



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

**DETERMINACIÓN DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA DE UNA ESTUFA AHORRADORA DE  
LEÑA TIPO ROCKET AL VARIAR EL FLUJO DE AIRE EN LA CÁMARA DE COMBUSTIÓN,  
A TRAVÉS DEL PROTOCOLO DE PRUEBA DE EBULLICIÓN DE AGUA 4.2.2. (WBT)  
UTILIZANDO LEÑA COMO COMBUSTIBLE (*PINUS AYACAHUITE*)**

**Ana Lucía Cán Reyes**

Asesorado por Ing. Mauricio Valentino Rivera Tello

Guatemala, abril de 2022

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**DETERMINACIÓN DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA DE UNA ESTUFA AHORRADORA DE  
LEÑA TIPO ROCKET AL VARIAR EL FLUJO DE AIRE EN LA CÁMARA DE COMBUSTIÓN,  
A TRAVÉS DEL PROTOCOLO DE PRUEBA DE EBULLICIÓN DE AGUA 4.2.2. (WBT)  
UTILIZANDO LEÑA COMO COMBUSTIBLE (*PINUS AYACAHUITE*)**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
POR

**ANA LUCÍA CÁN REYES**

ASESORADO POR ING. MAURICIO VALENTINO RIVERA TELLO

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

**INGENIERA QUÍMICA**

GUATEMALA, ABRIL DE 2022

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERÍA



**NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA**

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
VOCAL I	Ing. José Francisco Gómez Rivera
VOCAL II	Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Kevin Vladimir Armando Cruz Lorente
VOCAL V	Br. Fernando José Paz González
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

**TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO**

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
EXAMINADOR	Ing. Gerardo Ordoñez
EXAMINADORA	Inga. Cinthya Patricia Ortiz Quiroa
EXAMINADOR	Ing. Jorge Rodolfo García Carrera
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

## **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:

**DETERMINACIÓN DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA DE UNA ESTUFA AHORRADORA DE LEÑA TIPO ROCKET AL VARIAR EL FLUJO DE AIRE EN LA CÁMARA DE COMBUSTIÓN, A TRAVÉS DEL PROTOCOLO DE PRUEBA DE EBULLICIÓN DE AGUA 4.2.2. (WBT) UTILIZANDO LEÑA COMO COMBUSTIBLE (*PINUS AYACAHUITE*)**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Química, con fecha 28 de julio de 2019.

**Ana Lucía Cán Reyes**

Guatemala, 18 de enero de 2022

Ingeniero  
Williams Guillermo Álvarez Mejía  
DIRECTOR  
Escuela de Ingeniería Química  
Presente

Estimado Ingeniero Williams Guillermo Álvarez:

Por medio de la presente HAGO CONSTAR que he revisado y aprobado el informe final del trabajo de graduación titulado: " **DETERMINACIÓN DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA DE UNA ESTUFA AHORRADORA DE LEÑA TIPO ROCKET AL VARIAR EL FLUJO DE AIRE EN LA CÁMARA DE COMBUSTIÓN, A TRAVÉS DEL PROTOCOLO DE PRUEBA DE EBULLICIÓN DE AGUA 4.2.2. (WBT) UTILIZANDO LEÑA COMO COMBUSTIBLE (*Pinus Ayacahuite*).**" Elaborado por la estudiante de Ingeniería Química, **Ana Lucía Cán Reyes**, quien se identifica con el registro académico **2014-04059** y con el CUI No.**2525 61961 0101**.

Agradeciendo su atención a la presente, me suscribo de usted.

Atentamente,

  
Mauricio Valentino  
Ing. Químico, Mauricio Valentino Rivera Tello  
Colegiado No. 2089  
ASESOR  
Escuela de Ingeniería Química, FIUSAC



Guatemala, 14 de marzo de 2022.  
 Ref. EIQ.TG-IF.005.2022.

Ingeniero  
 Williams Guillermo Álvarez Mejía  
 DIRECTOR  
 Escuela de Ingeniería Química  
 Facultad de Ingeniería

Estimado Ingeniero Álvarez:

Como consta en el registro de evaluación, correlativo **037-2019**, le informo que reunidos los Miembros de la Terna nombrada por la Escuela de Ingeniería Química, se practicó la revisión del:

**INFORME FINAL**

Solicitado por el estudiante universitario: **Ana Lucía Cán Reyes**.  
 Identificado con número de carné: **2525619610101**.  
 Identificado con registro académico: **201404059**.  
 Previo a optar al título de la carrera: **Ingeniería Química**.  
 En la modalidad: **Informe Final, Seminario de Investigación**.

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:

**DETERMINACIÓN DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA DE UNA ESTUFA AHORRADORA DE LEÑA TIPO ROCKET AL VARIAR EL FLUJO DE AIRE EN LA CÁMARA DE COMBUSTIÓN, A TRAVÉS DEL PROTOCOLO DE PRUEBA DE EBULLICIÓN DE AGUA 4.2.2. (WBT) UTILIZANDO LEÑA COMO COMBUSTIBLE (*Pinus Ayacahuite*)**

El Trabajo de Graduación ha sido asesorado por:

**Mauricio Valentino Rivera Tello, profesional de la Ingeniería Química**

Habiendo encontrado el referido 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"

  
 Otto Raúl De León  
 profesional de la Ingeniería Química  
 COORDINADOR DE TERNA  
 Tribunal de Revisión  
 Trabajo de Graduación



C.c.: archivo

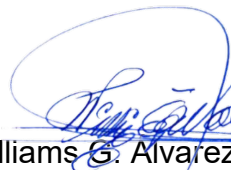





LNG.DIRECTOR.088.EIQ.2022

El Director de la Escuela de Ingeniería Química de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor, el visto bueno del Coordinador de Área y aprobación del área de lingüística del trabajo de graduación titulado: **DETERMINACIÓN DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA DE UNA ESTUFA AHORRADORA DE LEÑA TIPO ROCKET AL VARIAR EL FLUJO DE AIRE EN LA CÁMARA DE COMBUSTIÓN, A TRAVÉS DEL PROTOCOLO DE PRUEBA DE EBULLICIÓN DE AGUA 4.2.2. (WBT) UTILIZANDO LEÑA COMO COMBUSTIBLE (PINUS AYACAHUITE)**, presentado por: **Ana Lucía Cán Reyes**, procedo con el Aval del mismo, ya que cumple con los requisitos normados por la Facultad de Ingeniería.

*“Id y Enseñad a Todos”*

  
Ing. Williams G. Alvarez Mejía M.U.I.E.  
DIRECTOR  
Escuela de Ingeniería Química



Guatemala, abril de 2022.

LNG.DECANATO.OI.296.2022

La Decana 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: **DETERMINACIÓN DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA DE UNA ESTUFA AHORRADORA DE LEÑA TIPO ROCKET AL VARIAR EL FLUJO DE AIRE EN LA CÁMARA DE COMBUSTIÓN, A TRAVÉS DEL PROTOCOLO DE PRUEBA DE EBULLICIÓN DE AGUA 4.2.2. (WBT) UTILIZANDO LEÑA COMO COMBUSTIBLE (PINUS AYACAHUITE)**, presentado por: **Ana Lucía Cán Reyes**, después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:



ingra. Aurelia Anabela Cordova Estrada

Decana

Guatemala, abril de 2022

AACE/gaoc



## **ACTO QUE DEDICO A:**

### **Mi padre**

Rubén Can por ser un padre ejemplar, por brindarme su amor y apoyo; por llevarme a la universidad todos los días; nunca negarse y estar para mi incondicionalmente.

### **Mi madre**

María Reyes por ser una madre ejemplar, por brindarme su amor y apoyo; por preocuparse por mi salud; velar que comiera y que nunca me faltara mi comida en la universidad.

### **Mis hermanas**

Regina y Andrea Can por todo su amor y apoyo, por estar conmigo incondicionalmente; por ser la fuente de inspiración a superarme; lograr mis metas y demostrarme que los sueños se pueden hacer realidad.

### **Mi tía**

Paulina Reyes por ser una tía cariñosa y noble conmigo, por brindarme su amor y apoyo durante toda mi carrera universitaria.

### **Mis amigos**

Por compartir buenos momentos y también difíciles, porque sin ustedes mi vida universitaria no hubiera sido grata y la misma, gracias por su apoyo y estar conmigo en todo momento; por brindarme su ayuda cuando más los necesitaba.

**Mi asesor**

Mauricio Rivera gracias ingeniero por su apoyo, por tenerme paciencia, por estar en este proceso y brindarme su ayuda cuando más lo necesitaba.

**A mí**

Ana Can porque hubo momentos difíciles durante mi carrera y nunca me di por vencida.

## **AGRADECIMIENTOS A:**

<b>Mis padres</b>	Por su apoyo, amor y estar conmigo incondicionalmente.
<b>Mis hermanas</b>	Por ser las que motivaban a lograr esta meta, creer en mí y estar conmigo incondicionalmente.
<b>Mi asesor y revisor</b>	Ing. Mauricio Rivera y Ing. Otto de León, por el tiempo y paciencia que me brindaron en este proceso.
<b>Al equipo de Centro Investigaciones</b>	En especial a los del laboratorio multipropósito de sección de tecnología de la madera, ya que me brindaron el uso del laboratorio y equipo para poder realizar mis pruebas y brindarme la ayuda que necesité.
<b>Amigos de la carrera</b>	Dulce Quezada, Mildred Zúñiga y Francisco Rodríguez, por su apoyo incondicional.
<b>Escuela de Ingeniería Química</b>	Por los conocimientos brindados.
<b>Facultad de Ingeniería</b>	Por formar mi carrera profesional.
<b>Universidad de San Carlos</b>	Por ser mi casa de estudio.

## ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	V
LISTA DE SÍMBOLOS .....	VII
GLOSARIO .....	IX
RESUMEN.....	XI
OBJETIVOS.....	XIII
HIPÓTESIS.....	XV
INTRODUCCIÓN .....	XVII
1. ANTECEDENTES .....	1
2. MARCO TEÓRICO.....	5
2.1. El calor y la temperatura.....	5
2.2. Transferencia de calor .....	5
2.2.1. Transferencia de calor por conducción .....	7
2.2.2. Transferencia de calor por convección .....	7
2.2.3. Transferencia de calor radiación.....	8
2.3. Combustión .....	9
2.3.1. Capacidad calorífica .....	11
2.3.2. Calor de combustión.....	12
2.3.3. Proceso de combustión .....	13
2.3.4. Gases CO y CO <sub>2</sub> .....	14
2.3.5. Determinación del aire teórico .....	15
2.3.6. Productos de la combustión.....	17
2.4. Combustión de biomasa .....	17
2.4.1. Demanda de consumo de leña .....	18

2.4.2.	Ventajas de la utilización sostenible de la biomasa.....	20
2.4.3.	Proceso de combustión de leña .....	22
2.4.4.	Valor calorífico.....	23
2.4.5.	Eficiencia energética .....	23
2.4.5.1.	La eficiencia como indicador del grado de economía .....	24
2.4.6.	Biomasa a utilizar (Pino).....	25
2.4.7.	Características del Pino.....	26
2.4.8.	Pinos más comunes en Guatemala.....	27
2.4.9.	Pinus ayacahuite .....	28
2.5.	Estufas ahorradoras de leña .....	30
2.5.1.	Diseño de la estufa.....	31
2.5.1.1.	Características de la estufa a evaluar ..	33
2.5.2.	Damper de chimenea .....	35
2.5.3.	Estufa ahorradora de leña tipo rocket .....	37
2.6.	Prueba de ebullición del agua, protocolo WBT versión 4.2.2.....	38
2.7.	Prueba de emisión de gases.....	40
3.	MARCO METODOLÓGICO .....	41
3.1.	Variables .....	41
3.2.	Delimitación de campo de estudio .....	42
3.3.	Recursos humanos disponibles .....	42
3.4.	Recursos materiales disponibles.....	43
3.4.1.	Materia Prima e Insumos.....	43
3.4.2.	Equipos .....	43
3.4.3.	Instrumentos de medición .....	43
3.4.4.	Materiales.....	44

3.5.	Técnica cuantitativa .....	44
3.6.	Recolección y ordenamiento de la información .....	44
3.6.1.	Datos generales.....	45
3.6.2.	Información general .....	45
3.6.3.	Preparación de cada fase .....	48
3.6.4.	Fase de inicio frío.....	50
3.6.5.	Fase de inicio caliente .....	52
3.6.6.	Fase III, FL.....	54
3.6.7.	Medición de las emisiones de CO y CO <sub>2</sub> .....	55
3.6.8.	Punto de ebullición de agua local .....	55
3.6.9.	Hoja de datos originales .....	56
3.7.	Análisis estadístico .....	57
3.8.	Plan de análisis de los resultados .....	60
3.8.1.	Programas a utilizar para el análisis de datos .....	60
3.8.2.	Métodos y modelos de los datos según tipo de variables .....	60
3.9.	Programas a Utilizar para análisis de datos .....	61
4.	RESULTADOS .....	63
5.	INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS.....	71
	CONCLUSIONES .....	77
	RECOMENDACIONES.....	79
	BIBLIOGRAFÍA.....	81
	APÉNDICES .....	83



## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

### FIGURAS

1.	Mecanismos de transferencia de calor.....	6
2.	Ciclo de la transformación de la biomasa.....	21
3.	Esquema general de los componentes y la forma del cuerpo de una estufa ahorradora de leña .....	33
4.	Diseño de la estufa tipo rocket.....	34
5.	Cámara de combustión de la estufa.....	34
6.	Ventilador de la estufa.....	35
7.	Regulador del damper para el manejo de flujo de aire.....	36
8.	Ubicación del damper.....	37
9.	Funcionamiento de una estufa tipo rocket.....	38
10.	Toma de datos de información general .....	48
11.	Hoja de toma de datos .....	56
12.	Hoja de toma de datos para las tres fases .....	57
13.	Eficiencia térmica vs Apertura del damper en fase de inicio en frío .....	64
14.	Eficiencia térmica vs Apertura del damper en fase de inicio en caliente.....	65
15.	Eficiencia térmica vs Apertura del damper en fase de inicio a fuego lento de alta potencia .....	66
16.	Emisiones de CO vs Abertura del damper .....	67
17.	Emisiones de CO <sub>2</sub> vs Abertura del damper .....	68
18.	Material particulado de 1,8 µm vs Abertura del damper.....	69
19.	Material particulado de 17 µm vs Abertura del damper.....	70



## TABLAS

I.	Calores de combustión .....	12
II.	Listado de pinos más comunes en Guatemala .....	28
III.	Descripción de parámetros dependientes e independientes .....	41
IV.	Datos para el análisis de varianza .....	57
V.	Eficiencia energética.....	61
VI.	Emisiones de gases.....	61
VII.	Flujos de aire del ventilador de la estufa con cada apertura del damper.....	63

## LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
H <sub>2</sub> O	Agua
CO <sub>2</sub>	Dióxido de carbono
FA	Flujo de aire
FL	Fuego lento
°C	Grados celsius
g	Gramo
H	Humedad
IFAP	Inicio caliente de alto poder
ICAP	Inicio frio de alto poder
kg	Kilo gramo
kJ	Kilo jule
PM	Materia particulado
m <sup>3</sup>	Metro cúbico
µg	Microgramo
CO	Monóxido de carbono
%AD	Porcentaje de abertura del damper
%ET	Porcentaje de eficiencia térmica
T <sub>eb</sub>	Temperatura de ebullición
t	Tiempo en min
WBT	<i>Water Boiling Test</i> (Prueba de ebullición de agua)
W	Watts



## GLOSARIO

<b>Biomasa</b>	Grupo de productos energéticos y materia primas de tipo renovable que se originan a partir de materia orgánica formada por vía biológica.
<b>Buitrón</b>	Tubo a través del cual circula el aire para generar la combustión.
<b>Carbón</b>	Tipo de roca, fuente de energía, formada por la sustancia química carbono mezclado con otras sustancias.
<b>Ceniza</b>	Polvo de color gris claro que queda después de una combustión completa, formado generalmente, por sales alcalinas y térreas, sílice y óxidos.
<b>Combustión</b>	Proceso químico de oxidación rápida que va acompañado de desprendimiento de energía bajo en forma de luz y calor.
<b>Concentración de fondo</b>	Concentración de un contaminante en aire debido al aporte de otras fuentes distintas a las analizadas.
<b>Damper</b>	Pequeña pieza cuadrada de metal en un fuego, caldera, horno o estufa que puede ser movido para

incrementar o reducir una cantidad de aire que entre a dichos aparatos mencionados anteriormente.

<b>Eficiencia térmica</b>	Medida de la fracción de calor producido por el combustible que llegó directamente al agua en la olla.
<b>Emisiones intradomiciliarias</b>	Toda emisión de sustancia o compuestos dentro de casas, colegios y oficinas que puedan afectar la salud de quienes habitan en ellas.
<b>Hervir</b>	Dicho de un líquido: producir burbujas por la acción del calor, manteniendo la temperatura de ebullición.
<b>Hollín</b>	Partículas sólidas de tamaño pequeño, de color negro.
<b>Hornillas</b>	Discos en donde se colocan sartenes y ollas. Son removidas para realizar limpieza interior.
<b>Pirolisis</b>	Descomposición química de materia orgánica y de todo tipo de materiales, excepto vidrios y metales, causada por el calentamiento en ausencia de aire.
<b>Potencia</b>	Energía desarrollada por unidad de tiempo. Rapidez con que se realiza un trabajo.
<b>Punto de ebullición</b>	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 el efecto que genera el flujo de aire sobre la eficiencia energética, para lograr tal fin se ajustó la apertura del damper al 0 %; 20 %; 60 %; 80 %; y 100 %. Utilizando leña como combustible para dicha estufa ahorradora de leña tipo rocket. Se utilizó una cantidad de leña y agua requerida por el protocolo. El tipo de leña utilizado fue pinus ayacahuite con un rango de humedad del 12-14 %, valor que se mantuvo constante durante las pruebas. De esta manera se pudo determinar la eficiencia energética de la estufa, la emisión de monóxido de carbono, dióxido de carbono y material particulado. Siguiendo los procedimientos del protocolo de Prueba de Ebullición de Agua 4.2.2 (WBT).

El análisis se realizó en tres fases: arranque en frío, arranque en caliente e hirviendo a fuego lento. Las primeras dos fases son de alta potencia y la tercera es de baja potencia; el procedimiento consistió en obtener diferentes flujos de aire estos se fueron midiendo al ajustar el damper de la estufa a diferentes porcentajes de apertura, posteriormente la leña fue utilizada en la estufa para llevar a punto de ebullición el agua en la olla a un volumen establecido, se controló la temperatura del proceso y el tiempo en el que se llegó al punto de ebullición. Por último, se quemó la leña hasta su punto de combustión total para obtener las emisiones de dióxido de carbono, monóxido de carbono y material particulado.

La tabulación de datos y análisis de resultados de eficiencia energética se realizarán con base al documento WBT SPREADSHEET 4.2.4 el cual es el

documento avalado por La Alianza Global para Estufas Limpias, la Organización Internacional de Normalización (ISO) y el Acuerdo de Taller Internacional (IWA).

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

## OBJETIVOS

### General

Determinar la eficiencia energética de una estufa ahorradora de leña tipo rocket al variar el flujo de aire en la cámara de combustión, a través del protocolo de prueba de ebullición de agua 4.2.2. (wbt) utilizando leña como combustible (*pinus ayacahuite*).

### Específicos

1. Determinar el efecto de la eficiencia energética de una estufa ahorradora de leña en fase de inicio frío al variar el flujo de aire a diferentes aberturas del damper 0 %, 20 %, 60 % 80 % y 100 %, utilizando pinus ayacahuite como combustible.
2. Determinar el efecto de la eficiencia energética de una estufa ahorradora de leña en fase de inicio caliente al variar el flujo de aire a diferentes aberturas del damper 0 %, 20 %, 60 % 80 % y 100 %, utilizando pinus ayacahuite como combustible.
3. Determinar el efecto de la eficiencia energética de una estufa ahorradora de leña en fase de fuego lento al variar el flujo de aire a diferentes aberturas del damper 0 %, 20 %, 60 % 80 % y 100 %, utilizando pinus ayacahuite como combustible.



4. Determinar las emisiones monóxido de carbono, dióxido de carbono y material particulado al variar el flujo de aire a diferentes aberturas del damper 0 %, 20 %, 60 % 80 % y 100 %, utilizando pinus ayacahuite como combustible.

# HIPÓTESIS

## Hipótesis Estadística

### Hipótesis nula

- Ho,1: no existen diferencias significativas en la eficiencia energética en arranque en frío al variar el flujo de aire.
- Ho,1: no existen diferencias significativas en la eficiencia energética en arranque en caliente al variar el flujo de aire.
- Ho,1: no existen diferencias significativas en la eficiencia energética en arranque a fuego lento al variar el flujo de aire.

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

### Hipótesis alternativa

- Ho,1: si existen diferencias significativas en la eficiencia energética en arranque en frío al variar el flujo de aire.
- Ho,1: si existen diferencias significativas en la eficiencia energética en arranque en caliente al variar el flujo de aire.
- Ho,1: si existen diferencias significativas en la eficiencia energética en arranque a fuego lento al variar el flujo de aire.

