



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

**EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA DE UNA ESTUFA AHORRADORA DE
CÁMARA TIPO ROCKET A TRAVÉS DEL PROTOCOLO PRUEBA EBULLICIÓN DE AGUA
(WBT) VARIANDO EL CONTENIDO DE HUMEDAD DE ENCINO BLANCO (*Quercus
subspathulata*, Trel)**

Dilan Arnulfo Zamora Tobar

Asesorado por el Ing. Mauricio Valentino Rivera Tello

Guatemala, octubre de 2020

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA DE UNA ESTUFA AHORRADORA DE CÁMARA TIPO ROCKET A TRAVÉS DEL PROTOCOLO PRUEBA EBULLICIÓN DE AGUA (WBT) VARIANDO EL CONTENIDO DE HUMEDAD DE ENCINO BLANCO (*Quercus subspathulata*, Trel)

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

DILAN ARNULFO ZAMORA TOBAR

ASESORADO POR EL ING. MAURICIO VALENTINO RIVERA TELLO

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO QUÍMICO

GUATEMALA, OCTUBRE DE 2020

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordoba 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. Christian Moisés de la Cruz Leal
VOCAL V	Br. Kevin Armando Cruz Lorente
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
EXAMINADORA	Inga. Adela María Marroquín González
EXAMINADOR	Ing. Jorge Mario Estrada Asturias
EXAMINADORA	Inga. Hilda Piedad Palma Ramos
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:

EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA DE UNA ESTUFA AHORRADORA DE CÁMARA TIPO ROCKET A TRAVÉS DEL PROTOCOLO PRUEBA EBULLICIÓN DE AGUA (WBT) VARIANDO EL CONTENIDO DE HUMEDAD DE ENCINO BLANCO (*Quercus subspathulata*, TreI)

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Química con fecha 25 de octubre de 2018.

Dilan Arnulfo Zamora Tobar

Guatemala, noviembre de 2019

Ingeniero
Williams Guillermo Álvarez Mejía
DIRECTOR
Escuela Ingeniería Química
Presente.

Estimado Ingeniero Álvarez:

Le saludo cordialmente, deseándole éxitos en sus actividades. Por medio de la presente hago constar que he revisado y aprobado el Informe Final del trabajo de graduación titulado: **“EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA DE UNA ESTUFA AHORRADORA DE CÁMARA TIPO ROCKET A TRAVÉS DEL PROTOCOLO PRUEBA EBULLICIÓN DE AGUA (WBT) VARIANDO EL CONTENIDO DE HUMEDAD DE ENCINO BLANCO (*Quercus subspatulata*, Trel).”**, elaborado por el estudiante de la carrera de Ingeniería Química, Dilan Arnulfo Zamora Tobar, quien se identifica con el registro académico 2012-12782 y con el CUI 2404 14314 03 01.

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

Atentamente,



Mauricio Valentino Rivera Tello
ASESOR
Ingeniero Químico
Colegiado activo no. 2089



Mauricio Valentino
Rivera Tello
INGENIERO QUIMICO
Colegiado. No. 2089



Guatemala, 21 de febrero de 2020.
Ref. EIQ.TG-IF.009.2020.

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

Estimado Ingeniero Álvarez:

Como consta en el registro de evaluación, correlativo **013-2018**, 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: **Dilan Arnulfo Zamora Tobar**.
Identificado con número de carné: **2404143140301**.
Identificado con registro académico: **201212782**.
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:

EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA DE UNA ESTUFA AHORRADORA DE CÁMARA TIPO ROCKET A TRAVÉS DEL PROTOCOLO PRUEBA EBULLICIÓN DE AGUA (WBT) VARIANDO EL CONTENIDO DE HUMEDAD DE ENCINO BLANCO (Quercus subspatulata, Trel)

El Trabajo de Graduación ha sido asesorado por:

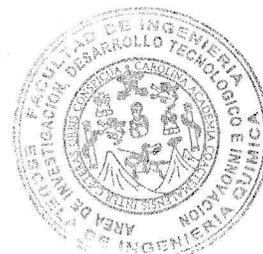
Mauricio Valentino Rivera Tello, profesional de la Ingeniería Química

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 De Paz
Profesional de la Ingeniería Química
COORDINADOR DE TERNA
Tribunal de Revisión
Trabajo de Graduación



C.c.: archivo



Guatemala, 21 de octubre de 2020 .

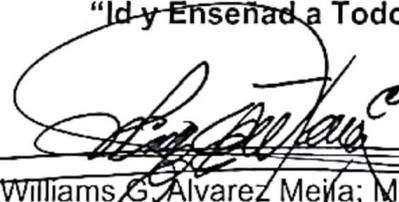
Ref. EIQ 273.

Aprobación del informe final del trabajo de graduación

Ingeniera
Aurelia Anabela Cordova Estrada
Decana
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos de Guatemala

Revisado el INFORME FINAL DEL TRABAJO DE GRADUACIÓN (TESIS), DENOMINADO EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA DE UNA ESTUFA AHORRADORA DE CÁMARA TIPO ROCKET A TRAVÉS DEL PROTOCOLO PRUEBA EBULLICIÓN DE AGUA (WBT) VARIANDO EL CONTENIDO DE HUMEDAD DE ENCINO BLANCO (*Quercus subspathulata*, Trel) del(la) estudiante Dilan Arnulfo Zamora Tobar, se conceptúa que el documento presentado, reúne todas las condiciones de calidad en materia administrativa y académica (rigor, pertinencia, secuencia y coherencia metodológica), por lo tanto, se procede a la autorización del mismo, para que el(la) estudiante pueda optar al título de Ingeniería Química.

“Id y Enseñad a Todos”


Ing. Williams G. Alvarez Mejia; M.I. Q.
DIRECTOR
Escuela de Ingeniería Química



Cc. Archivo
WGAM/mpea



Formando Ingenieros Químicos en Guatemala desde 1939

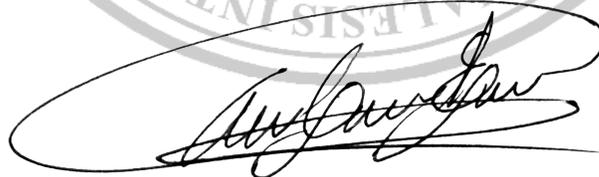


NO SALGAS
QUÉDATE EN
CASA

DTG. 320.2020.

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: **EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA DE UNA ESTUFA AHORRADORA DE CÁMARA TIPO ROCKET A TRAVÉS DEL PROTOCOLO PRUEBA EBULLICIÓN DE AGUA (WBT) VARIANDO EL CONTENIDO DE HUMEDAD DE ENCINO BLANCO (*Quercus subspathulata, Trel*)**, presentado por el estudiante universitario: **Dilan Arnulfo Zamora Tobar**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:



Inga. Anabela Cordova Estrada
Decana



Guatemala, octubre de 2020

AACE/asga

ACTO QUE DEDICO A:

Dios

Por sus infinitas bendiciones en mi vida.

Mi padre

Isauro Zamora, por darme la oportunidad de ser un profesional a base de su esfuerzo y sacrificio. Por apoyar y permitirme cumplir mis metas. Espero este logro sea una pequeña recompensa.

Mi madre

Asucena Tobar, por ser mi mayor motivación y ejemplo de vida. Por su amor, comprensión y apoyo en todo momento. Gracias por guiarme para seguir adelante.

Mis hermanos

Brandon y Ángel Zamora Tobar, por ser quienes me motivan a ser una mejor persona y un ejemplo. Los quiero.

AGRADECIMIENTOS A:

Universidad de San Carlos de Guatemala	Por ser mi casa de estudios y por brindarme la oportunidad de formarme como profesional
Facultad de Ingeniería	Por ser el centro de enseñanza diaria durante estos años y proporcionarme los conocimientos necesarios en toda mi formación académica.
Mis amigos de la Facultad	Por el apoyo y amistad que me brindaron, por todos los momentos que compartimos y por formar parte de este sueño.
Sección de tecnología de la madera	Especialmente a los ingenieros Mauricio Rivera y Jessiel Enríquez, por brindarme su apoyo, tiempo, asesoría y conocimiento para la realización de esta tesis.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	XVII
LISTA DE SÍMBOLOS	XIX
GLOSARIO	XXI
RESUMEN	XXIII
OBJETIVOS.....	XXV
HIPÓTESIS.....	XXVII
INTRODUCCIÓN	XXIX
1. ANTECEDENTES	1
2. MARCO TEÓRICO.....	7
2.1. Fenómenos de transferencia de calor	7
2.1.1. Transferencia de calor por conducción.....	7
2.1.2. Transferencia de calor por convección	8
2.1.3. Transferencia de calor por radiación	9
2.2. Temperatura	11
2.3. Calor sensible y latente	12
2.4. Combustión	14
2.4.1. Calor de combustión.....	15
2.4.2. Proceso de combustión	16
2.4.3. Aire teórico.....	17
2.4.4. Relación aire-combustible.....	18
2.5. Combustión de biomasa	19
2.5.1. Características químicas	19
2.5.2. Características físicas.....	20

2.5.3.	Proceso de combustión de leña	21
2.6.	Valor calorífico	23
2.7.	Estufa ahorradora	24
2.7.1.	Procesos involucrados en una estufa ecológica.....	25
2.8.	Tipos de estufas ahorradoras.....	25
2.8.1.	Estufa ahorradora con cámara de combustión tipo Rocket	26
2.9.	Biomasa: encino blanco	27
2.10.	Prueba de ebullición del agua	28
2.11.	Prueba de emisiones.....	29
2.11.1.	Material particulado	30
3.	MARCO METODOLÓGICO	33
3.1.	Variables del método.....	33
3.2.	Delimitación del campo de estudio.....	34
3.2.1.	Aplicación de la Ingeniería Química	34
3.2.2.	Proceso general	34
3.2.3.	Localización.....	34
3.3.	Recursos humanos disponibles	34
3.4.	Recursos y materiales disponibles	35
3.4.1.	Materia prima e insumos	35
3.4.2.	Equipo	35
3.4.3.	Instrumentos de medición	35
3.4.4.	Materiales.....	35
3.5.	Técnicas cualitativas o cuantitativas	36
3.5.1.	Preparación de cada ensayo.....	36
3.6.	Recolección y ordenamiento de la información.....	39
3.6.1.	Datos generales	41
3.6.2.	Hoja de datos originales.....	44

3.7.	Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información	46
3.7.1.	Procesamiento de la información.....	46
3.8.	Análisis estadístico	50
3.8.1.	Diseño experimental	50
3.9.	Plan de análisis de resultados	54
3.9.1.	Programas para análisis de datos	54
4.	RESULTADOS	55
4.1.	Eficiencia energética	55
4.2.	Tasa de combustión	57
4.3.	Potencia.....	59
4.4.	Emisiones de CO y material particulado 2.5.....	61
5.	INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS.....	63
	CONCLUSIONES	69
	RECOMENDACIONES	71
	BIBLIOGRAFÍA.....	73
	APÉNDICES	75
	ANEXOS	89

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Estufa ahorradora con cámara de combustión tipo rocket	24
2.	Relación de la ingeniería química con evaluación de una estufa ecológica	25
3.	Estufa rocket de inercia térmica	27
4.	Distribución de partículas suspendidas en el aire	31
5.	Toma de datos de información general	39
6.	Información general (descripción del combustible)	40
7.	Datos de operación durante el proceso.....	41
8.	Hoja de toma de datos	45
9.	Hoja de toma de datos para las tres fases	46
10.	Eficiencia energética del arranque en frío	55
11.	Eficiencia energética del arranque en caliente	56
12.	Eficiencia energética fase hervir a fuego lento	56
13.	Tasa de combustión del arranque en frío.....	57
14.	Tasa de combustión del arranque en caliente.....	58
15.	Tasa de combustión de fase hervir a fuego lento	58
16.	Potencia en el arranque en frío	59
17.	Potencia en el arranque en caliente	60
18.	Potencia en la fase de hervir a fuego lento	60
19.	Emisión de monóxido de carbono (co)	61
20.	Emisión de material particulado (pm 2,5)	62

TABLAS

I.	Calores específicos de combustión	16
II.	Reacciones para la combustión de leña	23
III.	Descripción de las variables del procedimiento	33
IV.	Eficiencia energética estufas ahorradoras en fase de arranque en frío.....	47
V.	Eficiencia energética estufas ahorradoras en fase de arranque en caliente.....	48
VI.	Eficiencia energética estufas ahorradoras en fase de hervir a fuego lento.....	49
VII.	Emisiones y material particulado estufas ahorradoras.....	50
VIII.	Relación entre variables.....	51
IX.	Datos para el análisis de varianza	51

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
H₂O	Agua
CV	Coeficiente de variación
CO₂	Dióxido de carbono
H	Entalpía
°C	Grados Celsius
K	Grados Kelvin
g	Gramo
kg	Kilogramo
kJ	Kilojulio
Kpa	Kilopascal
PM	Material particulado
m³	Metro cúbico
µg	Microgramo
min	Minuto
CO	Monóxido de carbono
%	Porcentaje
Atm	Presión atmosférica

GLOSARIO

Biomasa	Materia orgánica de origen vegetal o animal, incluyendo los residuos y desechos orgánicos, susceptible de ser aprovechada energéticamente.
Carbón	Tipo de roca, fuente de energía, formada por la sustancia química carbono mezclado con otras sustancias.
CCT	Prueba de cocina controlada.
Ceniza	Polvo de color gris claro que queda después de una combustión completa, formado generalmente, por sales alcalinas y térreas, sílice y óxidos.
Combustión	Reacción química que se produce entre el oxígeno y un material oxidable, que se acompaña de desprendimiento de energía.
Concentración de fondo	Concentración de un contaminante en aire debido al aporte de otras fuentes distintas a las analizadas.
Creosota	Residuo altamente inflamable, es el residuo de la leña mojada que se acumula y es muy inflamable.
Eficiencia térmica	Cociente del trabajo obtenido y el calor suministrado.

Equilibrio térmico	Estado en el cual se igualan las temperaturas de dos cuerpos.
Hervir	Dicho de un líquido: producir burbujas por la acción del calor, manteniendo la temperatura de ebullición.
Higroscópico	Sustancia que tiene la capacidad de absorber humedad del medio circundante.
Hollín	Partículas sólidas de tamaño pequeño, de color negro.
KPT	Prueba de desempeño de cocina.
Longitud de onda	Perturbación que se propaga a través de un determinado medio o en el vacío.
Material particulado	Mezcla de partículas líquidas y sólidas, de sustancias orgánicas e inorgánicas, que se encuentran en suspensión en el aire.
Pirolisis	Descomposición térmica de una materia orgánica en una atmosfera exenta de oxígeno.
Punto de ebullición	Temperatura que provoca que la presión del vapor de un líquido iguale a la presión del vapor.
WBT	<i>Water Boiling Test</i> (prueba de ebullición de agua).

RESUMEN

En este trabajo de graduación se analizó la eficiencia energética, emisiones de gases de combustión (CO y CO₂) y macropartículas (MP) de una estufa mejorada con cámara de combustión tipo Rocket utilizando como biomasa encino blanco (*Quercus subspathulata*, Trel) a seis diferentes humedades (0 %, 5 %, 10 %, 15 %, 20 %, 25 %). Se han seguido las instrucciones de la prueba de ebullición de agua WBT 4.2.2 que es una simulación simplificada del proceso de cocinado para comparar el desempeño de una estufa en condiciones controladas en el laboratorio y en óptimo funcionamiento.

El análisis se realizó en tres fases de control térmico: arranque en frío, arranque en caliente y a fuego lento siendo las primeras dos fases a alta potencia y la tercera a fuego lento. Cada prueba se hizo en condiciones controladas preparando el laboratorio y el equipo por utilizar. Para dar inicio al estudio se realizó una calibración de todos los equipos que garantizará la normalización de los resultados. Se verificó que la estufa utilizada haya recibido el mantenimiento requerido y se cuidó el entorno del experimento debido a que es necesario realizar el experimento en una habitación protegida del viento, pero con suficiente aire para ventilar las emisiones nocivas de la estufa.

Datos fueron tabulados y analizados en el documento *WBT spreadsheet* 4.2.4., el cual fue desarrollado y aceptado por la Organización Internacional de Estandarización (ISO) enfocado en estufas y emisiones limpias y, a su vez, fue avalado por la Alianza Global para Estufas Limpias.

Se determinó, en base a los resultados obtenidos la humedad en la leña que permite optimizar la eficiencia térmica en las tres fases analizadas y se cuantificó la cantidad de emisiones de material particulado, dióxido de carbono y monóxido de carbono emitido.

