

ANÁLISIS DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA DE ESTUFAS AHORRADORAS DE LEÑA, CUATRO TIPO PLANCHA Y UNA ESTUFA FOGÓN ABIERTO UTILIZANDO EL PROTOCOLO DE PRUEBA DE EBULLICIÓN DE AGUA (WBT)

Silvia Noemí Hernández Tecún

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

Guatemala, octubre de 2019

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

ANÁLISIS DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA DE ESTUFAS AHORRADORAS DE LEÑA, CUATRO TIPO PLANCHA Y UNA ESTUFA FOGÓN ABIERTO UTILIZANDO EL PROTOCOLO DE PRUEBA DE EBULLICIÓN DE AGUA (WBT)

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

SILVIA NOEMÍ HERNÁNDEZ TECÚN

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

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERA QUÍMICA

GUATEMALA, OCTUBRE DE 2019

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Aurelia Anabela Cordova Estrada
VOCAL I	Ing. José Francisco Gómez Rivera
VOCAL II	Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Luis Diego Aguilar Ralón
VOCAL V	Br. Cristian Daniel Estrada Santizo
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera López

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	ing. Ped	ro Antonio /	Aguilar P	olanco

EXAMINADOR Ing. Gerardo Ordóñez

EXAMINADOR Ing. Julio David Vargas García

EXAMINADOR Ing. Juan Pablo Argueta Elías

SECRETARIA Inga. Lesbia Magalí Herrera López

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

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

ANÁLISIS DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA DE ESTUFAS AHORRADORAS DE LEÑA,
CUATRO TIPO PLANCHA Y UNA ESTUFA FOGÓN ABIERTO UTILIZANDO EL
PROTOCOLO DE PRUEBA DE EBULLICIÓN DE AGUA (WBT)

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

Silvia Noemí Hernández Tecún

Ingeniero
Williams Guillermo Álvarez Mejía
DIRECTOR
Escuela Ingeniería Química
Presente

Estimado Ingeniero Williams 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: "ANÁLISIS DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA DE ESTUFAS AHORRADORAS DE LEÑA, CUATRO TIPO PLANCHA Y UNA ESTUFA FOGÓN ABIERTO UTILIZANDO EL PROTOCOLO DE PRUEBA DE EBULLICIÓN DE AGUA (WBT)", elaborado por el estudiante de la carrera de Ingeniería Química, Silvia Noemí Hernández Tecún, quien se identifica con el registro académico 2010-10660 y con el CUI 1581 99340 01 08.

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

Atentamente,

Ing. Qco. Jorge Emilio Godínez Lemus

ASESOR

Ingeniero Químico Colegiado activo no. 874

> ing. Jorge Emilio Godinez Lemus INGENIERO QUÍMICO



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

Guatemala, 23 de septiembre de 2019. Ref. EIQ.TG-IF.036.2019.

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

Estimado Ingeniero Álvarez:

Como consta en el registro de evaluación del informe final correlativo **035-2017** le informo que reunidos los Miembros de la Terna nombrada por la Escuela de Ingeniería Química, se practicó la revisión del:

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

Solicitado por la estudiante universitaria: Silvia Noemí Hernández Tecún. Identificada con número de carné: 1581993400108. Identificada con registro académico: 201010660. Previo a optar al título de INGENIERA QUÍMICA.

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

ANÁLISIS DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA DE ESTUFAS AHORRADORAS DE LEÑA, CUATRO TIPO PLANCHA Y UNA ESTUFA FOGÓN ABIERTO UTILIZANDO EL PROTOCOLO DE PRUEBA DE EBULLICIÓN DE AGUA (WBT)

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

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

AREA
TRABAJOS
TRABAJOS
TRABAJOS
GRADUACION

AND
TRABAJOS

"ID Y ENSEÑAD A TODOS"

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

C.c.: archivo









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

Ref.EIQ.TG.064.2019

El Director de la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor y de los Miembros del Tribunal nombrado por la Escuela de Ingeniería Química para revisar el Informe del Trabajo de Graduación, de la carrera de Ingeniería Química, de la estudiante, SILVIA NOEMÍ HERNÁNDEZ TECÚN titulado: "ANÁLISIS DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA DE ESTUFAS AHORRADORAS DE LEÑA, CUATRO TIPO PLANCHA Y UNA ESTUFA FOGÓN ABIERTO UTILIZANDO EL PROTOCOLO DE PRUEBA DE EBULLICIÓN DE AGUA (WBT)". Procede a la autorización del mismo, ya que reúne el rigor, la secuencia, la pertinencia y la coherencia metodológica requerida.

"Id y Enseñad a Todos"

Ing. Williams G. Alvarez Mejía, M.L.Q., M.U.I.E

DIRECTOR

Escuela de Ingeniería Química

Guatemala, octubre de 2019

Cc: Archivo WGAM/ale





Universidad de San Carlos de Guatemala



DTG.499.2019

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Química, al Trabajo de Graduación titulado: ANÁLISIS DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA DE ESTUFAS **AHORRADORAS** LEÑA, CUATRO TIPO **ESTUFA** PLANCHA UNA **FOGÓN ABIERTO** UTILIZANDO EL PROTOCOLO DE PRUEBA DE EBULLICIÓN DE AGUA (WBT), presentado por la estudiante universitaria: Silvia Noemí Hernández Tecún, 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 2019

/gdech



ACTO QUE DEDICO A:

Dios

Por ser mi padre celestial y darme salud, sabiduría y entendimiento a lo largo de mi vida, por bendecirme grandemente y nunca dejarme. Te amo.

Mis padres

Santos Humberto Hernández y Ester de Hernández por ser mis motores para seguir adelante, por sus consejos, amor y el sacrificio que hicieron para que pudiera alcanzar esta meta, los amo.

Mis hermanas

Mery Tecúm y Judit Hernández por su comprensión, amor, apoyo y poder ser un ejemplo para sus vidas.

Mi hermano

Henry Hernández por ser un gran ejemplo en mi vida, por creer en mí, por su apoyo y fortaleza a lo largo de mi vida.

AGRADECIMIENTOS A:

Universidad de San Carlos de Guatemala Por ser mi casa de estudios, en donde me formaron profesionalmente.

Facultad de Ingeniería

Por brindarme la oportunidad de aprender y crecer profesionalmente y por permitirme conocer a personas únicas en mi vida.

Kimberly Lavicount

Por ser la amiga que me brindó su apoyo incondicional en todo momento y su sincera amistad, te quiero.

.

Mis amigos

Por creer en mí, apoyarme a lo largo de mi vida y brindarme su sincera amistad, especialmente a Brenda Rac, Blanca Rac, Paola Juárez, Iván Navarro, Diana Cermeño, William Morales, Nilda Capriel, Rafael Yol, Leslie Oliva y Karol Esquit. Los quiero.

Sección Tecnología de la Madera Por abrir las puertas de sus instalaciones para realizar la parte experimental de mi investigación y poder culminar esta meta, especialmente a los ingenieros Jessiel Enríquez y Fredy Contreras por su apoyo y conocimiento.

Ingeniero Jorge Godínez

Por ser un profesional que practica la ética, los valores y ofrece el conocimiento que todo estudiante necesita para formarse profesionalmente.

Ingeniero Mauricio Rivera

Por el tiempo dedicado, su paciencia y compartirme todos sus conocimientos y enseñanzas para culminar mi formación profesional. Infinitas gracias.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDI	ICE DE IL	.USTRACI	ONES	IX
LIST	A DE SÍN	MBOLOS .		XI
GLC	SARIO			XIII
RES	SUMEN			XVII
OBJ	ETIVOS.			XIX
HIP	ÓTESIS			XXI
INT	RODUCC	IÓN		XXV
1.	ANTEC	CEDENTE	S	1
	1.1.	Justifica	ación	6
	1.2.	Determi	nación del problema	7
		1.2.1.	Definición	7
		1.2.2.	Delimitación	8
2.	MARC	O TEÓRIC	;o	15
	2.1.	Fenóme	enos de transferencia de calor	15
		2.1.1.	Transferencia de calor por conducción	15
		2.1.2.	Transferencia de calor por convección	16
		2.1.3.	Transferencia de calor por radiación	16
	2.2.	Temper	atura	17
	2.3.	Calor se	ensible y latente	17
	2.4.	Capacio	dad calorífica	17
	2.5.	Cambio	climático	18
	2.6.	Cocina	tradicional	18
	2.7.	Estufa a	ahorradora	19

	2.7.1.	Las venta	ajas y desventajas de las estufas	
		ahorradora	as	.20
		2.7.1.1.	Las estufas ahorradoras de leña	
			tienen las siguientes ventajas	20
		2.7.1.2.	Presenta las desventajas siguientes	.20
	2.7.2.	Perspectiv	ras del desarrollo de una estufa	
		ahorradora	a	.21
2.8.	Caracte	rísticas gene	rales de una estufa ahorradora	.23
	2.8.1.	Compone	ntes de una estufa tipo plancha	.24
		2.8.1.1.	Chimenea	.25
		2.8.1.2.	Plancha	.25
		2.8.1.3.	Anillos o discos	.25
		2.8.1.4.	Base de chimenea	.25
		2.8.1.5.	Cámara de combustión	.26
		2.8.1.6.	Base de la estufa	.26
		2.8.1.7.	Sombrero o capuchón	.26
		2.8.1.8.	Compuerta	.27
		2.8.1.9.	Gancho	.28
2.9.	Tipo de	leña: Quercu	s spp (Familia Fagaceae)	.28
	2.9.1.	Usos		.29
	2.9.2.	Propagaci	ón y manejo	.29
	2.9.3.	Factores of	que influyen en la energía que produce	
		la leña		.30
		2.9.3.1.	Densidad de la madera	.30
		2.9.3.2.	Contenido de humedad	.31
		2.9.3.3.	Sanidad de la leña	.31
		2.9.3.4.	Valor calorífico de algunas especies	
			forestales para leña	.31
2 10	Proceso	de nasificac	ión de madera	32

	2.10.1.	Secado		3	32
	2.10.2.	Pirólisis		3	32
	2.10.3.	Reducción	1	3	32
	2.10.4.	Oxidación		3	32
	2.10.5.	Combustić	ón	3	33
		2.10.5.1.	Calor de con	nbustión3	34
		2.10.5.2.	Proceso de l	a combustión3	34
		2.10.5.3.	Combustión	de biomasa3	35
			2.10.5.3.1.	Características	
				químicas 3	35
2.11.	Alianza C	Global para e	stufas limpias	(Global Alliance for clean	
	Cooksto	/es)		3	36
2.12.	Pruebas	aplicadas pa	ara estufas aho	orrativas3	37
	2.12.1.	Prueba de	ebullición de a	agua (WBT)3	37
		2.12.1.1.	Beneficios y	limitaciones del WBT 3	38
		2.12.1.2.	Eficiencia en	ergética3	38
			2.12.1.2.1.	Para la fase de alta	
				potencia de inicio frío 3	38
			2.12.1.2.2.	La fase de alta	
				potencia de inicio	
				caliente3	39
			2.12.1.2.3.	La fase de hervir a	
				fuego lento 3	39
		2.12.1.3.	Pruebas de l	Emisiones3	39
		2.12.1.4.	Cambio neto	o en carbón durante la	
			fase de la pr	ueba4	ł0
		2.12.1.5.	Consumo es	pecífico de combustible 4	10
		2.12.1.6.	Concentració	ón relativa máxima de	
			monóxido de	e carbono CO4	10

			2.12.1.7.	Material parti	iculado (PN	Л)		41
				2.12.1.7.1.	Concenti	ració	n relativa	
					máxima	de	material	
					particula	do P	M 2,5	41
3.	MARCO) METODO	LÓGICO					43
	3.1.	Variables	del método					43
		3.1.1.	Variables of	de operación				43
			3.1.1.1.	Humedad de	l ambiente			43
			3.1.1.2.	Presión				43
		3.1.2.	Variables of	de proceso				44
			3.1.2.1.	Temperatura	de ebullici	ón		44
			3.1.2.2.	Masa de con	nbustible			44
			3.1.2.3.	Masa del agu	ла			44
	3.2.	Delimitad	ión del cam	po de estudio				46
		3.2.1.	Campo de	estudio				46
		3.2.2.	Etapas que	e conforman la	investigad	ión		46
		3.2.3.	Ubicación	del desarrollo	de la inves	tigac	ión	46
	3.3.	Recursos	humanos d	lisponibles				47
	3.4.	Recursos	s y materiale	s disponibles				47
		3.4.1.	Equipo					47
		3.4.2.	Instrument	os de medició	n			48
		3.4.3.	Materia pri	ma				48
		3.4.4.	Materiales	para medición	de tempe	ratur	a	48
		3.4.5.	Cristalería					49
		3.4.6.	Materiales	para la obtend	ción de carl	bón .		49
	3.5.	Técnicas	cualitativas	o cuantitativas	3			49
		3.5.1.	Técnica cu	ıantitativa				49

		3.5.1.1.	Para la fase d	de alta potencia de inicio	
			frío		49
		3.5.1.2.	La fase de	alta potencia de inicio	
			caliente		50
		3.5.1.3.	La fase de he	ervir a fuego lento	50
3.6.	Recolec	ción de	información y	ordenamiento de la	
	informa	ción			50
	3.6.1.	Informac	ión general		51
		3.6.1.1.	Condiciones a	ambientales	51
		3.6.1.2.	Selección del	combustible	53
		3.6.1.3.	Preparación o	diaria	54
			3.6.1.3.1.	Preparación del	
				combustible	54
			3.6.1.3.2.	Preparación de la	
				muestra	54
	3.6.2.	Consider	aciones importar	ntes para la prueba	55
	3.6.3.	Procedim	niento metodológ	ico experimental	56
		3.6.3.1.	Instrucciones	para cada fase del	
			WBT		56
			3.6.3.1.1.	Fase I. Inicio en frío	
				(alta potencia)	56
			3.6.3.1.2.	Fase II. Inicio caliente	57
			3.6.3.1.3.	Fase III. Baja potencia,	
				hervir a fuego lento	58
		3.6.3.2.	Medición del	punto de ebullición del	
			agua en la oll	a	59
		3.6.3.3.	Medición de	las emisiones CO y	
			PM _{2,5}		59
		3.6.3.4.	Poder calorífi	CO	59

		3.6.4.	Hoja de da	atos origina	ıles				60
	3.7.	Tabulació	n, ordena	amiento y	, p	rocesamiento	de	la	
		informació	ón						62
		3.7.1.	Tabulación	n y ordenar	mient	to			62
		3.7.2.	Procesam	iento					62
	3.8.	Análisis e	stadístico						64
		3.8.1.	Medida de	tendencia	cent	tral			64
		3.8.2.	Medidas d	e dispersió	n				65
	3.9.	Plan de a	nálisis de lo	s resultado	os				66
		3.9.1.	Métodos	y modelos	de l	los datos segúr	tipo (de	
			variables						66
		3.9.2.	Programas	s por utiliza	ır par	ra el análisis de	datos		66
		3.9.3.	Microsoft (Office Word	d 365	5			66
		3.9.4.	Microsoft I	Excel 365					66
		3.9.5.	WBT 4.2.4	SPREAD	SHE	ET			67
4.	RESULT	ADOS							69
	4.1.	Comparad	ción del por	centaje de	eficie	encia energética	en fa	se	
		inicio en f	río						69
	4.2.	Comparad	ción del por	centaje de	eficie	encia energética	en fa	se	
		arranque	caliente						70
	4.3.	Comparad	ción del por	centaje de	eficie	encia energética	en fa	se	
		hervir a fu	ego lento						71
		4.3.1.	Comparac	ión del tien	npo d	que tarda en alc	anzar	el	
			punto de e	ebullición el	agu	a en fase: inicio	en frí	o	72
		4.3.2.	Comparac	ión del tien	npo d	que tarda en alc	anzar	el	
			punto de	ebullición	el a	gua en fase: a	arranq	ue	
			caliente						72