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

- Criterio con base a un análisis ANOVA

$F < F_c$ : Se acepta la hipótesis nula

$F > F_c$ : Se rechaza la hipótesis nula

## INTRODUCCIÓN

Cocinar de manera artesanal es una actividad de la vida cotidiana en nuestras comunidades rurales. En relación a lo anterior cabe mencionar que el principal combustible natural utilizado para cocinar alimentos de las regiones rurales de Guatemala marginadas es, la leña. Se emplean fogones tradicionales, estos aprovechan un bajo porcentaje de calor producido.

Esta combustión ineficiente conlleva un alto consumo de leña, lo que produce un impacto negativo sobre los recursos forestales, pues con el crecimiento de las poblaciones rurales las tasas de extracción de leña se incrementan. Sin embargo, las comunidades rurales hacen uso de la leña y para ello se han diseñado estufas ahorradoras de leña para obtener beneficios, los cuales mejoraran la calidad de vida de muchos pobladores de áreas rurales. Utilizar como combustible madera ofrece una solución evidente a los problemas económicos, reduciendo los costos de combustible.

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

El presente trabajo de investigación se enfoca en determinar la eficiencia de una estufa ahorradora de leña tipo rocket, utilizando la prueba de ebullición

de agua (WBT 4.2.2) ya que este tipo de estufas se les está incorporando un sistema para modificar el flujo de aire y aun no se sabe si esto mejoré la eficiencia de una estufa ahorradora.

## 1. ANTECEDENTES

El fenómeno de emisiones de gases contaminantes al ambiente, es un tema necesario para comprender las necesidades de una estufa ahorradora para cocinar alimentos, que funciona con leña como combustible principal. La mayoría de las comunidades rurales del interior de la República de Guatemala utilizan fogones de leña para la cocción de sus alimentos y como calefacción para sus hogares. Sin embargo, la acumulación de humo intradomiciliar, por el uso de fogones abiertos, tiene un impacto en el desarrollo de enfermedades respiratorias, las cuales afectan especialmente a los niños y a las mujeres ya que ellos pasan la mayor parte del tiempo en la cocina preparando los alimentos.

Cabe señalar que un problema diagnosticado en estas áreas rurales es la escasez de leña debido a la deforestación, contribuyendo en el incremento del deterioro ambiental en las comunidades rurales.

- En Guatemala se creó la primera estufa ahorradora después del terremoto en 1976. Distintas Universidades e investigaciones han trabajado en conjunto para crear estufas ahorradoras de leña adecuada para el cocimiento de alimentos y el medio ambiente.
- Otro de los problemas señalados en la contaminación es la generación de gases de efecto invernadero (GEI) afecta a todos, manifestándose en eventos climáticos extremos cada vez más frecuentes y aumentando la variabilidad climática. Debido a su posición geográfica, Guatemala es uno de los países más vulnerables a los efectos del cambio climático. De esa cuenta, “el objetivo cinco del CNCG está enfocado en apoyar los primeros

pasos para crear una estrategia nacional de desarrollo con bajas emisiones de carbono.”<sup>1</sup>

- El desarrollo de esta iniciativa es liderado por el Gobierno de Guatemala con el apoyo del Gobierno de los Estados Unidos, a través de USAID y el departamento de Estado. La iniciativa es apoyada por la Agencia de los Estados Unidos para el desarrollo internacional (USAID), y focaliza sus esfuerzos a nivel nacional y en la Reserva de Biósfera Maya, Reserva de Biósfera Sierra de la Minas, Alta y Baja Verapaz y cinco departamentos del Altiplano Occidental.
- De manera general, Guatemala ha impulsado la construcción y el uso de las estufas ahorradoras ya que son de tipo económico, social y ambiental; reducción de la tala de árboles; ahorro en el consumo de leña; contaminación y del deterioro de los suelos y el agua, entre otros.
- Los fogones abiertos utilizados por las familias en el área rural, generan cantidad de partículas y gases contaminantes y muchos de ellos pueden ser tóxicos. Guatemala, al igual que el resto de países del mundo, genera GEI debido a las actividades humanas o antropológicas:

Según el Inventario Nacional de Emisiones y Remociones de GEI para Guatemala-2005, las emisiones en el país equivalen a 43 590 giga gramos de CO<sub>2</sub> equivalente. De esta cantidad el 46 % corresponde al sector agrícola, el 28 % al sector de energía, el 19 % a cambio de uso de suelo, el 4 % a procesos industriales y el 3 % a residuos.<sup>2</sup>

- Ante este problema ambiental se han creado estufas ahorradoras de leña que disminuyen hasta en un 60 % la utilización de la biomasa (leña). Además, contribuye a la economía de las personas.

---

<sup>1</sup> USAID. *Programa clima, naturaleza y comunidades en Guatemala*. p. 6.

<sup>2</sup> RODRIGUEZ, Ana Victoria. *Desarrollo con bajas emisiones*. p. 1.

- En la Universidad de Antioquia en Medellín Colombia, se realizó un trabajo denominado 'Caracterización energética y emisiones de una estufa de cocción eco-eficiente con biomasa a diferentes altitudes' se les realizaron a las estufas mejoras con las pruebas CCT y WBT con el fin de obtener el diseño adecuado para aumentar el desempeño energético disminuyendo emisiones de gases. Como resultado se obtuvo que a menor altura tomando como referencia el nivel de mar las estufas ahorradoras mejoran su rendimiento (entre 6,8 %-23,3 % WBT arranque en frío a WBT arranque en caliente) ya que se aprovecha mejor la energía suministrada debido a la disminución de pérdidas de calor, además disminuyen las emisiones de gases.
- Por lo anterior, cabe decir que, ante esta problemática en el 2014, se realizó un 'Plan de acción nacional de Guatemala para estufas y combustibles limpios'. Este documento refleja el compromiso del gobierno por abordar este problema, e impulsar el marco legal y las iniciativas de los diferentes sectores interesados en formar parte de este esfuerzo, con acciones viables y efectivas a las necesidades particulares de nuestro país.
- En el año 2018, en la Universidad de San Carlos de Guatemala, Kimberly Pammela Lavicount Sandoval, presentó un trabajo de graduación denominado: 'Análisis de la eficiencia energética de cinco estufas ahorradoras de estructura metálica usando el protocolo (BTW)', en el cual se analizó la eficiencia energética, potencia del fuego, emisiones de CO y PM 2,5 de cinco estufas ahorradoras de leña base metálica. Ya que se pretendía mejorar la calidad de vida humana, disminuyendo la contaminación por emisión de gases de combustión, material particulado y el uso excesivo de leña.



- El Ingeniero Mauricio Valentino Rivera y Alejandra Donis-Alvarez, publicaron en el año 2019, en la revista *Análisis de la Realidad Nacional USAC*, un artículo sobre la evolución de estufas ahorradoras de leña en Guatemala. En dicho artículo se explican cómo se evaluaron las estufas en condiciones de laboratorio “los 15 principales modelos de estufas mejoradas utilizadas y distribuidas en Guatemala con la plancha y hornilla por medio de: la eficiencia energética, emisiones intradomiciliarias y seguridad”.<sup>3</sup> Para la determinación de la eficiencia energética es necesario utilizar el protocolo internacional para la evaluación de estufas, pruebas de ebullición (BTW), las cuales se midieron en sus tres fases de alta potencia de inicio frío, alta potencia de inicio caliente y fuego lento; para seguridad a través de la norma boliviana.

---

<sup>3</sup> RIVERA TELLO, Mauricio Valentino; DONIS ALVAREZ, Alejandra María Rebeca. *Evaluación de estufas ahorradoras de leña en Guatemala*. p. 7.

## **2. MARCO TEÓRICO**

### **2.1. El calor y la temperatura**

Calor y temperatura son conceptos que en el lenguaje cotidiano se confunden, pero son diferentes. La temperatura es una magnitud física que se refiere a la sensación de frío o caliente al tocar alguna sustancia. En cambio, el calor es una transferencia de energía de una parte a otra de un cuerpo, o entre diferentes cuerpos, producida por una diferencia de temperatura. El calor es energía en tránsito; siempre fluye de una zona de mayor temperatura a otra de menor temperatura, con lo que eleva la temperatura de la zona más fría y reduce la de la zona más cálida, siempre que el volumen de los cuerpos se mantenga constante.

La energía no fluye desde un objeto de temperatura baja a otro de temperatura alta si no se realiza trabajo. La materia está formada por átomos o moléculas que están en constante movimiento, por lo tanto, tienen energía de posición o potencial y energía de movimiento o cinética. Los continuos choques entre los átomos o moléculas transforman parte de la energía cinética en calor, cambiando la temperatura del cuerpo.

### **2.2. Transferencia de calor**

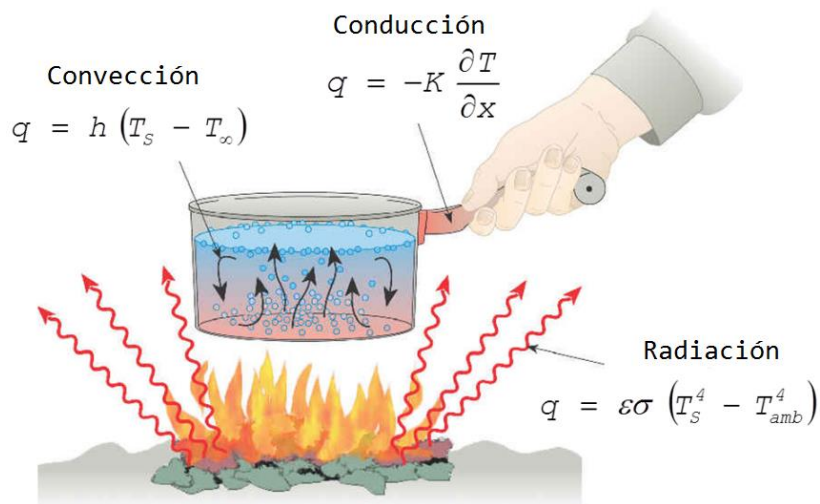
La transferencia de calor es el proceso por el cual se intercambia energía en forma de calor entre distintos cuerpos, o entre diferentes partes de un mismo cuerpo que están a distintas temperaturas.

La transferencia de calor siempre ocurre desde un cuerpo más caliente a uno más frío, como resultado de la Segunda Ley de la Termodinámica. La transferencia de calor ocurre hasta que los cuerpos y su entorno alcancen el equilibrio térmico.

El calor se transfiere mediante convección, radiación o conducción. Aunque estos tres procesos pueden ocurrir al mismo tiempo, puede suceder que uno de los mecanismos predomine sobre los otros dos.

Cuando existe una diferencia de temperatura entre dos objetos en proximidad uno del otro, la transferencia de calor no puede ser detenida; solo puede hacerse más lenta.

Figura 1. **Mecanismos de transferencia de calor**



Fuente: SILVA, Roberto. *Mecanismos de transferencia de calor*.

<https://www.esss.co/blog/es/analisis-termico-por-el-metodo-de-elementos-finitos/>. Consulta: 23 de abril de 2019.

### 2.2.1. Transferencia de calor por conducción

Es el mecanismo de transferencia de calor en escala atómica a través de la materia por actividad molecular, por el choque de unas moléculas con otras, donde las partículas más energéticas le entregan energía a las menos energéticas, produciéndose un flujo de calor desde las temperaturas más altas a las más bajas. La conducción es una transferencia de calor entre los cuerpos sólidos. La conducción de calor sólo ocurre si hay diferencias de temperatura entre dos partes del medio conductor.

Los mejores conductores de calor son los metales. El aire, plumavit, corcho, madera, hielo, lana, papel o plásticos, son malos conductores térmicos. A estas sustancias se les llaman aislantes. La transferencia de calor se expresa de la siguiente manera:

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

Donde:

Q= flujo de calor (J/s)

k= conductividad térmica, (J/(s\*m<sup>2</sup>\*K/m))

A = área de flujo de calor, m<sup>2</sup>

L= grosor de la pared, m

t= temperatura, K

### 2.2.2. Transferencia de calor por convección

La convección es el mecanismo de transferencia de calor por movimiento de masa o circulación dentro de la sustancia. Si existe una diferencia de

temperatura en el interior de un líquido o un gas, es casi seguro que se producirá un movimiento del fluido. Este movimiento transfiere calor de una parte del fluido a otra. La convección transfiere calor por el intercambio de moléculas frías y calientes: es la causa de que el agua de una tetera se caliente uniformemente, aunque sólo su parte inferior esté en contacto con la llama.

Este proceso llamado convección puede ser natural producida solo por las diferencias de densidades de la materia; o forzada, cuando la materia es obligada a moverse de un lugar a otro, por ejemplo, el aire con un ventilador o el agua con una bomba. Sólo se produce en líquidos y gases donde los átomos y moléculas son libres de moverse en el medio. En la naturaleza, la mayor parte del calor ganado por la atmósfera por conducción y radiación cerca de la superficie, es transportado a otras capas o niveles de la atmósfera por convección. Para describir la transferencia de calor ( $Q$ ) por convección natural se tiene la siguiente expresión:

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

Donde:

$h_i$ = coeficiente de película.  $J/(s*m^2*K)$

$A_i$ = área interna de transferencia.  $M^2$

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

### **2.2.3. Transferencia de calor radiación**

La radiación térmica es energía emitida por la materia que se encuentra a una temperatura dada, se produce directamente desde la fuente hacia afuera en todas las direcciones. Esta energía es producida por los cambios en las

configuraciones electrónicas de los átomos o moléculas constitutivos y transportada por ondas electromagnéticas o fotones, por lo recibe el nombre de radiación electromagnética.

La radiación electromagnética es una combinación de campos eléctricos y magnéticos oscilantes y perpendiculares entre sí, que se propagan a través del espacio transportando energía de un lugar a otro. A diferencia de la conducción y la convección, o de otros tipos de onda, como el sonido, que necesitan un medio material para propagarse, la radiación electromagnética es independiente de la materia para su propagación, de hecho, la transferencia de energía por radiación es más efectiva en el vacío. Sin embargo, la velocidad, intensidad y dirección de su flujo de energía se ven influidos por la presencia de materia. Así, estas ondas pueden atravesar el espacio interplanetario e interestelar y llegar a la Tierra desde el sol y las estrellas.

### **2.3. Combustión**

La combustión se refiere a las reacciones químicas que se establecen entre cualquier compuesto y el oxígeno. A esto también se le llama reacciones de oxidación. De este tipo de proceso se desprenden energía lumínica y calórica y se llevan a cabo rápidamente. Cabe destacar que los organismos vivos, para producir energía, utilizan una combustión controlada de los azúcares.

El oxígeno tiene la capacidad de combinarse con diversos elementos para producir óxidos. En definitiva, la oxidación es la combinación del oxígeno con otra sustancia. Existen oxidaciones que son sumamente lentas, como por ejemplo la del hierro. Cuando la oxidación es rápida se llama combustión.

Entendemos por ignición el valor de temperatura que debe presentar el sistema fisicoquímico para que se pueda dar la combustión de manera natural. El proceso termina cuando se consigue el equilibrio entre la energía de los compuestos que reaccionan y la de los productos de la reacción. Con el punto de ignición se alcanza la temperatura de inflamación, activado por la energía de una chispa o por la llama de un fósforo.

El carbono y el hidrógeno, hidrocarburos, son elementos que entran en combustión más fácilmente. El heptano, propano y el metano, entre otros, son sustancias que se utilizan como combustibles, es decir, como fuentes de calor proporcionados por la combustión. En síntesis, la combustión se produce cuando convergen los siguientes factores:

- El combustible, es decir, el material que arde, carbón, madera, plástico.
- El comburente, el material que hace arder, oxígeno.
- La temperatura de inflamación, la temperatura más baja a la cual el material inicia la combustión para seguir ardiendo.

Los combustibles son, en su mayoría, de origen orgánico y su valor depende de la proporción de carbono e hidrógeno que contienen en su composición química. El valor principal de un combustible radica en su capacidad de liberar calor durante la combustión. Igualmente, hay combustibles sólidos, líquidos y gaseosos que pueden ser naturales y artificiales.

Por orden de potencial calorífico, los combustibles sólidos más comunes son el carbón, el coque, la madera, el bagazo, la caña de azúcar y la turba. Entre los líquidos se encuentran el petróleo crudo y sus derivados como la gasolina, el

alcohol, el aceite y la bencina. Los combustibles gaseosos más utilizados son el gas natural, mezcla de metano, etano, propano y butano, el acetileno que se utiliza en el soplete y el hidrógeno, empleado para impulsar vehículos espaciales.

Por su parte, los productos de la combustión difieren según el tipo de combustible que se use, y varían también si la combustión es completa o incompleta. En la combustión completa se produce: vapor de agua, dióxido de carbono y energía calórica. En cambio, si la combustión es incompleta, se produce monóxido de carbono.

### **2.3.1. Capacidad calorífica**

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

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

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

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



### 2.3.2. Calor de combustión

Cabe mencionar que, durante la combustión de los cuerpos, el desprendimiento de calor se realiza de forma diferente de acuerdo con las características físicas y químicas del cuerpo en cuestión. Una magnitud que permite caracterizar cuantitativamente el desprendimiento de calor de los cuerpos durante la combustión, es el denominado calor específico de combustión. La cantidad de calor desprendida por cierta masa de combustible al quemarse totalmente, puede calcularse mediante la siguiente fórmula:

$$Q = I * m$$

Donde:

Q= cantidad de calor desprendida (J/K)

I= calor específico (J/(kg\*K))

m = masa (kg)

Tabla I. Calores de combustión

<b>Material combustible</b>	<b>Kcal/Kg</b>	<b>MJ/Kg</b>
Hidrógeno	33 915,9	142
Gas metano	13 136,4	55
Gasolina	11 225,7	47
Petróleo crudo	11 225,7	47
Queroseno	10 986,8	46
Carbón butiminoso	8 598,4	36
Antracita	8 359,5	35
Coque	8 120,7	34
Alcohol etílico	7 165,3	30
Carbón vegetal	7 165,3	30

Continuación de la tabla I.

Alcohol metílico	5 254,5	22
Madera de pino	5 015,7	21
Cascaron de coco	4 776,9	20
Turba seca	4 776,9	20
Leña seca	4 299,2	18
Turba humedad	3 821,5	16
Aserrín seco	3 582,6	15
Cascara de arroz	3 582,6	15
Lignito	3 104,9	13
Bagazo de caña seco	2 149,6	9
Leña verde	2 149,6	9
Planta de maíz seca	2 149,6	9
Aserrín húmedo	1 910,7	8

Fuente: OSORIO CEBALLOS, Bernardo Yuri. *Evaluación de la eficiencia energética de una estufa ahorradora*. p. 17.

### 2.3.3. Proceso de combustión

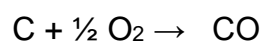
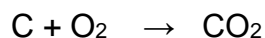
El proceso de combustión es el más importante en ingeniería porque todavía hoy, aunque tiende a disminuir (96 % en 1975, 90 % en 1985 y 40 % en 1995), la mayor parte de la producción mundial de energía se hace por combustión de petróleo, carbón y gas natural. Y no es importante el estudio de la combustión controlada de los recursos primarios usados en la producción de trabajo y calor, sino que también es preciso estudiar los procesos de combustión incontrolada (fuegos) para tratar de prevenirlos y luchar contra ellos. Además, cada vez va siendo más importante analizar la combustión controlada de materiales de desecho (incineración), con el fin de minimizar la contaminación ambiental. El proceso de combustión es difícil de analizar por los siguientes motivos:

- Es un proceso multidisciplinario (termoquímico-fluidodinámico) fuertemente acoplado.
- Los procesos de transporte de especies y calor (fenómeno de no equilibrio) son dominantes.
- La fuerte exotermicidad da lugar a altas temperaturas, enormes gradientes (llamas), e importantes fuerzas de flotabilidad por dilatación diferencial.
- Los enormes gradientes espaciales y los cortos tiempos de residencia en ellos provocan estados de no equilibrio local.

Sin embargo, por ser un amplio análisis científico el proceso de combustión se analiza con modelos más simples que enseñan a comprender los procesos reales de combustión. Un proceso de combustión se realiza con aire, este elemento está formado por oxígeno, nitrógeno y argón.

#### **2.3.4. Gases CO y CO<sub>2</sub>**

Como se mencionaba anteriormente un proceso de combustión toma como referencia el aire, por lo tanto, se hará énfasis en los componentes CO y CO<sub>2</sub> ya que este proceso se transcribe como la oxidación de los componentes de un combustible. La ecuación química representativa, la masa permanece inalterable. Para los cálculos se desprecia el Argón y se toma 21 % de oxígeno y 79 % de nitrógeno. Pero los dispositivos de combustión no queman necesariamente todo el combustible que se les suministra, teniendo las siguientes reacciones:



El CO<sub>2</sub> se forma a menor temperatura y sin duda es el producto deseado; el CO se forma a mayores temperaturas, y no es tan deseado debido a que su formación va acompañada por una menor liberación de calor. La característica especial del carbono como combustible es que su presión de vapor es despreciablemente pequeña. Es por eso que se puede describir la velocidad de combustión por medio de la relación de Nusselt:

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

Donde:

G<sub>o</sub> = velocidad de combustión

m<sub>ox</sub> = masa que se oxida

t<sub>ox</sub> = temperatura

s = constante de Nusselt

r<sub>o</sub> = radio de la partícula de carbono

### 2.3.5. Determinación del aire teórico

Se define aire teórico como la cantidad mínima de aire capaz de proporcionar el oxígeno suficiente para la combustión completa de carbono.