OBJETIVOS

General

Evaluar la eficiencia energética de una estufa ahorradora de leña de cámara de combustión tipo Rocket a través del protocolo de prueba de ebullición de agua (WBT) utilizando biomasa de encino blanco (*Quercus subpathulata*, Trel).

Específicos

1. Evaluar la eficiencia energética de una estufa ahorradora de leña de cámara de combustión tipo Rocket en la fase de inicio en frío, variando el contenido de humedad de la biomasa en los porcentajes: 0 %, 5 %, 10 %, 15 %, 20 %, 25 %.
2. Evaluar la eficiencia energética de una estufa ahorradora de leña de cámara de combustión tipo Rocket en la fase de inicio en caliente variando el contenido de humedad de la biomasa en 0 %, 5 %, 10 %, 15 %, 20 %, 25 %.
3. Evaluar la eficiencia energética de una estufa ahorradora de leña de cámara de combustión tipo Rocket en la fase de fuego lento variando el contenido de humedad de la biomasa en 0 %, 5 %, 10 %, 15 %, 20 %, 25 %.

4. Determinar las emisiones de monóxido de carbono (CO) y material particulado de una estufa ahorradora de leña de cámara de combustión tipo Rocket variando el contenido de humedad de la biomasa en 0 %, 5 %, 10 %, 15 %, 20 %, 25 %.

HIPÓTESIS

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

Hipótesis nula:

H_{0,1}: no existe diferencia significativa en la eficiencia energética en arranque en frío en función del contenido de humedad.

H_{0,2}: no existe diferencia significativa en la eficiencia energética en arranque en caliente en función del contenido de humedad.

H_{0,3}: no existe diferencia significativa en la eficiencia energética en arranque a fuego lento en función del contenido de humedad.

H_{0,4}: no existe diferencia significativa entre las emisiones de CO y material particulado al variar el contenido de humedad.

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

Hipótesis alternativa:

H_{a,1}: sí existe diferencia significativa en la eficiencia energética en arranque en frío en función del contenido de humedad.

H_{a,2}: sí existe diferencia significativa en la eficiencia energética en arranque en caliente en función del contenido de humedad.

H_{a,3}: sí existe diferencia significativa en la eficiencia energética en arranque a fuego lento al variar el contenido de humedad.

H_{a,4}: sí existe diferencia significativa entre las emisiones de CO y material particulado al variar el contenido de humedad.

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

Criterio con base a un análisis ANOVA

$F < F_c$: se acepta la hipótesis nula

$F > F_c$: se rechaza la hipótesis nula

INTRODUCCIÓN

Se estima que más de la mitad de la población mundial utiliza biomasa para cocinar sus alimentos y específicamente en Guatemala los fogones de leña son utilizados en su mayoría por la población que vive en el área rural. Sin embargo, generalmente son estructuras mal diseñadas que consumen excesiva leña, contaminan el aire y causan problemas respiratorios. Por ello, las estufas ecológicas permiten mejorar la eficiencia energética de la biomasa utilizada.

Las estufas ahorradoras están diseñadas para aprovechar el poder calorífico de la biomasa que utilice y de esta forma ser más eficientes energéticamente. Además, evitan que las personas respiren gases nocivos que causan problemas crónicos, esto mediante la expulsión de los gases de combustión y material particulado con una chimenea y por último reducen la emisión de gases de efecto invernadero.

Guatemala forma parte de la Alianza Global para Estufas Limpias que tiene como meta proteger el ambiente mediante la implementación de soluciones para estufas más limpias y eficientes y permitir a la población tener acceso a las estufas. Por esto han establecido protocolos y pruebas que permiten evaluar y mejorar la eficiencia y calidad de las estufas y la biomasa que utilicen.

La prueba de ebullición de agua (WBT) evaluará la ejecución de la estufa ahorradora con lo cual se podrá medir la eficiencia de la biomasa utilizada para calentar agua, así como la emisión de gases de combustión y material particulado. Mediante condiciones controladas en tres fases distintas: en frío y en

caliente que son pruebas de alta potencia y a fuego lento, que es una prueba de baja potencia.

1. ANTECEDENTES

En Guatemala el área rural principalmente utiliza leña como fuente de energía para cocinar sus alimentos, la mayoría de las estufas no aprovecha el poder calorífico total de la leña, por lo cual gran porcentaje se pierde en forma de calor. Además, la utilización de leña provoca deforestación debido a que aproximadamente el 40 % de la leña cortada en el país es empleada para cocinar alimentos.

El desarrollo de estufas ahorradoras disminuye hasta en un 60 % la utilización de biomasa (leña) lo cual tiene un impacto positivo en el medio ambiente y en la economía de las familias rurales. En Guatemala se creó la primera estufa ahorradora después del terremoto de 1976.

Distintas universidades e investigadores han trabajado en conjunto para crear una estufa ahorradora de leña adecuada para el cocimiento de alimentos y el medio ambiente.

Kimberly Pammela Lavicout Sandoval, en 2018, hizo una investigación sobre la medición de la eficiencia energética de cinco estufas ahorradoras de estructura metálica en la Universidad de San Carlos de Guatemala. Para lo cual utilizó el protocolo de prueba de ebullición de agua WBT. Este estudio permitió obtener los primeros resultados utilizando dicho protocolo y, a su vez, estableció una línea de investigación entre la biomasa, la estufa y el nivel de humedad, lo cual permitió desarrollar el presente trabajo.

La Alianza Global de Estufas Limpias a través del Ministerio de Economía y Minas en 2014 realizó el *Plan de acción nacional de Guatemala para estufas y combustibles limpias*, con el apoyo de varias instituciones nacionales e internacionales, teniendo como objetivo, organizar la información e identificar las actividades relevantes para todos los actores del sector (fabricantes, implementadores, gobierno, universidades y donantes). Además de esto se tienen varios objetivos a corto plazo entre los que destacan la creación de normas y pruebas, medidas institucionales, monitoreo y evaluación.

J. F. Pérez Bayer en 2017 realizó un trabajo denominado *Caracterización energética y emisiones de una estufa de cocción ecoeficiente con biomasa a diferentes altitudes* en la Universidad de Antioquia en Medellín Colombia. A las estufas mejoradas se les aplicaron 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 sobre él 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.

J. Blandon, G. Soto, A. Urueña y D. Valencia publicaron en 2012 un estudio denominado *Caracterización energética de estufas de cocción utilizando biomasa como combustible mediante pruebas de ebullición de agua: comparación experimental de una estufa ecoeficiente con una tradicional (“3 piedras”)* como parte de su trabajo de graduación en la Universidad de Antioquia. A partir de experimentos, utilizando el protocolo WBT, determinan que la estufa B tiene una mejor eficiencia que la estufa ecoeficiente (20 %-25 %). Así mismo, que la potencia en fuego fue más alta, lo cual provoca que se cocinen más rápido los alimentos.

Hilda Portillo Cruz presentó en 2010 en la Universidad de San Carlos de Guatemala un trabajo de graduación denominado *Lineamiento para la elaboración de estufas ecológicas ahorradoras de leña, en la aldea Tablones del municipio de Zacapa, departamento de Zacapa*. Este estudio se hizo para reducir el consumo de leña en la cocción de los alimentos en los hogares, así como disminuir la deforestación. Así mismo, el trabajo de investigación contribuye a minimizar las enfermedades en los ojos y en las vías respiratorias de la población, a causa de las grandes cantidades de humo que se produce en los fogones.

Javier Darío Hernández en 2010 realizó una investigación denominada *Estufas mejoradas y bancos de leña: una alternativa de autoabastecimiento energético a nivel de finca para comunidades dependientes de los bosques de roble de la cordillera oriental* hace una comparación entre tres tipos de estufas que han sido mejoradas en la cámara de combustión. El rendimiento se obtuvo mediante el seguimiento de la prueba de cocción controlada y se compararon con una estufa tradicional o común. Se obtuvo un rendimiento promedio de 14,66 % más en las estufas mejoradas que en las tradicionales en el consumo de leña. Por último, se presentó un arreglo de leña de tipo endoenergético para minimizar la dependencia de leña proveniente del roble lo que ocasiona una disminución de las emisiones de CO₂.

La Fundación Sierra Madre, institución que ayuda a familias de escasos recursos en el oriente del país de Guatemala, realizó en 2009 el *Informe final del estudio de sistematización de estufas ahorradoras de leña en ocho municipios del altiplano occidental de Guatemala* en donde se presentaron los resultados a las entrevistas que se realizaron a las usuarias de cuatro modelos de estufas (estufa de plancha tradicional, estufa de plancha mejorada, estufa de plancha tipo Onil y estufa mejorada Eco-comal). Se obtuvieron datos importantes como, por ejemplo, que la estufa tipo Onil tiene un menor consumo de leña, sin embargo,

debido a su pequeño tamaño no es la favorita entre las usuarias. Con estos datos y brindada la información para lograr mejores técnicas de uso, se realizó una propuesta del modelo de estufa tipo plancha mejorada en donde se ahorra hasta un 50 % del uso de leña.

La secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) y el Instituto Nacional de Ecología en México realizaron el *Estudio comparativo de estufas mejoradas para sustentar un programa de intervención masiva en México* en 2009. A nivel mundial 1,5 millones de personas mueren al año por enfermedades relacionadas con el humo de estufas de leña por lo cual este estudio tuvo el fin el solventar este problema para los hogares mexicanos en donde 1 de 5 utilizan una estufa de leña. Esto mediante el estudio y evaluación de estufas mejoradas que reducen el impacto de la salud y cumple con el estándar establecido en México de 2,5 P.M. Se determinaron parámetros de las estufas mejoradas como eficiencia energética, concentración de contaminantes en interiores de cocinas y emisión de gases de efecto invernadero de cuatro estufas mejoradas y de un fogón abierto.

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

Sebastián del Valle Rosales en 2005, realizó en la Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, un trabajo de graduación denominado *Determinación de la eficiencia termodinámica máxima y de combustión de la estufa mejorada Doña Justa*. En el cual se evaluó la eficiencia de un modelo de estufa mejorada la cual fue introducida a Guatemala recientemente. Se determinó que la estufa Doña Justa tiene una eficiencia termodinámica elevada cuando se utiliza biomasa como combustible, pero se recomienda una readecuación de cámara de combustión.

Se pudo obtener un procedimiento para determinar la eficiencia máxima termodinámica y de combustión susceptible de réplica en condiciones similares a equipos de combustión de biomasa, con una metodología experimental que puede aplicarse sin mayores cambios a otros modelos y aplicaciones de estufas mejoradas.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Fenómenos de transferencia de calor

El flujo de calor es la transferencia de energía desde un cuerpo a mayor temperatura que otro con el simple objeto de llegar a un equilibrio térmico entre los dos cuerpos. Durante el siglo XVIII y parte del XIX, se pensaba que todos los cuerpos tenían un fluido que era invisible y se le denominaba calórico. El calórico tenía propiedades las cuales eran imposible de relacionar con la verdadera naturaleza y no tenían siquiera lógica, por lo cual eran inconsistentes. Y se creía que fluía de un cuerpo más caliente a uno más frío.

Actualmente a esto se le denomina transferencia de calor y es el proceso mediante el cual hay un intercambio de energía en forma de calor entre dos cuerpos que se encuentran a diferentes temperaturas. Hay tres formas de transferir calor: convección, radiación y/o conducción. Estos pueden ocurrir al mismo tiempo y también puede ocurrir que haya un mecanismo dominante sobre los otros.¹

2.1.1. Transferencia de calor por conducción

En cuerpos sólidos, la transferencia de calor se da a través de conducción. Si un cuerpo metálico es calentado por un extremo el calor se transmitirá a lo largo de todo el cuerpo, calentando toda sección que se encontrará más fría. A pesar de que no se tiene conocimiento exacto del fenómeno de transferencia de

¹ SMITH, Van. *Introducción a la termodinámica en Ingeniería Química*. p. 255.

calor por conducción se sabe que en parte es debido al movimiento de electrones libres que transportan energía cuando existe una diferencia de temperatura. Esta teoría explica por qué los buenos conductores eléctricos también tienden a ser buenos conductores del calor.²

El matemático francés Joseph Fourier desarrolló la ecuación denominada Ley de Fourier sobre la conducción del calor en 1822 en donde establece que la velocidad de conducción de calor a través de un cuerpo por unidad de sección transversal es proporcional al gradiente de temperatura que existe en el cuerpo.³ Se expresa de la siguiente forma:

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

Donde:

Q= flujo de calor (J/s)

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

A = área de flujo de calor, m²

L= grosor de la pared, m

t= temperatura, K

2.1.2. Transferencia de calor por convección

El movimiento de un fluido es explicado por la convección, esto se da cuando hay diferencia de temperatura en el interior de un fluido (líquido o gas). El movimiento del fluido que transfiere el calor entre las partes del fluido es

² SMITH, Van. *Introducción a la termodinámica en Ingeniería Química*. p. 255.

³ DIAZ, Hernando. *Física 3*. p. 76.

denominado convección. Este movimiento del fluido puede ser de forma espontánea o de forma forzada. Un fluido, ya sea gas o líquido, que es calentado tiende a disminuir su densidad. Si el líquido o gas está dentro de un campo gravitacional, el fluido más caliente y menos denso asciende, mientras que el fluido más frío y denso desciende. Este movimiento del fluido ocasionado por la uniformidad de la temperatura es llamado convección natural.

La convección forzada se logra sometiendo el fluido a una diferencia de presiones es decir un gradiente de presión, con lo que se fuerza su movimiento de acuerdo con las leyes de la mecánica de fluidos.⁴

La siguiente expresión permite describir la transferencia de Calor (Q) por convección natural:

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

Donde:

h_i = coeficiente de película. J/(s*m²*K)

A_i = área interna de transferencia.

t_i = temperatura de la parte interna de la pared. m²

2.1.3. Transferencia de calor por radiación

La conducción y la convección se diferencian de la radiación en que en esta última el intercambio de calor entre las sustancias ocurre sin que haya un contacto físico y generalmente están separadas por un vacío. Se le denomina

⁴ DIAZ, Hernando. *Física 3*. p. 77.

radiación a cualquier fenómeno que tenga relación con ondas electromagnéticas por lo cual es un término genérico. La teoría cuántica permite explicar completamente el fenómeno de la radiación electromagnética, generalmente la “teoría de ondas” permite describir parte del comportamiento de la radiación.³

Albert Einstein descubrió en 1905 el comportamiento cuantizado de la radiación es decir que “en el efecto fotoeléctrico, la radiación se comporta como minúsculos proyectiles llamados fotones y no como ondas.”⁵ El comportamiento cuántico de la energía radiante se había postulado antes de la aparición de los resultados de Einstein, y a principios del siglo XIX el físico alemán Max Planck utilizó la teoría cuántica y la matemática de la mecánica estadística para derivar una ley fundamental de la radiación.

“Esta ley relaciona la intensidad de la energía radiante que emite un cuerpo en una longitud de onda determinada con la temperatura del cuerpo.”⁶ Es decir que cada temperatura asociada a cada longitud de onda debe existir una energía radiante. Solo cuerpo negro emite radiación ajustándose a la ley de Planck. En la realidad los cuerpos emiten con una intensidad algo menor.

El poder emisor es la contribución de las longitudes de onda a la energía radiante emitida y corresponde a la cantidad de energía que se emite por unidad de superficie del cuerpo y por unidad de tiempo. “Como se demuestra a partir de la ley de Planck, el poder emisor de una superficie es proporcional a la cuarta potencia de su temperatura absoluta”.⁷

El factor de proporcionalidad entre el poder emisor y la temperatura se denomina constante de Stefan-Boltzman. “Según la ley de Planck, todas las

⁵ DIAZ, Hernando. *Física 3*. p. 77.

⁶ *Ibíd.*

⁷ *Ibíd.* p.78.

sustancias emiten energía radiante solo por tener una temperatura superior al cero absoluto”.⁸

Al aumentar la temperatura, aumenta la cantidad de energía que se emite. Además de emitir radiación, todas las sustancias son capaces de absorberla. De esta forma se explica por qué un cubo de hielo se derrite si es iluminado por un bombillo porque este absorbe más calor que la que emite por radiación.

2.2. Temperatura

Generalmente se mide la temperatura con termómetros de vidrio llenos de líquido (mercurio en su mayoría), en los que el líquido se expande cuando aumenta la temperatura. De esta forma un tubo uniforme, con mercurio, alcohol o algún otro fluido que está lleno parcialmente, indica el grado de calentamiento al medirse que tanto se expandió dicho fluido. Sin embargo, la escala numérica del grado de calentamiento se define arbitrariamente.