	4.4.	Compara	ción de la desviación estándar de la eficiencia	
		energética	a de las tres fases	73
	4.5.	Compara	ción del porcentaje de área utilizada en la prueba	74
	4.6.	Compara	ción de concentración de emisiones de monóxido	
		de carbor	no (CO)	75
	4.7.	Compara	ción de concentración de emisiones de material	
		particulad	do (PM 2,5)	76
		4.7.1.	Comparación de la desviación estándar de	
			emisiones de monóxido de carbono (CO) y	
			material particulado (PM 2,5)	77
	4.8.	Compara	ción del porcentaje de reducción de emisiones de	
		material p	particulado (PM 2,5) y monóxido de carbón (CO)	78
5.	INTERP	RETACIÓN	N DE RESULTADOS	79
CON	CLUSION	ES		89
RECO	OMENDA	CIONES		91
BIBLI	OGRAFÍA	١		93
APÉN	IDICES			97
V VIE Z	/OS		,	110

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Fogón abierto	19
2.	Procesos involucrados en el desarrollo de una estufa ahorradora	21
3.	Estufa tipo plancha (Onil)	24
4.	Base de estufa ahorradora	26
5.	Sombrero de una estufa ahorradora	27
6.	Base de estufa ahorradora	27
7.	Componentes de una estufa ahorradora de leña	28
8.	Quercus spp (Familia Fagaceae)	30
9.	Proceso de gasificación de madera	33
10.	Proceso de combustión	34
11.	Análisis de cocinas limpias libre de humo por Alianza Global	36
12.	Información general de la prueba WBT	52
13.	Información general del combustible	53
14.	Hoja de toma de datos	60
15.	Hoja de toma de datos para las tres fases	61
16.	Eficiencia energética fase inicio en frío	69
17.	Eficiencia energética fase arranque en caliente	70
18.	Eficiencia energética fase hervir a fuego lento (45 min)	71
19.	Área superficial vs eficiencia energética	74
20.	Emisión de monóxido de carbono (CO) total de cada estufa	75
21.	Emisión de PM 2,5 total de cada estufa	76
22.	Emisiones de PM 2,5 y monóxido de carbono (CO) total de cada	
	estufa	78

TABLAS

I.	Caracterización estufa A	9
II.	Caracterización estufa B	10
III.	Caracterización estufa C	11
IV.	Caracterización estufa D	12
V.	Caracterización fogón abierto	13
VI.	Descripción de las variables de procedimiento	45
VII.	Emisiones (CO) y material particulado (MP 2,5)	62
VIII.	Eficiencia energética	63
IX.	Tiempo de ebullición	63
Χ.	Tiempo de ebullición fase arranque en frío	72
XI.	Tiempo de ebullición fase arranque en caliente	73
XII.	Desviación estándar, eficiencia energética	73
XIII.	Desviación estándar, CO y PM 2,5	77

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo Significado

H₂O Agua

cm Centímetro

CO₂ Dióxido de carbono

g Gramo

°C Grados Celsius

kJ Kilojulekg Kilogramo

L Litro

PM Material particulado

m³ Metro cúbicoμg Microgramomg Miligramo

min Minuto

CO Monóxido de carbono

CCT Prueba de cocinado controlado

GLOSARIO

Biomasa

Materia orgánica originada en un proceso biológico, espontáneo o provocado, utilizable como fuente de energía. La biomasa puede recuperarse quemándola directamente o transformándola en combustible.

Cámara de combustión Espacio de la cocina donde se realiza el proceso de combustión (o quemado de la biomasa).

Combustión

Reacción química entre el oxígeno y un material oxidable, acompañada de desprendimiento energía y que habitualmente se manifiesta por incandescencia o llama.

Dióxido de carbono (CO₂)

Gas que se produce de forma natural, y también subproducto de la combustión de combustibles fósiles y biomasa. Es el gas que se toma como referencia para medir otros gases de efecto invernadero y, por lo tanto, tiene un Potencial de Calentamiento Mundial de 1.

Eficiencia energética Relación entre el producto de energía aprovechable

de un sistema, un proceso o actividad de conversión y

su aportación energética.

Emisiones La liberación de sustancias gaseosas como gases de

efecto invernadero, a la atmósfera.

Energía Cantidad de trabajo o calor emitido. La energía puede

ser de diferentes tipos y resulta útil para fines humanos cuando fluye de un lugar a otro o se

transforma de un tipo de energía a otro.

Estufa Aparato donde se realiza la combustión con fines de

cocina.

Estufa ahorradora Es la estufa que por su diseño y propósito permite

ahorrar leña, esfuerzos y tiempo al cocinar los alimentos. La denominación incluye modelos que

cumplen el propósito en diferentes proporciones.

Fogón abierto Tecnología artesanal utilizada para cocinar alimentos,

donde las ollas se apoyan en tres piedras.

Gases de efecto Son todos aquellos compuestos químicos en estado

invernadero gaseoso que se acumulan en la atmósfera. Es decir,

que contribuye al efecto invernadero, lo intensifica y lo

vuelve más peligroso, aumentando

considerablemente la temperatura del planeta, siendo

una cuestión fundamental en lo que al calentamiento

global refiere.

Punto de ebullición Es la temperatura a la cual la presión de vapor del

líquido es igual a la presión que rodea al líquido y el

líquido se transforma en vapor.

Transferencia de calor Razón de intercambio de energía en forma de calor

entre cuerpos calientes y fríos llamados fuente y

recibidor respectivamente.

WBT Water Boiling Test (prueba de ebullición de agua)

RESUMEN

Esta investigación tuvo como objetivo analizar la eficiencia energética, emisiones de monóxido de carbono (CO) y material particulado (MP 2,5) de cuatro estufas ahorradoras de leña tipo plancha y una estufa a fogón abierto. Se basó en el protocolo internacional para la evaluación de estufas, Prueba de Ebullición de Agua (WBT siglas de su nombre en inglés), para poder desarrollar normas oficiales con la finalidad de estandarizar el desempeño de cada estufa ahorradora de leña.

La prueba WBT consta de tres repeticiones en tres fases: alta potencia de arranque en frío, alta potencia de inicio caliente y baja potencia de hervir a fuego lento. En las estufas ahorradoras se utilizó como combustible leña de especie encino (Quercus spp) midiendo el porcentaje de humedad de la misma. Para cada prueba se calentó agua en una olla previamente pesada, se midió la temperatura inicial del agua y cuando alcanzaba su punto de ebullición se anotó el tiempo transcurrido y temperatura final. Se midió y anotó la humedad del ambiente al que se trabajó.

Con los datos obtenidos anteriormente se determinó el porcentaje de eficiencia energética con base al documento WBT SPREADSHEET 4.2.4 avalado por la Alianza Global para estufas limpias, la Organización Internacional de Normalización (ISO) y el Acuerdo de Taller Internacional (IWA).

Se midió, de forma directa, las emisiones de las tres fases en total de cada estufa, utilizando el equipo IAP. Con la ayuda de la hoja de Excel Indoor Air Pollution (IAP) Meter Processing 5,0 Macro-Free, proporcionado por los creadores del equipo, se interpretan los datos y análisis de los resultados de las concentraciones de monóxido de carbono (CO) y material particulado (MP 2,5).

Se comparó el porcentaje de eficiencia energética de las cuatro estufas ahorradoras de leña con la estufa a fogón abierto y se determinó que no todas las estufas ahorradoras de leña son eficientes, mediante un análisis de varianza. Así mismo, se identificaron las estufas que obtuvieron mayor porcentaje de reducciones de monóxido de carbono (CO) y material particulado (MP 2,5) que pueden evitar inhalar las personas y con ello mejorar la calidad de vida.

OBJETIVOS

General

Analizar la eficiencia energética de cuatro estufas ahorradoras de leña tipo plancha (A, B, C y D) y fogón abierto utilizando el protocolo de prueba de ebullición de agua (WBT).

Específicos

- Determinar y comparar la eficiencia energética de inicio en frío de cuatro estufas ahorradoras: estufa A, estufa B, estufa C, estufa D con la de fogón abierto.
- Determinar y comparar la eficiencia energética de arranque caliente de cuatro estufas ahorradoras: estufa A, estufa B, estufa C, estufa D con la de fogón abierto.
- Determinar y comparar la eficiencia energética en hervir a fuego lento de cuatro estufas ahorradoras: estufa A, estufa B, estufa C, estufa D con la de fogón abierto.
- Determinar y comparar la cantidad de emisiones de monóxido de carbono
 (CO) generado de cuatro estufas ahorradoras: estufa A, estufa B, estufa
 C, estufa D con la de fogón abierto.

 Determinar y comparar la cantidad de material particulado (PM 2,5) generado de cuatro estufas ahorradoras: estufa A, estufa B, estufa C, estufa D con la de fogón abierto.

Hipótesis

Es posible realizar un análisis de eficiencia energética a cuatro estufas ahorradoras de leña tipo plancha y una estufa a fogón abierto, utilizando el protocolo de Prueba de Ebullición de Agua (WBT), realizando una comparación de la eficiencia energética de cada una de ellas en tres fases distintas de operación, y al mismo tiempo en que se cuantifica las cantidades de monóxido de carbono (CO) y material particulado (MP 2,5).

Hipótesis nula

H_{0,1}: no existe diferencia significativa entre los resultados de eficiencia energética de arranque en frío de las cuatro estufas ahorradoras con la de fogón abierto.

H_{0,2}: no existe diferencia significativa entre los resultados de eficiencia energética de arranque caliente de las cuatro estufas ahorradoras con la de fogón abierto.

 $H_{0,3}$: no existe diferencia significativa entre los resultados de eficiencia energética de hervir a fuego lento de las cuatro estufas ahorradoras con la de fogón abierto.

H_{0,4}: no existe diferencia significativa entre los resultados de las emisiones de monóxido de carbono (CO) de las cuatro estufas ahorradoras con la de fogón abierto.

H_{0,5}: no existe diferencia significativa entre los resultados de las emisiones de material particulado (PM 2,5) de las cuatro estufas ahorradoras con la de fogón abierto.

$$\mu_1 \neq \mu_2 \neq \mu_3 \neq \mu_4 \neq \mu_5 = 0$$

Hipótesis alternativa

H_{a,1}: existe diferencia significativa entre los resultados de eficiencia energética de arranque en frío de las cuatro estufas ahorradoras con la de fogón abierto.

H_{a,2}: existe diferencia significativa entre los resultados de eficiencia energética de arranque en caliente de las cuatro estufas ahorradoras con la de fogón abierto.

H_{a,3}: existe diferencia significativa entre los resultados de eficiencia energética de hervir a fuego lento de las cuatro estufas ahorradoras con la de fogón abierto.

H_{0,4}: existe diferencia significativa entre los resultados de las emisiones de monóxido de carbono (CO) de las cuatro estufas ahorradoras con la de fogón abierto.

H_{0,5}: existe diferencia significativa entre los resultados de las emisiones de material particulado (PM 2,5) de las cuatro estufas ahorradoras con la de fogón abierto.

$$\mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = \mu_4 = \mu_5 = 0$$

Criterio con base en un análisis ANOVA

F < F_c: Se acepta la hipótesis nula

F > Fc: Se rechaza la hipótesis nula

INTRODUCCIÓN

En Guatemala, gran porcentaje de la población depende directamente de la leña como fuente de energía para el desarrollo de sus actividades de subsistencia. La demanda de leña en el país para la cocción de alimentos y el calentamiento de las viviendas, en la mayoría de los hogares del área rural sigue siendo alta. Se estima que la leña representa el 57 % del consumo de energía primaria.

La oferta total anual de leña reportada asciende a 17,96 millones de metros cúbicos, de los cuales el 85 % proveniente de bosque natural. Además, la demanda total anual de leña reportada ascendió a 27,98 millones de metros cúbicos en donde el 85 % corresponde a la demanda doméstica rural. Actualmente se extraen 10,02 millones de metros cúbicos de leña más de lo que crece en el bosque, por lo tanto, el consumo de leña a nivel nacional no es sostenible (Instituto Nacional de Bosques, 2015).

Para construir las cocinas tradicionales, en muchos hogares guatemaltecos, se colocan piedras y leños en el suelo para provocar el fuego que actuará como una estufa, utilizando de 20 a 30 leños al día. Este tipo de cocina contamina el aire dentro del hogar y ocasiona más de 5 mil muertes al año, gran parte de ellas son mujeres y niños. Además, se afecta el medio ambiente, emitiendo grandes cantidades de gases de efecto invernadero.

La convivencia directa con el consumo de leña aumenta en un 31 % la probabilidad de contraer enfermedades cardiacas o respiratorias. Aspirar el humo de la cocina todos los días equivale a fumar dos cajetillas de cigarrillos diarios. Es indudable que el uso de fogón abierto en el hogar es un problema ambiental, energético, económico, de salud y de productividad de la mujer, y la solución es erradicar el uso de fogón abierto en el hogar, mejorando la calidad de vida de la mujer y su familia. (Programa Nacional de Competitividad, 2014)

Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), exponen que entre el 60 % y el 70 % de los hogares donde cocina con leña no cuenta con una chimenea para la extracción del humo y que casi el 20 % de las familias en extrema pobreza cocinan en el mismo lugar donde duermen.

Actualmente, se han distribuido una gama de estufas ahorradoras de leña en Guatemala, pero no todas tienen un respaldo de laboratorio que garantice que son eficientes, por ello se están dando iniciativas para desarrollar normas oficiales con la finalidad de estandarizar el desempeño de las mismas. En este sentido, se debe comenzar determinando la eficiencia energética y las emisiones intradomiciliares de monóxido de carbono (CO) y material marticulado (MP 2,5) emitidas por las estufas.

Entre los objetivos de la investigación está utilizar el protocolo Prueba de Ebullición de Agua (WBT) establecido por la Alianza Global para Estufas Limpias, que permite determinar el porcentaje de eficiencia energética de cuatro estufas ahorradoras de leña y una prueba a fogón abierto, la cual consiste en calentar agua a ebullición en tres fases: alta potencia de arranque en frío, alta potencia de arranque caliente y baja potencia de hervir a fuego lento. Además permite cuantificar las emisiones intradomiciliares de cada estufa en su proceso.

1. ANTECEDENTES

En Guatemala, una gran parte de la población depende directamente de la leña como fuente de energía para cocinar sus alimentos y calentar su vivienda. Es pronosticable que, frente a la fluctuación de precios del petróleo, la demanda de leña y madera para uso doméstico, se incremente en el futuro, principalmente en el área rural.

En 2005, en la Universidad de San Carlos de Guatemala, Sebastián del Valle Rosales, asesorado por el Ingeniero Químico Federico Guillermo Salazar Rodríguez, presentó un trabajo de graduación denominado *Determinación de la eficiencia termodinámica máxima y de combustión de la estufa mejorada "Doña Justa"*. RI trabajo se basa en la evaluación de la eficiencia de un modelo específico de estufa mejorada, la cual se introdujo en Guatemala. Se determinó que la estufa Doña Justa, no cuenta con una eficiencia termodinámica propia, sino que dicha eficiencia está netamente en función del uso que se le esté dando. También se determinó que la estufa Doña Justa tiene un rendimiento de combustión elevado de la biomasa que se utilice como combustible, pero se recomienda una readecuación de la cámara de combustión.

En 2006, en Guatemala, Boy E. publicó su estudio sobre *Eficiencia de combustible de una estufa de leña mejorada en zonas rurales de Guatemala: implicaciones para la salud, el medio ambiente y el desarrollo* donde evaluaron el efecto de diferentes diseños de la cámara de combustión bajo la prueba WBT. Con la modificación de la cámara de combustión, la eficiencia térmica global aumento 12 % con respecto a la estufa de fuego abierto.