En una combustión completa no puede existir oxígeno en los productos de la combustión. Por lo tanto, al realizar la práctica no es posible tener una combustión completa ni con las proporciones “ideales” químicamente correctas a menos que se administre una cantidad mayor de aire teórico. Esto se debe a que probabilísticamente no es posible que cada una de las extraordinariamente numerosas moléculas del combustible encuentre una molécula de oxígeno para

combinarse con ella. Por consiguiente, realizar una oxidación total de combustible se logra mediante una mezcla de exceso de aire y variando el flujo de aire.

Se necesita calcular el número de moles necesarios de aire ya que la relación de aire combustible es la razón teórica entre la masa o moles de aire teórico y la masa o moles de combustible y para ello se necesita la siguiente ecuación:

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

Donde:

f= % de madera que se convierte en CO

c= % de carbono en la madera.

Y= % de oxígeno presente en la madera menos ocho veces el Porcentaje de hidrógeno.

Si la cantidad de aire suministrado en una combustión es inferior al aire teórico necesario la combustión será incompleta y habrá presencia de CO. La combustión incompleta se debe a tres causas:

- Insuficiencia de oxígeno.
- Mezcla imperfecta entre el oxígeno y el combustible.
- Temperatura demasiado baja para mantener la combustión.

Debido a la naturaleza heterogénea del proceso de combustión de biomasa sólida, solo parte del aire que entra a la cámara de combustión será utilizado, el

resto no será utilizado. Entonces es necesario agregar más aire que lo que teóricamente se definió. Y la relación aire/combustible que se recomienda es un factor de 1,2 a 1,5.

### **2.3.6. Productos de la combustión**

En la combustión de cualquier tipo de combustible se pueden generar numerosos elementos producto de la combustión, entre los que se podrían destacar nitrógeno (N<sub>2</sub>), dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), vapor de agua (H<sub>2</sub>O), oxígeno (O<sub>2</sub> no utilizado en la combustión), monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrógenos (NO<sub>x</sub>), dióxidos de azufre (SO<sub>2</sub>), in-quemados (combustible sin terminarse de quemar), hollín y partículas sólidas.

La composición propia de cada tipo de combustible marca estrictamente qué elementos pueden salir como producto de la combustión. Todos los combustibles consumen oxígeno (O<sub>2</sub>) para poder quemarse. Los elementos de la combustión del aire y del combustible pueden formar nuevos enlaces formándose nuevos compuestos, algunos de los cuales se han citado anteriormente.

## **2.4. Combustión de biomasa**

En la combustión de la biomasa se considera que las emisiones tienen el balance neutro de CO<sub>2</sub>. Realmente sí que se produce CO<sub>2</sub> como resultado de la combustión de la biomasa, pero esto se considera así porque se plantea que la combustión de biomasa no contribuye al aumento del efecto invernadero porque el CO<sub>2</sub> que se libera forma parte de la atmósfera actual (es el CO<sub>2</sub> que absorben y liberan continuamente las plantas y árboles para su crecimiento) y no es el CO<sub>2</sub>

capturado en el subsuelo a lo largo de miles de años y liberado en un breve espacio de tiempo como ocurre con los combustibles fósiles.

La energía que contiene la biomasa es energía solar almacenada a través de la fotosíntesis, proceso por el cual algunos organismos vivos, como los árboles, utilizan la energía solar para convertir los compuestos inorgánicos que asimilan (como el CO<sub>2</sub>) en compuestos orgánicos. La biomasa es un combustible de origen biológico, con un coste económico inferior al de cualquier tipo de energía de origen fósil y que en función de su gestión puede llegar a ser respetuosa con el medio ambiente.

Lo especialmente interesante e inteligente es la utilización de biomasa residual y los restos de excedentes agrícolas del entorno más próximo. Valorizar restos hasta ahora desperdiciados sin distorsionar los equilibrios naturales existentes: Limpieza equilibrada de monte bajo, podas y clareos, restos agrícolas, restos de cortas, destocados, entre otros.

#### **2.4.1. Demanda de consumo de leña**

Al principio, el hecho de talar; (aunque sea de forma sostenible); árboles hace incrementar las emisiones de CO<sub>2</sub> porque los árboles talados evidentemente dejan de absorber el CO<sub>2</sub> de la atmósfera, y ese CO<sub>2</sub> contenido en la propia madera es emitido a la atmósfera, de ahí el incremento de CO<sub>2</sub>.

Sin embargo a partir de un punto; si la biomasa utilizada es proveniente de una gestión equilibrada y por lo tanto sostenible, se observa que el incremento de CO<sub>2</sub> emitido a la atmósfera acaba por frenarse, pasando a una situación de reducidas emisiones de CO<sub>2</sub> (las emisiones de calderas no son las únicas consecuencias para el medio ambiente que deben ser consideradas, la

producción y el transporte del combustible suponen unas cantidades considerables de contaminación que necesitan considerarse para valorar el equilibrio medioambiental).

La producción de electricidad con la combustión de la biomasa en una gran central de producción eléctrica, precisa de sistemas complejos que conllevan inversiones elevadas (puede hacer falta producir vapor a 540 °C y 90 bar).

Este tipo de plantas suelen tener rendimientos bajos del orden del 30 %. Esto quiere decir que de cada 10 kWh que tiene la madera que entra, se aprovechan aproximadamente 3 kWh en forma de electricidad. Sin embargo, esta misma madera si se utilizase para aprovechar su calor en una caldera de biomasa con un rendimiento del 90 %, significaría que de cada 10 kWh que tiene la madera se aprovecharían alrededor de 9 kWh. En el primer caso se aprovechan 3 de cada 10 partes del árbol y en el segundo se aprovechan 9 de cada 10 partes del árbol. Por otro lado, la gran demanda de combustible de este tipo de plantas obliga a asegurar un abastecimiento continuo; (24 horas al día), que tiene la dualidad de encarecer (económica y medioambientalmente) su precio por la distancia a la que se debe buscar el suministro.

Es más eficaz y respetuoso con las personas y el medio ambiente no utilizar la biomasa para producir electricidad. Este tipo de proyectos puede desequilibrar el mercado de la biomasa e impedir el desarrollo más respetuoso y sostenible de la misma, que sería utilizando la biomasa de forma local, valle a valle, en calderas de calefacción, evitando transportes de camiones de muchas toneladas, favoreciendo el desarrollo local y sobretodo utilizando la biomasa con rendimientos altos.



#### **2.4.2. Ventajas de la utilización sostenible de la biomasa**

El uso de la biomasa como recurso energético, en lugar de los combustibles fósiles comúnmente utilizados, si se utiliza de forma sostenible puede suponer unas ventajas medioambientales de primer orden, como son:

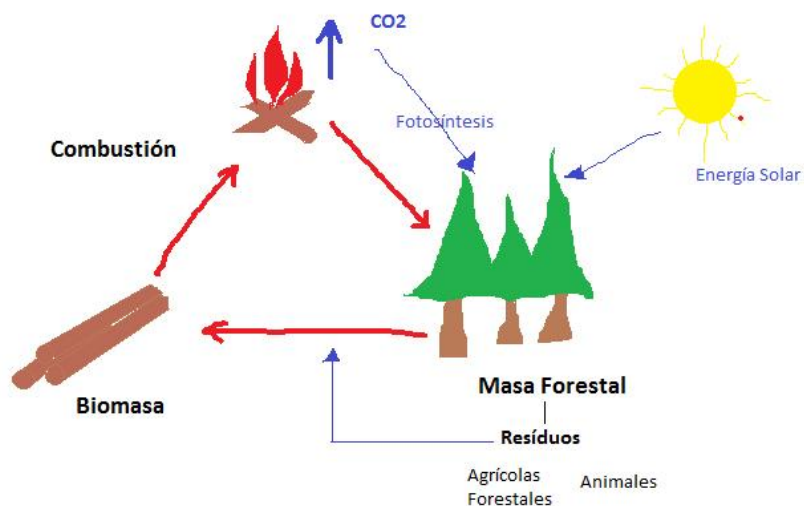
- Disminución de las emisiones de azufre.
- Disminución de las emisiones de partículas.
- Emisiones reducidas de contaminantes como CO, HC y NOX.
- Menos emisiones de CO<sub>2</sub>, desacelerando el efecto invernadero.
- Reducción de los peligros derivados del escape de gases tóxicos y combustibles. Reducción de riesgos de incendios forestales (si se plantea respetando los equilibrios naturales).
- Aprovechamiento de residuos agrícolas (olivos, árboles frutales, entre otros) o forestales.
- Posibilidad de utilización de tierras abandonadas o desertizadas con cultivos energéticos.
- Mayor independencia de las fluctuaciones de los precios de los combustibles provenientes del exterior (no son combustibles importados).
- Mejora socioeconómica de las áreas rurales.

- La biomasa es igual a futuro.

La Biomasa tiene balance neutro en CO<sub>2</sub>, en su combustión se libera sólo la cantidad de CO<sub>2</sub> que se había captado de la atmósfera por la fotosíntesis y el efecto de la luz, cambiándose por el oxígeno. Por eso la biomasa es energía solar almacenada, la energía del sol es capturada por la biomasa; (por los árboles); y se crea la madera formándose así la pila más perfecta de acumulación de energía solar.

Es energía solar acumulada en la madera, en un sólido que se conserva, que se transporta y con múltiples utilidades. La fotosíntesis como convertidor es el mejor y más importante transformador de energía del planeta. La biomasa es la raíz de nuestra historia y es el tronco del futuro.

Figura 2. **Ciclo de la transformación de la biomasa**



Fuente: Sustrai. *La combustión y la biomasa*. <https://fundacionsustrai.org/la-combustion-y-la-biomasa-analisis-de-los-usos-por-combustion-de-la-biomasa/>. Consulta: 23 de abril de 2019.

### 2.4.3. Proceso de combustión de leña

La combustión de leña lleva consigo cambios químicos debido a la presencia de calor. Al principio del proceso de combustión se desprende dióxido de carbono y agua sin presencia de llamas, la temperatura al aumentar libera gases de combustión de resinas que se involucran en la reacción. Este primer proceso de la degradación de la leña se le llama pirolisis. Cuando la temperatura supera los 280 °C la porción de gases inflamables que emite es lo suficientemente caliente para empezar a arder.

La combustión únicamente ocurrirá en presencia de oxígeno y a temperaturas sobre la de ignición del combustible, la temperatura promedio de ignición de la madera es de 600 °C. Es aquí cuando los gases arden por efecto de calor radiante de las otras piezas de madera ya ardiendo. Una vez ardiendo, los gases pirolizados se quemarán a temperaturas de 1 100 °C; estas llamas luego proveerán de calor radiante que mantiene y acelera la pirolisis. Las llamas que se miran en un fuego son estos gases quemándose. Es probable en muchos casos que las llamas no toquen la superficie de la leña. El flujo de gases, que se incrementa con el aumento de temperatura de las llamas, previene que el oxígeno llegue a la superficie de la leña.

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

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

Donde:

$\rho_c$  = densidad del carbono

$r_o$  = diámetro inicial de la partícula de carbono.

$G_o$  = velocidad de combustión

$t$  = tiempo de combustión de la partícula

#### **2.4.4. Valor calorífico**

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

#### **2.4.5. Eficiencia energética**

Definimos eficiencia energética como el uso eficiente de la energía. Un aparato, proceso o instalación es energéticamente eficiente cuando consume una cantidad inferior a la media de energía para realizar una actividad. Una persona, servicio o producto eficiente comprometido con el medio ambiente, además de necesitar menos energía para realizar el mismo trabajo, también busca abastecerse, si no por completo, con la mayor cantidad posible de energías renovables (también llamadas energías alternativas).

La eficiencia energética busca proteger el medio ambiente mediante la reducción de la intensidad energética y habituando al usuario a consumir lo

necesario y no más. Las emisiones de CO<sub>2</sub> que enviamos a la atmósfera son cada vez mayores y, por ese motivo, la eficiencia energética se ha convertido en una forma de cuidar al planeta ya que, no solo está en usar electrodomésticos que consuman menos, sino en que seamos nosotros quienes consumamos menos y de forma más verde. Los siguientes apartados describen qué es la eficiencia energética:

- Se refiere a la utilización de tecnologías que requieren una menor cantidad de energía para conseguir el mismo rendimiento o realizar la misma función.
- La eficiencia energética se centra en la tecnología, el equipamiento o la maquina usada de edificios.
- El ahorro de energía se basa en el modo de actuar de las personas para utilizar menos energía (por ejemplo, utilizar luz natural en lugar de artificial para reducir el consumo de electricidad).

#### **2.4.5.1. La eficiencia como indicador del grado de economía**

La eficiencia energética de una estufa ahorradora es una manifestación cuantitativa del comportamiento de la unidad en el logro del aprovechamiento integral del calor generado por el combustible. Concebida de forma general es un comportamiento dinámico que relaciona variables físicas, químicas y termodinámicas.

La eficiencia en el aprovechamiento de la energía de la leña se puede describir de forma general, mediante el estudio de un modelo matemático que

relaciona, por ejemplo, el área de aprovechamiento del calor, régimen de turbulencia en los gases de combustión, un factor de forma de la estufa y la cantidad de aire que ingresa a la unidad. También la eficiencia está ligada a los materiales constituyentes de la estufa. Es una función de su operación.

#### **2.4.6. Biomasa a utilizar (Pino)**

La madera de pino es quizás la madera más usada y conocida. Se debe a varios factores entre los destacan su abundancia, su facilidad para trabajar y versatilidad. Existen muchas especies de pinos, cada una de ellas con características o propiedades diferenciadas. En el presente artículo nombraremos algunas de estas especies y las características más comunes, pero debemos ser conscientes de que se trata de una generalización que puede no aplicarse a todos los tipos de pino. Algunas de las especies más habituales dentro del mundo de la carpintería son:

- Pino Insignis o pino radiata. Abundante en el norte de España, Chile y la costa oeste de USA entre otros lugares. Albura blanquecina y duramen entre amarillo y marrón. Tiene abundantes nudos.
- Pino de Oregón. Principalmente localizado en la costa oeste de USA y Canadá, norte de Francia y Reino Unido. Albura amarilla y duramen marrón amarillento. Tiene nudos gruesos.
- Pino silvestre o rojo. Muy abundante en Europa, desde España hasta Rusia. Albura amarillo pálida y duramen rojizo. Presenta nudos frecuentes y pequeñas bolsas de resina.

- Pino marítimo o gallego. Principalmente ubicado en el Sur de Europa y Norte de África. Albura de tonos amarillentos claros y duramen amarillo anaranjado. Presenta abundantes nudos, tanto pequeños como grandes, y pequeñas bolsas de resina.

#### **2.4.7. Características del Pino**

Presenta unos buenos índices en resistencia, contracción y flexión, e impregnabilidad. No destaca en ninguno de ellos, pero la combinación suele ser buena.

- La densidad aproximada puede situarse entre los 500 kg/m<sup>3</sup> del pino insignis y los 570 kg/m<sup>3</sup> del pino laricio. Calculado a una humedad del 12 %.
- Fibra recta.
- Nivel aceptable de resistencia mecánica.
- Se considera que el pino tiene entre poco y media durabilidad frente a la acción de hongos e insectos. El pino de oregon es uno de las especies de pino más durable. Todas deben ser tratadas, al menos superficialmente, para mejorar su durabilidad. Quizás el tratamiento más habitual es de la autoclave (vacío y alta presión), que permite obtener madera apta para exteriores de una forma económica.
- Secado fácil y lento. Existen pequeños riesgos de fendas y ligeras deformaciones.

- Aserrado y mecanizado fácil en términos generales.
- Acepta bastante bien los acabados. Algunas especies de pino tienen abundante resina, lo que complica el tema de los acabados.

Aunque como es lógico existen importantes diferencias en función de la especie y donde la compramos, el precio de la madera de pino es bajo. Especialmente si lo comparamos con otras maderas. Se debe principalmente a su abundancia.

#### **2.4.8. Pinos más comunes en Guatemala**

Guatemala tiene como característica principal sus selvas ya que cuenta con una gran cantidad de árboles y estos se encuentran esparcidos por todo el país. Guatemala es un país que aún conserva sus costumbres artesanales, en las áreas rurales los pobladores hacen uso de la leña ya que es la principal fuente de energía para las áreas rurales y en algunas partes del área urbana, aun cuando el porcentaje ha descendido en los últimos años, se mantiene en un alto nivel de consumo, principalmente para cocción de alimentos y calefacción de hogares, aunque también se utiliza en industrias tales como: ladrilleras, calderas, carboneras, panaderías y agroindustrias como beneficios de café.

En la actualidad se ha ampliado el número de especies forestales que utiliza la industria maderera guatemalteca. Las especies de coníferas más utilizadas son:

- pinus oocarpa
- pinus caribea
- pinus maximinoi
- pinus tecunumanii



Tabla II. Listado de pinos más comunes en Guatemala

Familia género especie	Distribución altitudinal de Guatemala
<b>Pinaceae</b>	
Aibes guatemalensis Rehder	2 600-3 500 m
Pinus ayacahuite Ehren	2 000-3 400 m
P. montezumae Lamb	1 100-2 600 m
P. Oocarpa Schiede	500-2 750 m
P. pseudostrobus Lindl	1 600-3 200 m
P. quichensis Aguilar	Sin datos
P. rudis Endl	2 300-4 000 m
P. strobus ver. chiapensis Mart	800-2 000 m
P. tenuifolia Benth	1 100-2 400 m
P. teocote var. guatemalensis Aguilar	1 300-2 000 m

Fuente: AGUILAR; STANDLEY; STEYMARK; VELBEN. *Tabla de lista de pinos en Guatemala.*

<http://www.fao.org/3/12015s05.htm>. Consulta: 25 de abril de 2019.

#### 2.4.9. Pinus ayacahuite

Por otra parte, el pino de mayor valor en Guatemala es el P. ayacahuite el cual también es conocido como: *pino chahuite, chahuite, ocote, pinabete, tuusha, wiyo y wiyoko*. Tiene mayor valor en Guatemala, por la facilidad con que se trabaja su madera blanda con las herramientas de carpintería rudimentaria que emplean los mayas, habitante de las tierras altas del oeste. Es un árbol grande, que normalmente alcanza por lo menos 35 m de altura, y a veces más de 45 m.

El pino ayacahuite es el pino que se utilizara para la elaboración de la práctica ya que es económico y factible de encontrar a la venta. Por lo tanto, es necesario saber su rango de humedad y calor específico.

A continuación, se especifican las propiedades físicas del pinus ayacahuite:

- Humedad aparente: muy húmedos, de 0 a 10,24 % vol. de humedad aprovechable.
- Color: café amarillo grisáceo.

Características químicas:

- pH: 5-8
- Materia orgánica: De 2,0-28 %
- Fertilidad: alta

Capacidad de temperatura (°C)

- Mínima: - 8
- Media: 12-19
- Máxima: 35

Otras de las características del pinus ayacahuite es que no se adapta al calor y ambientes áridos, crece muy bien en condiciones frías y de mucha humedad, en sitios con días nublados casi la mitad del año y heladas muy frecuentes. Resiste heladas y es tolerante a la sombra en etapas juveniles. Se utiliza para reforestación en las zonas urbanas y suburbanas, también en la elaboración de muebles, moldes de función, y en la construcción. La resina se utiliza en la elaboración de diversos productos. La madera es de buena calidad, suave y manejable, útil en la artesanía, aserrío, triplay, celulosa, papel, puntuales para las minas, construcciones y ebanistería.

## **2.5. Estufas ahorradoras de leña**

Las estufas ahorradoras de leña como su nombre lo indica es disminuir el consumo de ese recurso energético, mejorando la combustión durante la elaboración de comida. En general los beneficios que se pueden obtener al mejorar el fogón tradicional son los siguientes:

- Con la adopción generalizada en una comunidad se reduce la presión sobre los recursos dendrogenéticos y disminuye la tasa de deforestación local.
- Disminuye el consumo de leña familiar hasta un 60 % en relación con un fogón tradicional de tres puntos, debido a que su construcción se basa en galerías que conducen el calor y el humo a sitios de aprovechamiento y expulsión. Además, se conserva el calor durante más tiempo.
- Da mayor comodidad para cocinar y disminuye las horas de trabajo para cocinar, permitiendo disponer de más tiempo para otras actividades.
- Disminuye considerablemente o en su totalidad la emisión de humo al interior de la cocina, debido a que el humo se canaliza por tubo hacia el exterior de la casa.
- Disminuye el riesgo de contraer enfermedades de vías respiratorias, irritación de los ojos, dolores de cabeza crónicos o tos, que se presentan principalmente en mujeres y niños menores de 5 años por inhalar humo, con una exposición de hasta 50 veces superior a lo recomendado.

- Las hornillas están protegidas por lo cual disminuye considerablemente la disipación del calor y el riesgo de quemaduras por brasas o agua caliente.

Los principios de funcionamiento de una estufa ahorradora de leña son:

- La mezcla de barro y arena que constituye el cuerpo de la estufa es un aislante térmico que evita la pérdida excesiva de calor. Una vez apagado el fuego es posible seguir cocinando gracias al calor que guarda en su interior.
- Las hornillas colocadas a lo largo del túnel que atraviesa el cuerpo de la estufa, aprovechan el calor residual de la combustión, esto no sucede en una estufa abierta hay un 80 % de desperdicio.
- La entrada de aire a la cámara de combustión y su salida por la chimenea mejora la calidad de la combustión, permitiendo un aprovechamiento del aire caliente y eliminando la dispersión del humo en la cocina.

Otras características importantes son que los materiales básicos de construcción como el lodo, el barro, la arena, adobe, tabiques, ladrillos o cementos, son fáciles de conseguir en la región o localidad y no se requiere de mano de obra especializada para hacer una estufa ahorradora de leña.