Para una escala en Celsius, el punto de fusión que es el punto de congelación del agua saturada con aire a presión atmosférica estándar es cero y el punto de ebullición del agua pura a presión atmosférica estándar es 100. Siendo esto a una altura sobre el nivel del mar de 0 m.

Para darle a un termómetro una escala numérica generalmente se sumerge en un baño de hielo y poniendo una marca para el cero en el nivel donde se encuentra el fluido, y después colocándolo en agua hirviendo y haciendo una marca para el 100 a este mayor nivel del fluido. La distancia entre las dos marcas se divide en 100 espacios iguales y a esto se le llama grados.

⁸ DIAZ, Hernando. *Física 3*. p. 78.

Se pueden marcar otros espacios de igual tamaño por debajo de cero y por encima de 100 para extender el rango del termómetro. Los termómetros actuales sin excepción tienen una lectura entre 0 y 100 ya que han sido calibrados con el método antes descrito. Los fluidos, a su vez, cambian en cuanto a sus características de dilatación por lo cual es común que en los puntos entre el 0 y 100 no siempre correspondan.

El fluido que se seleccione puede ser arbitrario e igualmente se obtienen resultados correctos para la mayoría de los propósitos. Sin embargo, como se mostrará, la escala de temperatura del sistema SI, con el kelvin, símbolo K, como unidad, está basada en el gas ideal como fluido termométrico. Nótese que, como escala absoluta, esta depende del concepto de un límite inferior de temperatura. Las temperaturas Kelvin tienen el símbolo T. Las temperaturas Celsius, con símbolo t, están relacionadas con las temperaturas Kelvin por.⁹

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

2.3. Calor sensible y latente

Las sustancias sufren cambios físicos cuando hay un cambio de temperatura, generalmente estas tienden a aumentar el volumen y a contraerse cuando se enfrían. La excepción a la regla sería el agua cuando se encuentra entre 0 y 4°C, la cual tiene un comportamiento opuesto. A una sustancia en su estado se le llama fase y puede ser sólido, líquido o gaseoso.

Todos los cambios de estado en sustancias ocurren a temperaturas y presiones establecidas. El cambio de sólido a gas se denomina sublimación; de

⁹ COSTAS, María; ACEVEDO, Rogelio. *Experiencias sobre la propiedad: temperatura*. p. 171.

sólido a líquido, fusión, y de líquido a vapor vaporización. La presión afecta la temperatura, por lo cual, si no cambia la presión, la temperatura es constante. La cantidad de calor que se necesita para generar un cambio se llama calor latente; existen tres tipos de calores latentes: sublimación, fusión y vaporización.¹⁰

En el mar, si se hierve agua en un recipiente abierto a 1 am, la temperatura nunca será mayor a 100 °C, aunque se siga suministrando más calor. El calor que se absorbe sin cambiar la temperatura del agua es el calor latente; no se pierde, sino que se emplea en transformar el agua en vapor y se almacena como energía en el vapor. Si el vapor se condensa para formar agua, esta energía vuelve a liberarse. De igual forma, si se calienta una mezcla de hielo y agua, su temperatura no cambia hasta que se funde todo el hielo.¹¹

Las fuerzas que mantienen unidos átomos y moléculas del hielo se rompen mediante la absorción del calor latente, se almacena como energía en el agua. Así que el calor latente que acompaña a un cambio de fase está en función solo de la temperatura, y se relaciona con otras propiedades del sistema mediante una ecuación termodinámicamente exacta:

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

Donde para una especie pura a temperatura dada T:

ΔH = calor latente (Btu/lb)

ΔV = cambio de volumen (gal)

P^{sat} = presión de vapor (psi)

¹⁰ CHANG, Raymond. *Química*. p. 235, 236.

¹¹ *Ibíd.*

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

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

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):

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

Análogamente si se está trabajando a presión (p) constante, se tiene la expresión anterior que involucra la entalpía (H) y temperatura (T). Nótese que en el caso de volumen constante se expresa la capacidad calorífica como función directamente proporcional a la energía interna (U) molar o específica y en el caso de presión constante es directamente proporcional a la entalpía (H) molar o específica.¹²

2.4. Combustión

Se define a la combustión como a la combinación violenta, con desprendimiento de luz y calor, del oxígeno (O₂) del aire junto con el carbono (C), hidrógeno (H), azufre (S) y nitrógeno (N).

¹² CHANG, Raymond. *Química*. p. 241.

La combustión del oxígeno con el carbono, hidrógeno, azufre, se realiza en proporciones de peso específicas y determinadas. Por cada átomo de carbono se necesitan 2 átomos de oxígeno para llegar a la combustión perfecta formando CO_2 (dióxido de carbono), el carbono que se quema con falta de aire forma el gas CO (monóxido de carbono), que representa solo el 30 % de una combustión perfecta, por lo tanto, la combustión al formarse CO se le denomina incompleta.

El hidrógeno se combina siempre en proporción de 2 átomos de hidrógeno con uno de oxígeno obteniéndose vapor de agua H_2O , y el azufre es de proporción 1 a 2; un átomo de azufre por 2 de oxígeno. Este gas es indeseable porque al enfriarse los productos de la combustión se forma agua derivada de la combustión y la que se presenta en la humedad del combustible que se condensan y esta reacciona con el gas anhídrido H_2S por lo cual se forma ácido sulfúrico H_2SO_4 , el cual corroe el metal de los conductos metálicos.

2.4.1. Calor de combustión

El desprendimiento de calor se realiza de forma diferente de acuerdo con las características físicas y químicas del cuerpo en cuestión mientras está ocurriendo la combustión en dichos cuerpos. El calor específico de combustión es una magnitud que permite caracterizar de forma cuantitativa el desprendimiento de calor de los cuerpos durante la combustión.

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

también, diferentes cantidades de calor (Q). La expresión que permite calcular el calor que se desprende por una cierta cantidad de masa es: $Q = l \cdot m$.¹³

Tabla I. **Calores específicos de combustión**

Material combustible	Kcal/Kg	MJ/Kg	Material combustible	Kcal/Kg	MJ/Kg
Hidrógeno	33915,9	142	Madera de pino	5015,7	21
Gas metano	13136,4	55	Cascarón de coco	4776,9	20
Gasolina	11225,7	47	Turba seca	4776,9	20
Petróleo crudo	11225,7	47	Leña seca	4299,2	18
Queroseno	10986,8	46	Turba humedad	3821,5	16

Fuente: elaboración propia.

2.4.2. Proceso de combustión

La mayor parte de los procesos de combustión se realiza con aire que contiene oxígeno, nitrógeno y argón y no solamente oxígeno puro.

Este proceso se traduce a la oxidación de los componentes de un combustible, en cuya ecuación química representativa la masa permanece inalterable. Para los cálculos se despreja el Argón y se toma 21 % de oxígeno y 79 % de nitrógeno. Pero los dispositivos de combustión no queman

¹³ BRIZUELA, Rosario. *Combustión*. p. 3.

necesariamente todo el combustible que se les suministra, teniendo las siguientes reacciones:¹⁴



El CO₂ se forma a menor temperatura y sin duda es el producto deseado; el CO se forma a mayores temperaturas, y no es tan deseado debido a que su formación va acompañada por una menor liberación de calor. La característica especial del carbono como combustible es que su presión de vapor es despreciablemente pequeña.⁹ Por ello, se puede describir la velocidad de combustión por medio de la relación de Nusselt:

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

En donde: G_o = velocidad de combustión

m_{ox} = masa que se oxida

t_{ox} = temperatura

s = constante de Nusselt

r_o = radio de la partícula de carbono

2.4.3. Aire teórico

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

¹⁴ BRIZUELA, Rosario. *Combustión*. p. 3.

Cuando se obtiene combustión completa no puede haber oxígeno en los productos de la combustión.¹⁵

En la práctica es casi imposible tener una combustión completa ni con las proporciones "ideales" químicamente correctas a menos que se administre una cantidad mayor de aire teórico. Esto es debido a que hay una probabilidad casi nula de que cada una de las casi infinitas moléculas del combustible encuentre una molécula de oxígeno para combinarse con ella.

Por lo tanto, la oxidación total del combustible se logra utilizando en la mezcla exceso de aire.

2.4.4. Relación aire-combustible

Se define como la razón teórica entre masa o moles de aire teórico y la masa o moles de combustible. Para calcular el número de moles necesarios de aire se aplica la siguiente ecuación:

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

En 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.

¹⁵ CORTEZ, Ignacio. *Estudios técnicos*. p. 6.

Si la cantidad de aire suministrado en una combustión es inferior al aire teórico necesario la combustión será incompleta y habrá presencia de monóxido de carbono.¹⁶

Las causas principales de una combustión incompleta son:

- Falta de oxígeno
- Mezcla desequilibrada de combustible y oxígeno
- Temperatura insuficiente para mantener la combustión

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

2.5. Combustión de biomasa

La biomasa se forma por un proceso llamado fotosíntesis, una reacción química que combina agua, CO₂ y energía solar. La reacción opuesta de la anterior es la combustión, que es la descomposición de la biomasa y liberando energía que se puede utilizar para cocinar, secar, calentar. A continuación, se expondrán las características químicas y físicas de la biomasa.¹⁰

2.5.1. Características químicas

La biomasa consiste en tres elementos químicos: hemicelulosa, celulosa e ignita. También contiene agua, pequeñas cantidades de resinas y minerales.

¹⁶ CORTEZ, Ignacio. *Estudios técnicos*. p. 6.

Según los análisis proximales de madera, la composición de esta es de aproximadamente 50 % de C y 45 % de O. La composición de la biomasa es considerada en términos de carbono, materia volátil y cenizas producidas cuando se calienta en ausencia de aire.

2.5.2. Características físicas

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

Tamaño y forma, a mayor área superficial expuesta a las cantidades necesarias de oxígeno y calor, más rápido será el proceso de quemado por lo tanto habrá mayor potencia. Por ejemplo, pequeños pedazos de madera, astillas, se quemarán más rápido que leños grandes del mismo tipo de madera. El tamaño de la leña siempre influirá en el diseño de una estufa, sobre todo, de la cámara de combustión.¹⁷

La densidad y la estructura de la biomasa están íntimamente relacionadas por la proporción y el tamaño de los poros. A medida que la proporción de poros de un sólido incrementa, la densidad disminuye. Estos poros que mantienen aire y humedad tienen el efecto de facilitar el escape de gases volátiles y hacer más fácil que la materia se quemé.

La mayoría de combustibles biomásicos son higroscópicos. De todos los combustibles biomásicos el menos higroscópico es el carbón, pero por sus grandes poros puede retener grandes cantidades de agua si se le moja. La biomasa recientemente cortada posee niveles de humedad entre 80-90 %, en un período de tiempo, dependiendo de la clase de biomasa que sea y factores

¹⁷ CORTEZ, Ignacio. *Estudios técnicos*. p. 7.

climáticos, gran parte de esa humedad se evaporará, pero se llega a un punto en que ya no se puede perder más humedad. El contenido de humedad en la biomasa que se ha secado al aire está entre 10 % al 26 %.

El contenido de humedad en un combustible tiene gran importancia en la combustión. Después que la humedad en el combustible se ha calentado a 100 °C, la humedad se evapora y esa energía que se utilizó para evaporarla se ha perdido completamente, no se puede recuperar. Un combustible con menor porcentaje de humedad que otro, será más eficiente y aprovechará mejor la energía que uno con mayor porcentaje de humedad. El efecto que tiene la humedad sobre el valor calorífico de la biomasa se describe de esta manera: ¹⁸

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

Donde:

m = contenido de humedad (%)

L = calor latente de evaporación

B = calor de combustión de biomasa

Bo = calor de combustión de biomasa seca

2.5.3. Proceso de combustión de leña

La combustión de leña lleva consigo cambios químicos debido a la presencia de calor. Al principio del proceso de combustión se desprende dióxido de carbono y agua sin presencia de llamas. Este primer proceso de la degradación de la leña se le llama pirolisis. Cuando la temperatura supera los

¹⁸ CORTEZ, Ignacio. *Estudios técnicos*. p. 7.

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. Es solamente después, cuando la actividad de estos gases decrece, que la madera ya convertida en carbón empieza a arder con una tenue llama azul; y los productos de esto serán CO₂ y carbono. Todos estos procesos ocurren simultáneamente en una hoguera.¹⁹

¹⁹ BRIZUELA, Rosario. *Op. Cit. Combustión*. p. 4.

Tabla II. **Reacciones para la combustión de leña**

No.	Reacción
1	$C_{\text{grafítico}} + O_2 \text{ gas} \rightarrow CO_2 \text{ gas} + 178430 \text{ KJ}$
2	$C_{\text{grafítico}} + CO_2 \text{ gas} \rightarrow 2CO \text{ gas} - 78210 \text{ KJ}$
3	$2C_{\text{grafítico}} + O_2 \text{ gas} \rightarrow 2CO \text{ gas} + 100230 \text{ KJ}$
4	$2CO \text{ gas} + O_2 \text{ gas} \rightarrow 2CO_2 \text{ gas} + 256640 \text{ KJ}$
5	$2H_2 \text{ gas} + O_2 \text{ gas} \rightarrow 2H_2O \text{ gas} + 219300 \text{ KJ}$
6	$C_{\text{grafítico}} + H_2O \text{ gas} \rightarrow CO \text{ gas} + H_2 \text{ gas} - 59450 \text{ KJ}$
7	$C_{\text{grafítico}} + 2H_2O \text{ gas} \rightarrow CO_2 \text{ gas} + 2H_2 \text{ gas} - 40870 \text{ KJ}$
8	$CO \text{ grafítico} + H_2O \text{ gas} \rightarrow CO_2 \text{ gas} + H_2 \text{ gas} - 40870 \text{ KJ}$

Fuente: elaboración propia.

2.6. 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.

2.7. Estufa ahorradora

El esquema general de una estufa eficiente consta de una cámara de combustión, un canal o canales de paso para humo, una o más superficies de cocción y una chimenea. La cámara de combustión tiene forma de codo, con las paredes de la estufa aisladas de la cámara de combustión y el paso de los gases por medio de ceniza.

Figura 1. **Estufa ahorradora con cámara de combustión tipo Rocket**



Fuente: Mercado libre. *Estufas ahorradoras*. <https://listado.mercadolibre.com.mx/estufa-ahorradora-de-le%C3%B1a>> Consulta: 18 de agosto 2018.

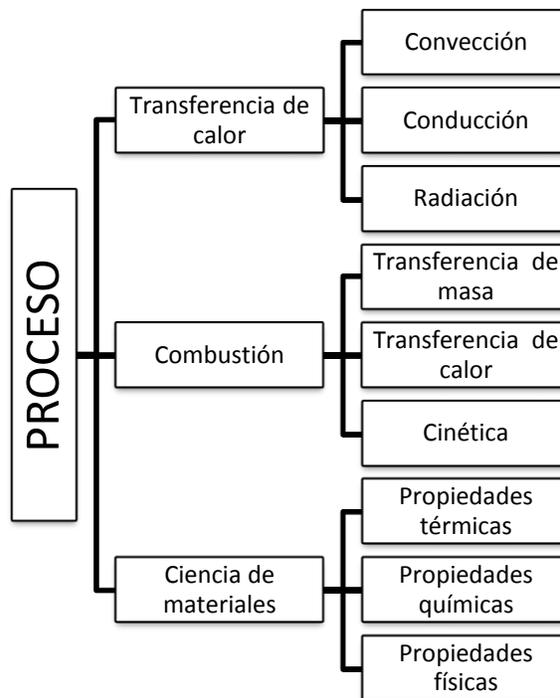
El cuerpo de la estufa es construido con ladrillos. La estufa tiene una plancha de hierro que se pone encima de una caja de ladrillos, y una chimenea que lleva el humo hacia el exterior. Sobre la plancha de hierro es donde se colocan los recipientes con los alimentos.²⁰

²⁰ BLANCO, Salvador. *Estudio comparativo de estufas mejoradas para sustentar un programa de intervención masiva en México*. p. 4.

2.7.1. Procesos involucrados en una estufa ecológica

Se describen las áreas de la ingeniería química que involucra la medición de la eficiencia de una estufa de leña.

Figura 2. Relación de la ingeniería química con evaluación de una estufa ecológica



Fuente: elaboración propia.