En 2007, en México, Smith K. R. realizó un estudio denominado *Técnicas* estandarizadas para el seguimiento de estufas mejoradas en India y México mediante la prueba WBT. Evaluaron los cambios en la calidad del aire interior y el consumo de combustible. Obtuvieron reducción de los niveles de monóxido de carbono entre 30-70 %, las concentraciones de partículas disminuyeron entre 25 % y 65 %, y el consumo de combustible se redujo entre 20 % y 67 %.

En 2007, en la Universidad de San Carlos de Guatemala, realizada por el Ing. Manuel Tay, presentó un trabajo de graduación denominado Evaluación tecnológica de la fabricación de equipo doméstico para la combustión de leña como consecuencia del tipo de materiales utilizados. Ensayo de eficiencia, donde se definieron los beneficios que identifican a las estufas ahorradoras de leña, la descripción del uso de diferentes materiales de fabricación, las ventajas y desventajas de su uso, criterios de mejora en los mecanismos de selección de materiales, técnicas de fabricación, uso y mantenimiento, mediante el desarrollo de un procedimiento para la medición de la eficiencia termodinámica.

En 2009, en San Miguel Ixtahuacán, la Fundación Sierra Madre juntamente con el Ing. José Esaú Guerra como consultor, presentó el *Informe final del estudio de sistematización de estufas ahorradoras de leña en 8 municipios del altilplano occidental de Guatemala*, en donde evaluaron estufas tipo planchas tradicional (fuego semienterrado), estufa mejorada, estufa plancha tipo Onil y estufa Ecocomal. En donde concluyeron que todos los modelos de estufa tipo plancha tienden a ahorrar leña, por las siguientes razones: a) Porque el fuego está encerrado y no es visible directamente, b) Los gases son retenidos hasta donde es posible dentro de la unidad para optimizar el uso del calor que transportan.

El modelo que más leña ahorra es la estufa tipo Plancha Onil, le sigue el modelo de estufa Eco-comal; en tercer lugar está la estufa tipo plancha mejorada, que ha sido impulsada por diferentes programas de instituciones públicas y privadas; por último se encuentra la estufa de plancha tradicional, la cual ha sido construida empíricamente a nivel local.

En 2012, en México, Berrueta V. M. publicó un estudio de *rendimiento* energético de las estufas de leña en donde analizó y comparó el desempeñó de una estufa eficiente (Patsari) con respecto a estufas tradicionales de fuego abierto (tres piedras y tipo U), llevando a cabo pruebas WBT y cocción controlada (CCT). La estufa Patsari presentó claras ventajas con respecto a las cocinas tradicionales, con una reducción del consumo de energía del 67 % y ahorro de combustible del 44 %.

En 2012, Users Netwowok, BUN-CA, José María Blanco Rodríguez, asesorados por el Ing.Manuel Tay (Guatemala) y el Ing. Leonardo Mayorga (Nicaragua) publicó su estudio *Estufas mejoradas de leña en Centroamérica: Detonando los mercados* en donde identifican una diversidad de modelos de estufas mejoradas de leña que se comercializan en cada uno de los países centroamericanos, y definen cuatro principios fundamentales para guiar su intervención en los mercados de estufas mejoradas, como alternativa tecnológica al fogón abierto en el contexto centroamericano.

En 2014, la Alianza Global para las Estufas Limpias, una iniciativa de la Fundación de la Organización de Naciones Unidas (ONU), seleccionó a Guatemala como único país prioritario para la implementación de estufas limpias en América Latina. Por su lado, Radha Muthiah, Directora Ejecutiva de la Alianza Global para las Estufas Limpias comentó que son las niñas y las mujeres las primeras en sentir los impactos de la pobreza al cocinar, pues abandonan la escuela cuando se necesita leña o comida: "Caminan largas distancias, acarreando pesadas cargas de leña, cada día más lejos de las poblaciones por la deforestación y además se exponen al humo que se produce cuando preparar los alimentos".1

En 2015, en la Universidad de Zamorano Honduras, realizado con fundación VIDA y Profogones Honduras con el apoyo de BID/FOMIN a través de su Centro de Evaluación de Estufas mejoradas (CEEM), desarrolló un borrador de una normativa nacional de estufas mejoradas, el cual fue discutido en el Taller de Insumos para el Desarrollo de la Normativa Nacional de Estufas Mejoradas en Honduras. Trabajaron con el diseño, difusión e implementación de estufas mejoradas y en la priorización de estándares técnicos para evaluar modelos. Este sería el primer país en Centroamérica en poseer una normativa nacional de estufas mejoradas.

¹ RODAS, E., CHIANG, R., y RIVERA, M. *Planifican la implantación de 650 mil estufas mejoradas para reducir el uso de leña*. p.140.

En 2017, en la Universidad de San Carlos de Guatemala, Kimberly Pammela Sandoval publicó la tesis titulada *Análisis de la eficiencia energética de cinco estufas ahorradoras de estructura metálica utilizando el protocolo de prueba de ebullición de agua (wbt)* en donde determinó las estufas que tienen mayor eficiencia energética y potencia de fuego en las tres distintas fases analizadas, además de la cantidad de emisiones y PM 2,5 que pueden evitar inhalar las personas.

En 2017, en Honduras se publicó la tesis titulada Evaluación del desempeño de estufas mejoradas portátiles operadas con combustible sólidos alternativos que fue realizada por Lcda. María Anthonella León Abad en donde se basó en la evaluación del combustible sólidos alternativos a la leña del pino para operar la estufa mejorada HM-4000, seleccionados acorde con su disponibilidad, potencial calorífico y facilidad de manipulación. Se evaluó el desempeño de la estufa mediante el protocolo de ebullición de agua utilizando como combustible, palma de coco, carbón, aserrín y bagazo. Llegaron a la conclusión que el aserrín y el bagazo tuvo la mayor eficiencia energética y generaron menos emisiones.

1.1. Justificación

El alto consumo de leña obedece a que la mayor parte de la población vive en el área rural y sus recursos económicos son escasos, lo que le impide tener acceso a otras fuentes energéticas. Tradicionalmente, se utiliza un tipo de estufa para cocción, conocida como fogón abierto o tres piedras. En Guatemala, el uso de leña para la cocción de alimentos no se realiza de forma eficiente.

Actualmente, en Guatemala se han fabricado estufas ahorradoras de leña que ofrecen disminuir el consumo de leña y cocinar "eficientemente" para proteger la salud de las familias de las emisiones que estas generan al quemar leña como combustible, pero no existe certificados a nivel laboratorio que garanticen el cumplimiento de los límites permisibles de eficiencia energética y de emisiones intradomiciliarias o en su defecto que utilicen protocolos estándares avalados internacionalmente.

En Latinoamérica han surgido iniciativas para desarrollar normas oficiales con la finalidad de estandarizar el desempeño de las estufas ahorradoras de leña que se han distribuido en todas los países.

La investigación que se realizará es continuación al proyecto evaluación de la eficiencia energética, emisiones intradomiciliarias de monóxido de carbono y material particulado (MP 2,5) de las principales estufas ahorradoras de leña fabricadas y distribuidas en Guatemala 4.8.63.4.11 el cual está financiado por la Dirección General de Investigación (DIGI) y avalado por Centro de Investigaciones de Ingeniería (CII) ambas pertenecientes a la Universidad de San Carlos de Guatemala.

1.2. Determinación del problema

En esta sección se define y se delimita el problema del trabajo de investigación.

1.2.1. Definición

En Guatemala el 70 % de la población usa leña para cocinar, el déficit anual de leña es de más de 5 millones de toneladas seca, más de 5000 muertes en todas las edades son causadas por la inhalación emisiones intradomiciliarias. Además, las emisiones del fuego abierto son gran distribuidor a la contaminación del aire exterior y la existencia de estufas ahorradoras de leña y sus beneficios son todavía desconocidos por la mayoría de los hogares.

La Prueba de Ebullición de Agua (WBT) es una simulación simple del proceso de cocinado. Sirve para comparar el desempeño de estufas en condiciones controladas en el laboratorio y en óptimo funcionamiento. En esta prueba, se mide el tiempo y cantidad de combustible consumido al realizar una tarea simple: calentar una olla con agua.

Además, cuantifica la cantidad de emisiones producidas durante el proceso. Se determina y compara la eficiencia de cada estufa identificando cuál de ellas consume menos leña y mejora la calidad de vida de las familias.

1.2.2. Delimitación

El estudio se enfoca en el análisis de eficiencia energética de cuatro estufas ahorradoras de leña tipo plancha (A, B, C y D) y fogón abierto. Las pruebas se realizarán en el área de Prefabricados de la sección Tecnológica de la Madera del Centro de Investigaciones de Ingeniería (CII), a nivel de laboratorio utilizando instrumentos y equipos adecuados para la determinación de los resultados.

A continuación se describen las especificaciones técnicas de cada estufa, siendo: diámetro (D), largo (L), altura (A), ancho (H), peso (P), refuerzo (R) y calibre (C).

Tabla I. Caracterización estufa A

Información General		
Precio	Q500,00	
Fabricación	Santiago Zamora, San Antonio Aguas calientes, Sacatepéquez Guatemala	
Tiempo de Vida útil	6 años	
Combustible	Leña	
Especificaciones Técnicas		
	Dimensiones	Material
Estructura de la estufa	D = 50 cm L = 40 cm A = 35 cm P = 90 lb	1 Pieza de concreto
Cámara de combustión	D = 48 cm L = 11 cm A = 11 cm	Ladrillo incorporado a la estructura de la estufa
Plancha	H = 11 cm D = 48 cm	De hierro negro
Otros		Aislante de arena poma y ceniza

Tabla II. Caracterización estufa B

Información General			
Precio	Q900,00		
Fabricación	Santiago Zamora, San Antonio Aguas calientes, Sacatepéquez Guatemala		
Tiempo de Vida útil	5 años		
Combustible	Leña		
Especificaciones Técnicas			
	Dimensiones	Material	
Estructura de la estufa	D = 50 cm L = 38 cm A = 40 cm P = 100 lb R = 1,27 cm C = 19	1 Pieza de concreto con refuerzo de cedazo.	
Cámara de combustión	L = 11 cm A =11,5 H = 12,5 cm	Ladrillo refractario incorporada a la estructura de la estufa.	
Plancha	D = 48 cm	De hierro negro con refuerzo en la parte baja, incluye un gancho de hierro plano.	

Tabla III. Caracterización estufa C

Información General			
Precio	Q1 250,00		
Fabricación	Zacapa La Laguna, Edificio Cordón Fajardo, Zacapa.		
Tiempo de Vida útil	10 años		
Combustible	Leña		
Componentes	Codo adaptador, abrazadora para chimenea, base de hierro.		
Especificaciones Técnicas			
	Dimensiones	Material	
Estructura de la Estufa:	H = 86 cm L = 120 cm A = 78 cm P = 210 lb	1 Pieza de concreto forrada de metal.	
Cámara de combustión	H =12 cm L = 28 cm A = 10 cm	Grande y sólida de ladrillo.	
Plancha	H = 40,6 cm L = 81,2 cm A = 0,032 cm	Hierro fundido o metal con tres hornillas.	

Tabla IV. Caracterización estufa D

Información General			
Precio	Q1 200,00		
Fabricación	Guatemala		
Tiempo de Vida útil	15 años		
Combustible	Leña		
Componentes	Codo adaptador, abrazadora para chimenea, base de hierro.		
Especificaciones Técnicas			
	Dimensiones	Material	
Estructura de la Estufa	H = 61 cm L = 81 cm A = 71 cm P = 250 lb	Caja metálica aislada con arena y ladrillos.	
Cámara de combustión	H =36 cm L = 60 cm A =11 cm	Grande y sólida de ladrillo y arena.	
Plancha	H = 45,7 cm L = 61,0 cm A = 0,04 cm	Hierro fundido o metal con dos hornillas.	

Tabla V. Caracterización fogón abierto

Información General			
Fabricación	Guatemala		
Tiempo de Vida útil	No aplica		
Combustible	Leña		
Componentes	No aplica		
Especificaciones Técnicas			
	Dimensiones	Material	
Ladrillo	L = 24 cm A = 5,25 cm H = 11 cm	Tres ladrillos Q6,00 c/u 10 adoquín Q2,80 c/u 5 lb piedrín Q1,40 c/lb Lamina Q3,50	
Cámara de Combustión	No aplica	Grande y sólida de ladrillo.	
Plancha	No aplica		

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Fenómenos de transferencia de calor

El flujo de calor es la transferencia de energía desde un cuerpo a mayor temperatura que otro con el simple objeto de llegar a un equilibrio térmico entre los dos cuerpos. "En el siglo XVIII y comienzos del XIV, los científicos imaginaban que todos los cuerpos contenían un fluido invisible al cual llamaron calórico. Al calórico se le asignó una variedad de propiedades, algunas que probaron ser inconsistentes con la naturaleza. Pero su más importante propiedad era que fluía de cuerpos calientes a fríos. Era una manera útil de pensar acerca del calor".²

2.1.1. Transferencia de calor por conducción

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

² MUKUNDA, H. S. Shirivasa, Portable simple plan *Wood stoves of high efficiency for domestic use.Sadhana*. http://link.springer.com/article/10.1007%2FBF02759888. Consulta: diciembre 2018.

2.1.2. Transferencia de calor por convección

Si existe una diferencia de temperatura en el interior de un líquido o un gas, es casi seguro que se producirá un movimiento del fluido. Este movimiento transfiere calor de una parte del fluido a otra por un proceso llamado convección.

El movimiento del fluido puede ser natural o forzado. Si se calienta un líquido o un gas, su densidad (masa por unidad de volumen) suele disminuir.

Si el líquido o gas se encuentra en el campo gravitatorio, el fluido más caliente y menos denso asciende, mientras que el fluido más frío y más denso desciende.

Este tipo de movimiento, debido exclusivamente a la no uniformidad de la temperatura del fluido, se denomina convección natural.

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

2.1.3. Transferencia de calor por radiación

La radiación presenta una diferencia fundamental respecto a la conducción y la convección: las sustancias que intercambian calor no tienen que estar en contacto, sino que pueden estar separadas por un vacío. La radiación es un término que se aplica genéricamente a toda clase de fenómenos relacionados con ondas electromagnéticas.

Algunos fenómenos de la radiación pueden describirse mediante la teoría de ondas, pero la única explicación general satisfactoria de la radiación electromagnética es la teoría cuántica.

2.2. Temperatura

La sensación de calor o frío, al tocar una sustancia, depende de su temperatura, de la capacidad de la sustancia para conducir el calor y de otros factores. Aunque, si se procede con cuidado, es posible comparar las temperaturas relativas de dos sustancias mediante el tacto, es imposible evaluar la magnitud absoluta de las temperaturas a partir de reacciones subjetivas.

2.3. Calor sensible y latente

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

2.4. Capacidad calorífica

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*K -1.

2.5. Cambio climático

Es un cambio significativo y duradero de los patrones locales o globales del clima. Las causas pueden ser naturales, por ejemplo, variaciones en la energía que se recibe del Sol, erupciones volcánicas, circulación oceánica, procesos biológicos y otros, o puede ser causada por las actividades humanas, por ejemplo, a través de la emisión de CO₂ y otros gases que atrapan calor, o alteración del uso de grandes extensiones de suelos que causan, finalmente, un calentamiento global.

2.6. Cocina tradicional

Tecnología artesanal utilizada para cocinar alimentos, conocida también como cocina a fogón abierto, donde las ollas se apoyan en tres piedras. El gasto de leña es de 8 a 10 leños por tiempo y entre 20 a 30 leños diarios. El humo producido por el fuego queda dentro de la cocina y tiene efectos que dañan seriamente la salud de nuestra familia. Algunos de estos efectos dañinos son:

- Irritación en los ojos
- Irritación de la garganta
- Irritación en los bronquios, que producen mucha tos

Figura 1. Fogón abierto



Fuente: CUZ CHAMAM, Víctor Hugo. *Manual para estufas mejoradas, Panzós, Alta Verapaz.* p. 151.