### **2.5.1. Diseño de la estufa**

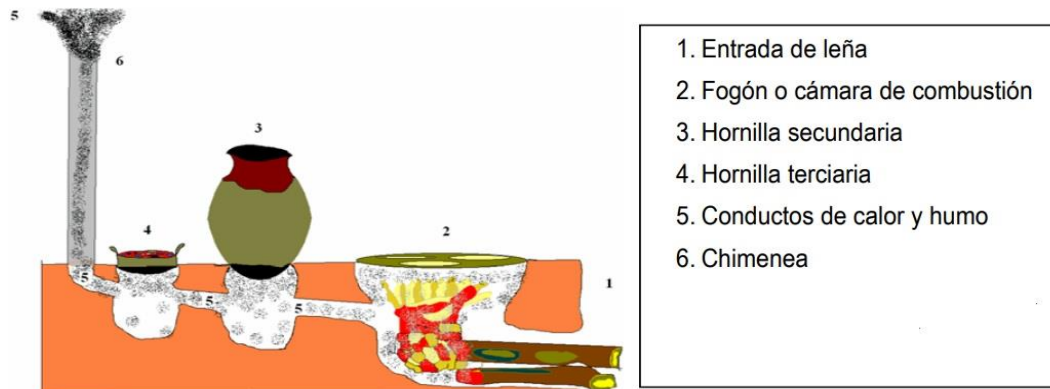
El tamaño y la forma de la estufa deben adaptarse a las necesidades de la familia o persona que la utilizará. Por lo general se hacen uno o más túneles con salida para las hornillas, de tamaños variables, que corresponden a los trastes que se usan normalmente por la familia. El túnel debe permitir que el aire caliente

pase de una cacerola a la siguiente, por lo que la hornilla que está directamente sobre el fuego se destina al utensilio y la actividad diaria que requiera más calor. El diseño de cada estufa depende del uso que se le dará, pero debe tomarse en cuenta lo siguiente:

- Las hornillas pueden ajustarse a más de una olla, sartén o comal. Pero lo ideal es disponer de 4 hornillas.
- El aire caliente debe permanecer el mayor tiempo posible bajo las ollas, por lo cual el túnel debe doblar debajo de cada olla y mantener un flujo ascendente hacia la chimenea.
- Las ollas deben quedar al alcance de la persona que cocina. Además del comal para las tortillas, siempre están presentes la olla del café, la olla de los frijoles y otro traste para hacer algún guisado.
- El tamaño de la cámara de combustión del comal depende de la cantidad de leña utilizada. Una adaptación recomendada por las usuarias en las comunidades PESA es hacer otra cámara de combustión de un tamaño menor, en el extremo opuesto de la estufa.
- La mezcla de lodo y arena se desmorona con el agua, por lo que la estufa debe protegerse de la lluvia.
- Una estufa casi cuadrada se agrieta menos que una rectangular.

La estructura de las estufas ahorradoras de leña por lo general consta de una base y del cuerpo de la estufa.

Figura 3. **Esquema general de los componentes y la forma del cuerpo de una estufa ahorradora de leña**



Fuente: CHÁVEZ LÓPEZ, Moisés. *Estufa ahorradora de leña*. p. 4.

### 2.5.1.1. Características de la estufa a evaluar

En esta sección se describe el diseño de la estufa a evaluar para la prueba de ebullición de agua. La estufa es de metal y tiene una altura de 90 cm, ancho de 49 cm y 61 cm de largo.

Figura 4. **Diseño de la estufa tipo rocket**



Fuente: elaboración propia, laboratorio multiusos de sección de tecnología de la madera. Centro de Investigación de Ingeniería, USAC.

Las dimensiones de la cámara de combustión son las siguientes: 3,5 cm de ancho y 6 cm de altura.

Figura 5. **Cámara de combustión de la estufa**



Fuente: elaboración propia, laboratorio multiusos de sección de tecnología de la madera. Centro de Investigación de Ingeniería, USAC.

Figura 6. **Ventilador de la estufa**



Fuente: elaboración propia, laboratorio multiusos de sección de tecnología de la madera. Centro de Investigación de Ingeniería, USAC.

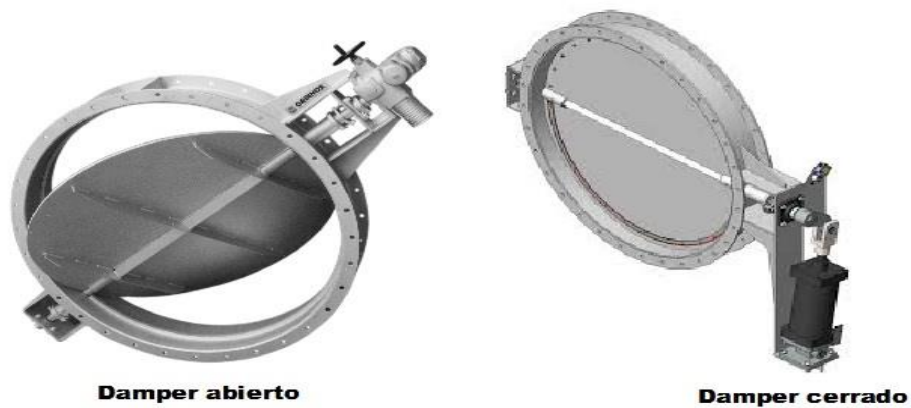
### **2.5.2. Damper de chimenea**

El damper de chimenea es una placa de metal movable, que se utiliza para regular el proyecto y así controlar la velocidad de combustión. Se hace un enfoque en el damper porque en la práctica se modificará el damper de la estufa ahorradora de leña. Este actúa como un amortiguador que funciona como una puerta, creando una barrera en la chimenea para permitir que el humo se eleve y de esta manera mantener los residuos fuera.



Se usa un asa en el lado de la chimenea para abrir el regulador de tiro, la compuerta abierta permite que el humo suba por la chimenea y mantiene el humo y los gases tóxicos fuera del hogar. Cuando el fuego este ardiendo, se puede ajustar el damper para permitir menos flujo de aire y crea un fuego pequeño.

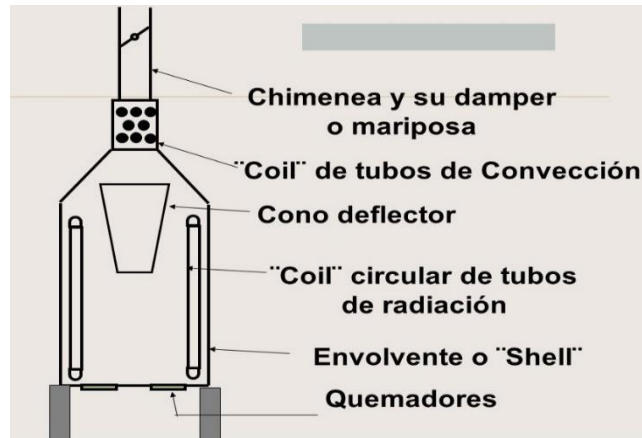
Figura 7. **Regulador del damper para el manejo de flujo de aire**



Fuente: Orbinox. *Damper chimenea de tipo mariposa*. <http://www.orbinox.com/ml-damper-mariposa>. Consulta: 25 de abril de 2019.

La mayoría de dampers se instalan en la base de la chimenea. Los dampers de garganta se instalan cerca de la compuerta existente y se conectan a la chimenea cuando no se está usando. Son baratos y fáciles de instalar, pero no hay que permitir que la lluvia o suciedad se introduzcan a la chimenea.

Figura 8. **Ubicación del damper**



Fuente: TISCARENO, Agapito. *Hornos y calderas*. <https://slideplayer.es/slide/3558411/>.

Consulta: 25 de abril de 2019.

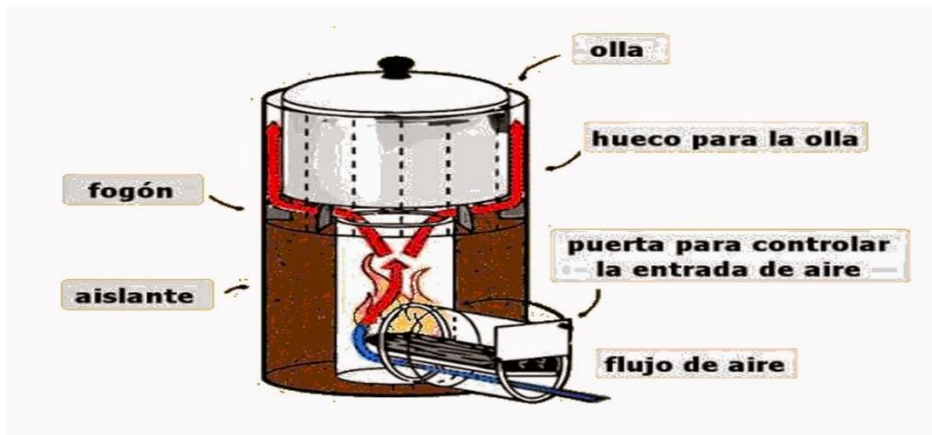
### 2.5.3. **Estufa ahorradora de leña tipo rocket**

Las estufas de tipo rocket son modelos recientes de estufas ahorradoras de leña. Sus diseños se basan en los anteriores modelos, en los últimos 30 años se han revisado y ensayado hasta llegar a los modelos actuales con unos rendimientos sorprendentes. Su diseño es distinto, siendo el principio el mismo: una carga de leña que se quema rápidamente a alta temperatura y el calor producido se almacena en una masa densa de tierra o mampostería que conforma la propia estufa.

Las estufas de masa son sistemas de mucha masa que almacenan calor. Las estufas rocket necesitan fuegos cortos (2-4 horas) y calientes (en torno a 1 000 °C) que generan mucho calor. A diferencia de otros sistemas, las rockets aprovechan el calor de los gases, haciéndolos circular por el cuerpo de la estufa. Esto permite recuperar hasta el 80 % del calor generado durante la combustión.

A la salida del conducto su temperatura no supera los 100 °C. La estufa, una vez cargada (2 a 4 horas de fuego al día), devuelve el calor lentamente, bajo forma de radiación, a lo largo de 12-24h.

Figura 9. **Funcionamiento de una estufa tipo rocket**



Fuente: GÓMEZ, Paula. *Diseño de una estufa rocket*. <http://paula-gomez-blog.blogspot.com/2014/07/disen-rocket.html>. Consulta 25 de abril de 2019.

Las estufas rocket son el sistema más eficiente para calentar con leña. Son más seguras y eficientes de estufas de metal o incluso que los casetes. Su eficiencia, que en muchos casos supera el 90 %, hace que no produzca hollín. el humo liberado al exterior no es visible al no transportar partículas contaminantes no quemadas, tan solo se libera CO<sub>2</sub> y vapor de agua, resultado de una perfecta combustión. La no presencia de residuos y la baja temperatura de los gases emitidos, reduce a cero el riesgo de fuego de chimenea.

## 2.6. Prueba de ebullición del agua, protocolo WBT versión 4.2.2.

La prueba de Ebullición de Agua es una simulación simple del proceso de cocción con la finalidad de medir cuan eficiente es una estufa en utilizar

combustible para calentar el agua en una olla y la cantidad de emisiones producidas durante el proceso.

La prueba de ebullición de agua fue desarrollada para evaluar la actuación de la estufa en una forma controlada, y por lo tanto es probable que no se parezca a las costumbres de cocción locales como otras pruebas descritas. Aunque el WBT es una herramienta útil por las razones expuestas anteriormente, es importante tener en cuenta sus limitaciones. Es una aproximación del proceso de cocción y se lleva a cabo en condiciones controladas por técnicos capacitados. Los resultados de las pruebas de laboratorio pueden diferir de los resultados obtenidos al cocinar los alimentos reales con los combustibles locales, incluso si la eficiencia y las emisiones se midieron exactamente de la misma manera para ambas pruebas.

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

## **2.7. Prueba de emisión de gases**

La eficiencia del combustible es un factor principal para los programas de estufas. Ahora sabemos que los contaminantes atmosféricos emitidos por el uso de combustibles sólidos tienen muchas repercusiones sanitarias y medioambientales. Este documento contiene las instrucciones para la medición de los contaminantes emitidos por la estufa durante la cocción, pero estos pasos pueden omitirse para quienes no tienen el equipo necesario. La eficiencia y emisiones deben ser evaluadas con el mismo protocolo, debido a que los cambios en la operación y diseño de la estufa afectan a ambas.

Mientras que el consumo de combustible es una medida relativamente simple, la determinación de las mediciones de contaminantes es significativamente más complicada. Además de las directrices para la medición de la eficiencia de combustible, el WBT también proporcionan directrices para medir los contaminantes y la obtención de medidas de rendimiento de la estufa. Combinando estas mediciones con las mediciones de eficiencia, podemos determinar un parámetro útil: Emisiones por tarea. Las medidas de emisiones del WBT: no son a lo que las personas están expuestas, sino que son los contaminantes que salen de la estufa. Esta es una forma más directa de comparar dos estufas que la concentración en el aire interior. Otras organizaciones han desarrollado protocolos importantes para determinar las exposiciones interiores. Los modelos computacionales también se han desarrollado para estimar las concentraciones de aire en el interior sobre la base de las emisiones de la estufa y otros parámetros.

### 3. MARCO METODOLÓGICO

#### 3.1. Variables

A continuación, se muestran las variables independientes las cuales no se ven afectadas. Por tanto, no varían durante toda la experimentación. Por otro lado, también se definieron las variables dependientes las cuales son inestables y susceptibles de ser modificadas. Establecer estas variables es muy fundamental ya que las variables independientes son las variables que sirven para estudiar las dependientes.

Tabla III. Descripción de parámetros dependientes e independientes

Variable	Unidad	Factor de diseño		Tipo de Variable	
		Constante	Variable	Independiente	Dependiente
Peso agua (inicial)	g	X		X	
Peso combustible (inicial)	g	X		X	
Dimensiones combustibles	cm	X		X	
Humedad del combustible	%	X		X	
Tiempo	min	X		X	
Temperatura de ebullición	°C		X	X	
Peso agua (final)	g		X	X	
Peso combustible (final)	g		X	X	
Eficiencia	%		X		X
Peso de Carbón	g		X		X
Peso de la ceniza	g		X		X

Continuación de la tabla III.

Poder calorífico	KJ/K*g		X		X
CO y CO2	ppm		X		X
Flujo del aire			X	X	
Damper	%		X		X
Potencia Watts	W		X		X

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Word 2021.

### 3.2. Delimitación de campo de estudio

Se evaluará la eficiencia energética de una estufa ahorradora de leña tipo rocket de cámara abierta mediante un flujo de aire en inicio frío de alto poder, inicio en caliente de alto poder y fuego lento, variando la abertura del damper a 0 %, 20 %, 60 %, 80 %, 100 % utilizando el Protocolo de Ebullición de Agua 4.2.2. (WBT).

- Fundamento del conocimiento: 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 y estadística.
- Aplicación de procedimiento experimental: Operación de combustión.

### 3.3. Recursos humanos disponibles

Investigador: Ana Lucía Can Reyes

Asesores: Ing. Qco. Mauricio Valentino RiveraTello

### **3.4. Recursos materiales disponibles**

En esta sección se definen y se establecen todas las materias y equipos utilizados durante la experimentación.

#### **3.4.1. Materia Prima e Insumos**

- Leña de pinus ayacahuite
- H<sub>2</sub>O (Temperatura ambiente)
- Material de ignición del fuego.

#### **3.4.2. Equipos**

- Estufa ahorradora de leña de cámara abierta tipo rocket.
- Horno
- Indoor Air Pollution Meter (IAP Meter)

#### **3.4.3. Instrumentos de medición**

- Balanza analítica digital
- Balanza de humedad
- Termocupla
- Anemómetro
- Termómetro digital
- Cronometro
- Higrómetro
- Cinta métrica



#### **3.4.4. Materiales**

- Atizador
- Escobilla
- Fósforos
- Guantes térmicos
- Lentes de protección
- Mascarilla para gases
- Ollas estándar con tapadera, capacidad mayor de 5L.
- Recipiente para el carbón
- Removedor de cenizas
- Tenazas para retirar el carbón

#### **3.5. Técnica cuantitativa**

La técnica de este trabajo de investigación es cuantitativa, ya que se obtendrán datos de valores experimentales, con el fin de evaluar los resultados de cinco tipos de flujo de aire variando el damper en una estufa ahorradora de leña con cámara abierta.

#### **3.6. Recolección y ordenamiento de la información**

Análisis de eficiencia energética, CO; CO<sub>2</sub> y MP de una estufa ahorradora de leña de cámara abierta tipo rocket, en los cinco tipos de flujo del aire, con tres repeticiones por cada fase (inicio en frío, inicio en caliente y a fuego lento).

### **3.6.1. Datos generales**

Para la recolección de datos generales de las estufas ahorradoras de leña tipo rocket se utilizará el documento WBT 4.2.4. SPREADSHEET, es un Excel creado por la Alianza Global para Estufas Limpias y se puede encontrar en el siguiente link: <https://www.cleancookingalliance.org/technology-andfuels/testing/protocols.html>.

### **3.6.2. Información general**

Cada hoja tiene la siguiente información

- Prueba y descripción de la estufa
  - Número de prueba
  - Fecha
  - Nombre del Evaluador
  - Lugar
  - Repetir la cantidad de pruebas
  - Altitud
  - Modelo de Estufa
  - Fabricante
  - Descripción y Notas acerca de la estufa
  - Descripción del (de los) hornillo(s)
  
- Condiciones ambientales
  - Humedad relativa del aire (%)
  - Punto de ebullición local del agua

- Evaluación de emisiones
  - Presión atmosférica (kPa)
  - Pitot delta-P
  - Rango del flujo de chimenea o campana (m<sup>3</sup>/hr)
  
- Notas o descripción sobre la estufa o la operación que no se incluyen en otra parte de este formulario
  
- 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.
  
- 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?

Figura 10. Toma de datos de información general

**Water Boiling Test - General Information**

**Test & stove description**

Name of Tester(s) \_\_\_\_\_

Test Number or Code \_\_\_\_\_

Test Dates \_\_\_\_\_

Test Year \_\_\_\_\_

Test Location \_\_\_\_\_

Replicate Test Number \_\_\_\_\_

Altitude/Elevation (m) \_\_\_\_\_

Stove Type/Model \_\_\_\_\_

Manufactured by \_\_\_\_\_

Description and Notes \_\_\_\_\_

Description of Pot(s) \_\_\_\_\_

**Ambient conditions**

Air relative humidity (%) \_\_\_\_\_

Local boiling point (C) \_\_\_\_\_

**Emission testing**

Atmospheric P (kPa) \_\_\_\_\_

Pilot delta-P \_\_\_\_\_

Hood flow rate (m<sup>3</sup>/hr) \_\_\_\_\_

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

Version 4.2.4

**Fuel description**

Your general description \_\_\_\_\_

Fuel type \_\_\_\_\_

Fuel description \_\_\_\_\_

Average length (cm) \_\_\_\_\_

Gross-sectional dimensions (cm x cm) \_\_\_\_\_

Default values (rounded up)

Gross calorific value \_\_\_\_\_ 19,000 HHV, kJ/kg

Net calorific value \_\_\_\_\_ 17,680 LHV, kJ/kg

Char calorific value \_\_\_\_\_ 29,500 LHV, kJ/kg

Char carbon content \_\_\_\_\_ 95% by mass

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

Check box if you have a measured calorific value

Measured gross calorific value \_\_\_\_\_ HHV measured, kJ/kg

Measured net calorific value \_\_\_\_\_ LHV, kJ/kg

Assumed net calorific value \_\_\_\_\_ LHV, kJ/kg

Values to be used for tests

Gross calorific value \_\_\_\_\_ 19,000 HHV, kJ/kg

Net calorific value \_\_\_\_\_ 17,680 LHV, kJ/kg

Fuel carbon content \_\_\_\_\_ 0.500 by mass

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

**Description of operation during the high-power test**

How is fire started? \_\_\_\_\_

When do you add new fuel to the fire? \_\_\_\_\_

How much fuel do you add at one time? \_\_\_\_\_

How often do you feed the fire without adding fuel (e.g. push sticks)? \_\_\_\_\_

Do you control the air above or below the fire? If so, what do you do? \_\_\_\_\_

**Description of operation during the simmering test**

How is fire started? \_\_\_\_\_

When do you add new fuel to the fire? \_\_\_\_\_

How much fuel do you add at one time? \_\_\_\_\_

How often do you feed the fire without adding fuel (e.g. push sticks)? \_\_\_\_\_

Do you control the air above or below the fire? If so, what do you do? \_\_\_\_\_

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel 2021.

### 3.6.3. Preparación de cada fase

El WBT se divide en tres fases: Inicio en frío de alto poder (IFAP), Inicio en caliente de alto poder (ICAP) y fuego lento (FL). Los preparativos para la prueba son:

- Se verifica que se tiene todo el material en el laboratorio.
- Se debe colocar el equipo de seguridad: mandil y guantes de alta temperatura, lentes de protección, zapatos cerrados y pantalón.
- Se capturan los datos generales en el formato para el WBT.
- Se registran la temperatura y humedad del ambiente.
- Se mide la temperatura local de ebullición del agua con ayuda de una estufa eléctrica, un mechero de bunsen, una estufa de gas o una estufa alternativa de combustibles sólidos.
- Si se usa leña como combustible, se cortan trozos de 2 a 4 cm de ancho y de 20 a 40 cm de largo.
- Se mide la humedad del combustible con el higrómetro (1 vez por cada prueba ya que es un valor constante) y se registra.
- Se registra el peso de la charola para carbón.
- Se registra el peso del combustible que se va a utilizar para cada fase de la prueba: 4 kg para el IFAP, 4 kg para el ICAP y 4 kg para el FL.
- Se registra el peso de la(s) olla(s) vacía(s).