2.8. Tipos de estufas ahorradoras

- Estufas de combustión directa: son estufas que tienen cámaras eficientes, materiales aislantes y poseen una elevada transferencia de calor, tienen un

diseño geométrico y correcto flujo de aire. La estufa con cámara Rocket es un ejemplo de estufa ahorradora de combustión directa.²¹

- Gasificadoras: es un tipo de estufa que utiliza pellets como combustibles. Se caracterizan por que el ventilador no es necesario y tienen una eficiencia del 35 %.
- Estufas de biogás y otros biocombustibles procesados: este tipo de estufas se caracterizan porque utilizan biogás a base de estiércol animal y pueden generar abono y pueden reducir los patógenos.
- Estufas híbridas: este es el tipo de estufa ahorradora más reciente que se está desarrollando. Producen calor y pueden proporcionar agua caliente o energía para otros fines. La generación eléctrica se hace mediante el efecto termoeléctrico.

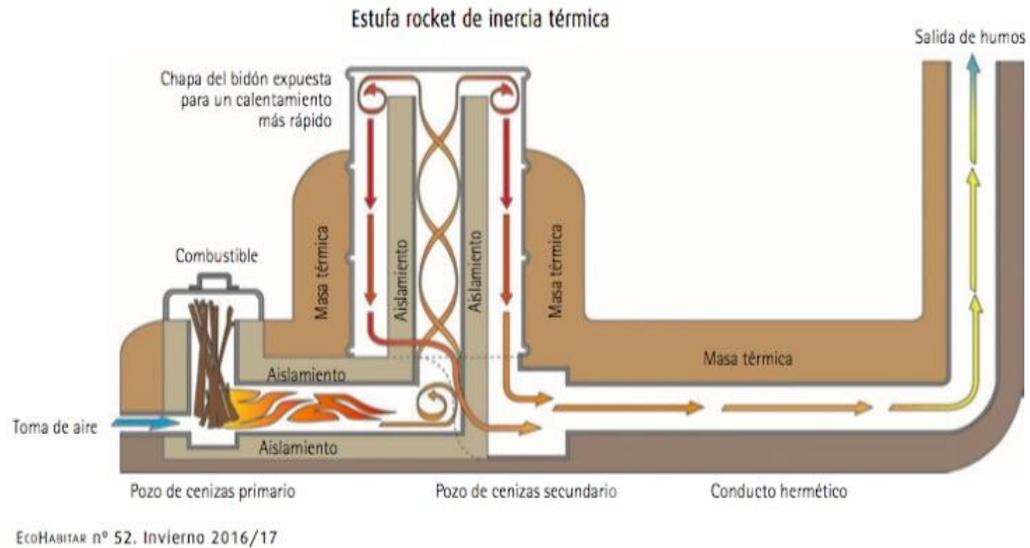
2.8.1. Estufa ahorradora con cámara de combustión tipo Rocket

Una estufa con cámara de combustión tipo Rocket tiene un diseño que permite utilizar el material combustible de forma más eficiente mediante la utilización de una cámara de combustión de alta temperatura. La estufa mantiene una combustión completa debido a que tiene incorporada una chimenea vertical asilada que asegura la combustión total de oxígeno y por último aprovecha el poder calorífico al máximo. Este tipo de estufas además es amigable con el ambiente debido a que utiliza mejor cantidad de leña a comparación de otras estufas y reduce el humo a casi cero.²²

²¹ DÍAZ, Rodolfo. *Estufas de leña*. p. 25.

²² SANTOS, Diego. *Manual para la construcción de una estufa Rocket*. p. 11.

Figura 3. Estufa Rocket de inercia térmica



Fuente: RIVAS, Pacheco. *Como construir una estufa de masa térmica de alto rendimiento. Estufas Rocket.* <<https://about-haus.com/estufa-de-masa-termica-rocket/>>

Consulta: 18 de agosto de 2018.

2.9. Biomasa: encino blanco

El encino blanco o *Quercus subspatulata* es un árbol perteneciente a la familia de las Fagáceas y es de madera dura. Los árboles de madera dura se caracterizan porque no tiene fruto ni flor. En general es preferible escoger un árbol con madera dura debido a que por sus características permiten aprovechar mejor el poder calorífico. Este tipo de árbol se encuentra principalmente en Europa y América.

Entre las propiedades principales de la madera de encino blanco se puede mencionar su gran capacidad de adhesión, alto grado de encogimiento y es

susceptible a fluctuación en el rendimiento. Es una madera pesada, con resistencia media al impacto. Presenta bajo grado de rigidez.²³

2.10. Prueba de ebullición del agua

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.²⁴

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)

²³Madera la misión. S.A. *Maderas finas*. <http://maderaslamision.com/encinoblanco.html>.

²⁴ Ecotec. *Laboratorio de innovación y evaluación en estufas de biomasa*. LINEB. http://ecotec.unam.mx/Ecotec/wp-content/uploads/Protocolo-WBT_4.2.2.pdf.

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.

2.11. Prueba de emisiones

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

La eficiencia y emisiones deben ser evaluadas con el mismo protocolo, debido a que los cambios en la operación y diseño de la estufa afectan a ambas.

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.²⁵

2.11.1. Material particulado

Son una serie de diminutos cuerpos sólidos o de gotitas de líquidos dispersos en la atmósfera. Se producen a partir de actividad antropogénica (la quema de carbón para producir electricidad) o natural (como por ejemplo la actividad volcánica).

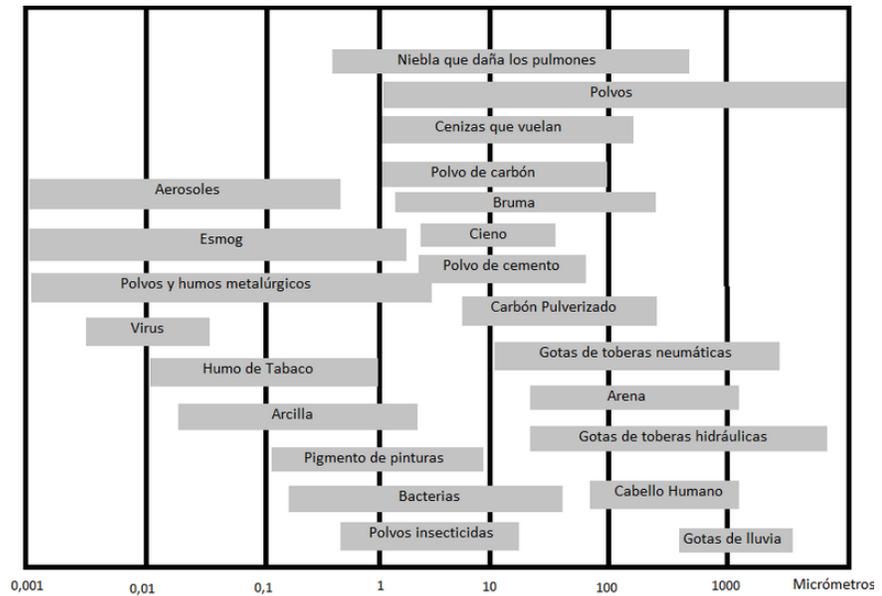
Las características comunes de las partículas son ocho: tamaño, distribución de tamaños, forma, densidad, adhesividad, corrosividad, reactividad y toxicidad. La más importante es la distribución de tamaños. El diámetro aerodinámico de las partículas es la forma en la cual se mide el tamaño. Esta dimensión se mide comúnmente en micrómetros (10⁻⁶ m). La unidad de medida mencionada recibe también el nombre de micra.

Debido a que la mayoría de partículas o corpúsculos que queda suspendida en el aire implica un peligro que varía de 0,1 a 10 μm ; son utilizados para la descripción de los contaminantes por partículas.²⁶

²⁵ ARCINIÉGAS, César. *Diagnóstico y control de material particulado*. <http://www.scielo.org.co/pdf/luaz/n34/n34a12.pdf>. Consultado: 18 de agosto del 2018.

²⁶ *Íbid.*

Figura 4. **Distribución de partículas suspendidas en el aire**



Fuente: SPIRO, Thomas. *Partículas en suspensión*.

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

Consulta: 2 de agosto de 2018.

3. MARCO METODOLÓGICO

A continuación se presentan las variables y factores que se estudiarán.

3.1. Variables del método

Ahora se presentan las variables que pueden ser manipuladas y medidos.

Tabla III. Descripción de las variables del procedimiento

Variable	Unidad	Factor de diseño		Tipo de variable	
		Constante	Variable	Independiente	Dependiente
Humedad	%		X	X	
Fases de control térmico					
En frío				X	
En caliente				X	
Alta potencia				X	
Tiempo	Min	X			X
Eficiencia	%		X		X
Peso de carbón	g		X		X
Peso de la ceniza	g		X		X
Poder calorífico	kJ/kg		X		X
Monóxido de carbono	ppm		X		X
Dióxido de Carbono	ppm		X		X
Material particulado	ppm		X		X
Vatio	W		X		X

Fuente: elaboración propia.

3.2. Delimitación del campo de estudio

Se enfoca la investigación en terminos de alcance, area de interés y recursos que se utilizaran.

3.2.1. Aplicación de la Ingeniería Química

El trabajo de graduación tendrá a porte de las siguientes ramas de estudio: Balance de masa (IQ-1) transferencia de calor (IQ-3), balance de masa y energía (IQ-4), química ambiental, química orgánica 1, termodinámica 4 y estadística.

3.2.2. Proceso general

Se hará una comparación de la eficiencia energética de una estufa ahorradora con cámara de combustión tipo Rocket utilizando biomasa a diferentes humedades (0 %, 5 %, 10 %, 15 %, 20 %, 25 %), siguiendo los lineamientos del protocolo WBT sobre ebullición de agua en un entorno controlado.

3.2.3. Localización

El desarrollo del experimento será llevado a cabo en la Sección de Tecnología de la Madera del Centro de Investigaciones de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

3.3. Recursos humanos disponibles

Investiga: Br. Dilan Arnulfo Zamora Tobar

Asesor: Ing. Qco. Mauricio Valentino Rivera Tello

3.4. Recursos y materiales disponibles

Se describen los recursos y materiales que se utilizará en el experimento.

3.4.1. Materia prima e insumos

- Leña de encino blanco (*Quercus subspathulata*, Trel)
- H₂O (a 24° T y 0,84 atm)
- Material de ignición (*Pinus oocarpa*, Schiede)

3.4.2. Equipo

- Estufa ahorradora con cámara de combustión tipo Rocket
- Campana de extracción de gases
- Indoor Air Pollution Meter

3.4.3. Instrumentos de medición

- Balanza analítica digital con capacidad mayor a 6 kg.
- Cronómetro
- Higrómetro
- Termómetro digital con sonda termopar
- Cinta métrica
- Regla de madera

3.4.4. Materiales

- Atizador
- Espátula

- Escobilla
- Guantes térmicos
- Lentes de protección
- Mascarilla de gases
- Recipiente de teflón con capacidad de 5 L
- Recipiente para transferencia de calor
- Bandeja de metal para sostener carbón
- Remover de cenizas
- Tenazas para retirar el carbón

3.5. Técnicas cualitativas o cuantitativas

El trabajo de graduación es una investigación cuantitativa, debido a que se obtendrán 18 unidades experimentales que permitirán evaluar los resultados obtenidos de utilizar leña como biomasa a 6 diferentes humedades en una estufa con cámara de combustión tipo Rocket.

3.5.1. Preparación de cada ensayo

Se hará en tres fases.

- Ensayo 1: arranque en frío
 - Tomar el peso inicial de la leña (*Quercus subspathulata*, Trel).
 - Tomar el contenido inicial de humedad de la leña.
 - Colocar los recipientes en la estufa con un termómetro en cada recipiente (deben estar a temperatura ambiente).
 - Encender el fuego y registrar el tiempo.
 - Verificar la temperatura de las ollas cada 1 o 2 minutos.

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

- Ensayo 2: arranque en caliente
 - Tomar el peso inicial de la leña (*Quercus subspathulata*, Trel).
 - Tomar el contenido inicial de humedad de la leña.
 - Colocar los recipientes en la estufa con un termómetro en cada recipiente (debe estar a temperatura ambiente).
 - Encender el fuego y registrar el tiempo.
 - Verificar la temperatura de los recipientes cada 1 o 2 minutos.
 - Cuando el recipiente 1 o 2 alcance los 91 °C.
 - Registrar el tiempo y temperatura en ambos recipientes
 - Quitar toda la leña de la estufa y apagar las llamas
 - No pesar carbón ni ceniza
 - Colocar la leña quemada otra vez dentro de la estufa

- Proceder inmediatamente con la prueba de baja potencia
- Ensayo 3: cocción a fuego lento
 - Colocar los recipientes con agua de la fase II sobre las hornillas, anotar el peso y temperatura.
 - Anotar el peso del combustible sobrante de la segunda fase.
 - Colocar la leña caliente de la fase II en el horno e iniciar el cronómetro.
 - Durante 45 minutos mantener el fuego a un nivel que mantiene la temperatura del agua lo más cerca posible del punto de ebullición.
 - Después de 45 minutos realizar los pasos enunciados a continuación.
 - Anotar el tiempo.
 - Registrar la temperatura final del agua que todavía debe ser de 3°C por debajo de la temperatura de ebullición establecido.
 - Quitar toda la leña de la estufa y apagar las llamas.
 - Eliminar todo el carbón suelto de los extremos de la leña en el recipiente para carbón.
 - Pesar la leña sin quemar retirada de la estufa junto con la leña restante del segundo bulto pesado previamente.
- Medición de las emisiones de CO y PM

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

- 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 hora de datos los resultados (promedio).

3.6. Recolección y ordenamiento de la información

Se analizará la eficiencia energética, CO y PM de una estufa de cámara tipo Rocket, en las seis variaciones del contenido de humedad de la biomasa, con tres repeticiones para tres fases: inicio en frío, en caliente y hervir a fuego lento.

Figura 5. Toma de datos de información general

Water Boiling Test - General Information

Test & stove description	
Name of Tester(s)	[Redacted]
Test Number or Code	[Redacted]
Test Dates	[Redacted]
Test Year	[Redacted]
Test Location	[Redacted]
Replicate Test Number	[Redacted]
Altitude/Elevation (m)	[Redacted]
Stove Type/Model	[Redacted]
Manufactured by	[Redacted]
Description and Notes	[Redacted]
Description of Pot(s)	
[Redacted]	
Ambient conditions	
Air relative humidity (%)	[Redacted]
Local boiling point (C)	[Redacted]
Emission testing	
Atmospheric P (kPa)	[Redacted]
Pitot delta-P	[Redacted]
Hood flow rate (m3/hr)	[Redacted]
Notes or description about stove or operation not included elsewhere on this form	
[Redacted]	
[Redacted]	
[Redacted]	

Fuente: BIRCH, Eileen. *WBT 4.2.4 spreadsheet*. <https://www.cleancookingalliance.org/binary-data/DOCUMENT/file/000/000/399-1.pdf>. Consulta: 5 de agosto de 2018.

Figura 6. Información general (descripción del combustible)

Version 4.2.4

Fuel description

Your general description

Fuel type

Fuel description

Average length (cm)

Cross-sectional dimensions (cm x cm)

Default values (looked up)

Gross calorific value	<input type="checkbox"/>	-	HHV, kJ/kg
Net calorific value	<input type="checkbox"/>	-	LHV, kJ/kg
Char calorific value	<input type="checkbox"/>	-	LHV, kJ/kg
Char carbon content	<input type="checkbox"/>	95%	by mass

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

Check box if you have a measured calorific value

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

Values to be used for tests

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

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

Fuente: BIRCH, Eileen. *WBT 4.2.4 spreadsheet*. <https://www.cleancookingalliance.org/binary-data/DOCUMENT/file/000/000/399-1.pdf>. Consulta: 5 de agosto de 2018.

Figura 7. Datos de operación durante el proceso

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

Fuente: BIRCH, Eileen. *WBT 4.2.4 spreadsheet*. <https://www.cleancookingalliance.org/binary-data/DOCUMENT/file/000/000/399-1.pdf>. Consulta: 5 de agosto de 2018.