2.7. Estufa ahorradora

Una estufa ahorradora es un sistema que quema combustible de una manera más eficiente que una estufa de tres piedras (fogón abierto) donde se produce calor por combustión para uso inmediato en la cocina. La diferencia primordial entre una estufa ahorradora y una de tres piedras, es que la primera tiene resguardado en fuego dentro de una cámara de combustión, mientras que la segunda tiene el fuego "abierto" al ambiente. Como consecuencia del encierro del fuego, es posible conducir lo gases de combustión al exterior mediante una chimenea.

2.7.1. Las ventajas y desventajas de las estufas ahorradoras

Hay muchos tipos de estufas ahorradoras. Todas tienen en común una base alta con fuego encerrado en una caja y una chimenea para sacar el humo.

2.7.1.1. Las estufas ahorradoras de leña tienen las siguientes ventajas

- Se ahorra leña
- Hay menos humo dentro de la casa
- Se evitan enfermedades respiratorias como la tos y el catarro
- Hay menos riesgo de guemaduras y de incendios
- Es más cómoda para usar
- Se adapta a las necesidades de cada familia
- Podemos construirla de materiales locales

2.7.1.2. Presenta las desventajas siguientes

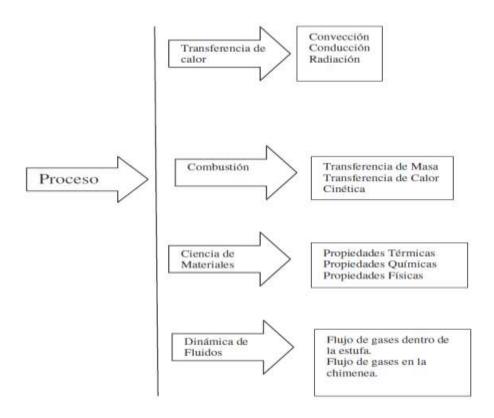
- Se necesita tener algunos conocimientos técnicos para su instalación
- Requieren mantenimiento
- Se necesita hacer un gasto inicial"³
- CUZ CHAMAM, Víctor Hugo Manual para estufas mejoradas dirigido a la Escuela Oficial Rural Mixta, Barrio Poza Azul I, Panzós, Alta Verapaz.

³ CUZ CHAMAM, Víctor Hugo *Manual para estufas mejoradas dirigido a la Escuela Oficial* Rural Mixta, Barrio Poza Azul I, Panzós, Alta Verapaz. p.151.

2.7.2. Perspectivas del desarrollo de una estufa ahorradora

El desempeño térmico de una estufa ahorradora depende en la eficiencia de conversión de calor, de energía química en los combustibles a energía térmica. También depende de la eficiencia en que la energía térmica producida es la transferencia hacia las ollas en donde se tiene la comida a cocinar.

Figura 2. Procesos involucrados en el desarrollo de una estufa ahorradora



Fuente: DEL VALLE ROSALES, Sebastián. Determinación de la eficiencia termodinámica máxima y de combustión de la estufa mejorada "Doña Justa". p.73.

Solo una parte del calor generado en la combustión será transmitida a los recipientes que contienen alimentos. Al desarrollar un modelo de estufa se debe tomar en consideración los tres mecanismos de transferencia de calor.

Cuando se habla de conducción, se refiere a la transferencia entre el calor de las ollas y los alimentos entre ellas, pérdida de calor a través de las paredes, transferencia entre la llama y el interior de la madera.

La radiación es la energía lumínica que emitirá la llama. En una estufa son tres los puntos de interés donde se intercambia radiación: de la llama, radiación intercambiada entre las paredes internas, ollas y madera, pérdida de radiación a la atmósfera a través de pared externa de la estufa, pared de la chimenea y la abertura de la cámara de combustión.

La transferencia de calor por convección involucra la transferencia de calor por el movimiento de los fluidos seguido por conducción entre dicho fluido y la materia. La transferencia por convección es el fenómeno de transferencia de calor que más se da en las estufas mejoradas. Gases calientes que se producen por la combustión del combustible, calientan las ollas por medio de convección. La manera en que la estufa se enfría también es por convección.

En una estufa hay transferencia por convección en: los gases emitidos de la combustión, contacto del fluido de gas con la olla, fluido de los gases a través de túneles, chimeneas y el área entre paredes y ollas.

2.8. Características generales de una estufa ahorradora

Se entiende por estufa de plancha tradicional, aquellas unidades que han sido construidas en las comunidades con recursos propios de las familias, con apoyo de un albañil que desconoce el diseño apropiado, que le confiere las características de ahorradora de leña. En la mayoría de los casos es una unidad de fuego semiencerrado, con una chimenea para la expulsión de humo y gases de la combustión.

Características de la estufa de plancha tipo Onil, en la evolución de las experiencias de estufas mejoradas ahorradoras de leña en Guatemala, la estufa de Plancha tipo Onil es una de las más recientes. Esta estufa fue desarrollada por la organización no gubernamental Helps International. La estufa Onil lleva el nombre de una de las personas que la desarrollaron, en la organización Helps.

Es una unidad pequeña de forma rectangular, se fabrica en serie de productos de cemento, para luego ser comercializada y llevada a las comunidades.

Figura 3. Estufa tipo plancha (Onil)



Fuente: CUZ CHAMAM, Víctor Hugo. Manual para estufas mejoradas. p.151.

2.8.1. Componentes de una estufa tipo plancha

Una estufa de leña es el equipo para cocinar alimentos que funciona, como su nombre lo indica, con leña como combustible principal. Está conformada de diferentes piezas organizadas entre sí que permiten encerrar el fuego para administrarlo de acuerdo con los requerimientos, ubicarlo a diferentes alturas y trasladar los gases de combustión al exterior de la cocina luego de aprovechar al máximo su calor.

2.8.1.1. Chimenea

Esta es una estructura elaborada de lámina de zinc o tubos de cemento de diferentes diámetros por donde se conduce hacia el exterior el humo de la estufa.

2.8.1.2. Plancha

Es una estructura de metal que puede ser de dos, tres o cuatro hornillas; las más utilizadas son las de tres hornillas. El espesor de la plancha es de 5 mm.

2.8.1.3. Anillos o discos

Son las estructuras circulares de la plancha en donde se colocan los utensilios (ollas, jarras, sartenes, lecheros, entre otros.) de cocina para la cocción de los alimentos.

2.8.1.4. Base de chimenea

Es el soporte de la chimenea que está elaborado de una mezcla de barro y cal. Algunas estufas llevan en esta estructura un regulador de humo el cual, como su nombre lo indica, sirve para regular la entrada de aire en el tubo de la chimenea.

2.8.1.5. Cámara de combustión

Es la estructura de mayor importancia. Para aumentar la eficacia en el consumo de leña, esta estructura ha sido modificada en los últimos modelos. La cámara de combustión es la estructura en donde se introduce la leña y es la que transmite el calor a la plancha.

2.8.1.6. Base de la estufa

Es la estructura de soporte para la cámara de combustión y la plancha. La base, de acuerdo con los recursos locales, se puede construir de adobes, block o hierro.

CODO DE
CHIMINEA
DESMONTABLE
PARA UNA
LIMPIEZA FACIL

BASE DE
HIERRO
OPCIONAL

Figura 4. Base de estufa ahorradora

Fuente: GUERRARA SAMAYOA, José Esaú. Informe final del estudio de sistematización de estufas ahorradoras de leña de ocho municipios del Altiplano occidental de Guatemala. p.31.

2.8.1.7. Sombrero o capuchón

Es la tapadera de metal elaborada con lámina de zinc que protege la tubería de la chimenea de la entrada de agua de lluvia.

Figura 5. Sombrero de una estufa ahorradora



Fuente: GUERRARA SAMAYOA, José Esaú. Informe final del estudio de sistematización de estufas ahorradoras de leña de ocho municipios del Altiplano occidental de Guatemala. p.31.

2.8.1.8. Compuerta

Es la estructura en donde se introduce la leña hacia la cámara de combustión de la estufa de leña.

Figura 6. Base de estufa ahorradora

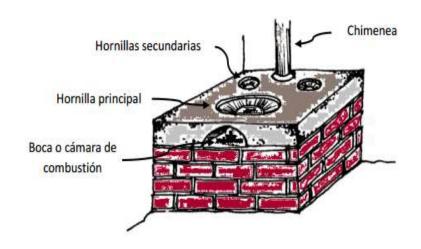


Fuente: GUERRARA SAMAYOA, José Esaú. Informe final del estudio de sistematización de estufas ahorradoras de leña de ocho municipios del Altiplano Occidental de Guatemala. p.31.

2.8.1.9. Gancho

Es una estructura elaborada de metal que es utilizada para levantar los discos de la plancha cuando esta en funcionamiento y evitar quemaduras.

Figura 7. Componentes de una estufa ahorradora de leña



Fuente: CUZ CHAMAM, Victor Hugo. Manual para estufas mejoradas dirigido a la Escuela Oficial Rural Mixta, Barrio Poza Azul I, Panzós, Alta Verapaz. p.151.

2.9. Tipo de leña: Quercus spp (Familia Fagaceae)

Quercus es un género de árboles de gran porte, aunque también se incluyen arbustos. Los hay de follaje permanente, caducifolio y marcescente. Las flores masculinas se presentan en amentos, inflorescencias complejas colgantes, habitualmente cada flor con entre cuatro y diez estambres, lo más a menudo seis, de largos filamentos. Las flores femeninas aparecen aisladas u organizadas en espigas o cabezuelas.

El fruto se denomina bellota, es solitario y de origen axil, con cotiledones planos. La corteza suele ser lisa en los ejemplares jóvenes, pero se va agrietando con la madurez de la edad.

2.9.1. Usos

El principal uso de todos los encinos es leña y carbón. En particular, son una de las principales fuentes de energía doméstica, preferida por su poder calorífico y la duración de sus brasas.

La madera de estas especies se utiliza por su fuerza, durabilidad y belleza, y es usada para la construcción de durmientes de ferrocarril, barcos, acabados de interiores.

2.9.2. Propagación y manejo

Las bellotas están listas para su recolección cuando comienzan a caer del árbol. Cada kg contiene entre 100 y 1 500 semillas. Generalmente, no conservan su poder germinativo más de tres meses, por lo que es preferible sembrarlas inmediatamente o mantenerlas refrigeradas a 4 ° C.

Para leña y forraje se aprovechan bajo turnos de rotación cortos, alrededor de 10 años.

Figura 8. Quercus spp (Familia Fagaceae)



Fuente: SANDOVAL VILLAMIL, Keyla J. *Biología reproductiva y conservación*. http://www.parquebicentenario.gob.mx/jardines/encinos.html. Consulta: 30 de junio 2017.

2.9.3. Factores que influyen en la energía que produce la leña

Los factores que son considerados comúnmente y que influyen en la energía que suministra a la leña son los siguientes.

2.9.3.1. Densidad de la madera

La densidad de la madera que se usa para leña es uno de los factores más importantes para lograr buena combustión. Las maderas con densidad alta presentan mejor calidad y tiempo de combustión. Mientras más densa es una madera, mayor poder calorífico tiene.

2.9.3.2. Contenido de humedad

En general, el contenido de humedad en la leña no debe sobrepasar del 25 %, esto garantiza una buena combustión y además no genera emisiones de humo, los cuales son dañinos para la salud y el ambiente. La leña verde o recién cortada tiene un contenido de humedad mayor al 60 % de humedad, lo que hace que disminuya su rendimiento, ya que la mitad del calor se pierde en evaporar el contenido de agua.

2.9.3.3. Sanidad de la leña

No debe tener manchas blancas ni grises producidas por hongos (nunca aparecerán cuando la leña tenga un bajo contenido de humedad y esté bien ventilada). Aunque la leña se usa para combustión, se ha demostrado que cuando más limpia de impurezas esté, mejor es su calidad de combustión. Por lo tanto, debe verse que no contenga hongos o manchas para lograr una combustión eficiente.

2.9.3.4. Valor calorífico de algunas especies forestales para leña

El valor calorífico en la energía que se aprovecha en la combustión de la leña.

2.10. Proceso de gasificación de madera

La gasificación es un proceso termo-químico en el que la biomasa, normalmente de origen leñoso, es transformada en un gas combustible. A continuación se describen las etapas del proceso de gasificación:

2.10.1. Secado

Una primera etapa de calentamiento hasta 100 °C que provoca el secado de la biomasa por evaporación del agua contenida en esta y absorbe el calor sensible para elevar la temperatura, además del necesario para la evaporación del agua.

2.10.2. Pirólisis

La segunda etapa, que también absorbe calor, es la de pirólisis (ruptura por calor), en la que se rompen las moléculas grandes dando lugar a otras de cadena más corta que, a la temperatura del reactor, están en fase gaseosa.

2.10.3. Reducción

La tercera etapa es la reducción, por combinación del vapor de agua producido en la primera etapa, con el dióxido de carbono que viene arrastrado por la corriente del gasificante, desde la cuarta etapa (oxidación).

2.10.4. Oxidación

La oxidación de la fracción más pesada (carbonosa) de la biomasa al entrar en contacto con el agente gasificante (aire, oxígeno, o vapor de agua).

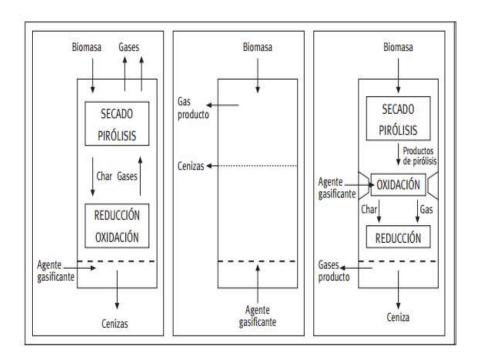


Figura 9. Proceso de gasificación de madera

Fuente: Instituto para la Diversificación y Ahorro de energía. *Biomasa Gasificación*. http://www.idae.es/uploads/documentos/documentos_10737_Biomasa_gasificacion_07_d2adcf3 b.pdf. Consulta: 30 de junio 2017.

2.10.5. Combustión

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

2.10.5.1. Calor de combustión

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

2.10.5.2. Proceso de la combustión

La mayoría de los procesos de combustión se realizan con aire (oxígeno + nitrógeno + argón) y no con 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 desprecia el Argón y se toma 21 % de oxígeno y 79 % de nitrógeno. Pero los dispositivos de combustión no queman necesariamente todo el combustible que se les suministra, teniendo las siguientes reacciones:

Figura 10. Proceso de combustión

$$C + O_2 \rightarrow CO_2$$

 $C + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow CO$

Fuente: Instituto para la Diversificación y Ahorro de energía. *Biomasa Gasificación*. http://www.idae.es/uploads/documentos/documentos_10737_Biomasa_gasificacion_07_d2adcf3 b.pdf. Consulta: 30 de junio 2017.

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.

2.10.5.3. 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, entre otros. A continuación, se expondrán las características químicas y físicas de la biomasa.

2.10.5.3.1. Características químicas

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

2.11. Alianza Global para estufas limpias (Global Alliance for clean Cookstoves)

La Alianza Global para las Estufas Limpias, una iniciativa de la Fundación de la Organización de Naciones Unidas (ONU), seleccionó a Guatemala como único país prioritario para la implementación de estufas limpias en América Latina.

La Alianza Global Para Estufas Limpias es una asociación entre los sectores público y privado para salvar vidas, mejorar calidad de vida, empoderar a las mujeres y combatir el cambio climático generando un mercado global vibrante para el desarrollo de soluciones limpias y eficientes para cocinar en los hogares. La meta de la Alianza, '100 por 20', busca que 100 millones de hogares adopten estufas y combustibles limpios y eficientes antes del año 2020. La Alianza está trabajando con socios públicos, privados y no gubernamentales para superar las barreras mercantiles que todavía impiden la producción, implementación y uso de estufas limpias en los países en vías de desarrollo.