#### **3.6.4. Fase de inicio frio**

En la primera fase, se utiliza una estufa que no ha sido encendida por lo menos en las últimas 24 hora. Los pasos a seguir son:

- Se llena la olla con agua 5L, a temperatura ambiente.
- Se registra el peso de la olla con agua.
- Se pone la olla sobre la superficie de cocción.
- Se posicionan los termómetros en la cámara de combustión, la chimenea y en la olla con agua.
- Se registra la temperatura del agua en la olla.
- El responsable técnico forma un arreglo con trozos de combustible que permita el paso del aire.
- El responsable técnico enciende, fuera de la cámara de combustión, un trozo de iniciador de fuego (en este caso pinus ayacahuite con alcohol en gel) y lo posiciona dentro del arreglo de combustible en la cámara de combustión. A partir de este paso se comienza a contar el tiempo.
- El responsable técnico vigila el fuego. Si el fuego se apaga y se consumió combustible, se mide y registra de nuevo el peso del combustible.
- Una vez que la cámara de combustión está encendida, el responsable técnico debe alimentarla cada dos o tres minutos. Se debe mantener el

fuego en alto poder durante toda la prueba. La frecuencia de alimentación y la cantidad de combustible dependerán del comportamiento de la cámara de combustión y de la destreza del responsable técnico.

- Cuando el agua de la olla de 5 L o 3,5 L llegue a la temperatura de ebullición, se registra el tiempo y la temperatura de la olla. En este paso inicia la cuenta de 10 minutos para comenzar con la fase de ICAP.
- El responsable técnico y el asistente se ponen la máscara contra humo.
- El responsable técnico retira de la cámara de combustión el combustible no quemado y lo introduce en el ahogador de fuego.
- El responsable técnico retira el carbón y las cenizas de la cámara de combustión y los deposita en el ahogador para carbón.
- El asistente retira la olla con agua de la estufa.
- El responsable técnico mide y registra el peso de la charola con el carbón.
- El asistente mide y registra el peso de la olla.
- Se mide y registra el peso de todo el combustible que no se quemó en la prueba.
- Se limpia y ordena el área de trabajo.

Entre el paso 10 del IFAP y el paso 7 del ICAP deben transcurrir como máximo 10 minutos.



### **3.6.5. Fase de inicio caliente**

Los pasos a seguir para la fase ICAP son:

- Todos los participantes de la prueba se deben colocar el equipo de seguridad: mandil y guantes de alta temperatura, lentes de protección, zapatos cerrados y pantalón.
- Se llena la olla con 5L de agua.
- Se pone la olla sobre la superficie de cocción.
- Se posicionan los termómetros en la olla con agua.
- Se registran las temperaturas del agua en la olla.
- El responsable técnico forma un arreglo con trozos de combustible que permita el paso de aire.
- El responsable técnico enciende, fuera de la cámara de combustión, un trozo de iniciador de fuego (en este caso pinus ayacahuite con alcohol en gel) y lo posiciona dentro del arreglo de combustible en la cámara. A partir de este paso se comienza a contar el tiempo.
- El responsable técnico vigila el fuego. Si el fuego se apaga y se consumió combustible, se mide y registra de nuevo el peso del combustible.
- Una vez que la cámara de combustión está encendida, el responsable técnico debe alimentarla cada dos o tres minutos. Se debe mantener el

fuego alto poder durante toda la prueba. La frecuencia de alimentación y la cantidad de combustible dependerá del comportamiento de la cámara de combustión y de la destreza del responsable técnico.

- Cuando el agua de la olla de 5 L o 3,5 L llegue a la temperatura de ebullición, se registran el tiempo y la temperatura de la olla. En este paso inicia la cuenta de 5 minutos para comenzar con la fase de FL.
- El responsable técnico y el asistente se ponen la máscara contra humo.
- El responsable técnico retira de la cámara de combustión el combustible no quemado y lo introduce en el ahogador de fuego.
- El responsable técnico retira del carbón y las cenizas de la cámara de combustión y los deposita en el ahogador para carbón.
- El asistente retira la olla con agua de la estufa.
- El responsable técnico registra el peso de la charola con el carbón.
- El asistente registra el peso de la olla.
- Se registra el peso de todo del combustible que no se quemó en la prueba.

Entre el paso 12 del ICAP y el paso 9 del FL deben transcurrir como máximo 5 minutos.

### **3.6.6. Fase III, FL**

Esta fase es una continuación directa del ICAP. Los pasos para la fase de FL son:

- Se vuelen a poner la olla usadas en el ICAP sobre la superficie de cocción (sin enfriar ni agregar agua).
- Se posicionan de nuevo los termómetros en la olla con agua.
- El responsable técnico acondiciona la cámara de combustión para que trabaje a bajo poder. Debe mantenerse una combustión constante y homogénea. Esta fase dura 45 minutos.
- El agua se mantiene 3 °C debajo de la temperatura de ebullición y puede oscilar  $\pm 3$  °C.
- Cumpliendo los 45 min, se registran la hora y la temperatura de la olla.
- El responsable técnico y el asistente se ponen la máscara contra humo.
- El responsable técnico retira de la cámara de combustión el combustible no quemado y lo introduce en el ahogador de fuego.
- El responsable técnico retira el carbón y las cenizas de la cámara de combustión y los deposita en el ahogador de carbón.
- El asistente retira la olla con agua de la estufa.

- El responsable técnico registra el peso de la charola con el carbón.
- El asistente registra el peso de la olla.
- Se registra el peso de todo el combustible que no se quemó en la prueba.
- Se limpia y ordena el área de trabajo.
- Adición esto se hace por cada abertura de damper, todas las fases.

### **3.6.7. Medición de las emisiones de CO y CO<sub>2</sub>**

La medición de emisión de gases se realizará con el equipo de analizador correspondiente, CO y CO<sub>2</sub>.

- 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).

### **3.6.8. 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.
- Registrar temperatura.
- Registrar tiempo.

### 3.6.9. 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 11. 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: elaboración propia, empleando Microsoft Excel 2021.

Figura 12. Hoja de toma de datos para las tres fases

	Cold Start		Hot Start		Simmer	
	Start	End	Start	End	Start	End
Time	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Weight of Fuel	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Water Temperature, Pot 1	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Water Temperature, Pot 2	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Water Temperature, Pot 3	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Water Temperature, Pot 4	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Weight of Pot 1 with water	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Weight of Pot 2 with water	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Weight of Pot 3 with water	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Weight of Pot 4 with water	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<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: elaboración propia, empleando Microsoft Excel 2021.

### 3.7. Analisis estadístico

Se realizará la prueba WBT a una estufa ahorradora, variando el damper de la estufa y obteniendo cinco flujos de aire, cada una con tres repeticiones, por lo que se utilizara un análisis de varianza para cada uno de ellos.

Tabla IV. Datos para el análisis de varianza

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

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel 2021.

Donde:

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

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

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

- Media muestral

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

$$\bar{x} = \frac{\sum_{I}^N X_I}{N} \quad [\text{Ec. 1}]$$

Donde:

$\bar{x}$  = media.

$\sum_{I}^N X_I$  = sumatoria de valores.

N = número de datos.

- Varianza

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

$$\sigma^2 = \frac{\sum(x_i - \bar{x})^2}{N} \quad [\text{Ec. 2}]$$

Donde:

$\sigma^2$  = varianza

$x$  = valor promedio.

$x_i$  = valor de la muestra.

$N$  = número de datos.

- Desviación estándar

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

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum(x_i - \bar{x})^2}{N}} \quad [\text{Ec. 3}]$$

Donde:

$\sigma$  = desviación estándar

$\bar{x}$  = valor promedio.

$x_i$  = valor de la muestra.

$N$  = número de datos.

- Coeficiente de variación de Pearson.

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

$$CV = \frac{\sigma}{\bar{x}} \quad [\text{Ec. 4}]$$



Donde:

CV = coeficiente de variación.

$\sigma$  = desviación estándar

$x$  = valor promedio.

### **3.8. Plan de análisis de los resultados**

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

#### **3.8.1. Programas a utilizar para el análisis de datos**

- Microsoft Word 2016 y Microsoft Excel 2016.
- WBT4.2.4SPREADSHEET

#### **3.8.2. Métodos y modelos de los datos según tipo de variables**

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

Tabla V. **Eficiencia energética**

Abertura del damper (%)	Arranque en frío (%)	Arranque en caliente (%)	Hervir a fuego lento (%)
0			
20			
60			
80			
100			

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel 2021.

Tabla VI. **Emisiones de gases**

Abertura del damper %	Arranque en frío		Arranque en caliente		Hervir a fuego lento	
	CO (ppm)	CO2 (ppm)	CO (ppm)	CO2 (ppm)	CO (ppm)	CO2 (ppm)
0						
20						
60						
80						
100						

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel 2021.

### 3.9. Programas a Utilizar para análisis de datos

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, los datos se registrarán en las pestañas: Test-1, Test-2, entre otros.



## 4. RESULTADOS

A continuación, en la siguiente tabla se presentan los flujos de aire utilizados en el ventilador para la estufa tipo rocket ajustando el damper con las siguientes aperturas 0 %; 20; 60 %; 80 % y 100 %.

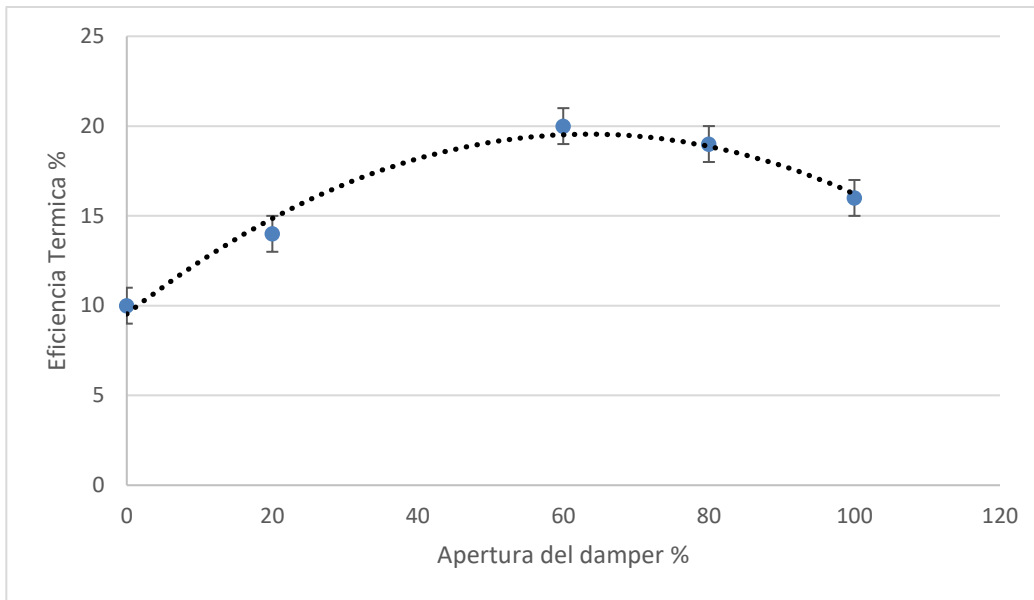
Tabla VII. **Flujos de aire del ventilador de la estufa con cada apertura del damper**

<b>Apertura (%)</b>	<b><math>C_{aire}</math> (pie/min)</b>
0	-----
20	420,50
60	470,73
80	569,50
100	655,09

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel 2021.

A continuación, se presenta en las figuras 13 a la 15 el comportamiento de la eficiencia térmica en función de la apertura del damper al 0 %; 20 %; 60 %; 80 % y 100 % cuando está en fase de inicio en frío, caliente y alta potencia.

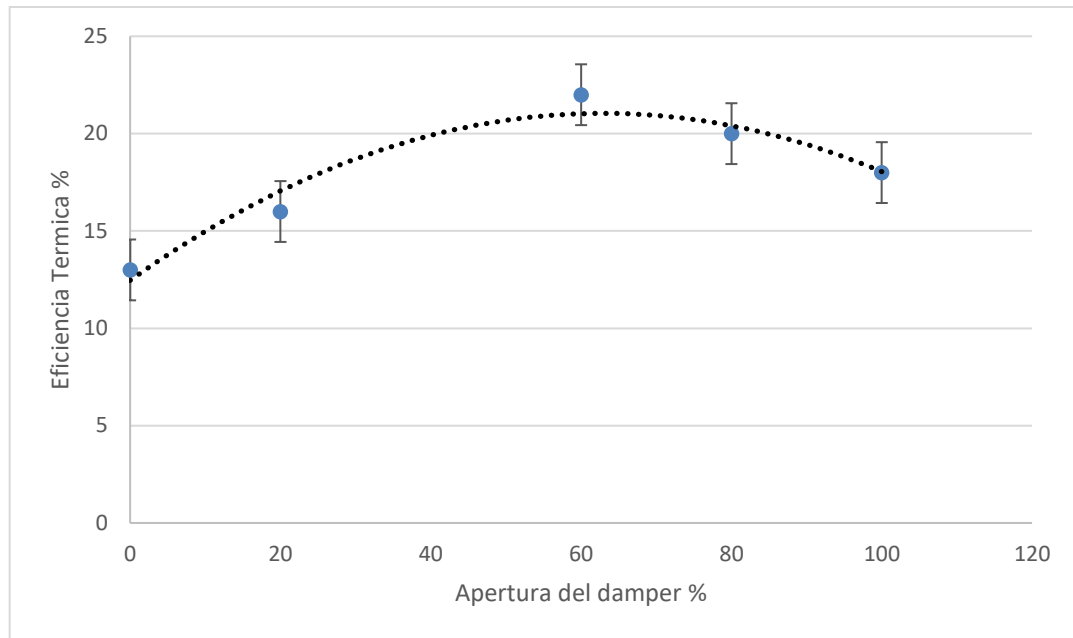
Figura 13. **Eficiencia térmica vs Apertura del damper en fase de inicio en frío**



Ecuación	$ET=0,0025AD^2+0,3157AD+9,5357$
Ordenada	Eficiencia Térmica (ET)
Abscisa	Apertura del damper (AD)
R cuadrado	$R^2=0,98$
Desviación estándar	4,024922359

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel 2021.

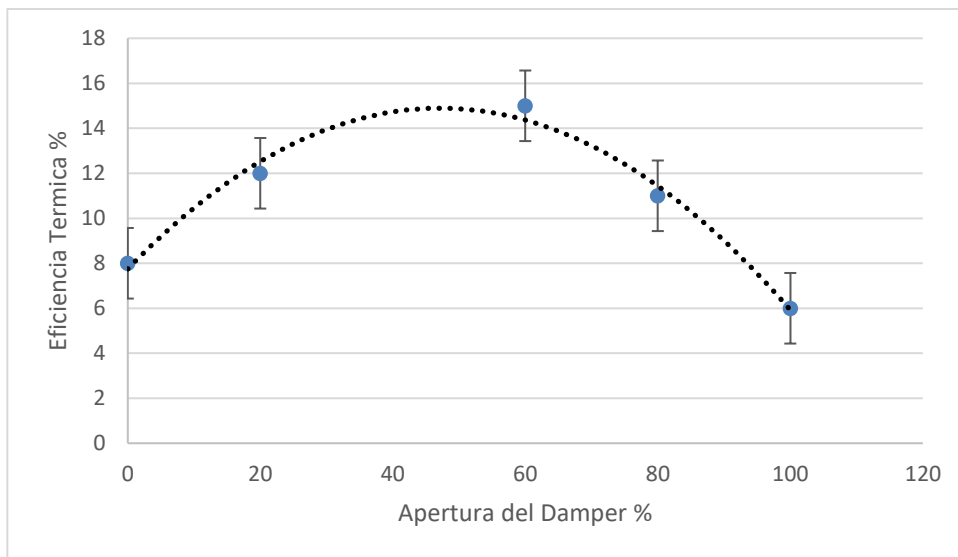
Figura 14. Eficiencia térmica vs Apertura del damper en fase de inicio en caliente



Ecuación	$ET=0,0022AD^2+0,2737AD+12,464$
Ordenada	Eficiencia Térmica (ET)
Abscisa	Apertura del damper (AD)
R cuadrado	$R^2=0,9484$
Desviación estándar	3,492849839

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel 2021.

Figura 15. **Eficiencia térmica vs Apertura del damper en fase de inicio a fuego lento de alta potencia**

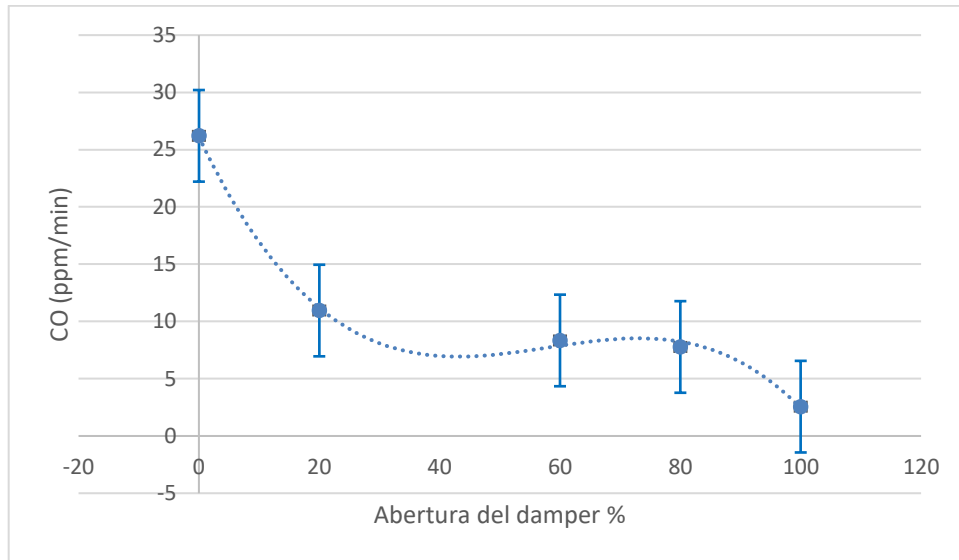


Ecuación	$ET=0,0032AD^2+0,3028AD+7,75$
Ordenada	Eficiencia Térmica (ET)
Abscisa	Apertura del damper (AD)
R cuadrado	$R^2=0,9811$
Desviación estándar	3,507135583

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel 2021.

A continuación, se presenta en las figuras 16 y 17 las emisiones de CO y CO<sub>2</sub> respectivamente en función de la apertura del damper al 0 %; 20 %; 60 %; 80 % y 100 %.

Figura 16. Emisiones de CO vs Abertura del damper

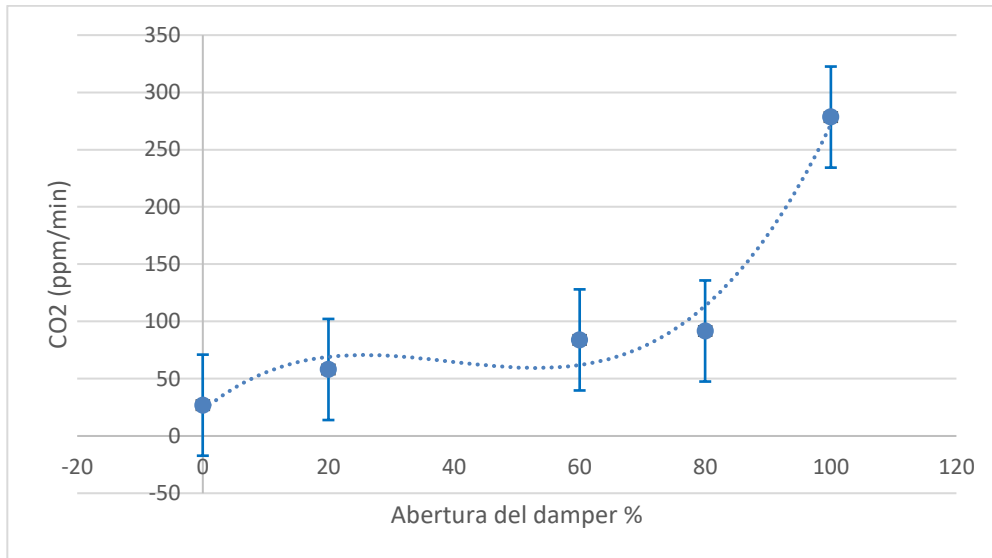


Ecuación	$CO=0,0001AD^3+0,0205AD^2-1,1086AD+26,113$
Ordenada	Monóxido de Carbono (CO)
Abscisa	Apertura del damper (AD)
R cuadrado	$R^2=0,9984$
Desviación estándar	8,941811375

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel 2021.