3.6.1. Datos generales

Para la recolección de datos generales de las estufas ahorradoras se utilizará el documento WBT 4.2.4 SPREADSHEET, este Excel fue creado por la Alianza Global para Estufas Limpias y se pueden encontrar en la siguiente dirección:

<http://cleancookstoves.org/technology-andfuels/testing/protocols.html>

Cada hoja tiene la siguiente información:

- Prueba y descripción de la estufa
 - Número de prueba
 - Fecha
 - Nombre del evaluador
 - Lugar
 - Repetir la cantidad de pruebas
 - Altitud
 - Modelo de estufa
 - Fabricante
 - Descripción y notas acerca de la estufa
 - Descripción del (de los) hornillo(s)

- Condiciones ambientales
 - Humedad relativa del aire (%)
 - Punto de ebullición local del agua

- Evaluación de emisiones
 - Presión atmosférica (kPa).
 - Pitot delta-P.
 - Rango del flujo de chimenea o campana (m³/hr).
 - Notas o descripción sobre la estufa o la operación que no se incluyen en otra parte de este formulario.

- 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?

- 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 la temperatura.
 - Registrar tiempo.

3.6.2. 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 8. 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 *	<input type="text"/>	
* enter on General Information		
Background CO ₂ (ppm)**	<input type="text"/>	
Background CO (ppm)**	<input type="text"/>	
Background PM (ug/m ³)**	<input type="text"/>	

** For emission testing only

Fuente: BIRCH, Eileen. *WBT 4.2.4 spreadsheet*. <https://www.cleancookingalliance.org/binary-data/DOCUMENT/file/000/000/399-1.pdf>. Consulta: 5 de agosto de 2018.

Figura 9. Hoja de toma de datos para las tres fases

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

Fuente: BIRCH, Eileen. *WBT 4.2.4 spreadsheet*. <https://www.cleancookingalliance.org/binary-data/DOCUMENT/file/000/000/399-1.pdf>. Consulta: 5 de agosto de 2018.

3.7. Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información

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

3.7.1. Procesamiento de la información

Se creará un nuevo archivo de Excel para cada conjunto de tres pruebas. Debido a que son 6 humedades se registrarán en las pestañas: Test-1, Test-2, Test-3, Test-4, Test-5 y Test-6. Los valores que se ingresen a la hoja de Excel será el promedio de tres repeticiones para cada humedad.

Tabla IV. **Eficiencia energética estufas ahorradoras en fase de arranque en frío**

Humedad (%)	Repetición	Arranque en frío (%)	\bar{x} Promedio	σ Desv. Estandar
0	1			
	2			
	3			
5	1			
	2			
	3			
10	1			
	2			
	3			
15	1			
	2			
	3			
20	1			
	2			
	3			
25	1			
	2			
	3			

Fuente: elaboración propia.

Tabla V. **Eficiencia energética estufas ahorradoras en fase de arranque en caliente**

Humedad (%)	Repetición	Arranque en caliente (%)	\bar{x} Promedio	σ Desv. Estándar
0	1			
	2			
	3			
5	1			
	2			
	3			
10	1			
	2			
	3			
15	1			
	2			
	3			
20	1			
	2			
	3			
25	1			
	2			
	3			

Fuente: elaboración propia.

Tabla VI. **Eficiencia energética estufas ahorradoras en fase de hervir a fuego lento**

Humedad (%)	Repetición	Hervir a fuego lento (%)	\bar{x} Promedio	σ Desv. Estándar
0	1			
	2			
	3			
5	1			
	2			
	3			
10	1			
	2			
	3			
15	1			
	2			
	3			
20	1			
	2			
	3			
25	1			
	2			
	3			

Fuente: elaboración propia.

Tabla VII. **Emisiones y material particulado estufas ahorradoras**

Humedad	Arranque en frío (%)		Arranque en caliente (%)		Hervir a fuego lento (%)	
	CO (ppm)	PPM (ug/m3)	CO (ppm)	PPM (ug/m3)	CO (ppm)	PPM (ug/m3)
0 %						
5 %						
15 %						
20 %						
25 %						

Fuente: elaboración propia.

3.8. Análisis estadístico

Se realizará prueba de ebullición de agua WBT en una estufa ahorradora, variando el contenido de humedad a seis diferentes humedades y se harán tres repeticiones, por lo que se utilizará un análisis de varianza para uno de ellos.

3.8.1. Diseño experimental

Se describen las variables estadísticas para determinar la cantidad de datos experimentales.

Tabla VIII. **Relación entre variables**

<i>Eficiencia = f(Humedad)</i>			
FACTORES	Humedad	NÚMERO DE FACTORES	1
NIVELES	Humedad al 0 %, 5 %, 10 %, 15 %, 20 %, 25 %	NÚMERO DE NIVELES	6
NÚMERO DE TRATAMIENTOS		6	
NÚMERO DE REPETICIONES $N = \frac{(Z^2 * p * q)}{E^2}$ $N = \frac{(1,96^2 * 0,95 * 0,05)}{0,25^2}$ $N=2,92 \approx 3$			
6*3=18 datos experimentales			

Fuente: elaboración propia.

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

Tratamiento	Repeticiones			
	1	2	3	Promedio
1	X _{1,1}	X _{1,2}	X _{1,3}	X ₁ promedio
2	X _{2,1}	X _{2,2}	X _{2,3}	X ₂ promedio
3	X _{3,1}	X _{3,2}	X _{3,3}	X ₃ promedio
Promedio	X ₁ promedio	X ₂ promedio	X ₃ promedio	X

Fuente: elaboración propia.

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

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

$$\bar{x} = \frac{\sum_I^N X_I}{N} \quad \text{Ecuación I}$$

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 de la media aritmética. Cuanto mayor sea la varianza, mayor dispersión existirá y, por tanto, menor representatividad tendrá la media aritmética.

$$\sigma^2 = \frac{\sum(x_i - \bar{x})^2}{N} \quad \text{Ecuación II}$$

Donde:

σ^2 = varianza

x = valor promedio

xi = 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.

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum(xi-\bar{x})^2}{N}} \quad \text{Ecuación III}$$

Donde:

σ = desviación estándar

\bar{x} = valor promedio

xi = 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.

$$CV = \frac{\sigma}{\bar{x}} \quad \text{Ecuación IV}$$

Donde:

CV = coeficiente de variación

σ = desviación estándar

x = valor promedio

3.9. Plan de análisis de resultados

Se realizará un análisis de varianza ANOVA con confiabilidad del 95 % que permitirá analizar y minimizar las fuentes de variabilidad dentro de los datos cuantitativos que se obtendrán.

3.9.1. Programas para análisis de datos

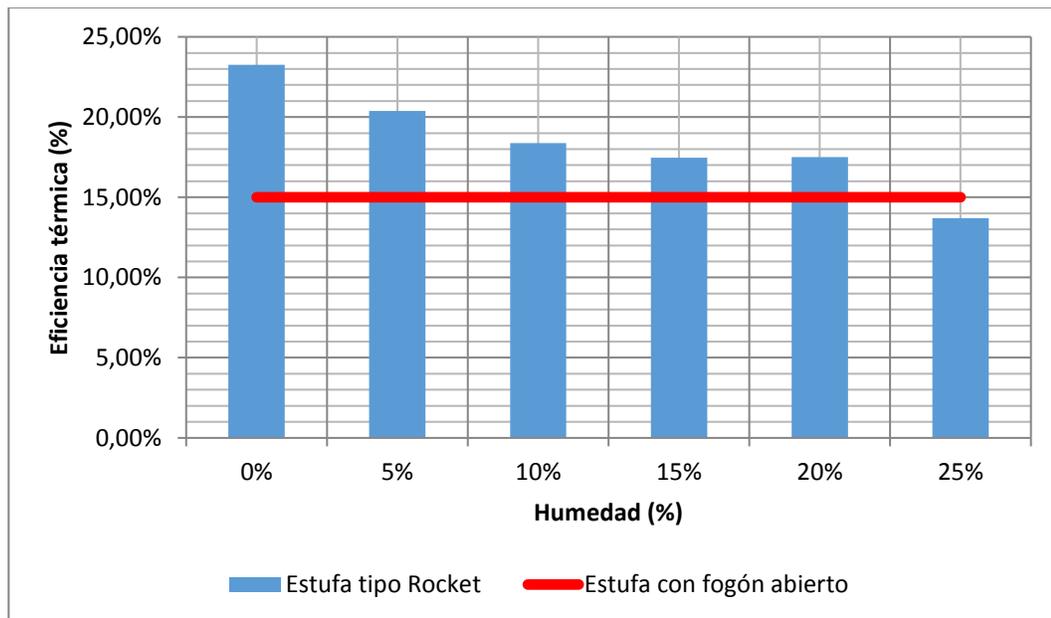
- Microsoft Word 2013
- Microsoft Excel 2013
- WBT.4.2.4 spreadsheet

4. RESULTADOS

4.1. Eficiencia energética

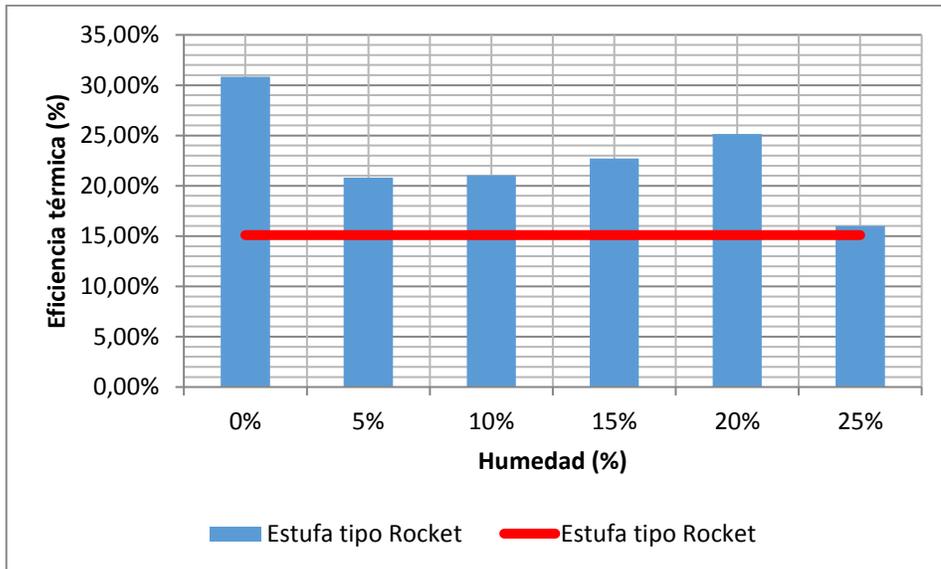
En las figuras 9 a la 11 se hace la comparación de la eficiencia térmica y humedad porcentual del material combustible para la estufa con cámara tipo Rocket y una estufa de fogón abierto.

Figura 10. Eficiencia energética del arranque en frío



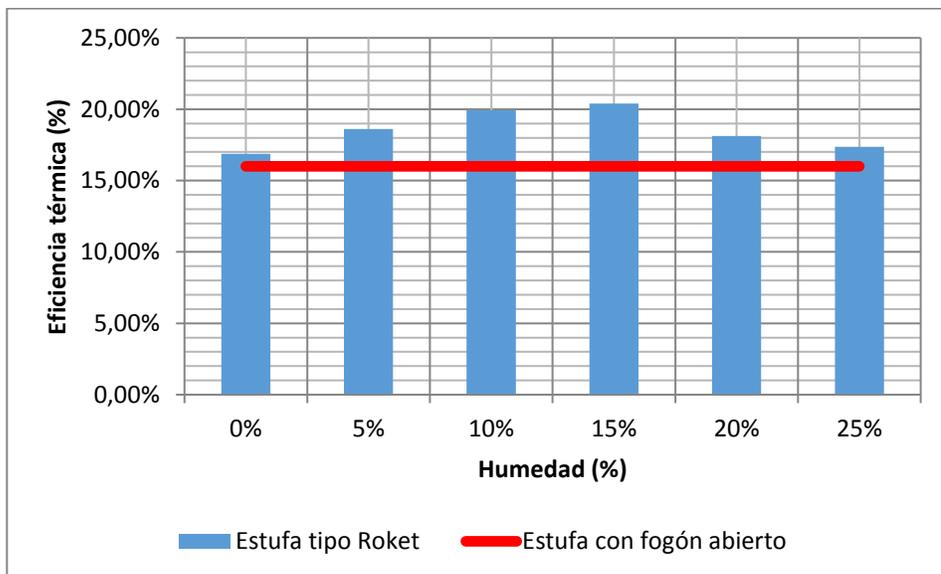
Fuente: elaboración propia.

Figura 11. **Eficiencia energética del arranque en caliente**



Fuente: elaboración propia.

Figura 12. **Eficiencia energética fase hervir a fuego lento**

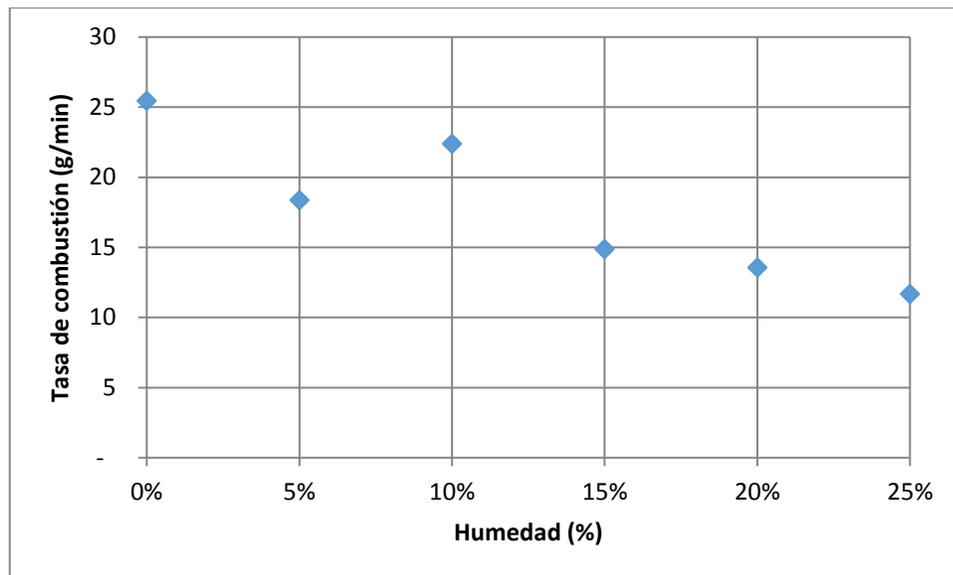


Fuente: elaboración propia.

4.2. Tasa de combustión

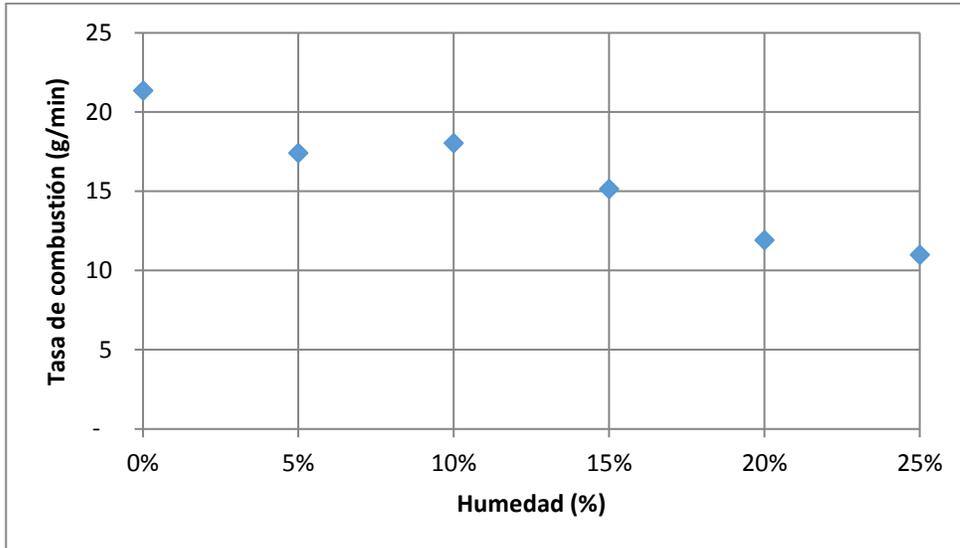
En las figuras 12 a la 14 se hace la comparación de la tasa de combustión y humedad porcentual del material combustible para la estufa con cámara tipo Rocket.