Figura 11. Análisis de cocinas limpias libre de humo por Alianza Global



Fuente: PAIZ, Juan Carlos. Plan de acción nacional de Guatemala para estufas y combustibles limpios. http://cleancookstoves.org/resources_files/guatemala-plan-de-accion.pdf. Consulta: 1 de Junio de 2017.

2.12. Pruebas aplicadas para estufas ahorrativas

Todas las pruebas estandarizadas implican compensaciones. Cuando las condiciones son altamente controladas y la variabilidad se reduce, una prueba es más capaz de detectar cambios pequeños. Las pruebas controladas son adecuadas para comparar los diversos aspectos técnicos del diseño de la estufa y las evaluaciones de desempeño previas en campo, entre ellas tenemos:

- Prueba de cocción controlada (CCT)
- Prueba de ebullición de agua (WBT)
- Prueba de desempeño de cocina (KPT)
- Prueba de seguridad

En el presente informe únicamente se evaluará la prueba de WBT.

2.12.1. Prueba de ebullición de agua (WBT)

La prueba de Ebullición de Agua es una simulación simple del proceso de cocción para medir cuán eficiente es una estufa en utilizar combustible para calentar el agua en una olla y la cantidad de emisiones producidas durante el proceso.

2.12.1.1. Beneficios y limitaciones del WBT

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

2.12.1.2. Eficiencia energética

Es la cantidad de energía utilizada para calentar y evaporar el agua por unidad de energía de combustible quemado. Y para ello consta en tres fases:

2.12.1.2.1. Para la fase de alta potencia de inicio frío

El evaluador comienza con la estufa a temperatura ambiente y se utiliza combustible de un paquete previamente pesado para hervir una cantidad medida de agua en una olla estándar.

2.12.1.2.2. La fase de alta potencia de inicio caliente

Se lleva a cabo después de la primera fase, mientras la estufa está caliente. Una vez más, el evaluador utiliza combustible de un paquete previamente pesado para hervir una cantidad medida de agua en una olla normal.

2.12.1.2.3. La fase de hervir a fuego lento

Es esta última etapa se hierve agua a fuego lento en un tiempo de 45 minutos y temperatura controlada no mayor a su punto de ebullición con un rango de error de +/- 3 °C.

2.12.1.3. Pruebas de Emisiones

La eficiencia del combustible es un factor principal para los programas de estufas. Ahora se sabe que los contaminantes atmosféricos emitidos por el uso de combustibles sólidos tienen muchas repercusiones sanitarias y medioambientales.

El consumo de combustible es una medida relativamente simple, la determinación de las mediciones de contaminantes es significativamente más complicada. Además de las directrices para la medición de la eficiencia de combustible, el WBT también proporciona 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.

2.12.1.4. Cambio neto en carbón durante la fase de la prueba

Esta es la cantidad de carbón creada durante la prueba menos el carbón remanente de la cocina al final de la fase de la prueba. Debido a su alta temperatura, el carbón se pondrá en un recipiente prepesado vacío de masa "k" (que será proporcionado por los técnicos verificadores) y pesando el carbón con el recipiente, se sustrae las dos (2) masas.

2.12.1.5. Consumo específico de combustible

Debe ser considerado como el combustible requerido para calcular el rendimiento de la unidad.

2.12.1.6. Concentración relativa máxima de monóxido de carbono CO

Las concentraciones de gas monóxido de carbono (CO) en grandes cantidades pueden causar la muerte cuando se respira por un tiempo prolongado. Es producto de la combustión incompleta de materiales combustibles como gas metano, gasolina, kerosén, petróleo, madera y otras biomasas combustibles. Por lo tanto, durante su uso cotidiano, una cocina mejorada no debe generar altas concentraciones de CO intradomiciliario.

2.12.1.7. Material particulado (PM)

Es el material sólido o líquido finamente dividido, cuyo diámetro aerodinámico es inferior de 100 µm, parte del cual corresponde a una fracción de partículas respirables (de diámetro aerodinámico igual o menor a 10 mm).

2.12.1.7.1. Concentración relativa máxima de material particulado PM 2,5.

En general, es más frecuente analizar la cantidad de material particulado (PM) respecto a su concentración en masa o la distribución de su concentración en masa, en función de su tamaño, por los diversos procesos que generan su producción, como ser procesos de combustión, abrasión o molienda, suspensión de partículas y condensación de sustancias volátiles. Así se calcula la fracción y cantidad de material particulado que puede ser inhalado por una persona durante un tiempo prolongado produciendo enfermedades graves del tracto respiratorio. En el uso cotidiano de una cocina mejorada no debe generar elevadas concentraciones de PM intradomiciliario. Para su evaluación, se utiliza la fracción respirable de PM en tamaños menores a 2,5 micras, PM 2,5.

3. MARCO METODOLÓGICO

3.1. Variables del método

Para la determinación de eficiencia obtenida a partir del punto de ebullición de agua, se involucrarán variables de operación y de proceso; las cuales podrán ser constantes, variables, dependientes o independientes como se muestra en la tabla I.

3.1.1. Variables de operación

Las variables de operación se describen a continuación.

3.1.1.1. Humedad del ambiente

Se determinará por medio de un instrumento higrógrafo.

3.1.1.2. Presión

El procedimiento se realizará a la presión atmosférica de la ciudad .de Guatemala.

3.1.2. Variables de proceso

Las variables de proceso son las siguientes.

3.1.2.1. Temperatura de ebullición

El punto de ebullición del agua en la olla se determinará por medio de un termómetro de mercurio.

3.1.2.2. Masa de combustible

Las cantidades se trabajarán en kilogramos para cada prueba.

3.1.2.3. Masa del agua

Las cantidades se trabajarán en kilogramos para cada prueba.

Tabla VI. Descripción de las variables de procedimiento

			Factor de po		Factores perturbadores			
No.	Variable	Dimensional	Independiente	Dependiente	Controlable	No controlable		
1	Masa inicial	g	X		Х			
2	Masa inicial de leña (combustible)	g	X		Х			
3	Medidas de leña (combustible)	cm	X		Х			
4	Medida de humedad	%	X			Х		
5	Tiempos iniciales	min	X		X			
6	Temperatura de ebullición	°C	X			х		
7	Masa de agua inicial y final	g	X			Х		
8	Masa de leña final (No utilizada)	g	X			Х		
9	Masa del carbón	g		Х		Х		
10	Poder calorífico	kJ/kg		Х		Х		
11	Eficiencia	%		x		X		
	Emisiones							
12	Monóxido de Carbono	mg/L		Х		х		
13	Dióxido de Carbono	mg/L		Х		Х		
14	Material particulado (MP)	mg/L		Х		Х		

Fuente: elaboración propia.

3.2. Delimitación del campo de estudio

Se describe el campo, área, etapas y ubicación que forman parte de la investigación.

3.2.1. Campo de estudio

Esta investigación está delimitada al campo de operaciones unitarias de balance de masa y energía, trasferencia de calor y masa, estadística, ciencia de los materiales, ecología, química ambiental, química orgánica, termodinámica tres.

3.2.2. Etapas que conforman la investigación

- Selección de estufas ahorradoras leña y clasificación de tipo de combustible a utilizar.
- Evaluación de las estufas ahorradoras por medio de la prueba de ebullición de agua (WBT).
- Caracterización y Comparación de la eficiencia energética, potencia en fuego y emisiones de CO y PM _{2,5} con fogón abierto.

3.2.3. Ubicación del desarrollo de la investigación

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

- Persona que realiza el estudio: Br. Silvia Noemí Hernández Tecún
- Asesor: Ing. Qco. Jorge Emilio Godínez Lemus
- Coasesor: Ing. Qco. Mauricio Valentino Rivera Tello

3.4. Recursos y materiales disponibles

Es el conjunto de materiales de trabajo para el desarrollo de la investigación.

3.4.1. **Equipo**

El equipo utilizado en la investigación se describe a continuación.

- Estufa ahorradora estufa A
- Estufa ahorradora estufa B
- Estufa ahorradora estufa D
- Estufa ahorradora estufa C
- Fogón abierto
- Horno
- Indoor Air Pollution Meter (IAP Meter)

3.4.2. Instrumentos de medición

Los instrumentos de medición utilizados en la investigación se describen a continuación:

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

3.4.3. Materia prima

La materia prima utilizada en la investigación se describe a continuación:

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

3.4.4. Materiales para medición de temperatura

Los materiales para la medición de la temperatura utilizada en la investigación se describen a continuación:

- Fósforos
- Guantes térmicos
- Lentes de protección
- Mascarilla de gases

3.4.5. Cristalería

Ollas de aluminio sin tapadera, de 24 cm de diámetro y capacidad de 5L.

3.4.6. Materiales para la obtención de carbón

- Espátula
- Tenazas
- Bandeja de metal

3.5. Técnicas cualitativas o cuantitativas

En la investigación se utilizará técnicas cuantitativas.

3.5.1. Técnica cuantitativa

La prueba de ebullición de agua se desarrollará para determinar la eficiencia energética de las estufas ahorradoras en una forma controlada en sus tres fases. Todas las pruebas de WBT deben llevarse a cabo al menos tres veces para cada estufa, que constituye un conjunto de pruebas WBT.

3.5.1.1. Para la fase de alta potencia de inicio frío

Se comienza con la estufa a temperatura ambiente y se utiliza combustible de un paquete previamente pesado para hervir una cantidad medida de agua en una olla de aluminio. Luego se reemplaza el agua hervida con una nueva olla de agua a temperatura ambiente para realizar la segunda fase.

3.5.1.2. La fase de alta potencia de inicio caliente

Se lleva a cabo después de la primera fase, mientras la estufa está caliente. Se utiliza combustible de un paquete previamente pesado para hervir una cantidad medida de agua en una olla normal. Repetir la prueba con una estufa caliente ayuda a identificar las diferencias en el rendimiento entre una estufa cuando esta fría y cuando está caliente. Esto es particularmente importante para las estufas con elevada masa térmica, ya que las mismas pueden mantenerse calientes durante la práctica.

3.5.1.3. La fase de hervir a fuego lento

Proporciona la cantidad de combustible requerido para 5 litros de agua y por debajo del punto de ebullición durante 45 minutos.

3.6. Recolección de información y ordenamiento de la información

A continuación, se describe los métodos por los cuales se realizará la recolección y ordenamiento de la información.

3.6.1. Información general

Cada prueba contiene la siguiente información:

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

3.6.1.1. Condiciones ambientales

- Porcentaje de humedad relativa del aire
- Punto de ebullición local del agua

Figura 12. Información general de la prueba WBT

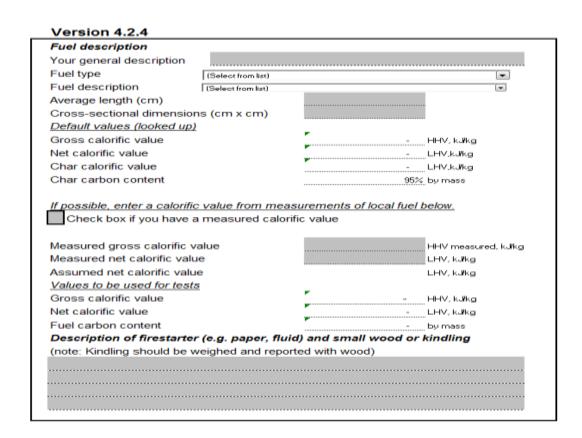
Water Boiling Test	t - General Information
Test & stove description	
Name of Tester(s)	
Test Number or Code	
Test Dates	
Test Year	
Test Location	
Replicate Test Number	
Altitude/Elevation (m)	
Stove Type/Model	
Manufactured by	
Description and Notes	
•	
Description of Pot(s)	
Ambient conditions	
Air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

Fuente: Global Alliance for Clean Cookstoves. *WBT Protocol 4.2.3 Spreadsheet*. http://cleancookstoves.org/technology-and-fuels/testing/protocols.html. Consulta: febrero 2017.

3.6.1.2. Selección del combustible

- Descripción general del combustible
- Tipo de combustible
- Los valores caloríficos netos y brutos y el contenido de carbón
- Descripción del material para iniciar el fuego, astillas o leña pequeña.
- Humedad del combustible

Figura 13. Información general del combustible



Fuente: Global Alliance for Clean Cookstoves. *WBT Protocol 4.2.3 Spreadsheet*. http://cleancookstoves.org/technology-and-fuels/testing/protocols.html. Consulta: febrero 2017.

3.6.1.3. Preparación diaria

Asegúrese que haya suficiente espacio y tiempo para llevar a cabo la prueba sin interrupciones. Las pruebas deben realizarse bajo techo en una habitación que esté protegida del viento, pero con suficiente ventilación para ventilar las emisiones nocivas de la estufa. El viento, la transferencia de calor, cambios de aire entre la estufa y la olla afectarán los resultados de la prueba, y esto debe evitarse.

3.6.1.3.1. Preparación del combustible

Preparar y pesar bastante combustible para cada WBT que se lleve a cabo. Cada paquete debe ser de al menos de 5 kg. Algunas estufas pueden necesitar más combustible. La leña que se utilizará para iniciar el fuego debe estar preparada antes de tiempo y se incluye en los paquetes prepesados de combustible.

Determinar el contenido de humedad del combustible por utilizar.

3.6.1.3.2. Preparación de la muestra

Se necesitan al menos 10 litros de agua (5 litros para ollas pequeñas) para cada olla que se utiliza en las tres fases del WBT. Si el agua es escasa en la zona, el agua utilizada el día anterior puede ser enfriada y reutilizada en la prueba del día siguiente. El agua debe estar a temperatura ambiente antes de la prueba. No empiece las pruebas con agua que está más caliente que la temperatura ambiente.

3.6.2. Consideraciones importantes para la prueba

- El sistema de cocción incluye una estufa, combustible, una olla y un operador. Los cuatro afectan el rendimiento del sistema.
- Ninguna prueba debe requerir que la estufa realice una tarea que no se llevaría a cabo durante su funcionamiento normal.
- Se debe utilizar la misma cantidad de combustible y olla para cada prueba para comparar diseños o estufas. Sin embargo, nunca se debe utilizar un combustible o una olla para una estufa que no fue diseñada para eso.
- El funcionamiento de la estufa tiene un gran efecto sobre el resultado de las pruebas de rendimiento. Todas las pruebas de una sola estufa, y todas las pruebas para evaluar las mejoras en el diseño, se deben hacer con el funcionamiento coherente de la estufa. Documentar la operación con los procedimientos escritos, fotos y videos (si es posible).
- La estufa debe comenzar a temperatura ambiente. La olla no debe estar tapada durante las pruebas.

3.6.3. Procedimiento metodológico experimental

A continuación, se describen los procesos para la obtención de las corridas de los distintos tratamientos.

3.6.3.1. Instrucciones para cada fase del WBT

La estufa debe comenzar a temperatura ambiente. La olla no debe estar tapada durante las pruebas.

3.6.3.1.1. Fase I. Inicio en frío (alta potencia)

- Prepare el cronómetro, pero aún no empiece.
- Pese la (s) o la olla (s).
- Llene la olla con 5 kg de agua fresca a temperatura ambiente. Pese la olla (con agua).
- De manera continua pese la leña y las astillas para iniciar el fuego.
- Coloque la olla en la estufa, utilice accesorios de madera para colocar el termómetro en cada olla.
- Confirme que no varía sustancialmente de la temperatura ambiente.
- Mida la temperatura inicial del agua en cada olla antes de encender.
- Inicie el fuego de una manera reproducible.
- Una vez que el fuego ha sido encendido, inicie el cronómetro y registre la hora.
- Controlar el fuego con los medios de uso común a nivel local.
- Cuando el agua de la primera olla alcanza el punto de ebullición (91°C)
 anotar el tiempo y temperatura.