Figura 17. **Emisiones de CO2 vs Abertura del damper**

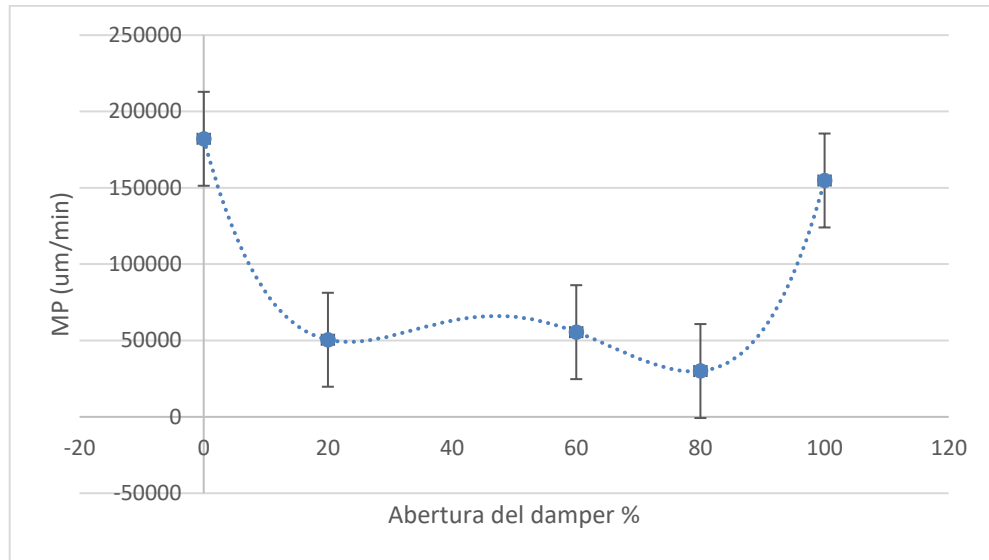


Ecuación	$CO=0,0011AD^3-0,1292AD^2+4,4699AD+22,52$
Ordenada	Monóxido de Carbono (CO)
Abscisa	Apertura del damper (AD)
R cuadrado	$R^2=0,9707$
Desviación estándar	9,870141507

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel 2021.

A continuación, se presenta en las figuras 18 y 19 material particulado de  $1,8 \mu\text{m}$  y  $17 \mu\text{m}$  respectivamente en función de la apertura del damper al 0 %; 20 %; 60 %; 80 % y 100 %.

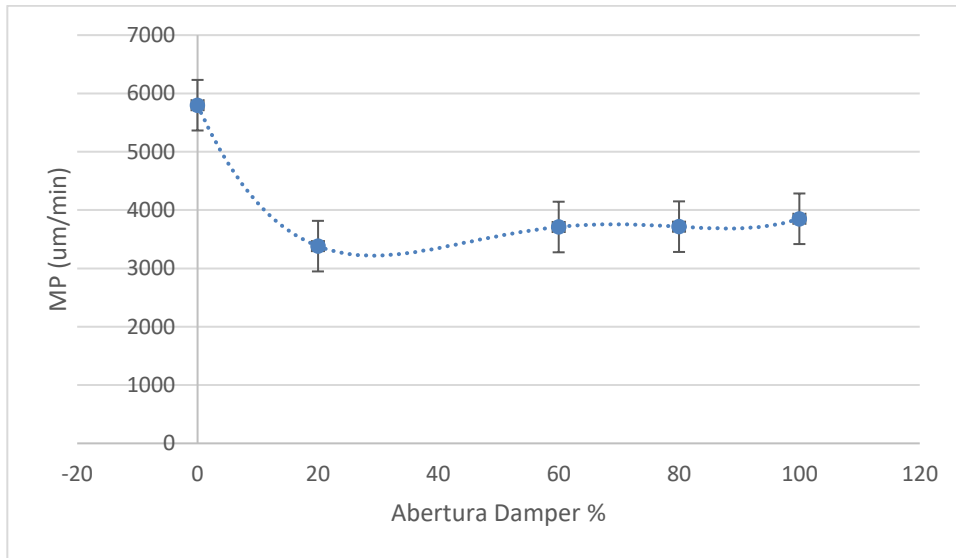
Figura 18. **Material particulado de 1,8 µm vs Abertura del damper**



Ecuación	$MP=0,0433AD^4-8,611AD^3+575,62AD^2-14994AD+182112$
Ordenada	Material Particulado (MP)
Abscisa	Apertura del damper (AD)
R cuadrado	$R^2=1$
Desviación estándar	6,87850684

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel 2021.

Figura 19. **Material particulado de 17 µm vs Abertura del damper**



Ecuación	$MP=0,0003AD^4-0,0801AD^3+6,8801AD^2-228,97AD+5798,4$
Ordenada	Material Particulado (MP)
Abscisa	Apertura del damper (AD)
R cuadrado	$R^2=1$
Desviación estándar	6,87850684

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel 2021.

## 5. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

El trabajo de investigación se realizó en el área de prefabricados de la sección de Tecnología de la Madera del Centro de Investigaciones de Ingeniería (CII), ubicado en la Universidad de San Carlos de Guatemala. Las condiciones climáticas durante el proceso fueron muy similares, temperatura promedio de 25 °C y una humedad relativa del 85 %.

El parámetro más importante de la prueba WBT para una estufa ahorradora de leña es la eficiencia térmica, este parámetro se define como la fracción de calor producida por el combustible que es transferida al cuerpo receptor (olla). Se trata de una medida adimensional, se expresa en valores de porcentaje. En la sección de resultados se registran los resultados individuales de cada uno de los ensayos de WBT realizados en la estufa tipo rocket con diferentes aperturas de damper, 0 %, 20 %, 60 %, 80 % y 100 %. Así mismo se determinó que tan contaminante es esta estufa registrando las emisiones de monóxido de carbono, dióxido de carbono y material particulado. Resultados sobre los cuales se efectúa la discusión del resultado general de las pruebas.

La tabla 7 muestra los flujos de aire a cada apertura de damper. Como se observa conforme se va abriendo el damper va aumentando el flujo de aire. La estufa tipo rocket la que se analizó en la presente investigación contaba con un ventilador que le proporcionaba aire extra la estufa y este ventilador era el que tenía el damper y así con la disposición del damper se iba regulando el flujo de aire para ir determinando a que apertura generaba mejor eficiencia a la estufa, también cabe mencionar que la humedad de la madera se mantuvo constante con un rango de humedad de 12-14 %.

En la figura 13 en la fase de arranque en frío, se puede observar que a una apertura de damper del 0 % la eficiencia térmica es del 10 % un valor relativamente bajo. Sin embargo, este valor de eficiencia térmica puede ser energéticamente reducido por la falta de oxígeno atmosférico. Como se tiene un flujo de aire más alto los gases de combustión salen más rápido. Como se puede observar en la gráfica 13, representa una parábola, la eficiencia máxima no se alcanzó en la apertura máxima del damper. Esto sucede porque el flujo de aire es demasiado alto y se lleva todos los gases de combustión y estos no se quedan suficiente tiempo en la estufa. Al no haber suficiente oxígeno que entre a la cámara de combustión dificulto el arranque de combustión en la estufa, pero al abrir el damper a un 20 % la eficiencia térmica aumenta con un 14 % y sigue de esta manera hasta una apertura del 60 %. Al abrir el damper a un 80 % y 100 % la eficiencia térmica vuelve a bajar significativamente debido a que al incrementar el aire primario (abriendo el damper), la combustión se empobrece, reduciendo su eficiencia térmica. Aunque no es un efecto visual significativo, los resultados muestran una reducción de hasta el 16 % en la eficiencia térmica.

La figura 14 muestra los resultados de la fase inicio en caliente, donde se puede visualizar que a una apertura del damper al 0 % en comparación con la fase en inicio en frío la eficiencia térmica ascendió al 13 %. Lo anterior es consecuente a que cuyo rendimiento es bajo cuando el encendido se hace en fase en inicio frío debido a que la mayor masa de la estufa retiene una mayor cantidad de energía térmica reduciendo la cantidad de calor transferible al cuerpo receptor (olla). Una vez la estufa se encuentre caliente, la transferencia térmica aumenta y mejora la eficiencia del proceso. También se puede observar que a una apertura del 20 % y 60 % la eficiencia es del 16 % y 22 % respectivamente, eficiencias que van ascendiendo. Sin embargo, a una apertura del 80 % y 100 % las eficiencias térmicas bajan a un 20 % y 18 % respectivamente. Como se ha

mencionado anteriormente las eficiencias térmicas en fase inicio caliente son mayores a las de fase en inicio frío.

La figura 15 muestra los resultados de la fase a fuego lento. Se encontró una disminución significativa entre la fase en inicio frío y caliente. A continuación, se explica dicho fenómeno; como se observa en el gráfico a una apertura de damper al 0 % la eficiencia térmica es del 8 %, la estufa tuvo un pobre desempeño en la fase de fuego lento, dado que la eficiencia solo alcanzó un valor bajo en comparación a la fase en inicio frío y caliente, lo que significa que, para labores de cocción de baja energía térmica, la estufa tipo rocket demandará una mayor cantidad de combustible para mantener una temperatura de referencia.

La figura 16 muestra las concentraciones de monóxido de carbono con las diferentes aperturas de damper. La combustión es una reacción química que se produce con el oxígeno y un material que se oxida, para esta investigación el material que se oxida es la madera, lo que sucede en la madera es que va desprendiendo energía térmica manifestándose con llamas incandescentes y gases calientes que contienen diferentes sustancias y entre ellas monóxido de carbono y material que no se quemó. Como se puede observar (figura 16) a una apertura de damper al 0 % la emisión de monóxido de carbono es alta, esto se debe que al estar totalmente cerrado el damper provoca que no haya una combustión completa de la madera además no hay suficiente oxígeno que provoque la combustión. Por lo tanto, desprende una mayor cantidad de monóxido de carbono, para obtener una combustión limpia se debe perseguir una combustión completa en condiciones de combustión lenta y esto se va consiguiendo conforme se abre el damper de la estufa al abrir el damper al 100 % se obtiene una baja emisión de monóxido de carbono lo que significa que a esta apertura hay una combustión casi completa.

La figura 17 muestra los resultados de las emisiones de CO<sub>2</sub>. Como se observa a una apertura de damper del 0 % la emisión de CO<sub>2</sub> es baja, y conforme se abre el damper las emisiones de CO<sub>2</sub> van aumentando. Lo que sucedió acá fue que al inicio de la combustión cuando el damper estaba al 0 % el CO y CO<sub>2</sub> tuvieron la misma cantidad de emisiones, debido a la falta de oxígeno ninguna de las dos logra combustionar por completo. Sin embargo, al agregar más oxígeno el CO logra combustionar casi completamente y el CO<sub>2</sub> va aumentando rápidamente su concentración en la atmósfera. Además, la combustión incompleta de hidrocarburos o carbón natural produce CO como hemos podido observar y este gas causa un mayor impacto medio ambiental y más tóxico que el CO<sub>2</sub>. Para hacerse una idea de la mayor toxicidad, el límite de exposición permisible según la OMS para el CO en el aire es de 50 ppm y para el CO<sub>2</sub> es de 5000 ppm, y se recomienda que no supere los 1000 ppm. Por lo tanto, esta estufa tipo rocket no sobre pasa los límites permisibles de CO y CO<sub>2</sub>. Al usar las ecuaciones empíricas se puede obtener el dato de las emisiones de CO y CO<sub>2</sub> que emite esta estufa. Como se puede observar en la figura 16 usando la ecuación empírica que muestra la tabla se determinó la exposición permisible de CO usando la máxima apertura del 100 % el dato máximo que dio fue de 20,253 ppm un valor aceptable ya que no sobrepasa la exposición permisible de los 50 ppm. Por otro lado, el resultado que se obtuvo usando la ecuación empírica de la figura 17, se metió el dato de la apertura máxima de la estufa del 100 % y dio como resultado 277,51 ppm de CO<sub>2</sub> un valor aceptable ya que no sobrepasa la emisión recomendada por la OMS de los 1 000 ppm.

Las siguientes figuras 18 y 19 muestran los resultados de material particulado que no se quemó, es de suma importancia hacer énfasis en estas gráficas ya que estas partículas son dañinas para nuestros pulmones causando daños respiratorios. Para clasificar el material particulado existen dos métricas comúnmente utilizadas: partículas menores o mayores a 10 micrones y partículas

menores a 2,5 micrones. Las partículas que están entre 10 micrones se pueden distinguir dos fracciones: La gruesa, es decir entre 2,5 y mayores a 10 micrones y la fina, menores a 2,5 micrones. Cabe destacar que entre más pequeño el tamaño de la partícula, más profundamente puede entrar a los pulmones y sistema respiratorio, acarreado toxinas por el cuerpo a través de la sangre. La OMS reconoce que las mediciones de contaminantes intradomiciliarios son técnicamente difíciles de controlar, ya que involucran equipos relativamente costosos, cuidadosos procedimientos y controles de calidad. Estas herramientas son aún más difíciles de obtener para las áreas rurales. Dadas las dificultades de las mediciones de material particulado, uno de los objetivos de esta investigación es predecir posibles escenarios de exposición de ocupantes de material particulado dentro de los hogares de áreas rurales y su potencia de salud, usando la estufa ahorradora de leña tipo rocket y con sus diferentes aperturas de damper.

Como se puede observar en la figura 18, muestra los resultados del diámetro de partícula de 1,8 micrones. Podemos ver que la concentración más baja la obtuvo la apertura de damper al 60 % y el valor más alto se obtuvo a una apertura del 100 %. Esto confirma dos cosas la primera es que al tener una mejor combustión del material tenemos más energía que puede ser aprovechada por la estufa, y menos contaminantes. Sin embargo, al tener totalmente abierto el damper de la estufa, lo que confirma la segunda observación, es que la eficiencia de la estufa baja y provoca que el material particulado se expanda con mayor facilidad incrementado la tasa de material particulado.

La figura 19 muestra los resultados del material particulado de diámetro de 17 micrones, partículas gruesas. El valor más bajo se encuentra entre la apertura de damper al 20 % y 60 %, luego los valores se mantienen constantes. Al ser partículas de mayor tamaño, que combustionen en su totalidad es más difícil. Como se ha visto, tanto en la figura 18 y 19 la menor tasa de material particulado



se encuentra entre las aperturas de damper del 20 % y 60 %, ya que al comparar resultados de las emisiones de material particulado con los que se emite a fuego abierto se obtuvieron valores grandes por lo que es mejor mantener la apertura del damper entre los rangos mencionados ya que así se mejora la calidad del aire y se reducen las emisiones de material particulado, al utilizar leña como fuente de energía, teniendo mejores valores para la estufa tipo rocket.

## CONCLUSIONES

1. Con relación a la eficiencia energética de la estufa ahorradora leña tipo rocket se determinó que en fase de inicio frío la mejor eficiencia se obtuvo con la apertura de damper al 60 % ya que en ese punto la relación de oxígeno que entra más el tiempo de retención de los gases hace que se transfiera más energía térmica a la plancha y así esta sea más aprovechada.
2. La eficiencia térmica de la estufa ahorradora de leña tipo rocket indico que en fase de inicio caliente la mejor eficiencia se consiguió a la apertura de damper al 60 % ya que en ese punto la relación de oxígeno que entra más el tiempo de retención de los gases hace que se transfiera más energía térmica a la plancha y así esta sea más aprovechada.
3. Finalmente, la eficiencia térmica de la estufa ahorradora de leña tipo rocket en fase a fuego lento mostro que su mejor eficiencia se logró a la apertura de damper del 60 % ya que en ese punto la relación de oxígeno que entra más el tiempo de retención de los gases hace que se transfiera más energía térmica a la plancha y así esta sea más aprovechada.
4. En cuanto a las emisiones de CO y CO<sub>2</sub>, se determinó que a una apertura de damper al 60 % se logra una combustión muy cercana a la combustión completa ya que al seguir abriendo más el damper los gases de CO disminuyen más, pero los gases de CO<sub>2</sub> aumentan porque los gases de CO<sub>2</sub> se mezclan con el aire de la atmosfera alimentando su concentración. Por lo tanto, a una apertura de damper al 60 % es la más ideal para la

estufa ya que se consumen los gases de CO y los gases de CO<sub>2</sub> se mantienen dentro del rango permisible de la calidad del aire.

5. El material particulado para partículas con diámetro de 1,8 micrones muestra que a una apertura de damper entre 60 % y 80 % el material particulado disminuye. Esto indica que a estas aperturas son las más ideales ya que muestran una mejor calidad de aire.
6. Se determinó que el material particulado con diámetro de 17 micrones, a una apertura de damper de 60 % y 80 % el material particulado disminuye. Indicando que a estas aperturas son las más ideales para usar en la estufa ya que muestran una mejor calidad de aire.
7. Se tiene que el flujo de aire tiene una relación directa sobre la eficiencia en sus tres fases y sobre la cantidad de material particulado y emisiones que pueda emitir en una estufa.

## RECOMENDACIONES

1. Almacenar la leña en un área seca y cerrada para que la humedad no se vea afectada.
2. Verificar que estén calibrados los equipos de emisiones de CO, CO<sub>2</sub> y Material Particulado.
3. Considerar que el tamaño de los leños para un mejor trabajo puede estar entre 0,02 m y 0,04 m, ancho y largo, respectivamente.
4. Considerar que la estufa ahorradora de leña solamente requiere dos o tres leños cortos y delgados para que encienda rápidamente la primera vez. Una vez que la lumbre prenda bien, pueden usarse leños gruesos, evitando tapan la entrada porque se ahoga.
5. Verificar antes de realizar las pruebas que, las ollas estén en buen estado y que no estén oxidadas, con agujeros u obstrucción físicas.
6. Ver que la separación entre las ollas quede al menos, 10 cm. Para tener una mejor transferencia de calor entre cada olla.
7. Estar pendientes que al finalizar la prueba en fase de inicio en frío no dejar mucho tiempo para la prueba en inicio caliente, ya que se va perdiendo el calor en la estufa. Por lo tanto, se debe tener listo los 4 kg de leño para la fase fría y caliente, así de esta manera no se pierde calor y tiempo entre las fases mencionadas.

8. Sacar las cenizas todos los días antes de prender la estufa.
9. Hacer una limpieza de las hornillas, los túneles y el tubo de la chimenea cada tercer día.
10. Hacer la limpieza de las hornillas y cuando se haga se recomienda utilizar una escobilla o cepillo, se raspan los costados y el tope para sacar la ceniza.

## BIBLIOGRAFÍA

1. GÓMEZ, Paula. *Diseño de una estufa rocket*. [en línea]. <<http://paula-gomez-blog.blogspot.com/2014/07/disenorocket.html>>. [Consulta 25 de abril de 2019].
2. LAVICOUNT SANDOVAL, Kimberly Pammela. *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 de Ing. Química, Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala, 2018. 130 p.
3. Orbinox. *Damper chimenea de tipo mariposa*. [en línea]. <<http://www.orbinox.com/ml-damper-mariposa>>. [Consulta: 25 de abril de 2019].
4. OSORIO CEBALLOS, Bernardo Yuri. *Evaluación de la eficiencia energética de una estufa ahorradora*. Trabajo de graduación de Ing. Química, Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala, 2019. 121 p.
5. PAIZ, Juan Carlos. *Plan de acción nacional de Guatemala para estufas y combustibles limpios*. Guatemala: Global Alliance for Clean Cooktoves, 2014. 51 p.
6. PÉREZ BAYER, Juan; GARCIANO BUSTAMANTE, Diana; GÓMEZ BETANCUR, José. *Caracterización energética y emisiones de una*

*estufa de cocción ecoeficiente con biomasa a diferentes altitudes.*  
Colombia: Universidad de Antioquia, 2013. 89 p.

7. PESA. *Estufas ahorradoras de leña.* México: PESA, 2007. 18 p.
8. RIVERA TELLO, Mauricio Valentino; DONIS ALVAREZ, Alejandra María Rebeca. *Evaluación de estufas ahorradoras de leña en Guatemala.* Guatemala: Universidad de San Carlos de Guatemala, 2017. 67 p.
9. RODRIGUEZ, Ana Victoria. *Desarrollo con bajas emisiones.* Guatemala: Rainforest Alliance, 2013. 2 p.
10. SILVA, Roberto. *Mecanismos de transferencia de calor.* [en línea]. <<https://www.esss.co/blog/es/analisis-termico-por-el-metodo-de-elementos-finitos/>>. [Consulta: 23 de abril de 2019].
11. Sustrai. *La combustión y la biomasa.* [en línea]. <<https://fundacionsustrai.org/la-combustion-y-la-biomasa-analisis-de-los-usos-por-combustion-de-la-biomasa/>>. [Consulta: 23 de abril de 2019].
12. TISCARENO, Agapito. *Hornos y calderas.* [en línea]. <<https://slideplayer.es/slide/3558411/>>. [Consulta: 25 de abril de 2019].
13. USAID. *Programa clima, naturaleza y comunidades en Guatemala.* Guatemala: Rainforest Alliance, 2013. 117 p.

# APÉNDICES

## Apéndice 1. Metodología del cálculo

- Eficiencia térmica

Para estufas masivas con capacidad para operar con más de dos ollas, esta métrica se calculó a partir de la siguiente ecuación.

$$h_c = \frac{[4.186 * (\sum_{j=1}^4(pj_{ci} - p_j)) - (T_{jcf} - T_{jci})] + 2260 * W_{cv}}{f_{cd} * LHV}$$

Donde:

$h_c$  = Eficiencia Térmica

$P_{jci}$  = Peso inicial de la olla con agua j

$P_j$  = Peso de la olla j

$T_{jcf}$  = Temperatura final de la olla j con agua

$T_{jci}$  = Temperatura inicial de la olla j con agua

$W_{cv}$  = Cantidad de agua evaporada

$f_{cd}$  = Cantidad de leña seca consumida

LHV = Poder calorífico inferior.