Figura 13. Tasa de combustión del arranque en frío



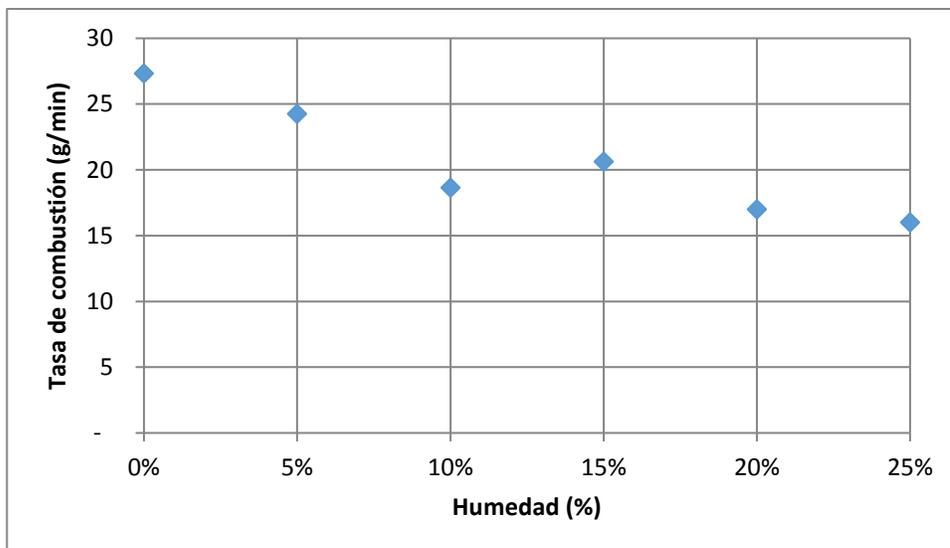
Fuente: elaboración propia.

Figura 14. Tasa de combustión del arranque en caliente



Fuente: elaboración propia.

Figura 15. Tasa de combustión de fase hervir a fuego lento

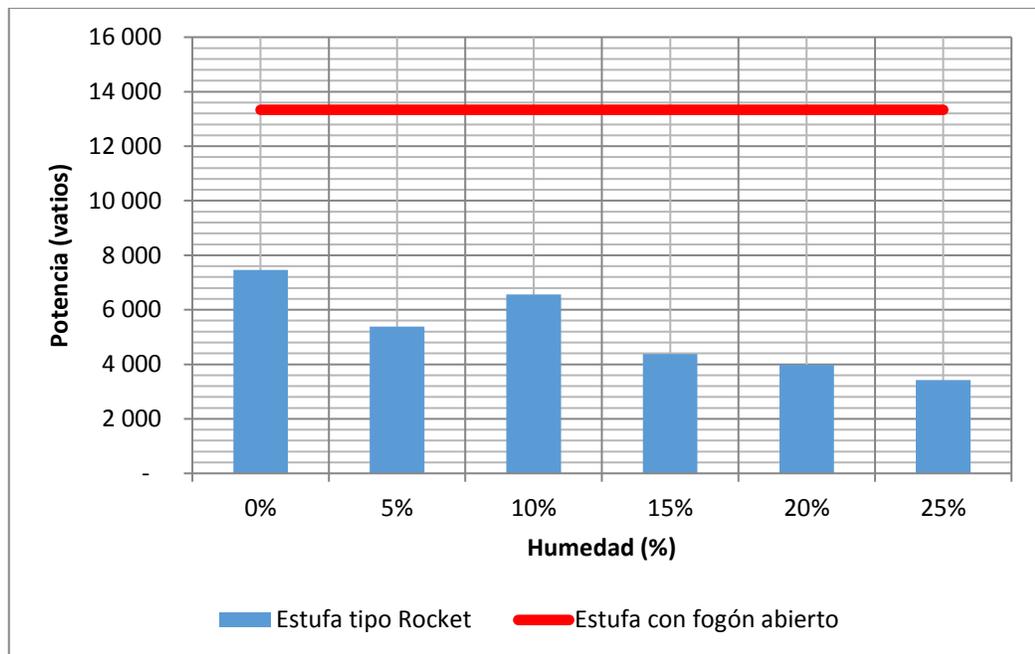


Fuente: elaboración propia.

4.3. Potencia

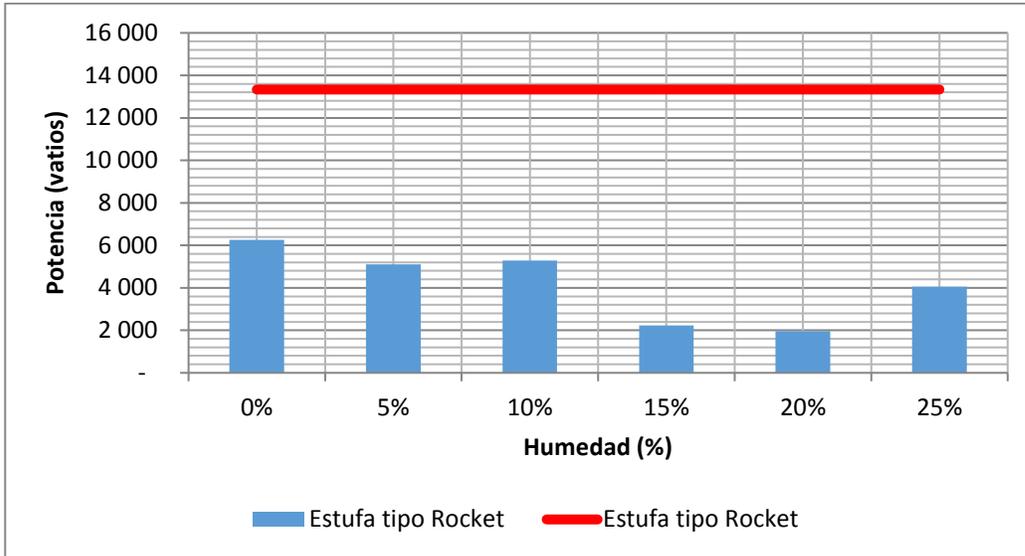
En las figuras 12 a la 14 se hace la comparación del tiempo de ebullición y humedad porcentual del material combustible para la estufa con cámara tipo Rocket y una estufa de fogón abierto.

Figura 16. Potencia en el arranque en frío



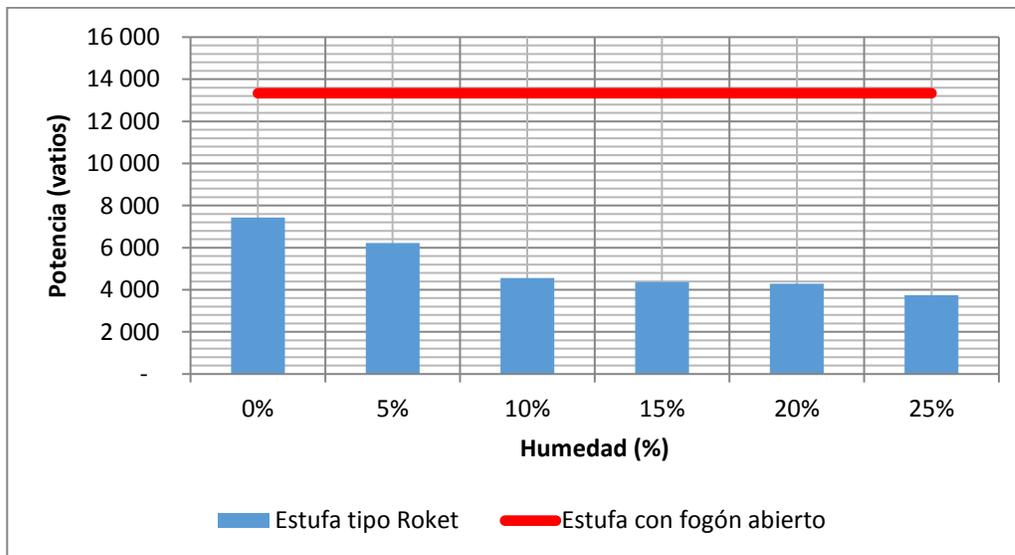
Fuente: elaboración propia.

Figura 17. **Potencia en el arranque en caliente**



Fuente: elaboración propia.

Figura 18. **Potencia en la fase de hervir a fuego lento**



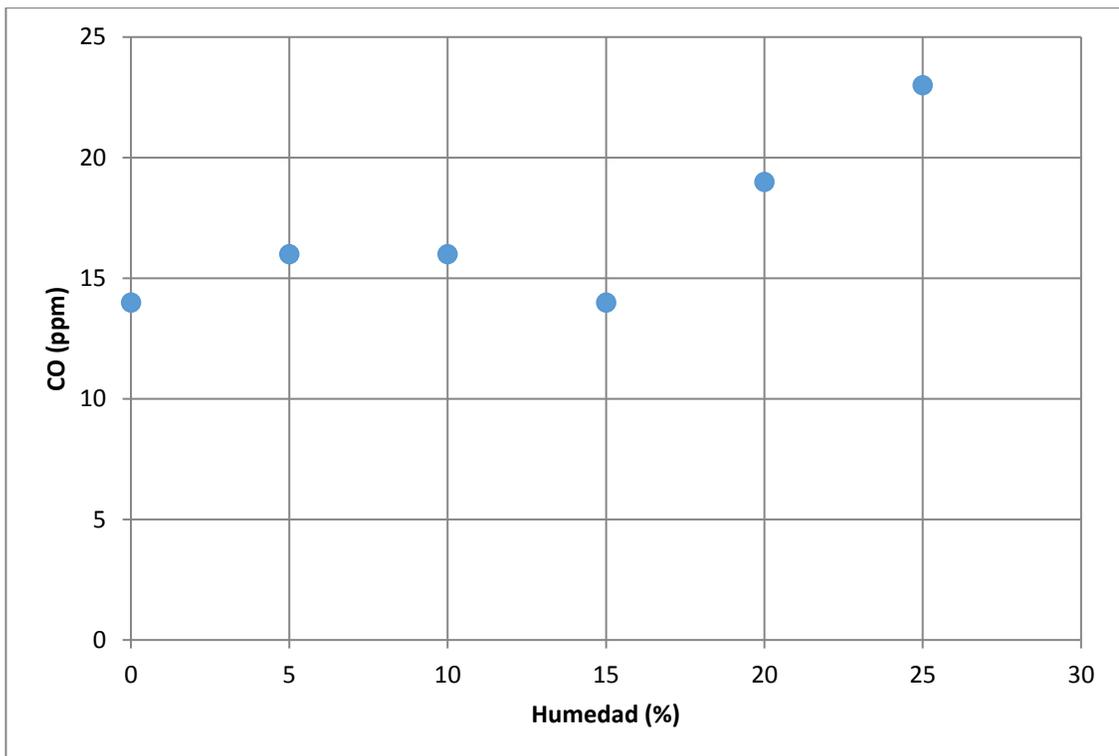
Fuente: elaboración propia.

4.4. Emisiones de CO y material particulado 2.5

Se refiere al estudio de la combustión incompleta.

Figura 19. **Emisión de monóxido de carbono (CO)**

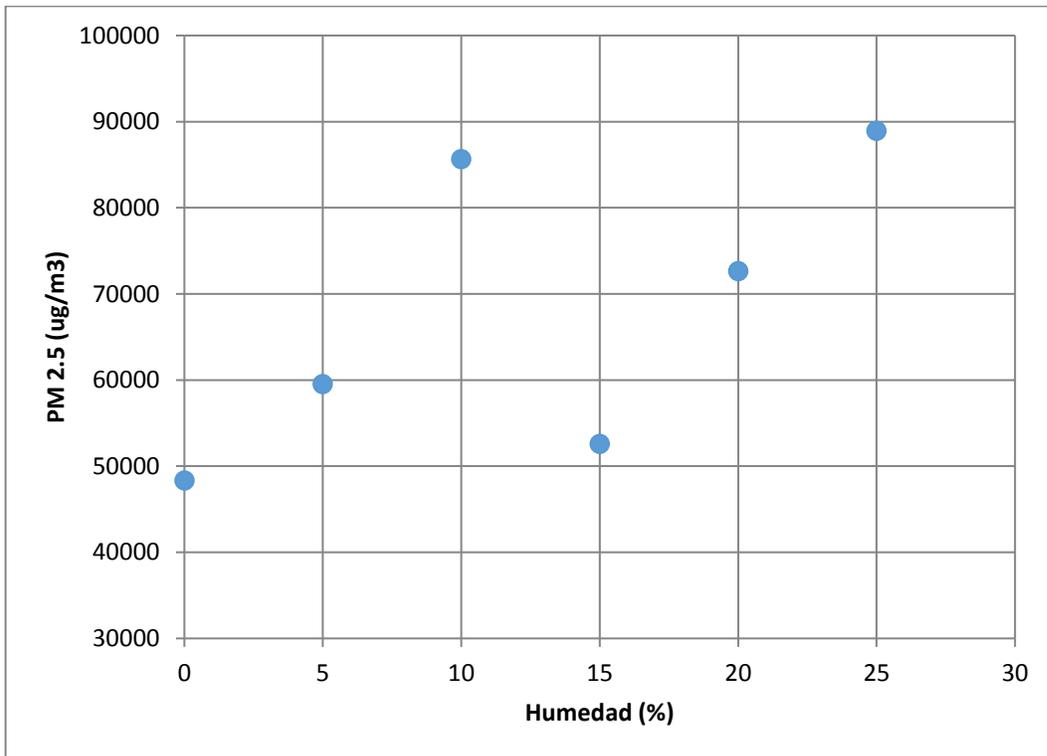
Comparación entre la emisión de monóxido de carbono de estufa con cámara tipo Rocket (experimento) y una estufa de fogón abierto.



Fuente: elaboración propia.

Figura 20. **Emisión de material particulado (PM 2,5)**

Comparación entre la emisión de material particulado de una estufa de cámara tipo Rocket (experimento y una estufa de fogón abierto).



Fuente: elaboración propia.

5. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

- Eficiencia térmica

Se determinó la eficiencia energética, tasa de combustión, potencia, la emisión de material particulado $2,5 \mu\text{m}$ y las emisiones de monóxido de carbono de una estufa con cámara de combustión tipo Rocket siguiendo las instrucciones del protocolo de ebullición de agua (WBT). Se evaluaron los resultados variando la cantidad de humedad de leña de encino blanco al 0 %, 5 %, 10 %, 15 %, 20 % y 15 %.

La prueba se realizó en tres fases de control térmico: arranque en frío, arranque en caliente y a fuego lento siendo las primeras dos fases a alta potencia y la tercera a fuego lento. Esto permitió comparar resultados variando las condiciones de inicio de cada prueba. Se pudo observar en términos generales que la fase de arranque en frío es la que consume mayor cantidad de leña por lo cual es la que tiene menor eficiencia térmica. Se puede observar que este comportamiento se mantiene al ir variando el porcentaje de humedad del combustible.

En la figura 9 se compara la eficiencia energética en la fase de arranque en frío (alta potencia) al variar el contenido de humedad de la leña. La mayor eficiencia es 23,25 % la cual se logra cuando la humedad de la leña es del 0 % y la menor eficiencia es del 13,70 % la cual se obtuvo al tener una humedad de leña del 25 %. Esto demuestra una correlación inversamente proporcional entre la eficiencia energética y el porcentaje de humedad de la leña utilizada como

combustible. Esto se debe a que el poder calorífico de la leña seca es mayor al poder calorífico de la leña humedad.

En la figura 10 se compara la eficiencia energética en la fase de arranque en caliente (alta potencia) al variar el contenido de humedad de la leña. La mayor eficiencia es del 30,85 % la cual se logra cuando la humedad de la leña es del 0 % y la menor eficiencia es del 16 % la cual se obtuvo al tener una humedad de leña del 25 %. Sin embargo, se puede observar que en esta fase de la prueba no existe una correlación entre el porcentaje de humedad de la leña y la eficiencia (ver tabla de la sección), y la tendencia de la eficiencia es a disminuir. La eficiencia disminuye debido a que la leña húmeda tiene un poder calorífico menor a la leña seca.

En la figura 11 se compara la eficiencia energética en la fase de hervir a fuego lento. Esta fase del experimento se mantiene el fuego constante durante 45 min. Se puede observar que la eficiencia no tiene una tendencia definida. En los resultados se observa que al tener una humedad del 15 % se obtiene la eficiencia térmica mayor que es 20,39 %, mientras que la menor eficiencia es del 16,88 % que se obtuvo al utilizar leña al 0 %.