- Quite toda la leña de la estufa y apague las llamas. Las llamas pueden extinguirse colocando los palos en un cubo de ceniza o arena, no utilice agua ya que afectará el peso de la madera. Elimine todo el carbón suelto de los extremos de la madera en el recipiente para pesar carbón.
- Pesar la leña sin quemar retirándola de la estufa junto con la madera restante del paquete previamente pesado.
- Extraer todo el carbón que queda de la estufa. Pesar el carbón restante con el carbón que se desprendió de los palos.
- Pesar cada olla con agua.
- Botar el agua caliente de cada olla.

3.6.3.1.2. Fase II. Inicio caliente

- Prepare el cronómetro, pero aún no empiece.
- Pese la (s) o la olla (s).
- Llenar la olla con 5 kg de agua fresca a temperatura ambiente. Pese la olla (con agua).
- Anote el peso del segundo paquete de leña junto con las astillas.
- Coloque la olla en la estufa e inserte el termómetro en la olla.
- Confirme que no varía sustancialmente de la temperatura ambiente.
- Mida la temperatura inicial del agua en cada olla.
- Iniciar el fuego usando combustible del segundo paquete de leña pesado previamente designado para esta fase de la prueba.
- Una vez que el fuego ha sido encendido, inicie el cronómetro y registre la hora.
- Controlar el fuego con los medios de uso común a nivel local.
- Cuando el agua de la primera olla alcanza la temperatura de ebullición (91°C) registre el tiempo y temperatura.

- Quite toda la leña de la estufa y apague las llamas. Elimine todo el carbón suelto de los extremos de la madera en la cámara de combustión de la estufa. (En esta parte no se pesa el carbón ni ceniza).
- Pesar la leña sin quemar retirándola de la estufa junto con la madera restante del paquete previamente pesado.
- Pesar cada olla con agua.
- Utilice la leña quemada otra vez dentro de la estufa. Proceda inmediatamente con la prueba de baja potencia.

3.6.3.1.3. Fase III. Baja potencia, hervir a fuego lento

- Prepare el cronómetro, pero aún no empiece.
- Anote el peso de la olla con agua.
- Anote el peso del combustible sobrante de la segunda fase más el tercer paquete de combustible y las astillas.
- Coloque la olla en la estufa e introduzca el termómetro en el agua.
- Reencienda la leña caliente que fue reemplazada.
- Una vez que el fuego ha sido encendido, iniciar el cronómetro. Anotar la hora de inicio.
- Por 45 minutos mantenga el fuego a un nivel que mantiene la temperatura del agua lo más cerca posible a 3 grados por debajo del punto de ebullición (91 °C). La prueba es inválida si la temperatura en la olla baja de más de 6 °C por debajo del punto de ebullición local.
- Después de los 45 minutos, anote el tiempo.
- Registre la temperatura final del agua que todavía debe ser de 3 °C por debajo del punto de ebullición establecido.
- Quite toda la leña de la estufa y apague las llamas. Elimine todo el carbón suelto de los extremos de la leña en el recipiente para carbón.

- Pesar la leña sin quemar retirada de la estufa junto con la leña restante del segundo bulto pesado previamente.
- Extraer todo el carbón que queda de la estufa. Pesar el carbón restante junto con el carbón de las puntas de los leños.
- Pese la olla con el agua que ha quedado.

3.6.3.2. Medición del punto de ebullición del agua en la olla

Mida constantemente la temperatura del agua (preferiblemente cada 30 s) a manera de controlar el tiempo en el que aparezca la primera burbuja de ebullición del agua.

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

- Encienda el equipo IAP Meter la misma se utilizará para medir CO y PM.
 Realice una medición al ambiente por diez minutos.
- Trascurrido el tiempo introduzca el equipo a la cámara de mezcla antes de iniciar la prueba.
- Al terminar la prueba retirar el equipo y anotar en la hoja de datos los resultados (promedio).

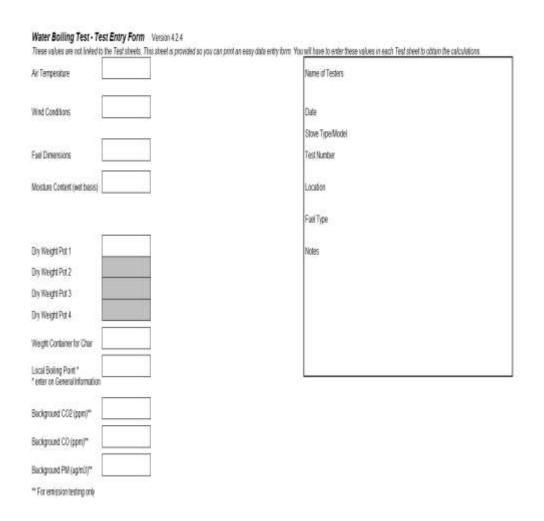
3.6.3.4. Poder calorífico

El dato del poder calorífico del combustible utilizado es proporcionado por La Sección de Tecnología de la Madera del Centro de Investigaciones de Ingeniería y es de 19 520 HHV kJ/kg.

3.6.4. Hoja de datos originales

Para el registro de los datos obtenidos es necesaria la impresión de una hoja de entrada de prueba, la cual es parte del documento WBT 4.2.4 SPREADSHEET.

Figura 14. Hoja de toma de datos



Fuente: Global alliance for clean cookstoves. WBT Protocol 4.2.4 Spreadsheet. p. 2.

Figura 15. Hoja de toma de datos para las tres fases



Fuente: Global alliance for Clean Cookstoves. WBT Protocol 4.2.4 Spreadsheet. p. 2.

3.7. Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información

Se describe a continuación los métodos utilizados para la tabulación,

ordenamiento y procesamiento de la información.

3.7.1. Tabulación y ordenamiento

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

Excel (WBT 4.2.4 SPREADSHEET) registradas en la pestaña Test-1, Test-2 y

Test-3.

3.7.2. **Procesamiento**

Utilizando el documento WBT 4.2.4 SPREADSHEET de Alianza Global, en

la sección de datos promedio se tomarán únicamente los parámetros que son

importantes para la prueba los cuales se presentarán en las tablas VII, VIII Y IX.

Tabla VII. Emisiones (CO) y material particulado (MP 2,5)

Parámetros Estufa A Estufa B Estufa C Estufa D Fogón abierto CO (mg/L) PM (mg/L)

Fuente: elaboración propia

62

Tabla VIII. Eficiencia energética

	Eficiencia Energética (%)					
Parámetros	Estufa A	Estufa B	Estufa C	Estufa D	Fogón abierto	
Arranque en frío						
Arranque caliente						
Baja potencia						

Fuente: elaboración propia.

Tabla IX. **Tiempo de ebullición**

	Tiempo de ebullición (min)					
Parámetros	Estufa A	Estufa B	Estufa C	Estufa D	Fogón abierto	
Arranque en frío						
Arranque Caliente						
Baja Potencia						

Fuente: elaboración propia.

3.8. Análisis estadístico

Para buscar la precisión y confiabilidad de los resultados, se calcula el número posible de observaciones que se deben tomar para alcanzar los objetivos de la investigación propuesta y que cumplan con un intervalo significativo de confianza, tratando de disminuir los posibles errores utilizando un número de corridas adecuadas a evaluar.

3.8.1. Medida de tendencia central

Se determinará la media aritmética que resumirá los datos obtenidos de las corridas e indicará el valor central de cada muestra.

Media aritmética

$$\bar{\mathbf{x}} = \frac{\sum xi}{\mathbf{n}}$$

[Ecuación 1]

Donde:

- \bar{x} Promedio de todas las muestras
- x_i Sumatoria de las muestras.
- n Número total de datos.

3.8.2. Medidas de dispersión

Se determinará la desviación estándar la misma será para indicar sobre la media de distancias que tienen los datos respecto a la media aritmética.

Desviación estándar

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} (x_i - \bar{x})}{n}}$$

[Ecuación 2]

Donde

 σ = desviación estándar

 x_i = valor de una muestra

 \bar{x} = promedio de todas las muestras

n = número total de muestras

Número de repeticiones

$$N = \frac{(Z_{\alpha}^2 PQ)}{\frac{2}{E^2}}$$

[Ecuación 3]

N = número de repeticiones

 $Z_{\alpha/2}$ = confiabilidad (0.95)

P = probabilidad de éxito (95%)

Q = probabilidad de fracaso (5%)

E = error estimado (10%)

3.9. Plan de análisis de los resultados

Los resultados se analizarán con diferentes métodos y programas, para llegar a conclusiones objetivas.

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

Los datos obtenidos se analizarán de forma estadística y grafica para determinar objetivamente si son eficientes las cinco estufas ahorradoras de leña.

3.9.2. Programas por utilizar para el análisis de datos

A continuación, se encuentran los programas que se utilizarán.

3.9.3. Microsoft Office Word 365

Este programa permitirá la edición y presentación del informe que contendrá los resultados de la investigación.

3.9.4. Microsoft Excel 365

Este programa se determinará la media aritmética y desviación de los datos obtenidos, así mismo se podrá visualizar gráficamente la eficiencia y potencia de cada estufa.

3.9.5. WBT 4.2.4 SPREADSHEET

Este documento establecido por Alianza Global para estufas ahorradoras de leña permitirá la recolección de todos los datos de todas las corridas necesarias a la investigación.

4. **RESULTADOS**

4.1. Comparación del porcentaje de eficiencia energética en fase inicio en frío

En la siguiente figura se muestra los resultados correspondientes de eficiencia energética en fase: inicio en frío. En el eje de las ordenadas están los porcentajes de eficiencia energética, en el eje de las abscisas está el tipo de estufa ahorradora de leña: estufa A, estufa B, estufa C y estufa D, y la línea continua representa el valor obtenido de fogón abierto.

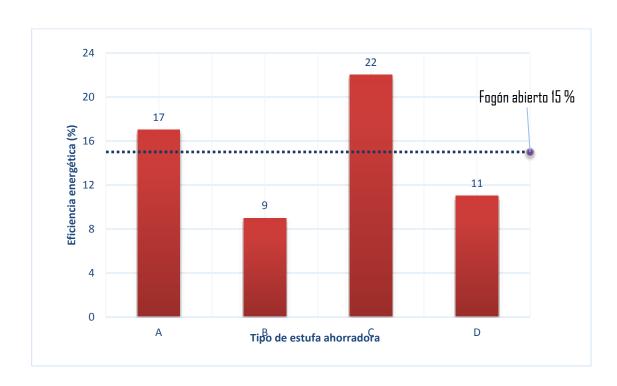


Figura 16. Eficiencia energética fase inicio en frío

Fuente: elaboración propia, con base en los resultados del apéndice 4, 5, 6,7 y 8.

4.2. Comparación del porcentaje de eficiencia energética en fase arranque caliente

En la siguiente figura se muestra los resultados correspondientes de eficiencia energética en fase: arranque caliente. En el eje de las ordenadas están los porcentajes de eficiencia energética y, en el de las abscisas está el tipo de estufa ahorradora de leña: estufa A, estufa B, estufa C y estufa D, y la línea continua representa el valor obtenido de fogón abierto.

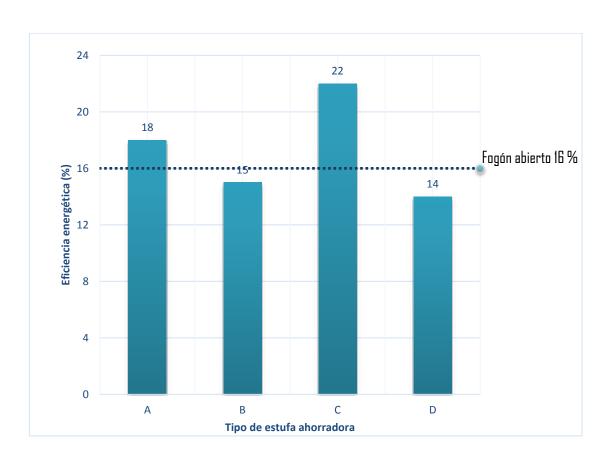


Figura 17. Eficiencia energética fase arranque en caliente

Fuente: elaboración propia, con base en los resultados del apéndice 4,5,6,7 y 8.

4.3. Comparación del porcentaje de eficiencia energética en fase hervir a fuego lento

En la siguiente figura se muestra los resultados correspondientes de eficiencia energética en fase: hervir a fuego lento. En el eje de las ordenadas se sitúan los porcentajes de eficiencia energética y en el de las abscisas, el tipo de estufa ahorradora de leña: estufa A, estufa B, estufa C y estufa D, y la línea continua representa el valor obtenido de fogón abierto.

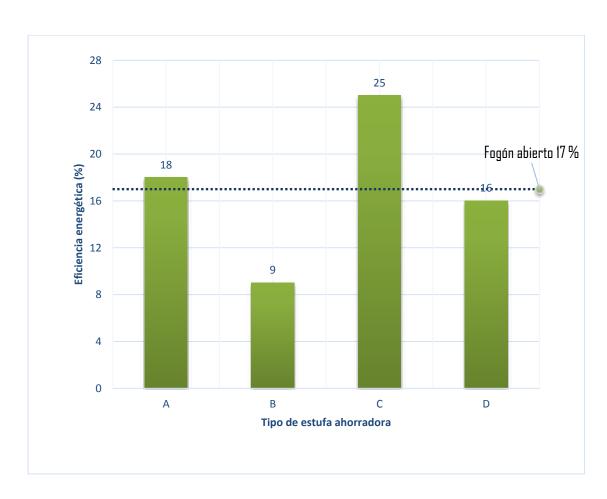


Figura 18. Eficiencia energética fase hervir a fuego lento (45 min)

Fuente: elaboración propia, con base en los resultados del apéndice 4,5,6,7 y 8.

4.3.1. Comparación del tiempo que tarda en alcanzar el punto de ebullición el agua en fase: inicio en frío

En la siguiente tabla se muestran los resultados del tiempo que tarda en alcanzar el punto de ebullición el agua en fase: inicio en frío, de cuatro estufas ahorradoras de leña: estufa A, estufa B, estufa C y estufa D y fogón abierto.

Tabla X. Tiempo de ebullición fase arranque en frío

Parámetros	Tiempo de ebullición (min)					
	Estufa A	Estufa B	Estufa C	Estufa D	Fogón abierto	
Arranque en frío	48	73	79	78	35	

Fuente: elaboración propia, con base en los resultados del apéndice 4,5,6,7 y 8.

4.3.2. Comparación del tiempo que tarda en alcanzar el punto de ebullición el agua en fase: arranque caliente

En la siguiente tabla se muestran los resultados del tiempo que tarda en alcanzar el punto de ebullición el agua en fase: arranque caliente, de cuatro estufas ahorradoras de leña: estufa A, estufa B, estufa C y estufa D y fogón abierto.

Tabla XI. Tiempo de ebullición fase arranque en caliente

	Tiempo de ebullición (min)						
Parámetros	Estufa A	Estufa B	Estufa C	Estufa D	Fogón abierto		
Arranque en caliente	35	41	40	50	27		

Fuente: elaboración propia, con base en los resultados del apéndice 4,5,6,7 y 8.

4.4. Comparación de la desviación estándar de la eficiencia energética de las tres fases

En la siguiente tabla se presenta los resultados de desviación estándar de la eficiencia energética de cuatro estufas ahorradoras de leña: estufa A, estufa B, estufa C, estufa D y fogón abierto, en sus tres fases: inicio en frío, arranque en caliente y hervir a fuego lento.

Tabla XII. Desviación estándar, eficiencia energética

Parámetros	Estufa A	Estufa B	Estufa C	Estufa D	Fogón abierto
Arranque en frío	1.67E-02	1.39E-02	1.47E-02	2.41E-02	7.29E-03
Arranque Caliente	1.67E-02	3.36E-02	1.47E-02	2.41E-02	4.25E-03
Hervir a fuego lento	1.03E-02	1.04E-02	8.79E-03	2.85E-02	1.43E-02

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

4.5. Comparación del porcentaje de área utilizada en la prueba

En la siguiente figura se muestra los resultados correspondientes para cada estufa ahorrada de leña: estufa A, estufa B, estufa C y estufa D, representa con un color en específico, en el eje de las ordenadas se representa el porcentaje de área superficial utilizada y en el eje de las abscisas, el porcentaje de eficiencia energética.