Nota: En el apéndice 2, se muestra 1 ejemplo de los registros de los resultados individuales de cada uno de los ensayos de WBT con las diferentes aperturas de damper realizados a la estufa tipo rocket, usando la hoja de cálculo WBT 4.2.4 SPREADSHEET. Se hicieron 15 ensayos con 3 repeticiones a cada apertura de damper al 0 %, 20 %, 60 %, 80 % y 100 %. De las cuales se extrajo la eficiencia térmica y se hizo un promedio en cada apertura de damper.

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Word 2021.



## Apéndice 2. Datos calculados

Figura A. Toma de datos de la prueba con una apertura de damper al 0 %

TEST #10 10		COLD START HIGH POWER				HOT START HIGH POWER (OPTIONAL)				SIMMER TEST			
Measurements	Units	Start		Finish: when Pot #1 boils		Start		Finish: when Pot #1 boils		Start		Finish: 45 min	
		data	label	data	label	data	label	data	label	data	label	data	label
Time (in 24 hour form)	hr:min	9:58	t <sub>i</sub>	10:38	t <sub>f</sub>	10:42	t <sub>i</sub>	11:08	t <sub>f</sub>	11:11	t <sub>i</sub>	11:59	t <sub>f</sub>
Weight of fuel	g	4000	f <sub>i</sub>	1900	f <sub>f</sub>	4000	f <sub>i</sub>	2750	f <sub>f</sub>	2750	f <sub>i</sub>	1630	f <sub>f</sub>
Water temperature, Pot # 1	°C	20.9	T <sub>1,i</sub>	91.8	T <sub>1,f</sub>	26.1	T <sub>1,i</sub>	91.7	T <sub>1,f</sub>	91.7	T <sub>1,i</sub>	94.6	T <sub>1,f</sub>
Water temperature, Pot # 2	°C	20.7	T <sub>2,i</sub>	63.4	T <sub>2,f</sub>	21.4	T <sub>2,i</sub>	46.3	T <sub>2,f</sub>	51.4	T <sub>2,i</sub>	75.3	T <sub>2,f</sub>
Water temperature, Pot # 3	°C		T <sub>3,i</sub>		T <sub>3,f</sub>		T <sub>3,i</sub>		T <sub>3,f</sub>		T <sub>3,i</sub>		T <sub>3,f</sub>
Water temperature, Pot # 4	°C		T <sub>4,i</sub>		T <sub>4,f</sub>		T <sub>4,i</sub>		T <sub>4,f</sub>		T <sub>4,i</sub>		T <sub>4,f</sub>
Weight of Pot # 1 with water	g	5420	P <sub>1,i</sub>	5230	P <sub>1,f</sub>	5420	P <sub>1,i</sub>	5400	P <sub>1,f</sub>	5400	P <sub>1,i</sub>	5000	P <sub>1,f</sub>
Weight of Pot # 2 with water	g	5420	P <sub>2,i</sub>	5370	P <sub>2,f</sub>	5420	P <sub>2,i</sub>	5411	P <sub>2,f</sub>	5411	P <sub>2,i</sub>	4590	P <sub>2,f</sub>
Weight of Pot # 3 with water	g		P <sub>3,i</sub>		P <sub>3,f</sub>		P <sub>3,i</sub>		P <sub>3,f</sub>		P <sub>3,i</sub>		P <sub>3,f</sub>
Weight of Pot # 4 with water	g		P <sub>4,i</sub>		P <sub>4,f</sub>		P <sub>4,i</sub>		P <sub>4,f</sub>		P <sub>4,i</sub>		P <sub>4,f</sub>
Fire-starting materials (if any)	--	30				30				30			
Weight of charcoal+container	g			330	c <sub>i</sub>			330	c <sub>i</sub>			390	c <sub>i</sub>
Average CO2	ppm				CO <sub>2,i</sub>				CO <sub>2,i</sub>				CO <sub>2,i</sub>
Average CO	ppm				CO <sub>i</sub>				CO <sub>i</sub>				CO <sub>i</sub>
Average PM	ug/m3				PM <sub>i</sub>				PM <sub>i</sub>				PM <sub>i</sub>
Average Duct Temperature	°C				T <sub>od</sub>				T <sub>od</sub>				T <sub>od</sub>
Total CO2 (if available)	g				m <sub>CO2,c</sub>				m <sub>CO2,h</sub>				m <sub>CO2,s</sub>
Total CO (if available)	g				m <sub>CO,c</sub>				m <sub>CO,h</sub>				m <sub>CO,s</sub>
Total PM (if available)	g				m <sub>PM,c</sub>				m <sub>PM,h</sub>				m <sub>PM,s</sub>

Figura B. Resultados de la prueba con una apertura de damper al 0 %

Calculations/Results	Units	COLD START		HOT START		SIMMER TEST (CALCULATIONS DIFFER FROM HIGH POWER TEST)		
		data	label	data	label	Units	data	label
Fuel consumed (moist)	g	1,740	f <sub>cm</sub>	1,260	f <sub>hm</sub>	g	2,740	f <sub>sm</sub>
Net change in char during test	g	390	Δc <sub>c</sub>	390	Δc <sub>h</sub>	g	(60)	Δc <sub>s</sub>
Equivalent dry fuel consumed	g	885	f <sub>cd</sub>	471	f <sub>hd</sub>	g	2461	f <sub>sd</sub>
Water vaporized from all pots	g	270	w <sub>cv</sub>	(60)	w <sub>hv</sub>	g	950	w <sub>sv</sub>
Effective mass of water boiled	g	7,289	w <sub>cr</sub>	7,637	w <sub>hr</sub>	g	7,590	w <sub>sr</sub>
Time to boil Pot # 1	min	40	Δt <sub>c</sub>	26	Δt <sub>h</sub>	min	48	Δt <sub>s</sub>
Temp-corr time to boil Pot # 1	min	42	Δt <sub>c</sub>	28	Δt <sub>h</sub>	%	8%	h <sub>s</sub>
Thermal efficiency	%	10%	h <sub>c</sub>	13%	h <sub>h</sub>	g/min	51.3	f <sub>sb</sub>
Burning rate	g/min	22.1	f <sub>cb</sub>	18.1	f <sub>hb</sub>	g/liter remaining	324.2	SC <sub>s</sub>
Specific fuel consumption	g/liter boiled	121.4649176	SC <sub>c</sub>	61.6547	SC <sub>h</sub>	watts	15929	FP <sub>s</sub>
Temp-corr sp consumption	g/liter	129.0349691	SC <sub>c</sub>	66.72587	SC <sub>h</sub>	--	0.43	TDR
Temp-corr sp energy consumpt.	kJ/liter	2,405	SE <sub>c</sub>	1,244	SE <sub>h</sub>	kJ/liter	6,044	SE <sub>s</sub>
Firepower	watts	6876	FP <sub>c</sub>	5626	FP <sub>h</sub>	g	2,111	BF
Fuel Benchmark to Complete 5L WBT	g					kJ	39,343	BE
Energy Benchmark to Complete 5L WBT	kJ							

Continuación del apéndice 2.

Figura C. Toma de datos de la prueba con una apertura de damper al 20 %

TEST #7 7		COLD START HIGH POWER				HOT START HIGH POWER (OPTIONAL)				SIMMER TEST			
Measurements	Units	Start		Finish: when Pot #1 boils		Start		Finish: when Pot #1 boils		Start		Finish: 45 min	
		data	label	data	label	data	label	data	label	data	label	data	label
Time (in 24 hour form)	hr.min	9:55	t <sub>ci</sub>	10:33	t <sub>cf</sub>	10:41	t <sub>hi</sub>	11:14	t <sub>hf</sub>	11:14	t <sub>si</sub>	12:59	t <sub>sf</sub>
Weight of fuel	g	4000	f <sub>ci</sub>	2920	f <sub>cf</sub>	4000	f <sub>hi</sub>	2400	f <sub>hf</sub>	2400	f <sub>si</sub>	1400	f <sub>sf</sub>
Water temperature, Pot # 1	°C	20.8	T1 <sub>ci</sub>	90.2	T1 <sub>cf</sub>	21.4	T1 <sub>hi</sub>	90.4	T1 <sub>hf</sub>	83.6	T1 <sub>si</sub>	93.6	T1 <sub>sf</sub>
Water temperature, Pot # 2	°C	20.7	T2 <sub>ci</sub>	62.5	T2 <sub>cf</sub>	26.3	T2 <sub>hi</sub>	65.6	T2 <sub>hf</sub>	68.2	T2 <sub>si</sub>	75.2	T2 <sub>sf</sub>
Water temperature, Pot # 3	°C		T3 <sub>ci</sub>		T3 <sub>cf</sub>		T3 <sub>hi</sub>		T3 <sub>hf</sub>		T3 <sub>si</sub>		T3 <sub>sf</sub>
Water temperature, Pot # 4	°C		T4 <sub>ci</sub>		T4 <sub>cf</sub>		T4 <sub>hi</sub>		T4 <sub>hf</sub>		T4 <sub>si</sub>		T4 <sub>sf</sub>
Weight of Pot # 1 with water	g	5420	P1 <sub>ci</sub>	5380	P1 <sub>cf</sub>	5420	P1 <sub>hi</sub>	5380	P1 <sub>hf</sub>	5380	P1 <sub>si</sub>	4340	P1 <sub>sf</sub>
Weight of Pot # 2 with water	g	5420	P2 <sub>ci</sub>	5370	P2 <sub>cf</sub>	5420	P2 <sub>hi</sub>	5520	P2 <sub>hf</sub>	5520	P2 <sub>si</sub>	5020	P2 <sub>sf</sub>
Weight of Pot # 3 with water	g		P3 <sub>ci</sub>		P3 <sub>cf</sub>		P3 <sub>hi</sub>		P3 <sub>hf</sub>		P3 <sub>si</sub>		P3 <sub>sf</sub>
Weight of Pot # 4 with water	g		P4 <sub>ci</sub>		P4 <sub>cf</sub>		P4 <sub>hi</sub>		P4 <sub>hf</sub>		P4 <sub>si</sub>		P4 <sub>sf</sub>
Fire-starting materials (if any)	--	30				30				30			
Weight of charcoal+container	g			340	c <sub>c</sub>			340	c <sub>h</sub>			300	c <sub>s</sub>
Average CO2	ppm				CO2 <sub>c</sub>				CO2 <sub>h</sub>				CO2 <sub>s</sub>
Average CO	ppm				CO <sub>c</sub>				CO <sub>h</sub>				CO <sub>s</sub>
Average PM	ug/m3				PM <sub>c</sub>				PM <sub>h</sub>				PM <sub>s</sub>
Average Duct Temperature	°C				T <sub>dc</sub>				T <sub>dh</sub>				T <sub>ds</sub>
Total CO2 (if available)	g				m <sub>CO2,c</sub>				m <sub>CO2,h</sub>				m <sub>CO2,s</sub>
Total CO (if available)	g				m <sub>CO,c</sub>				m <sub>CO,h</sub>				m <sub>CO,s</sub>
Total PM (if available)	g				m <sub>PM,c</sub>				m <sub>PM,h</sub>				m <sub>PM,s</sub>

Figura D. Resultados de la prueba con una apertura de damper al 20 %

Calculations/Results	Units	COLD START		HOT START		SIMMER TEST (CALCULATIONS DIFFER FROM HIGH POWER TEST)			
		data	label	data	label	Units	data	label	
Fuel consumed (moist)	g	1,080	f <sub>cm</sub>	1,600	f <sub>hm</sub>	g	1,000	f <sub>sm</sub>	
Net change in char during test	g	340	Δc <sub>c</sub>	340	Δc <sub>h</sub>	g	(40)	Δc <sub>s</sub>	
Equivalent dry fuel consumed	g	395	f <sub>cd</sub>	844	f <sub>hd</sub>	g	927	f <sub>sd</sub>	
Water vaporized from all pots	g	90	w <sub>cv</sub>	(60)	w <sub>hv</sub>	g	1,540	w <sub>sv</sub>	
Effective mass of water boiled	g	7,687	w <sub>cr</sub>	7,860	w <sub>hr</sub>	g	7,171	w <sub>sr</sub>	
Time to boil Pot # 1	min	38	Δt <sub>c</sub>	33	Δt <sub>h</sub>	min	105	Δt <sub>s</sub>	
Temp-corr time to boil Pot # 1	min	41	ΔT <sub>c</sub>	36	ΔT <sub>h</sub>	%	14%	h <sub>s</sub>	
Thermal efficiency	%	14%	h <sub>c</sub>	14%	h <sub>h</sub>	g/min	8.8	r <sub>sb</sub>	
Burning rate	g/min	10.4	r <sub>cb</sub>	25.6	r <sub>hb</sub>	g/liter remainin	129.3	SC <sub>s</sub>	
Specific fuel consumption	g/liter boiled	51.33417311	SC <sub>c</sub>	107.3444	SC <sub>h</sub>	watts	2743	FP <sub>s</sub>	
Temp-corr sp consumption	g/liter	55.63674831	SC <sub>c</sub> <sup>T</sup>	117.359	SC <sub>h</sub> <sup>T</sup>	--	1.18	TDR	
Temp-corr sp energy consumpt.	kJ/liter	1,037	SE <sub>c</sub> <sup>T</sup>	2,188	SE <sub>h</sub> <sup>T</sup>	kJ/liter	2,409	SE <sub>s</sub>	
Firepower	watts	3226	FP <sub>c</sub>	7943	FP <sub>h</sub>	g	1,079	BF	
Fuel Benchmark to Complete 5L WBT	g					kJ	20,108	BE	
Energy Benchmark to Complete 5L WBT	kJ								

Continuación del apéndice 2.

Figura E. Toma de datos de la prueba con una apertura de damper al 60 %

TEST #4 4	Units	COLD START HIGH POWER				HOT START HIGH POWER (OPTIONAL)				SIMMER TEST			
		Start		Finish: when Pot #1 boils		Start		Finish: when Pot #1 boils		Start		Finish: 45 min	
		data	label	data	label	data	label	data	label	data	label	data	label
Time (in 24 hour form)	hr.min	10:34	t <sub>ci</sub>	11:35	t <sub>cf</sub>	11:40	t <sub>hi</sub>	12:16	t <sub>hf</sub>	12:18	t <sub>si</sub>	1:03	t <sub>sf</sub>
Weight of fuel	g	4000	f <sub>ci</sub>	2380	f <sub>cf</sub>	4000	f <sub>hi</sub>	2460	f <sub>hf</sub>	2460	f <sub>si</sub>	1230	f <sub>sf</sub>
Water temperature, Pot # 1	°C	20.1	T1 <sub>ci</sub>	91.9	T1 <sub>cf</sub>	23.3	T1 <sub>hi</sub>	91.9	T1 <sub>hf</sub>	91.6	T1 <sub>si</sub>	93.3	T1 <sub>sf</sub>
Water temperature, Pot # 2	°C	17.8	T2 <sub>ci</sub>	60.9	T2 <sub>cf</sub>	24.8	T2 <sub>hi</sub>	72.0	T2 <sub>hf</sub>	68.4	T2 <sub>si</sub>	83.3	T2 <sub>sf</sub>
Water temperature, Pot # 3	°C		T3 <sub>ci</sub>		T3 <sub>cf</sub>		T3 <sub>hi</sub>		T3 <sub>hf</sub>		T3 <sub>si</sub>		T3 <sub>sf</sub>
Water temperature, Pot # 4	°C		T4 <sub>ci</sub>		T4 <sub>cf</sub>		T4 <sub>hi</sub>		T4 <sub>hf</sub>		T4 <sub>si</sub>		T4 <sub>sf</sub>
Weight of Pot # 1 with water	g	5420	P1 <sub>ci</sub>	5220	P1 <sub>cf</sub>	5420	P1 <sub>hi</sub>	5390	P1 <sub>hf</sub>	5390	P1 <sub>si</sub>	4210	P1 <sub>sf</sub>
Weight of Pot # 2 with water	g	5420	P2 <sub>ci</sub>	5360	P2 <sub>cf</sub>	5420	P2 <sub>hi</sub>	5520	P2 <sub>hf</sub>	5520	P2 <sub>si</sub>	493	P2 <sub>sf</sub>
Weight of Pot # 3 with water	g		P3 <sub>ci</sub>		P3 <sub>cf</sub>		P3 <sub>hi</sub>		P3 <sub>hf</sub>		P3 <sub>si</sub>		P3 <sub>sf</sub>
Weight of Pot # 4 with water	g		P4 <sub>ci</sub>		P4 <sub>cf</sub>		P4 <sub>hi</sub>		P4 <sub>hf</sub>		P4 <sub>si</sub>		P4 <sub>sf</sub>
Fire-starting materials (if any)	-	30				30				30			
Weight of charcoal+container	g			490	c <sub>i</sub>			490	c <sub>h</sub>			510	c <sub>s</sub>
Average CO2	ppm				CO2 <sub>c</sub>				CO2 <sub>h</sub>				CO2 <sub>s</sub>
Average CO	ppm				CO <sub>c</sub>				CO <sub>h</sub>				CO <sub>s</sub>
Average PM	ug/m3				PM <sub>c</sub>				PM <sub>h</sub>				PM <sub>s</sub>
Average Duct Temperature	°C				T <sub>cd</sub>				T <sub>hd</sub>				T <sub>sd</sub>
Total CO2 (if available)	g				m <sub>CO2,c</sub>				m <sub>CO2,h</sub>				m <sub>CO2,s</sub>
Total CO (if available)	g				m <sub>CO,c</sub>				m <sub>CO,h</sub>				m <sub>CO,s</sub>
Total PM (if available)	g				m <sub>PM,c</sub>				m <sub>PM,h</sub>				m <sub>PM,s</sub>

Figura F. Resultados de la prueba con una apertura de damper al 60 %

Calculations/Results	Units	COLD START		HOT START		SIMMER TEST (CALCULATIONS DIFFER FROM HIGH POWER TEST)			
		data	label	data	label	Units	data	label	
Fuel consumed (moist)	g	1,620	f <sub>cm</sub>	1,540	f <sub>hm</sub>		1,230	f <sub>sm</sub>	
Net change in char during test	g	490	Δc <sub>c</sub>	490	Δc <sub>h</sub>		20	Δc <sub>s</sub>	
Equivalent dry fuel consumed	g	624	f <sub>cd</sub>	555	f <sub>hd</sub>		1031	f <sub>sd</sub>	
Water vaporized from all pots	g	260	w <sub>cv</sub>	(70)	w <sub>hv</sub>		6,207	w <sub>sv</sub>	
Effective mass of water boiled	g	7,603	w <sub>cr</sub>	8,506	w <sub>hr</sub>		3,533	w <sub>sr</sub>	
Time to boil Pot # 1	min	61	Δt <sub>c</sub>	36	Δt <sub>h</sub>		(675)	Δt <sub>s</sub>	
Temp-corr time to boil Pot # 1	min	65	Δt <sub>c</sub> <sup>T</sup>	40	Δt <sub>h</sub> <sup>T</sup>				
Thermal efficiency	%	20%	h <sub>c</sub>	22%	h <sub>h</sub>		14%	h <sub>s</sub>	
Burning rate	g/min	10.2	r <sub>cb</sub>	15.4	r <sub>hb</sub>		1.5	r <sub>sb</sub>	
Specific fuel consumption	g/liter boiled	82.02325325	SC <sub>c</sub>	65.19837	SC <sub>h</sub>		291.7	SC <sub>s</sub>	
Temp-corr sp consumption	g/liter	88.00778245	SC <sub>c</sub> <sup>T</sup>	73.31152	SC <sub>h</sub> <sup>T</sup>		474	FP <sub>s</sub>	
Temp-corr sp energy consumpt.	kJ/liter	1,641	SE <sub>c</sub> <sup>T</sup>	1,367	SE <sub>h</sub> <sup>T</sup>		6.70	TDR	
Firepower	watts	3176	FP <sub>c</sub>	4786	FP <sub>h</sub>		5,438	SE <sub>s</sub>	
Fuel Benchmark to Complete 5L WBT	g						1,862	BF	
Energy Benchmark to Complete 5L WBT	kJ						34,707	BE	

Continuación del apéndice 2.