La alteración y falta de una tendencia en la eficiencia se debe a los siguientes factores; en primer lugar, se toma en cuenta el peso de la olla con agua después de haberse realizado las fases de alta potencia por lo cual mientras más agua se haya vaporizado, mayor es la eficiencia. Otro factor que puede alterar los resultados es la cantidad de leña utilizada. Se sabe que, al aumentar la humedad de la leña, se debe utilizar más leña para mantener la temperatura de ebullición del agua, sin embargo, esto varía de acuerdo con la humedad del medio ambiente también por lo cual los resultados se pudieron haber favorecido en días soleados y afectado en días nublados y lluviosos. Y, por último, también

afecta el valor de la eficiencia según la temperatura a la cual se mantiene el fuego, cuando se hace un cambio de fase mientras menos baje la temperatura la eficiencia tenderá a aumentar.

Se hizo una comparación entre la estufa utilizada en el experimento y una estufa de fogón abierto que son las utilizadas comúnmente. Esto se hizo con el objetivo de poder determinar la mejor estufa. Para la fase de arranque en frío en la figura 9 la eficiencia es del 15 %, se observa que todas las eficiencias obtenidas a las diferentes humedades tienen eficiencias más altas, excepto la eficiencia obtenida con leña a 25 % de humedad. Esto determina que la estufa con cámara de combustión tipo Rocket es más eficiente que la de fogón abierto para la fase de arranque en frío utilizando leña con humedad del 5 %, 10 %, 15 %, 20 % y 25 %. En la figura 10 se la eficiencia térmica de la estufa con fogón abierto en la fase de arranque en caliente es del 15,1 %.

Todas las eficiencias obtenidas con la estufa tipo Rocket son mayores, esto permite demostrar que la estufa tipo Rocket es más eficiente que las estufas comunes de fogón abierto cuando son utilizadas con arranque en caliente. En la figura 11 se tiene la comparación con la eficiencia en la fase de hervir a fuego lento, la eficiencia de la estufa a fogón abierto es del 16 %, por lo cual se puede demostrar que la estufa Rocket es más eficiente que la de fogón abierto utilizando leña con humedad entre 0 % hasta 25 %.

- Tasa de combustión

En las figuras 12, 13 y 14 se determinaron el comportamiento de la tasa de combustión en función de la humedad de la leña al 0 %, 5 %, 10 %, 15 %, 20 % y 25 %. Se puede observar las tres figuras tienen un comportamiento parecido; disminuye la tasa de combustión al aumentar el porcentaje de humedad que tiene

la leña utilizada. En la fase de arranque en frío la eficiencia disminuye al aumentar la humedad y este es el mismo comportamiento para la tasa de combustión. Este comportamiento se debe a que una tasa de combustión más baja se debe un mal aprovechamiento de la energía debido a la humedad contenida dentro de la leña.

En la figura 10 la eficiencia aumenta al utilizar leña al 20 y 25 % de humedad, pero el comportamiento de la tasa de combustión disminuye. Este comportamiento se debe a que hay un mejor aprovechamiento de la energía disponible que brinda la leña y la humedad del fogón influye en la eficiencia, pero no en la tasa de combustión.

En la figura 14 el comportamiento de la tasa de combustión es inversamente proporcional a la humedad, la eficiencia tiende a ser mayor a una humedad del 15 %, esto demuestra que no hay correlación entre la tasa de combustión y la eficiencia cuando se hace el experimento en la fase de hervir a fuego lento. El comportamiento descendente es debido a que la a mayor humedad de la leña es más lenta la combustión.

- **Potencia**

Se hace una comparación de la potencia en función de la humedad de la leña utilizada. La potencia térmica de una estufa de leña indica la cantidad de calor que es capaz de emitir al ambiente y, por lo tanto, su capacidad para calentar un volumen de aire. En la figura 15 la mayor potencia es de 7,466 vatios y la menor es de 3,425 vatios al utilizar leña con humedad del 0 % y 25 % respectivamente, se puede observar un comportamiento inversamente proporcional entre la potencia de una estufa y el porcentaje de humedad de la leña. Este mismo comportamiento se puede observar en la figura 16, donde la

mayor potencia es de 6 263 vatios y la menor 1 963 vatios al utilizar leña con humedad de 0 % y 20 % respectivamente.

El valor obtenido con la humedad al 0 % es un valor sesgado por lo cual no se toma en cuenta. En la figura 17 la mayor potencia es de 7 433 vatios y la menor es de 3 741 vatios al utiliza leña con humedad del 0 % y 25 % respectivamente. Esto demuestra que al utilizar leña con menor porcentaje de humedad se tiene una mejor combustión y aprovechamiento de la emisión del calor. Este comportamiento es para las tres fases del experimento.

Se hizo una comparación entre la potencia de la estufa tipo Rocket y la potencia obtenida con una estufa a fogón abierto que son las de uso común. En general la potencia de una estufa a fogón abierto para las tres fases de arranque es de 13 334,66 vatios y se puede observar que es mayor que la obtenida para la estufa con fogón tipo Rocket, ver figura 15, 16 y 17. Este comportamiento se debe a que la estufa de fogón abierto tiene menos restricción con el aire que puede calentar y tiene una mayor potencia. Sin embargo, la eficiencia es menor debido a que no tiene un aislamiento y el calor de irradia a todas partes tienen un menor aprovechamiento.

- Emisión de CO y PM 2,5

En la figura 18 se hizo una comparación de la emisión de monóxido de carbono entre una estufa de uso común de fogón abierto y la estufa utilizada en el experimento de cámara tipo Rocket. Se puede observar que la estufa de fogón abierto tiene una emisión de 35,6 ppm, mientras que los resultados de la estufa tipo Rocket tiene su emisión más alta a 25 ppm que ocurre cuando la leña tiene una humedad del 25 % y la emisión más baja es de 14 ppm cuando la estufa tiene una humedad del 0 %.

En general la tendencia de los datos experimentales es que el aumento de la emisión de monóxido de carbono es directamente proporcional al aumento de la humedad de la leña utilizada. Esto se explica debido a que la leña húmeda genera más humo porque la combustión es más débil por la cantidad de agua contenida en la leña. Este comportamiento es inversamente proporcional al observado con la eficiencia de la estufa; al aumentar la humedad de la leña, la eficiencia disminuye. Por último, se observa que la estufa de fogón abierto tiene una emisión mayor de ppm lo cual significa que genera mayor cantidad de humo y, por lo tanto, es menos recomendable utilizar la estufa de fogón abierto.

En la figura 19 se observa el comportamiento de la emisión de material particulado PM 2,5 en la estufa con cámara tipo Rocket utilizada en el experimento. La leña con mayor cantidad de humedad tiende a tener una combustión menos eficaz lo cual genera mayor cantidad de humo con partículas, esto concuerda con la tendencia observada en los datos; al aumentar la humedad de la leña utilizada tiende a haber un aumento de la emisión de material particulado. El valor máximo obtenido en el experimento fue de 88 963,05 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ al utilizar leña con 25 % de humedad y el menor fue de 48 341,8 al utilizar leña al 0 % de humedad.

CONCLUSIONES

1. La eficiencia energética es mayor cuando se utiliza leña con menor cantidad de humedad por lo cual la leña con 0 % de humedad es la más eficiente para las fases de arranque en frío y caliente.
2. Se obtuvo en el análisis ANOVA para la fase de arranque en frío $F > F_c$ (ver apéndice 9) por lo cual existe diferencia significativa en la eficiencia energética en función del contenido de humedad.
3. Se obtuvo en el análisis ANOVA para la fase de arranque en caliente $F > F_c$ (ver apéndice 10), por lo cual existe diferencia significativa en la eficiencia energética en función del contenido de humedad.
4. Se obtuvo en el análisis ANOVA para la fase de hervir a fuego lento $F_c > F$ (ver apéndice 11) por lo cual existe diferencia significativa en la eficiencia energética en función del contenido de humedad.
5. La tasa de combustión de la leña disminuye al aumentar el porcentaje de humedad en la leña, por lo tanto, se obtuvo de las tasas de combustión más alta cuando la humedad fue de 0 % para la fase de arranque en frío, arranque en caliente y hervir a fuego lento.
6. La potencia de la leña disminuye al aumentar al porcentaje de humedad en la leña, por lo tanto, se obtuvo la tasa de combustión más alta cuando la humedad fue de 0 % para la fase de arranque en frío, arranque en caliente y hervir a fuego lento.

RECOMENDACIONES

1. Evitar realizar la prueba si la temperatura ambiental es mayor al 80 %; por ejemplo, no hacer la prueba antes de las 9:00 am y en días lluviosos. Esto disminuye considerablemente la eficiencia de la estufa, especialmente en el arranque en frío.
2. Si la leña tiene humedades muy elevadas, secar a temperatura ambiente evitando la utilización del horno. Esto debido a que la leña tiene un secado más uniforme y no solo superficial que ocurre con el horno.
3. Si la leña es muy seca y se necesita elevar la humedad cortar la leña hasta obtener un tamaño de 1 cm x 1 cm aproximadamente, posteriormente dejar sumergida la leña en agua por 48 horas, por lo menos, después es posible aplicar el método de la segunda recomendación.
4. El experimento se debe realizar en un lugar cerrado, evitando las puertas y ventanas abiertas. Ya que esto influye significativamente en las mediciones de emisiones de CO y PM 2,5.
5. Evaluar la eficiencia, tasa de combustión, potencia, emisiones de CO y PM 2,5 de la estufa al variar las condiciones ambientales de temperatura y humedad.

BIBLIOGRAFÍA

1. BRIZUELA, Romano. *Combustión*. [en línea] <<http://www.celing.net/ingenieria/=/c1220080205>> [consulta: 28 de marzo de 2018].
2. CHANG, Carl. *Origen cósmico: descodificando el pasado*. Colombia: Carlos L. Congrains, 2007. 372 p.
3. CHANG, Raymond. *Química*. México : McGraw-Hill, 2011. Vol. Sexta. 345 p.
4. HERNÁNDEZ, Javier Darío. *Estufas mejoradas y bancos de leña: Una alternativa de autoabastecimiento energético a nivel de finca para dependientes de los bosques de roble de la cordillera Oriental*. Colombia: Forestal, 2010. 200 p.
5. Intituto Nacional de Bosques. *Estrategia nacional de producción sostenible y uso eficiente de la leña*. Guatemala : s.e., 2013. 45 p.
6. Laboratorio de innovación y evaluación en estufas de biomasa. LINEB. *Ecotec*. [en línea]. <<http://ecotec.unam.mx/Ecotec/wp-content/uploads/Protocolo-WBT-4.2.2.pdf>> [consulta: 25 de marzo de 2018]

7. ORTIZ, Herbert Estuardo. *Experiencias en la construcción de estufas economizadoras de leña en el área rural del país*. Trabajo de graduación de Ing. Agrónomo, Universidad de San Carlos de Guatemala, 2006. 128 p.
8. PORTILLO CRUZ, Hilda. *Lineamientos para la elaboración de estufas ecológicas ahorradoras de leña, en la aldea Tablones del municipio de Zacapa, departamento de zacapa*. Trabajo de graduación de licenciatura en Pedagogía y Ciencias de la Educación, Facultad de Humanidades, Universidad de San Carlos de Guatemala, 2012. 67 p.
9. ROSALES DEL VALLE, Sebastián. *Determinación de la eficiencia termodinámica máxima y de combustión de la estufa mejorada "Doña Justa"*. Trabajo de graduación de Ing. Químico, Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 2005. 98 p.
10. SAMAYOA, José. *Estudio de sistematización de estufas ahorradoras de leña en ocho municipios del altiplano occidental de Guatemala*. San Miguel Ixtahuacán: Fundación Madre Tierra, 2009. 29 p.
11. Secretaria de Estado de la Energía. *Manual para la construcción de una estufa Rocket*. [en línea]. <<https://www.santafe.gov.ar/index.php/web/content/download/216302/1123294/file/Manual%20%20Estufas%20Rocket>>. [consulta: 25 de marzo de 2018].
12. SMITH, Van Ness. *Introducción a la termodinámica en Ingeniería Química*. México : McGraw-Hill, 1997. 845 p.

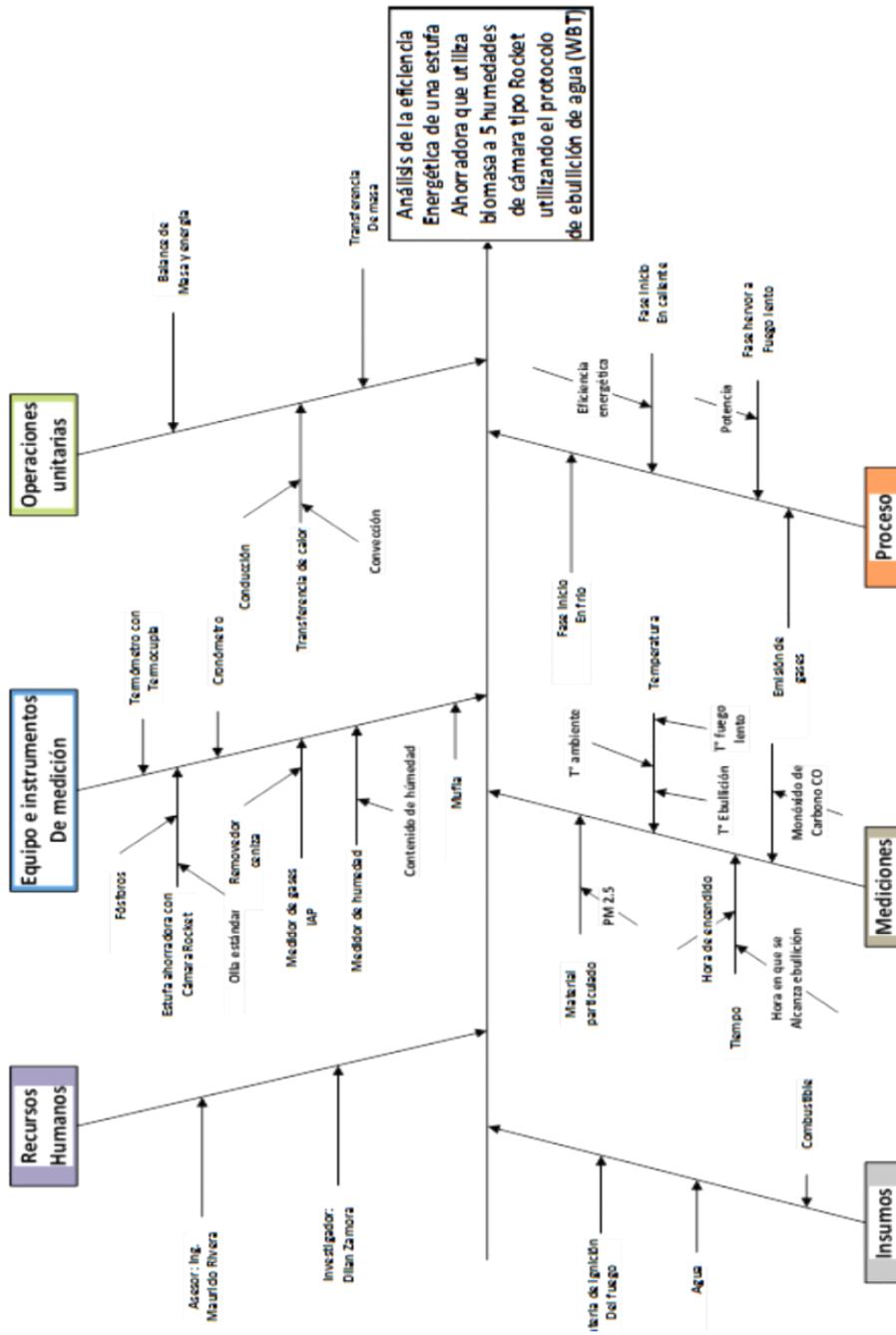
APÉNDICES

Apéndice 1. Requisitos académicos

Carrera	Área	Curso	Temática
Ingeniería Química	Área de Química	Química 3	Estequiometría. Reacciones químicas.
		Química Orgánica	Carbono, combustión
		Química Ambiental	Contaminación ambiental, contaminación del aire, emisiones de CO y material particulado
		Ecología	Preservación del medio ambiente
	Área de Operaciones Unitarias	Transferencia de Masa (IQ-4)	Difusión, secado
		Transferencia de Calor (IQ-3)	Mecanismos de transferencia de calor
		Balances de Materia (IQ-1)	Balances de masa y energía.
	Fisicoquímica	Termodinámica	eficiencia térmica, entalpías de vaporización
	Ciencias Básicas y Complementarias	Estadística 1	Estadística descriptiva
		Estadística 2	Análisis de correlación lineal

Fuente: elaboración propia.

