	17686,5815	5895,52717	921998,668		
Estufa D	3	13032,7793	4344,25976	1332621,24		
Estufa E	3	24243,2826	8081,0942	26447657		
ANÁLISIS DE VARIANZA						
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	21304445,5	4	5326111,37	0,90297219	0,49791589	3,47804969
Dentro de los grupos	58984223,5	10	5898422,35			
Total	80288668,9	14				
F<Fc	Se acepta la hipótesis nula					

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 15.

Análisis de costos de las estufas ahorradoras

Estufa A							
Ahorro mensual por fase			Ahorro anual por fase			Total ahorro anual	Venta al público
Fase I	Fase II	Fase III	Fase I	Fase II	Fase III		
Q10,36	Q12,42	Q19,20	Q124,27	Q149,04	Q230,40	Q503,71	Q1,400,00
Estufa B							
Ahorro mensual por fase			Ahorro anual por fase			Total ahorro anual	Venta al público
Fase I	Fase II	Fase III	Fase I	Fase II	Fase III		
Q14,38	Q15,05	Q18,83	Q172,51	Q180,58	Q225,94	Q579,02	Q1,700,00
Estufa C							
Ahorro mensual por fase			Ahorro anual por fase			Total ahorro anual	Venta al público
Fase I	Fase II	Fase III	Fase I	Fase II	Fase III		
Q12,34	Q11,86	Q19,43	Q148,03	Q142,27	Q233,14	Q523,44	Q2,669,00
Estufa D							
Ahorro mensual por fase			Ahorro anual por fase			Total ahorro anual	Venta al público
Fase I	Fase II	Fase III	Fase I	Fase II	Fase III		
Q20,38	Q29,02	Q29,76	Q244,51	Q348,19	Q357,12	Q949,82	Q1,800,00
Estufa E							
Ahorro mensual por fase			Ahorro anual por fase			Total ahorro anual	Venta al público
Fase I	Fase II	Fase III	Fase I	Fase II	Fase III		
Q9,01	Q10,67	Q8,54	Q108,14	Q128,02	Q102,53	Q338,69	Q2,200,00

Fuente: elaboración propia

ANEXOS

Anexo 1. Prueba WBT, estufa A



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

Anexo 2. Prueba WBT, estufa B



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

Anexo 3. **Prueba WBT, estufa C**



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

Anexo 4. **Prueba WBT, estufa D**



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

Anexo 5. **Prueba WBT, estufa E**



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

Anexo 6. **IAP (Medidor CO y PM_{2,5})**



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

Anexo 7. **Higrómetro**



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

Anexo 8. **Termómetro digital**



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

Anexo 9. Campana de extracción de gases



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

Anexo 10. Ollas utilizadas para la prueba WBT



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

Anexo 11. **Balanza digital y leña**



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