Figura G. Toma de datos de la prueba con una apertura de damper al 80 %

TEST #1	Units	COLD START HIGH POWER				HOT START HIGH POWER (OPTIONAL)				SIMMER TEST			
		Start		Finish: when Pot #1 boils		Start		Finish: when Pot #1 boils		Start		Finish: 45 min	
		data	label	data	label	data	label	data	label	data	label	data	label
Measurements													
Time (in 24 hour form)	hr:min	11:02	t <sub>ci</sub>	12:02	t <sub>cf</sub>	12:14	t <sub>hi</sub>	13:06	t <sub>hf</sub>	13:07	t <sub>si</sub>	13:52	t <sub>sf</sub>
Weight of fuel	g	4000	f <sub>ci</sub>	2090	f <sub>cf</sub>	4000	f <sub>hi</sub>	2870	f <sub>hf</sub>	2870	f <sub>si</sub>	2770	f <sub>sf</sub>
Water temperature, Pot # 1	°C	19.2	T1 <sub>ci</sub>	92.2	T1 <sub>cf</sub>	25.3	T1 <sub>hi</sub>	92.4	T1 <sub>hf</sub>	92.4	T1 <sub>si</sub>	93.2	T1 <sub>sf</sub>
Water temperature, Pot # 2	°C	19.2	T2 <sub>ci</sub>	65.9	T2 <sub>cf</sub>	24.9	T2 <sub>hi</sub>	69.4	T2 <sub>hf</sub>	72.0	T2 <sub>si</sub>	73.2	T2 <sub>sf</sub>
Water temperature, Pot # 3	°C		T3 <sub>ci</sub>		T3 <sub>cf</sub>		T3 <sub>hi</sub>		T3 <sub>hf</sub>		T3 <sub>si</sub>		T3 <sub>sf</sub>
Water temperature, Pot # 4	°C		T4 <sub>ci</sub>		T4 <sub>cf</sub>		T4 <sub>hi</sub>		T4 <sub>hf</sub>		T4 <sub>si</sub>		T4 <sub>sf</sub>
Weight of Pot # 1 with water	g	5420	P1 <sub>ci</sub>	5120	P1 <sub>cf</sub>	5420	P1 <sub>hi</sub>	5330	P1 <sub>hf</sub>	5330	P1 <sub>si</sub>	4440	P1 <sub>sf</sub>
Weight of Pot # 2 with water	g	5420	P2 <sub>ci</sub>	5390	P2 <sub>cf</sub>	5420	P2 <sub>hi</sub>	5332	P2 <sub>hf</sub>	5332	P2 <sub>si</sub>	4990	P2 <sub>sf</sub>
Weight of Pot # 3 with water	g		P3 <sub>ci</sub>		P3 <sub>cf</sub>		P3 <sub>hi</sub>		P3 <sub>hf</sub>		P3 <sub>si</sub>		P3 <sub>sf</sub>
Weight of Pot # 4 with water	g		P4 <sub>ci</sub>		P4 <sub>cf</sub>		P4 <sub>hi</sub>		P4 <sub>hf</sub>		P4 <sub>si</sub>		P4 <sub>sf</sub>
Fire-starting materials (if any)	--	30				30				30			
Weight of charcoal+container	g			500	c <sub>c</sub>			500	c <sub>h</sub>			470	c <sub>s</sub>
Average CO2	ppm				CO2 <sub>c</sub>				CO2 <sub>h</sub>				CO2 <sub>s</sub>
Average CO	ppm				CO <sub>c</sub>				CO <sub>h</sub>				CO <sub>s</sub>
Average PM	ug/m3				PM <sub>c</sub>				PM <sub>h</sub>				PM <sub>s</sub>
Average Duct Temperature	°C				T <sub>cd</sub>				T <sub>hd</sub>				T <sub>sd</sub>
Total CO2 (if available)	g				m <sub>CO2,c</sub>				m <sub>CO2,h</sub>				m <sub>CO2,s</sub>
Total CO (if available)	g				m <sub>CO,c</sub>				m <sub>CO,h</sub>				m <sub>CO,s</sub>
Total PM (if available)	g				m <sub>PM,c</sub>				m <sub>PM,h</sub>				m <sub>PM,s</sub>

Figura H. Resultados de la prueba con una apertura de damper al 80 %

Calculations/Results	Units	COLD START		HOT START		SIMMER TEST (CALCULATIONS DIFFER FROM HIGH POWER TEST)			
		data	label	data	label	Units	data	label	
Fuel consumed (moist)	g	1,910	f <sub>cm</sub>	1,130	f <sub>hm</sub>	Fuel consumed during the simmer phase (n	g	100	f <sub>sm</sub>
Net change in char during test	g	500	Δc <sub>c</sub>	500	Δc <sub>h</sub>	Net change in char during test phase	g	(30)	Δc <sub>s</sub>
Equivalent dry fuel consumed	g	858	f <sub>cd</sub>	184.6913	f <sub>hd</sub>	Equivalent dry fuel consumed	g	134	f <sub>sd</sub>
Water vaporized from all pots	g	330	w <sub>cv</sub>	178	w <sub>hv</sub>	Water vaporized	g	1,232	w <sub>sv</sub>
Effective mass of water boiled	g	7,837	w <sub>cr</sub>	8,157	w <sub>hr</sub>	Water remaining at end - All Pots	g	7,113	w <sub>sr</sub>
Time to boil Pot # 1	min	60	Δt <sub>c</sub>	52	Δt <sub>h</sub>	Time of simmer (should be ~45 minutes)	min	45	Δt <sub>s</sub>
Temp-corr time to boil Pot # 1	min	64	Δt <sub>c</sub>	60	Δt <sub>h</sub>	Thermal efficiency	%	10%	h <sub>s</sub>
Thermal efficiency	%	20%	h <sub>c</sub>	21%	h <sub>h</sub>	Burning rate	g/min	3.0	r <sub>sb</sub>
Burning rate	g/min	14.3	r <sub>cb</sub>	3.6	r <sub>hb</sub>	Specific fuel consumption	g/liter remainin	18.8	SC <sub>s</sub>
Specific fuel consumption	g/liter boiled	110	SC <sub>c</sub>	22.64127	SC <sub>h</sub>	Firepower	watts	924	FP <sub>s</sub>
Temp-corr sp consumption	g/liter	116.0277234	SC <sub>c</sub> <sup>T</sup>	26.24568	SC <sub>h</sub> <sup>T</sup>	Turn down ratio	--	4.81	TDR
Temp-corr sp energy consumpt.	kJ/liter	2,163	SE <sub>c</sub> <sup>T</sup>	489	SE <sub>h</sub> <sup>T</sup>	Specific Energy Consumption	kJ/liter	351	SE <sub>s</sub>
Firepower	watts	4445	FP <sub>c</sub>	1103	FP <sub>h</sub>	Fuel Benchmark to Complete 5L WBT	g	450	BF
						Energy Benchmark to Complete 5L WBT	kJ	8,384	BE

Continuación del apéndice 2.

Figura I. Toma de datos de la prueba con una apertura de damper al 100 %

TEST #3 13		COLD START HIGH POWER				HOT START HIGH POWER (OPTIONAL)				SIMMER TEST			
Measurements	Units	Start		Finish: when Pot #1 boils		Start		Finish: when Pot #1 boils		Start		Finish: 45 min	
		data	label	data	label	data	label	data	label	data	label	data	label
Time (in 24 hour form)	hr:min	9:30	t <sub>ci</sub>	10:10	t <sub>cf</sub>	10:19	t <sub>hi</sub>	10:49	t <sub>hf</sub>	10:55	t <sub>si</sub>	11:45	t <sub>sf</sub>
Weight of fuel	g	4000	f <sub>ci</sub>	2230	f <sub>cf</sub>	4000	f <sub>hi</sub>	2140	f <sub>hf</sub>	2140	f <sub>si</sub>	1100	f <sub>sf</sub>
Water temperature, Pot # 1	°C	21.3	T1 <sub>ci</sub>	91.3	T1 <sub>cf</sub>	31.3	T1 <sub>hi</sub>	91.7	T1 <sub>hf</sub>	91.5	T1 <sub>si</sub>	96.8	T1 <sub>sf</sub>
Water temperature, Pot # 2	°C	21.4	T2 <sub>ci</sub>	52.1	T2 <sub>cf</sub>	23.0	T2 <sub>hi</sub>	61.7	T2 <sub>hf</sub>	64.1	T2 <sub>si</sub>	75.4	T2 <sub>sf</sub>
Water temperature, Pot # 3	°C		T3 <sub>ci</sub>		T3 <sub>cf</sub>		T3 <sub>hi</sub>		T3 <sub>hf</sub>		T3 <sub>si</sub>		T3 <sub>sf</sub>
Water temperature, Pot # 4	°C		T4 <sub>ci</sub>		T4 <sub>cf</sub>		T4 <sub>hi</sub>		T4 <sub>hf</sub>		T4 <sub>si</sub>		T4 <sub>sf</sub>
Weight of Pot # 1 with water	g	5420	P1 <sub>ci</sub>	5280	P1 <sub>cf</sub>	5420	P1 <sub>hi</sub>	5380	P1 <sub>hf</sub>	5380	P1 <sub>si</sub>	4510	P1 <sub>sf</sub>
Weight of Pot # 2 with water	g	5420	P2 <sub>ci</sub>	5390	P2 <sub>cf</sub>	5420	P2 <sub>hi</sub>	5340	P2 <sub>hf</sub>	5340	P2 <sub>si</sub>	4150	P2 <sub>sf</sub>
Weight of Pot # 3 with water	g		P3 <sub>ci</sub>		P3 <sub>cf</sub>		P3 <sub>hi</sub>		P3 <sub>hf</sub>		P3 <sub>si</sub>		P3 <sub>sf</sub>
Weight of Pot # 4 with water	g		P4 <sub>ci</sub>		P4 <sub>cf</sub>		P4 <sub>hi</sub>		P4 <sub>hf</sub>		P4 <sub>si</sub>		P4 <sub>sf</sub>
Fire-starting materials (if any)	-	30				30				30			
Weight of charcoal+container	g			340	c <sub>c</sub>			340	c <sub>h</sub>			300	c <sub>s</sub>
Average CO2	ppm				CO2 <sub>c</sub>				CO2 <sub>h</sub>				CO2 <sub>s</sub>
Average CO	ppm				CO <sub>c</sub>				CO <sub>h</sub>				CO <sub>s</sub>
Average PM	ug/m3				PM <sub>c</sub>				PM <sub>h</sub>				PM <sub>s</sub>
Average Duct Temperature	°C				T <sub>cd</sub>				T <sub>hd</sub>				T <sub>sd</sub>
Total CO2 (if available)	g				m <sub>CO2,c</sub>				m <sub>CO2,h</sub>				m <sub>CO2,s</sub>
Total CO (if available)	g				m <sub>CO,c</sub>				m <sub>CO,h</sub>				m <sub>CO,s</sub>
Total PM (if available)	g				m <sub>PM,c</sub>				m <sub>PM,h</sub>				m <sub>PM,s</sub>

Figura J. Resultados de la prueba con una apertura de damper al 100 %

Calculations/Results	Units	COLD START		HOT START		SIMMER TEST (CALCULATIONS DIFFER FROM HIGH POWER TEST)			
		data	label	data	label	Units	data	label	
Fuel consumed (moist)	g	1,770	f <sub>cm</sub>	1,860	f <sub>hm</sub>		1,040	f <sub>sm</sub>	
Net change in char during test	g	340	Δc <sub>c</sub>	340	Δc <sub>h</sub>		(40)	Δc <sub>s</sub>	
Equivalent dry fuel consumed	g	991	f <sub>cd</sub>	1068.249	f <sub>hd</sub>		961	f <sub>sd</sub>	
Water vaporized from all pots	g	170	w <sub>cv</sub>	120	w <sub>hv</sub>		2,060	w <sub>sv</sub>	
Effective mass of water boiled	g	8,927	w <sub>cr</sub>	7,672	w <sub>hr</sub>		6,680	w <sub>sr</sub>	
Time to boil Pot # 1	min	40	Δt <sub>c</sub>	30	Δt <sub>h</sub>		50	Δt <sub>s</sub>	
Temp-corr time to boil Pot # 1	min	44	Δt <sub>c</sub> <sup>T</sup>	38	Δt <sub>h</sub> <sup>T</sup>		6%	h <sub>s</sub>	
Thermal efficiency	%	16%	h <sub>c</sub>	18%	h <sub>h</sub>		19.2	r <sub>sb</sub>	
Burning rate	g/min	24.8	r <sub>cb</sub>	35.6	r <sub>hb</sub>		143.9	SC <sub>s</sub>	
Specific fuel consumption	g/liter boiled	143	SC <sub>c</sub>	139.2331	SC <sub>h</sub>		5974	FP <sub>s</sub>	
Temp-corr sp consumption	g/liter	156.1109367	SC <sub>c</sub> <sup>T</sup>	177.8957	SC <sub>h</sub> <sup>T</sup>		1.29	TDR	
Temp-corr sp energy consumpt.	kJ/liter	2,910	SE <sub>c</sub> <sup>T</sup>	3,316	SE <sub>h</sub> <sup>T</sup>		2,683	SE <sub>s</sub>	
Firepower	watts	7693	FP <sub>c</sub>	11063	FP <sub>h</sub>		1,555	BF	
Fuel Benchmark to Complete 5L WBT	g						28,979	BE	
Energy Benchmark to Complete 5L WBT	kJ								

Continuación del apéndice 2.

Tabla A. **Valores de la eficiencia térmica obtenida a cada apertura de damper 0 % al 60 % con sus promedios**

Repeticiones	Damper 0 %			Damper 20 %			Damper 60 %		
	Inicio en Frio	Inicio caliente	Fuego Lento	Inicio en Frio	Inicio caliente	Fuego Lento	Inicio en Frio	Inicio caliente	Fuego Lento
1	10 %	12 %	8 %	14 %	14 %	14 %	20 %	22 %	14 %
2	9 %	13 %	8 %	14 %	16 %	12 %	21 %	23 %	15 %
3	10 %	13 %	9 %	15 %	17 %	11 %	20 %	22 %	15 %
Promedio	10 %	13 %	8 %	14 %	16 %	12 %	20 %	22 %	15 %

Tabla B. **Valores de la eficiencia térmica obtenida a cada apertura de damper 80 % al 100 % con sus promedios**

Repeticiones	Damper 80 %			Damper 100 %		
	Inicio en Frio	Inicio caliente	Fuego Lento	Inicio en Frio	Inicio caliente	Fuego Lento
1	20 %	21 %	10 %	16 %	18 %	6 %
2	19 %	20 %	11 %	16 %	18 %	6 %
3	19 %	20 %	11 %	15 %	19 %	7 %
Promedio	19 %	20 %	11 %	16 %	18 %	6 %

Continuación del apéndice 2.

Tabla C. **Valores promediados de las emisiones de CO y CO2 a cada apertura de damper**

Aberturas Damper (%)	CO2 (ppm/min)	CO (ppm/min)
0	26,89722222	26,20555556
20	58,05119826	10,95328283
60	83,86813187	8,34018759
80	91,66086957	7,773082011
100	278,4296296	2,558249158

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel 2021.

Apéndice 3. **Análisis estadístico**

Tabla D. **Datos de análisis de varianza de un factor de la eficiencia en función de la apertura del damper para la fase en inicio en frío**

Grupo	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza
Damper 0 %	3	29	9,666666667	0,333333333
Damper 20 %	3	43	14,33333333	0,333333333
Damper 60 %	3	61	20,33333333	0,333333333
Damper 80 %	3	58	19,33333333	0,333333333
Damper 100 %	3	47	15,66666667	0,333333333

Tabla E. **Datos de análisis de varianza de un factor de la eficiencia en función de la apertura del damper para la fase en inicio en caliente**

Grupo	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza
Damper 0 %	3	38	12,66667	0,333333
Damper 20 %	3	47	15,66667	2,333333
Damper 60 %	3	67	22,33333	0,333333
Damper 80 %	3	61	20,33333	0,333333
Damper 100 %	3	55	18,33333	0,333333

Tabla F. **Datos de análisis de varianza de un factor de la eficiencia en función de la apertura del damper para la fase a fuego lento**

<i>Grupo</i>	<i>Cuenta</i>	<i>Suma</i>	<i>Promedio</i>	<i>Varianza</i>
Damper 0 %	3	25	8,333333	0,333333
Damper 20 %	3	37	12,33333	2,333333
Damper 60 %	3	44	14,66667	0,333333
Damper 80 %	3	32	10,66667	0,333333
Damper 100 %	3	19	6,333333	0,333333



Continuación del apéndice 3.

Tabla G. **Resumen de datos para la prueba de Fisher de la eficiencia térmica en función de las aperturas de damper en las tres fases**

Variable	F	Probabilidad	F crítica	F > F crítica	Hipótesis Rechazada
ET en Frio	163,8	4,54899E-09	3,478049691	Si	Nula
ET en caliente	59,45454545	6,20341E-07	3,478049691	Si	Nula
ET a fuego lento	43,77272727	2,63766E-06	3,478049691	si	Nula

- **Conclusión estadística**
  - Con base en los resultados de la prueba de Fisher la eficiencia en inicio frio, caliente y a fuego lento es mayor a la F crítica, la hipótesis nula es rechazada. Lo que significa que la eficiencia en inicio frio, caliente y a fuego lento varía significativamente respecto a la apertura del damper.

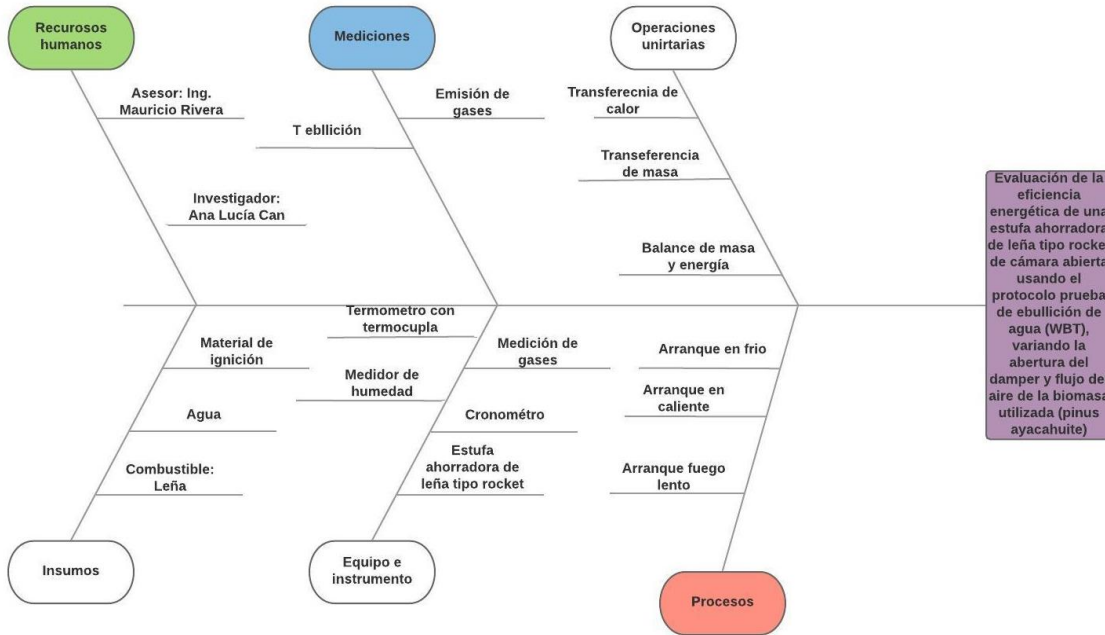
Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Word 2021.

#### Apéndice 4. Requisitos académicos

<b>Carrera</b>	<b>Área</b>	<b>Curso</b>	<b>Temática</b>
<b>Ingeniería Química</b>	<b>Química</b>	Química 3	Estequiometría y reacciones químicas
		Química Orgánica	Combustión completa e incompleta
		Química Ambiental	Contaminación ambiental, emisiones de CO, CO <sub>2</sub> y material particulado
		Ecología	Conservación al medio ambiente y contaminantes del aire
	<b>Operaciones Unitarias</b>	Balace de Masa y Energía (IQ1)	Balances de masa y energía
		Transferencia de Calor (IQ3)	Mecanismos de transferencia de calor
		Transferencia de Masa (IQ4)	Difusión y secado
	<b>Fisicoquímica</b>	Termodinámica 3	Eficiencia Térmica y entalpías de vaporización
	<b>Ciencias básicas y complementarias</b>	Estadística 1	Descriptiva
		Estadística 2	Análisis de correlación lineal

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel 2021.

## Apéndice 5. Diagrama de Ishikawa. Causa y Efecto



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel 2021.

**Apéndice 6. Balanza de humedad**



Fuente: elaboración propia, laboratorio multiusos de sección de tecnología de la madera. Centro de Investigación de Ingeniería, USAC.

**Apéndice 7. Balanza digital y peso de los 4 kg de leña**



Fuente: elaboración propia, laboratorio multiusos de sección de tecnología de la madera. Centro de Investigación de Ingeniería, USAC.

Apéndice 8. **Equipo de medición del flujo de aire a diferentes aperturas de damper**



Fuente: elaboración propia, laboratorio multiusos de sección de tecnología de la madera. Centro de Investigación de Ingeniería, USAC.

Apéndice 9. **Fluke, Equipo para mediciones de Material Particulado**



Fuente: elaboración propia, laboratorio multiusos de sección de tecnología de la madera. Centro de Investigación de Ingeniería, USAC.

**Apéndice 10. Equipo para mediciones de CO y CO2**



Fuente: elaboración propia, laboratorio multiusos de sección de tecnología de la madera. Centro de Investigación de Ingeniería, USAC.

**Apéndice 11. Ventilador de la estufa y damper**



Fuente: elaboración propia, laboratorio multiusos de sección de tecnología de la madera. Centro de Investigación de Ingeniería, USAC.

**Apéndice 12. Limpieza del lugar donde se instaló la estufa**



Fuente: elaboración propia, laboratorio multiusos de sección de tecnología de la madera. Centro de Investigación de Ingeniería, USAC.

**Apéndice 13. Instalación de la estufa**



Fuente: elaboración propia, laboratorio multiusos de sección de tecnología de la madera. Centro de Investigación de Ingeniería, USAC.



**Apéndice 14. Instalación de la estufa con las ollas**



Fuente: elaboración propia, laboratorio multiusos de sección de tecnología de la madera. Centro de Investigación de Ingeniería, USAC.

**Apéndice 15. Realización de las pruebas**



Fuente: elaboración propia, laboratorio multiusos de sección de tecnología de la madera. Centro de Investigación de Ingeniería, USAC.



Apéndice 16. **Corte de la leña**



Fuente: elaboración propia, laboratorio multiusos de sección de tecnología de la madera. Centro de Investigación de Ingeniería, USAC.