Apendice 2. Diagrama de Ishikawa



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 3. Resultados utilizando encino blanco a 0 % de humedad

1. HIGH POWER TEST (COLD START)					
	Units	Test 1	Test 2	Test 3	Average
Time to boil Pot # 1	min	25	22	33	27
Temp-corr time to boil Pot # 1	min	26	23	34	27
Thermal efficiency	%	25%	24%	21%	23.25%
Burning rate	g/min	24.6	27.4	24.4	25
Specific fuel consumption	g/liter boiled	140.54	139.08	191.42	157.01
Temp-corr sp consumption	g/liter	144.19	143.08	196.67	161.31
Temp-corr sp energy consumpt.	kJ/liter	2,537	2,518	3,461	2,838
Firepower	vaticos	7204	8040	7153	7,466
2. HIGH POWER TEST (HOT START)					
	Units	Test 1	Test 2	Test 3	Average
Time to boil Pot # 1	min	23	25	22	23
Temp-corr time to boil Pot # 1	min	24	25	22	24
Thermal efficiency	%	37%	28%	28%	30.86%
Burning rate	g/min	17.6	21.7	24.8	21
Specific fuel consumption	g/liter boiled	93.96	126.41	125.79	115.39
Temp-corr sp consumption	g/liter	97.34	128.81	127.84	118.00
Temp-corr sp energy consumpt.	kJ/liter	1,713	2,267	2,249	2,076
Firepower	vaticos	5153	6372	7264	6,263
3. LOW POWER (SIMMER)					
	Units	Test 1	Test 2	Test 3	Average
Thermal efficiency	%	15%	17%	18%	16.88%
Burning rate	g/min	31.5	26.2	24.3	27
Specific fuel consumption	g/liter remaining	502.08	395.17	369.98	422.41
Firepower	vaticos	9,227.30	7,690.87	7,137.11	8,018.43
Turn down ratio	--	0.78	1.05	1.00	1
Specific Energy Consumption	kJ/liter	8,834.65	6,953	6,510	7,433

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 4. Resultados utilizando encino blanco a 5 % de humedad

1. HIGH POWER TEST (COLD START)	Units	Test 1	Test 2	Test 3	Average
Time to boil Pot # 1	min	54	33	34	40
Temp-corr time to boil Pot # 1	min	54	34	35	41
Thermal efficiency	%	22 %	17 %	22 %	20,37%
Burning rate	g/min	14.0	20.5	20.6	18
Specific fuel consumption	g/liter boiled	179.60	149.59	161.98	163.72
Temp-corr sp consumption	g/liter	178.17	155.82	166.42	166.81
Temp-corr sp energy consumpt.	kJ/liter	3,135	2,742	2,928	2,935
Firepower	vattios	4112	6013	6044	5,390
2. HIGH POWER TEST (HOT START)	Units	Test 1	Test 2	Test 3	Average
Time to boil Pot # 1	min	31	22	27	27
Temp-corr time to boil Pot # 1	min	30	23	28	27
Thermal efficiency	%	24%	20%	18%	0
Burning rate	g/min	18.1	22.2	12.0	17
Specific fuel consumption	g/liter boiled	125.13	104.09	74.80	101.34
Temp-corr sp consumption	g/liter	122.51	107.38	76.64	102.18
Temp-corr sp energy consumpt.	kJ/liter	2,156	1,890	1,349	1,798
Firepower	vattios	5299	6506	3515	5,107
3. LOW POWER (SIMMER)	Units	Test 1	Test 2	Test 3	Average
Thermal efficiency	%	20%	20%	16%	0
Burning rate	g/min	24.5	22.7	25.6	24
Specific fuel consumption	g/liter remaining	369.80	307.31	383.73	353.62
Firepower	vattios	7181.85	6649.25	7502.50	7111.20
Turn down ratio	--	0.57	0.90	0.81	1
Specific Energy Consumption	kJ/liter	6,507	5,408	6,752	6,222

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 5. **Resultados utilizando encino blanco a 10 % de humedad**

1. HIGH POWER TEST (COLD START)	Units	Test 1	Test 2	Test 3	Average
Time to boil Pot # 1	min	33	36	40	36
Temp-corr time to boil Pot # 1	min	33	36	39	36
Thermal efficiency	%	16%	22%	17%	18.38%
Burning rate	g/min	23.0	21.0	23.2	22
Specific fuel consumption	g/liter boiled	161	176	213	183
Temp-corr sp consumption	g/liter	161.06	177.66	210.58	183
Temp-corr sp energy consumpt.	kJ/liter	2834.09	3126.06	3705.42	3,222
Firepower	vattios	6737	6173	6794	6,568
2. HIGH POWER TEST (HOT START)	Units	Test 1	Test 2	Test 3	Average
Time to boil Pot # 1	min	25	27	30	27
Temp-corr time to boil Pot # 1	min	25	27	30	28
Thermal efficiency	%	20%	14%	29%	0
Burning rate	g/min	23.9	11.7	18.5	18
Specific fuel consumption	g/liter boiled	129.43	73.24	128.61	110
Temp-corr sp consumption	g/liter	130.47	74.43	128.61	111
Temp-corr sp energy consumpt.	kJ/liter	2,296	1,310	2,263	1,956
Firepower	vattios	7022	3421	5423	5,289
3. LOW POWER (SIMMER)	Units	Test 1	Test 2	Test 3	Average
Thermal efficiency	%	24%	14%	22%	0
Burning rate	g/min	15.1	21.8	19.1	19
Specific fuel consumption	g/liter remaining	195.28	292.39	288.72	259
Firepower	vattios	4441.48	6385.41	5588.46	5,472
Turn down ratio	--	1.52	0.97	1.22	1
Specific Energy Consumption	kJ/liter	3,436	5,145	5,080	4,554

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 6. **Resultados utilizando encino blanco a 15 % de humedad**

1. HIGH POWER TEST (COLD START)	Units	Test 1	Test 2	Test 3	Average
Time to boil Pot # 1	min	49	55	50	51
Temp-corr time to boil Pot # 1	min	50	56	51	52
Thermal efficiency	%	16%	21%	16%	17.46%
Burning rate	g/min	14.2	15.0	15.5	15
Specific fuel consumption	g/liter boiled	167.19	199.22	185.72	184.04
Temp-corr sp consumption	g/liter	172.01	203.01	188.23	187.75
Temp-corr sp energy consumpt.	kJ/liter	3,027	3,572	3,312	3,304
Firepower	vattios	4178	4388	4538	4,368
2. HIGH POWER TEST (HOT START)	Units	Test 1	Test 2	Test 3	Average
Time to boil Pot # 1	min	32	41	31	35
Temp-corr time to boil Pot # 1	min	33	42	31	35
Thermal efficiency	%	28%	22%	19%	22.72%
Burning rate	g/min	14.3	12.6	18.5	15
Specific fuel consumption	g/liter boiled	111.24	125.43	135.82	124.17
Temp-corr sp consumption	g/liter	113.98	129.04	137.84	126.96
Temp-corr sp energy consumpt.	kJ/liter	2,006	2,271	2,426	2,234
Firepower	vattios	4197	3694	5439	4,443
3. LOW POWER (SIMMER)	Units	Test 1	Test 2	Test 3	Average
Thermal efficiency	%	21%	18%	22%	20.39%
Burning rate	g/min	23.0	20.2	18.7	21
Specific fuel consumption	g/liter remainin g	402.35	295.23	283.31	326.96
Firepower	vattios	6738.92	5926.11	5483.59	6049.54
Turn down ratio	--	0.62	0.74	0.83	1
Specific Energy Consumption	kJ/liter	7,080	5,195	4,985	5,753

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 7. **Resultados utilizando encino blanco a 20 % de humedad**

1. HIGH POWER TEST (COLD START)	Units	Test 1	Test 2	Test 3	Average
Time to boil Pot # 1	min	55	61	72	63
Temp-corr time to boil Pot # 1	min	55	61	73	63
Thermal efficiency	%	15%	15%	22%	17.50%
Burning rate	g/min	16.5	15.0	9.2	14
Specific fuel consumption	g/liter boiled	206.70	207.68	152.43	188.94
Temp-corr sp consumption	g/liter	206.42	208.52	154.70	189.88
Temp-corr sp energy consumpt.	kJ/liter	3,632	3,669	2,722	3,341
Firepower	váticos	4850	4387	2702	3,980
2. HIGH POWER TEST (HOT START)	Units	Test 1	Test 2	Test 3	Average
Time to boil Pot # 1	min	34	41	52	42
Temp-corr time to boil Pot # 1	min	34	42	53	43
Thermal efficiency	%	26%	26%	23%	25.16%
Burning rate	g/min	13.4	11.5	10.8	12
Specific fuel consumption	g/liter boiled	100.36	104.63	126.40	110.46
Temp-corr sp consumption	g/liter	100.49	107.20	127.76	111.82
Temp-corr sp energy consumpt.	kJ/liter	1,768	1,886	2,248	1,968
Firepower	váticos	3922	3383	3176	3,494
3. LOW POWER (SIMMER)	Units	Test 1	Test 2	Test 3	Average
Thermal efficiency	%	14%	22%	18%	18.14%
Burning rate	g/min	26.7	7.1	14.7	16
Specific fuel consumption	g/liter remaining	329.04	215.51	186.26	243.60
Firepower	váticos	7831.87	2076.65	4297.03	4735.19
Turn down ratio	--	0.62	2.11	0.63	1
Specific Energy Consumption	kJ/liter	5,790	3,792	3,277	4,286

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 8. **Resultados utilizando encino blanco a 25 % de humedad**

1. HIGH POWER TEST (COLD START)	Units	Test 1	Test 2	Test 3	Average
Time to boil Pot # 1	min	72	75	74	74
Temp-corr time to boil Pot # 1	min	73	76	75	74
Thermal efficiency	%	12%	17%	13%	13.70%
Burning rate	g/min	13.0	9.5	12.5	12
Specific fuel consumption	g/liter boiled	202.33	156.61	204.86	187.93
Temp-corr sp consumption	g/liter	205.34	158.08	206.79	190.07
Temp-corr sp energy consumpt.	kJ/liter	3,613	2,782	3,639	3,344
Firepower	vatos	3819	2776	3680	3,425
2. HIGH POWER TEST (HOT START)	Units	Test 1	Test 2	Test 3	Average
Time to boil Pot # 1	min	52	60	61	58
Temp-corr time to boil Pot # 1	min	53	61	62	58
Thermal efficiency	%	15%	19%	14%	16.00%
Burning rate	g/min	16.0	11.4	14.2	14
Specific fuel consumption	g/liter boiled	182.89	153.03	191.38	175.77
Temp-corr sp consumption	g/liter	185.61	154.89	193.71	178.07
Temp-corr sp energy consumpt.	kJ/liter	3,266	2,725	3,408	3,133
Firepower	vatos	4684	3330	4176	4,063
3. LOW POWER (SIMMER)	Units	Test 1	Test 2	Test 3	Average
Thermal efficiency	%	15%	20%	17%	17.38%
Burning rate	g/min	19.4	16.1	16.5	17
Specific fuel consumption	g/liter remaining	235.76	205.88	196.11	212.58
Firepower	vatos	5700.26	4722.96	4833.60	5085.61
Turn down ratio	--	0.67	0.59	0.76	1
Specific Energy Consumption	kJ/liter	4,148	3,623	3,451	3,741

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 9. **Análisis ANOVA de la fase inicio frío a alta potencia
utilizando humedad de 0 % - 25 %**

RESUMEN						
<i>Grupos</i>	<i>Cuenta</i>	<i>Suma</i>	<i>Promedio</i>	<i>Varianza</i>		
Fila 1	3	0.69742	0.23247	0.00045		
Fila 2	3	0.61114	0.20371	0.00064		
Fila 3	3	0.55142	0.18381	0.00117		
Fila 4	3	0.52393	0.17464	0.00102		
Fila 5	3	0.52504	0.17501	0.00155		
Fila 6	3	0.41095	0.13698	0.00066		
ANÁLISIS DE VARIANZA						
<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Entre grupos	0.015	5.000	0.003	3.353	0.040	3.106
Dentro de los grupos	0.011	12.000	0.001			
Total	0.026	17.000				

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 10. **Análisis ANOVA de la fase inicio caliente a alta potencia
utilizando humedad de 0 % - 25 %**

RESUMEN						
<i>Grupos</i>	<i>Cuenta</i>	<i>Suma</i>	<i>Promedio</i>	<i>Varianza</i>		
Fila 1	3	0.92568	0.30856	0.00282		
Fila 2	3	0.62428	0.20809	0.00089		
Fila 3	3	0.63125	0.21042	0.00580		
Fila 4	3	0.68149	0.22716	0.00208		
Fila 5	3	0.75488	0.25163	0.00027		
Fila 6	3	0.47997	0.15999	0.00089		
ANÁLISIS DE VARIANZA						
<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Entre grupos	0.0371	5.0000	0.0074	3.4941	0.0352	3.1059
Dentro de los grupos	0.0255	12.0000	0.0021			
Total	0.0626	17.0000				

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 11. **Análisis ANOVA de fase contante a baja potencia
utilizando humedad de 0 % - 25 %**

RESUMEN						
Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza		
Fila 1	3	0.50634	0.16878	0.00025		
Fila 2	3	0.55867	0.18622	0.00038		
Fila 3	3	0.59820	0.19940	0.00252		
Fila 4	3	0.61177	0.20392	0.00040		
Fila 5	3	0.54405	0.18135	0.00142		
Fila 6	3	0.52136	0.17379	0.00064		
ANÁLISIS DE VARIANZA						
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	0.0029	5.0000	0.0006	0.6204	0.6873	3.1059
Dentro de los grupos	0.0112	12.0000	0.0009			
Total	0.0141	17.0000				

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 12. **Análisis ANOVA de la emisión de material particulado a
PM 2.5 y monóxido de carbono**

Análisis de varianza de un factor						
RESUMEN						
Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza		
Columna 1	6	75	12.5	87.5		
Columna 2	6	407812.38	67968.73	293664477		
Columna 3	6	102	17	12		
ANÁLISIS DE VARIANZA						
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	18470973652	2	9.235E+09	94.347302	3.187E-09	3.6823203
Dentro de los grupos	1468322881	15	97888192			
Total	19939296533	17				

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 13. Muestra de cálculo

- Cálculo de calor sensible

$$Q_s = C_p * \Delta T * m$$

Donde

Q_s = calor sensible

C_p = calor específico

ΔT = cambio de temperatura

m = masa

Ejemplo: cálculo de calor para una masa de 890 g de agua desde una temperatura de 19,8 ° C hasta 92,9 °C, el C_p del agua es de 4,186 J/gC°

$$Q_s = C_p * \Delta T * m = 4,186 * (92,9 - 19,8) * 890 = 272336,9 J$$

Cálculo de eficiencia

$$\eta = \frac{(Q_s + Q_{vap})}{Q_d} * 100$$

Donde

η = eficiencia energética

Q_s = calor sensible

Q_{vap} = calor de vaporización del agua

Q_d = calor disponible del combustible

Continuación apéndice 13.

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

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

$$\eta = \frac{(Q_s + Q_{vap})}{Q_d} * 100 = \left(\frac{1\ 223\ 986 + 2\ 011\ 400}{26\ 394\ 000} \right) * 100 = 12 \%$$

Cálculo de tasa de combustión

$$\eta = \frac{Meq}{teb}$$

Donde:

Tc = tasa de combustión

Meq = masa equivalente de combustible consumido

teb = tiempo en llegar a ebullición

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

$$\eta = \frac{Meq}{teb} = \frac{1\ 982}{84} = 23,59\ g/min$$

Continuación apéndice 13.

Cálculo de la potencia de fuego

$$Pt = \frac{m * LHV}{\Delta T * 60}$$

Donde

Pt = potencia fuego

ΔT = cambio de temperatura

LHV = valor calorífico neto (kJ/kg)

m = combustible consumido (g)

Fuente: elaboración propia.

ANEXOS

Anexo 1. **Aeroqual series 300**



Fuente: GUTIERREZ, Mynor. *GasSensing*. <https://www.gas-sensing.com/aeroqual-series-200.html#960=>. Consulta: 6 de agosto de 2018.

Anexo 2. **Medidor de humedad de la leña Radwag Máx 50/N.**



Fuente: MENDIZABAL, Ester. *Equinlab*. <http://www.equinlabsac.com/content/balanza-analizadora-de-humedad-radwag-max-50-1>. Consulta: 6 de agosto de 2018.

Anexo 3. **Termómetro digital**



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

Anexo 4. Campana extracción de gases



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

Anexo 5. Leña y balanza digital



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