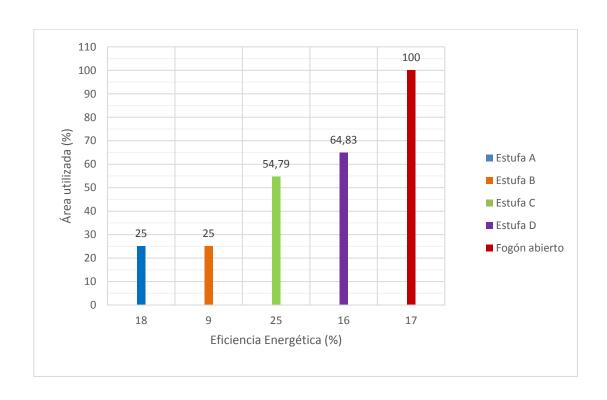


Figura 19. Área superficial vs eficiencia energética

Fuente: elaboración propia, con base en los resultados apéndice 4, 5, 6, 7,8 y 12.

4.6. Comparación de concentración de emisiones de monóxido de carbono (CO)

En la siguiente gráfica se muestra los resultados de emisiones de monóxido de carbono (CO) totales en sus tres fases. En el eje de las ordenadas se tienen los valores de concentraciones de monóxido de carbono (CO), en el eje de las abscisas, el tipo de estufa ahorradora de leña: estufa A, estufa B, estufa C y estufa D y la línea continua representa el valor obtenido de fogón abierto.

40 32 Fogón abierto 35,6 28 24 (g/min) 50 16 12 8 4,14 4 0,60 0.36 0,52 0 Α В С D

Figura 20. Emisión de monóxido de carbono (CO) total de cada estufa

Fuente: hoja Excel IAP 5000 Series.

Tipo de estufa ahorradora

4.7. Comparación de concentración de emisiones de material particulado (PM 2,5)

En la siguiente gráfica se muestra los resultados de material particulado (MP 2,5) totales en sus tres fases. En el eje de las ordenadas están los valores de concentraciones de material particulado (MP 2,5), en el eje de las abscisas, el tipo de estufa ahorradora de leña: estufa A, estufa B, estufa C y estufa D y la línea continua representa el valor obtenido de fogón abierto.

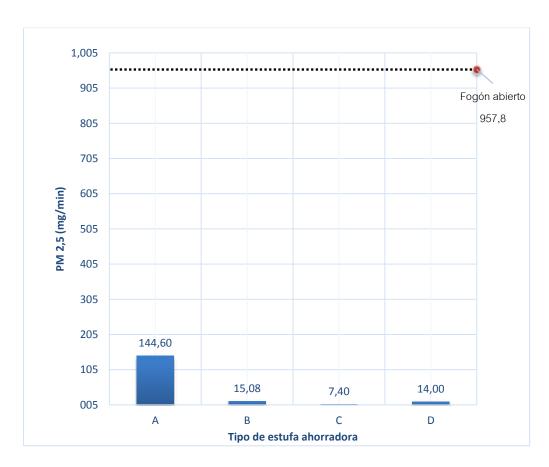


Figura 21. Emisión de PM 2,5 total de cada estufa

Fuente: hoja Excel IAP 5000 Series.

4.7.1. Comparación de la desviación estándar de emisiones de monóxido de carbono (CO) y material particulado (PM 2,5)

En la siguiente tabla se presenta los resultados de desviación estándar de la eficiencia energética, de cuatro estufas ahorradoras de leña: estufa A, estufa B, estufa C, estufa D y fogón abierto, en sus tres fases: inicio en frío, arranque en caliente y hervir a fuego lento.

Tabla XIII. Desviación estándar, CO y PM 2,5

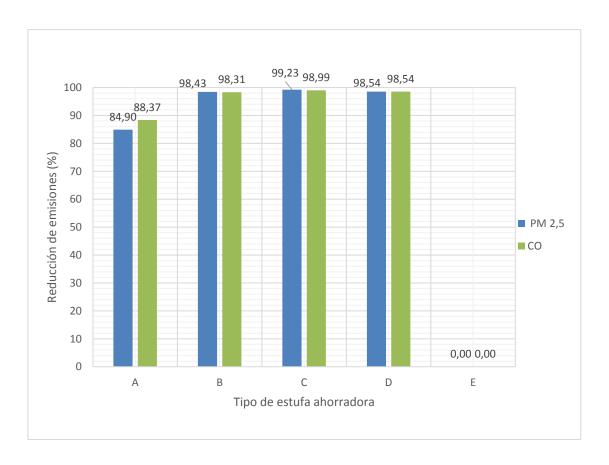
Parámetros	Estufa A	Estufa B	Estufa C	Estufa D	Fogón abierto
CO (g/min)	2.19E-01	3.65E-02	2.92E-02	1.10E-02	9.62E-01
PM 2,5 (mg/min)	8.94E-01	7.29E-01	5.48E-01	7.07E-01	1.10E+01

Fuente: hoja Excel IAP 5000 Series.

4.8. Comparación del porcentaje de reducción de emisiones de material particulado (PM 2,5) y monóxido de carbón (CO)

En la siguiente gráfica se muestra los resultados de porcentaje de reducciones en sus tres fases. Teniendo en el eje de las ordenadas, los porcentajes de reducción de emisiones, en el eje de las abscisas, indica el tipo de estufa ahorradora de leña: estufa A, estufa B, estufa C, estufa D y fogón abierto.

Figura 22. Emisiones de PM 2,5 y monóxido de carbono (CO) total de cada estufa



Fuente: hoja Excel IAP 5000 Series.

5. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

Una estufa ahorradora es un sistema para cocinar alimentos que funciona con leña como combustible principal. Permite encerrar el fuego para administrarlo y trasladar los gases de combustión al exterior de la cocina luego de aprovechar al máximo su calor.

La eficiencia energética de una estufa se determina cuando existe una transferencia por conducción y se refiere a la transferencia entre el calor de las ollas y el agua, perdidas de calor a través de las paredes, transferencia entre la llama y el interior de la leña.

Se realizó una comparación del porcentaje de eficiencia energética, emisiones de monóxido de carbono (CO) y material particulado (MP 2,5) de cuatro estufas ahorradoras de leña: estufa A, estufa B, estufa C, estufa D respecto a fogón abierto, fue necesario llevar a cabo una serie de pruebas que se dividió en tres fases: inicio en frío, arranque en caliente y hervir a fuego lento, con los diferentes valores de eficiencia energética en cada fase, que permitieron establecer el desempeño de las mismas, con base en los procedimientos estándares de operación del protocolo de ebullición de agua (WBT).

La eficiencia energética en fase: inicio en frío, es cuando el encendido se hace en frío, la mayor masa de la estufa retiene una mayor cantidad de energía térmica reduciendo la cantidad de calor transferible a la olla. El valor de eficiencia energética de inicio en frío para la prueba fogón abierto fue de 15 % y la tasa de combustión obtenida fue de 22 g/min. (Apéndice 8).

En la figura 16 se compara todos los valores de eficiencia energética de fase: inicio en frío de las cuatro estufas ahorradoras con la prueba de fogón abierto. La estufa que presenta mayor eficiencia energética y a su vez menor tasa de combustión (apéndice 6) es la estufa C, con valores de 22 % y 21 g/min, respectivamente. Hay una diferencia significativa de 7 % y 1 g/min comparado con fogón abierto.

La estufa A, fue la segunda en obtener mayor porcentaje de eficiencia respecto a fogón abierto con un valor de 17 %, pero con una tasa de combustión más baja de 14 g/min (apéndice 4), con una diferencia de 2 % y 8 g/min, comparado con fogón abierto . El valor de la tasa de combustión baja, nos demuestra un aprovechamiento mayor de energía disponible que brinda la leña hacia la estufa.

La estufa D obtuvo un porcentaje de eficiencia energética de 11 %, un valor más bajo comparada con fogón abierto y una tasa de combustión de 22 g/min (Apéndice 7) igual a la de fogón abierto. Lo anterior es consecuente con el bajo rendimiento cuyo encendido se hace en frío, debido a que la masa de la estufa absorbió parte de la energía para incrementar la temperatura. Una vez la estufa se encuentra en caliente, la transferencia térmica aumenta y mejora la eficiencia del proceso.

La estufa B, es la que obtuvo menor porcentaje de eficiencia comparadas con todas las estufas y fogón abierto, con un valor de 9 % y 19 g/min de tasa de combustión (Apéndice 5). Al analizar las particularidades de diseño, se nota que el área de boca de entrada de leña es pequeña y posee una doble plancha comparados con las otras estufas, por lo que la está tardará más en nivelar la temperatura en toda el área superficial y aumentar la transferencia térmica hacia la olla.

La eficiencia energética en fase: arranque en caliente, es cuando la estufa se encuentra caliente, aprovechando la temperatura de la fase anterior, por lo necesita menor combustible para mantener la temperatura del agua en la olla, reduciendo sus pérdidas de energía y determinar así si la eficiencia aumentaba, disminuía o se mantenía. El valor de eficiencia energética de arranque en caliente para la prueba de fogón abierto fue de 16 % y la tasa de combustión obtenida fue de 32 g/min. (Apéndice 8).

En la figura 17 se comparan todos los valores de eficiencia energética en fase: arranque en caliente de las cuatro estufas ahorradoras con la prueba de fogón abierto, nuevamente podemos decir que la estufa tipo C obtuvo mayor porcentaje de eficiencia energética con valor de 22 % y una tasa de combustible de 21 g/min. Estos resultados indican que es eficiente en comparación a fogón abierto. La estufa C está fabricada por diversos materiales como el concreto fundido que, por su conductividad térmica permite aumentar el calor a través de su masa, cedazo galvanizado, para evitar su corrosión temprana y fibra de vidrio, este por ser un material aislante ayuda a absorber la humedad de las paredes de la estufa que adquiere del ambiente. Con base en ello, se asegura que aporta un aumento de su eficacia en la prueba de ebullición de agua.

La estufa A, obtuvo un porcentaje de eficiencia energética de 18 %, con un grado de diferencia de las fases: inicio en frío y arranque en caliente. Obtuvo un valor de tasa de combustión de 16 g/min, lo cual indica que quemó más rápido la leña, pero logró mantener su eficiencia energética. Cabe resaltar que dicha estufa está diseñada por una cámara de combustión, el cual la transferencia de calor tiene contacto directo con la olla de calentamiento de agua a bullir, parecida a cocinar a fogón abierto, pero cocinar en ella es más eficiente que cocinar con fogón abierto.

La estufa B, obtuvo un porcentaje de eficiencia energética de 15 % y una tasa de combustión de 18 g/min en la fase: arranque caliente. Dicho valor está por debajo del porcentaje obtenido de fogón abierto. Comparando los porcentajes de eficiencia energética de las fases: inicio en frío y arranque en caliente, la estufa tuvo un aumento de 6 % de eficiencia energética. Esto se debe a que la estufa tuvo una distribución energética en la fase de calentamiento (inicio en frío) que permitió minimizar las dispersiones de energía térmica al ambiente y concentrar la energía térmica en el área donde se encontraba la olla calentando el agua. Esta estufa está fabricada de cemento y por su característica, de conductividad térmica, tardará en nivelar la temperatura en todas sus propiedades.

La estufa D obtuvo un porcentaje de eficiencia energética de 14 % y tasa de combustión de 32g/min, mejoró su eficiencia energética aumentando 3 % comparado con la fase arranque en frío, pero es la estufa que obtuvo menor eficiencia energética comparada con todas las estufas ahorradoras y fogón abierto. Con base en ello se puede asegurar que la transferencia de calor hacia las ollas disminuye y aumenta el tiempo de cocción. La estufa está fabricado de ladrillo por lo que tiene baja conductividad térmica en comparación con los materiales con lo que están fabricadas las estufas ahorradoras, este material no ayuda en gran manera a la estufa debido que su cámara de combustión es grande.

La eficiencia energética en fase: hervir a fuego lento, es cuando la estructura y accesorios de la estufa se encuentran calientes y únicamente necesita mantener la temperatura del agua lo más cerca posible a su punto de ebullición controlando que no suba ni baje seis grados de su temperatura de referencia.

El valor de eficiencia energética de hervir a fuego lento para la prueba fogón abierto fue de 17 % y la tasa de combustión obtenida fue de 21 g/min. (Apéndice 8).

En la figura 18 se comparan los valores de eficiencia energética de fase: hervir a fuego lento de las cuatro estufas ahorradoras con la prueba de fogón abierto. Utilizando un tiempo de 45 minutos para las pruebas, manteniendo la temperatura del agua lo más cerca posible a tres grados por debajo del punto de ebullición. Cabe resaltar que la intensidad del fuego debe ser constante y a fuego lento.

Al efectuar la comparación de las estufas podemos observar que las que destacan mayor eficiencia sobre fogón abierto fueron: estufa A con 18 % y estufa C con 25 %, y las que obtienen valores más bajo son: la estufa D con un 16 % y la estufa B con 9 %, comparadas con fogón abierto. Cabe resaltar que por las diversas estructuras morfológicas de cada estufa, no todas alcanzan un equilibrio termodinámico entre sus accesorios y el ambiente. Las que poseen mayor eficiencia son las que transfieren mayor energía de la plancha a la olla.

En la tabla X se compara los resultados de tiempo de que tarda en alcanzar el punto de ebullición el agua en la fase: inicio en frío, de cuatro estufas ahorradoras de leña: estufa A, estufa B, estufa C, estufa D y fogón abierto. La prueba de fogón abierto es la que menos tarda en calentar una olla con agua, con un valor de 35 minutos, le siguen las estufas A, B, D y C con valores de 48 minutos, 73 minutos, 78 minutos y 79 minutos, respectivamente.

El tiempo es un indicador independiente respecto a la eficiencia energética de una estufa, como lo demostró la figura 17 donde se muestra que puede tener un valor de eficiencia alto, pero se demorará más en calentar una olla con agua, porque no consume mayor cantidad de combustible como lo hace una prueba a fogón abierto.

En la tabla XI se comparan los valores de tiempo de ebullición de agua para la fase: arranque en caliente, y nuevamente calentar una olla con agua se tardó menos para fogón abierto con un valor de 27 minutos, le siguen las estufas: A, C, B y D con valores de 35 minutos, 40 minutos, 41 minutos y 50 minutos, respectivamente. Podemos observar que todas las estufas redujeron el tiempo en comparación con la fase de inicio en frío debido a que todas las estufas poseen un nivel energético.

En la figura 19 se comparan los resultados del porcentaje de área utilizada por cada estufa ahorradora en la prueba de bullir agua en una olla para conocer que estufa aprovecha mayor su área de calentamiento. Esto beneficia en gran medida el tiempo de ebullición de agua porque realiza mayor contacto energético. Se tiene que la estufa A y B utilizan únicamente el 25 % de su área, la estufa C un 54,79 % y la estufa D un 64,83 %. Esta diferencia se debe a que la estufa A y B tienen la capacidad de calentar únicamente una olla, y la estufa C y D utilizan dos ollas. Respecto a fogón abierto no se puede determinar el área que utilizará porque libera toda la energía hacia sus alrededores, debido a que no posee una forma morfológica definida.

Una de las contribuciones más relevantes de la implementación de estufas eficientes está relacionado con el potencial de reducir la degradación de los bosques existentes asociado a prácticas extractivas insostenibles y su impacto sobre el cambio climático global.

Como en cualquier combustible, son el carbono y el hidrógeno los que le confieren las propiedades térmicas a la madera que al incinerarse eficientemente generan dióxido de carbono y vapor de agua como productos residuales del proceso.

Sin embargo, cuando se produce una combustión ineficiente, se generan gases no deseados como el metano (CH4), el monóxido de carbono (CO) y óxido nitroso (N2O), los cuales presentan un potencial de efecto invernadero mucho mayor que el CO₂.

En las pruebas existen perdidas de energía a los alrededores. En el fogón abierto los gases no están confinados y se escapan al ambiente donde contaminan el aire en el área donde se trabaja. Las estufas ahorradoras de leña están fabricadas para aislar las emisiones intradomiciliarias que generan al quemar la leña. Se cuantificó las cantidades emitidas de las tres fases en total de emisiones de monóxido de carbono (CO) y material particulado (MP 2,5) para cada una de las estufas evaluadas y fogón abierto.

En la figura 20 se comparan los valores de concentraciones de monóxido de carbono (CO) consumidas por cada estufa ahorradora y fogón abierto. Se puede ver que la concentración más alta la obtuvo la de fogón abierto con un valor de 35,6 g/min de monóxido de carbono. Esto indica que no es apta para cocinar y aporta gran contaminación al ambiente debido a reacciones incompletas produciendo gases no deseados y no aprovecha toda la energía requerida por la olla. Cabe resaltar que el fuego no está encerrado y es altamente visible por el usuario.

La estufa C con menor emisión de monóxido de carbono (CO) con un valor de 0,36 g/min. Esta se justifica porque aprovecha al máximo su combustible y lo refleja en los porcentajes de eficiencia en cada una de las etapas mencionadas anteriormente. La estufa D, obtuvo un valor de 0,52 g/min y la estufa B con 0,60 g/min. La estufa A obtuvo 4,14 g/min, por su particularidad de diseño, el cual tiene una abertura por medio parecida a fogón abierto, pero pequeña y mejorada porque es cubierta por una plancha delgada, esto permitió que aumentará la cantidad de gases emitidos por dicha estufa. Con base en lo anterior se confirma que se aprovechó la energía generada por la combustión del material en las estufas ahorradoras a diferencia de fogón abierto que genero mayor contaminación.

En la figura 21 se comparan las concentraciones de material particulado (PM 2,5) al interior del área de las prueba en sus tres fases, de las cuatro estufas ahorradoras y fogón abierto. La prueba de fogón abierto obtuvo el valor más alto de 957,8 g/min. La estufa C obtuvo el menor valor siendo de 7,40 mg/min. El desempeño de las estufas ahorradoras B y D fue muy similar con valores 15,08 mg/min y 14,00 mg/min, respectivamente.

La estufa A mostró un valor de 144,60 mg/min. Por esta razón, se deben considerar mejoras tecnológicas en su diseño para su reducción o control respecto a la salida de gases ya que no cuenta con chimenea propia. Probablemente esta condición afecta la cantidad de gases emitidos.

En la figura 22 se observa el porcentaje de reducciones de material particulado (PM 2,5) y monóxido de carbono (CO) total en sus tres fases de las cuatro estufas ahorradoras; estufa A, estufa B, estufa C y estufa D se obtienen valores de: (84,90 % y 88,37 %), (98,43 % y 98,31 %), (99,23 % y 98,99 %), (98,54 % y 98,54 %), respectivamente.

Las estufas logran obtener porcentajes altos de reducciones mayores a 84,90 % lo cual indica que no contaminan el aire de forma directa en el área donde se está cocinando al utilizar leña como combustible. La prueba de fogón abierto no reduce emisiones por lo que se va directo al ambiente aumentando la contaminación y enfermedades respiratorias al usuario.

Las estufa A redujo seis veces la concentración de material particulado (PM 2,5), la estufa B lo hizo 63 veces, la estufa C 129 veces y la estufa D 129 veces, respecto al fogón abierto. Esta reducción es importante ya que al no contar con una estufa ahorradora y limpia pone en riesgo la salud de las usuarias.

Con base en los resultados obtenidos de eficiencia energética para todas las fases realizadas de las cuatro estufas ahorradoras y fogón abierto, se realiza en análisis de varianza (Apéndices 9 al 10) se afirma que existe una diferencia significativa, por lo que se rechaza las hipótesis nulas: H₀₁, H₀₂, H₀₃, H₀₄ y H₀₅.

CONCLUSIONES

- Se analizaron todas las eficiencias energéticas de las cuatro estufas ahorradoras y únicamente las estufas: C y D son eficientes comparadas con la de fogón abierto.
- 2. La eficiencia energética de la estufa A, estufa B, estufa C, estufa D y fogón abierto en el arranque en frío son: 17 %, 9 %, 22 %, 11 % y 15 % respectivamente.
- 3. La eficiencia energética de las estufas A, B, C, D y fogón abierto en el arranque en caliente son: 18 %, 15 %, 22 %, 14 % y 16 % respectivamente.
- 4. La eficiencia energética de las estufas A, B, C, D y fogón abierto en la fase hervir a fuego lento son: 18 %, 9 %, 25 %, 16 % y 17 % respectivamente.
- 5. La estufa C tuvo la mejor eficiencia energética en las tres fases estudiadas siguiendo el protocolo WBT comparada con fogón abierto.
- 6. Se logró determinar el área superficial utilizada por las estufas ahorradoras para conocer qué estufa aprovechó al máximo su área de calentamiento y los valores fueron: estufa A (25 %), estufa B (25 %), estufa C (54,79 %) y estufa D (64,83 %). La estufa D utilizó mayor área, pero no la que obtuvo mejor eficiencia energética.

- 7. Las emisiones de monóxido de carbono (CO) de las estufas A, B, C, D y fogón abierto en total de las tres fases son: 4,14 g/min, 0,60 g/min, 0,36 g/min, 0,52 g/min y 35,6 g/min respectivamente.
- 8. Las emisiones de material particulado (PM 2,5) de las estufas A, B, C, D y fogón abierto en total de las tres fases son: 144,60 mg/min, 15,80 mg/min, 7,40 mg/min, 14,00 mg/min y 957,8 mg/min respectivamente.
- 9. La estufa C emite menor cantidad de monóxido de carbono (CO) y material marticuado (MP 2,5) con valores de (0,36 g/min y 7,40 mg/min), respectivamente y fogón abierto es la que emite mayor cantidad con valores de (35,6 g/min y 957,8 g/min), respectivamente.
- 10. La estufa A fue la que alcanzó en menor tiempo la temperatura de ebullición en las fases de inicio en frío y arranque caliente con valores de 48 min y 35 min, respectivamente comparado con fogón abierto.
- 11. La reducciones de emisiones de monóxido de carbono (CO) y material particulado (MP 2,5) de todas las estufas ahorradoras de leña se encuentra arriba del 84,90 % y 88,37 %, respectivamente, representando gran ventaja con fogón abierto, indicando que son estufas limpias para la prueba de ebullición de agua.

RECOMENDACIONES

- 1. La leña a utilizar en todas la pruebas deberá tener la menor humedad posible para que su poder calorífico disminuya en cada estufa.
- 2. Determinar límites de humedad en la leña por utilizar ya que puede afectar la cantidad de combustible consumido en las estufas.
- Realizar más pruebas de ebullición de agua (WBT) con un mismo tipo de estufas para tener una mejor comparación con fogón abierto, ya que los resultados de eficiencia energética son afectados por características propias de cada una.
- 4. Realizar estudios evaluando las áreas utilizadas de las estufas, hacer una clasificación por tamaño o cantidades de ollas utilizadas y, con base en ello, evaluar la eficiencia energética ya que es un factor influyente en la misma.
- 5. Evaluar las condiciones ambientales y establecer límites específicos en cuanto a su temperatura y humedad para la realización de las pruebas, ya que la variación se ve afectada en la cantidad de combustible consumido y tiempo que tarda en nivelar la temperatura de cada estufa.
- Clasificar las estufas que poseen ducto de salida para la expulsión de emisiones al exterior y las que no tienen, realizar una comparación entre el mismo tipo para un mejor estudio de emisiones de CO y PM 2,5.

- 7. Asegurar que el área por utilizar para el estudio de pruebas controladas de ebullición de agua estén completamente confinadas y que no haya entradas y salidas de aire excesivas para evitar pérdidas de emisiones de CO y PM 2,5.
- 8. A realizar las mediciones de emisiones de material particulado (MP 2,5) y monóxido de carbono (CO) es necesario establecer una línea base, es decir, cuantificar las cantidades iniciales y finales al ambiente, para determinar y comparar las cantidades, al inicio y final de la prueba realizada.
- 9. Es necesario implementar un programa de seguimiento y monitoreo sobre las estufas ahorradoras.
- 10. Implementar entidades de certificación de estufas ahorradoras que puedan asegurar el desempeño de las mismas ante diferentes criterios.

BIBLIOGRAFÍA

- BAILIS RAILIS, Ogle. The Water Boiling Test (WBT) Household Energy and Health Programme Shell Foundtion. [enlinea]. http://cleancookstoves.org/chnologyandfuels/testing/protocols.html. [Consulta: 15 marzo de 2017].
- 2. BERRUETA V.M., Edwards. *Energy performance of Wood-burning cookstoves in M, Mexico.* [en línea]. http://cleancookstoves.org/technologyandfuels/testing/protocols.h tml>. [Consulta: 4 marzo de 2017].
- 3. BOY E. Bruce N. Fuel efficiency of an improved wood-burning stove in rural Guatemala: implications for health, environment and development. Energy for Sustainable Development. [en línea] http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0973082608602392. ISSN 0973-0826. DOI 10.1016/j.bbr.2011.03.031>. [Consulta: 4 de marzo de 2017].
- 4. CUZ CHAMAM, Víctor Hugo. Manual para estufas mejoradas dirigido a la Escuela Oficial Rural Mixta, Barrio Poza Azul I, Panzós, Alta Verapaz. Trabajo de graduación de Licenciatura en Pedagogía y Administración Educativa. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Humanidades, 2012. 151 p.

- Global Alliance for Clean Cookstoves. WBT Protocol 4.2.3 English. [en línea]. http://cleancookstoves.org/technology-and-fuels/testing/protocols.html. [Consulta: febrero de 2017].
 _______. (2014). WBT PROTOCOL 4.2.3 ESPAÑOL [en línea]. http://cleancookstoves.org/technology-and-fuels/testing/protocols.html. [Consulta: 2 marzo de 2017].
- 8. GRANADOS MERIDA, Rony Estuardo. Guía técnica de las especies forestales más utilizadas para la producción de leña en Guatemala. INAB. Guatemala: 2017. 66 p.
- GUERRARA SAMAYOA, José Esaú. Informe final del estudio de sistematización de estufas ahorradoras de leña de ocho municipios del Altiplano Occidental de Guatemala. San Miguel Ixtahuacán, Guatemala: Sierra Madre, 2009. 31 p.
- MOTHES, J. Estadística aplicada a la ingeniería. España: Ariel, 1960.
 360 p.
- MUKUNDA, H. S., SHRINIVASA, U. Y DASAPPA, S. Portable single pan wood stoves of high efficiency for domestic use. [en línea] http://link.springer.com/article/10.1007%2FBF02759888. [Consulta: 2 de marzo de 2017].

- 12. PAIZ, Juan Carlos. *Plan de acción nacional de Guatemala para estufas y combustibles limpios*. Guatemala: Global Alliance for clean cooktoves, 2014. 51 p.
- 13. SMITH K. Dutta. Monitoring and evaluation of improved biomass cookstove programs for indoor air quality and stove performance: conclusions from the Household Energy and Health Project. Energy for Sustainable Development. 2007, vol. 11, n° 2, p. 5-18. [en línea] http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S097308 2608603968>. [Consulta: 2 de marzo de 2017].
- 14. WANG, Xiaoping, et. al. ¿Qué hemos aprendido del uso de la biomasa para cocinar en los hogares de América Central? Banco Mundial, 2016,146 p.
- 15. DEL VALLE ROSALES, Sebastián. Determinación de la eficiencia termodinámica máxima y de combustión de la estufa mejorada "Doña Justa. Trabajo de graduación de Ingeniería Química. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 2005. 73 p.

APÉNDICES

Apéndice 1. Muestra de cálculo

Promedio humedad base húmeda

$$H_H = \frac{H_{H1} + H_{H2} + H_{H3}}{3}$$

[Ecuación 4]

Donde:

H_H= % de humedad en base húmeda

H_{H1}, H₂,H₃ = Humedad de cada repetición

Corrida 1

Tomando los valores de la estufa A, arranque en frío.

 $H_{H1} = 11,7\%$

H_{H2}= 12,1%

 $H_{H3} = 13,3\%$

$$H_H = \frac{11,7 + 16,2 + 13,3}{3}$$

$$H_H = 12 \%$$

Humedad en base seca

$$H_S = \left(\frac{H_H}{1 + H_H}\right) * 100$$

[Ecuación 5]

Donde:

H_H= % de humedad en base húmeda

Hs = % de humedad en base seca

Corrida 1

Tomando los valores de la estufa A, arranque en frío.

 $H_{H}= 11\%$

$$H_S = \left(\frac{0,11}{1+0,11}\right) * 100$$

$$H_S = 10\%$$

Tiempo de ebullición

$$\Delta t = t_{f} - t_{o}$$

[Ecuación 6]

Donde:

Δt= tiempo de ebullición (min)

to= tiempo inicio (min)

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

Corrida 1

Tomando los valores de la estufa A, arranque en frío.

 $t_0 = 9:10 h$

 $t_f = 10:14 h =$

$$\Delta t = 09:10 \ h - 10:14 \ h$$

$$\Delta t = 64 \, min$$

Combustible consumido

$$m_c = m_{ci} - m_{cf}$$

[Ecuación 7]

Donde:

m_c= combustible consumido (g).

 m_{ci} = combustible inicio (g).

 m_{cf} = combustible final (g).

Corrida 1

Tomando los valores de la estufa A, arranque en frío

 m_{ci} = 4000 g

 $m_{cf} = 2050 g$

$$m_c = 4\ 000\ g - 2950\ g$$

$$m_c = 1050 g$$

Peso neto de carbón y cenizas

$$\Delta W_c = W_c - W$$

[Ecuación 8]

Donde:

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

w = peso del contenedor (g).

Corrida 1

Tomando los valores de la estufa A, arranque en frío

 $W_c = 560 g$

w = 420 g

$$\Delta w_c = 560 - 420$$

$$\Delta W_c = 140 \ g$$

Masa de agua vaporizada

$$w_{wv} = O_i - O_f$$

[Ecuación 9]

Donde:

Wwv= Agua vaporizada (g).

 $O_f = Olla con agua final (g).$

O_i = Olla con agua inicial (g).

Corrida 1

Tomando los valores de la estufa A, arranque en frío

$$O_i = 5370 (g)$$

$$O_f = 5110 (g)$$

$$w_{cv} = 5370 - 5110$$
$$w_{cv} = 260 g$$

Masa efectiva de agua hervida

$$w_{cr} = \sum_{j=1}^{2} \left((M_{of} - M_{ov}) * \left(\frac{T_{wf} - T_{wi}}{T_b - T_{wi}} \right) \right)$$

[Ecuación 10]

Donde:

 w_{cr} = Masa efectiva del agua hervida

 M_{of} = masa de la olla después de la prueba (g).

 M_{ov} = masa de la olla inicial- vacía (g).

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

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

 T_b = temperatura de ebullición del agua.

Corrida 1

Tomando los valores de la estufa A, arranque en frío

 $M_{of} = 5110 (g)$

 $M_{ov} = 420 \text{ (g)}$

 $T_{wi} = 20,3 \ (^{\circ}C).$

 T_{wf} = 91 (°C).

 T_b = temperatura de ebullición del agua.

$$w_{cr} = 4740 g$$

Corrección de temperatura del tiempo de ebullición

$$\Delta t_c^T = \Delta t_c * \frac{75}{T_{eb} - T1_{ci}}$$

[Ecuación 11]

Donde:

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

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

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

 $T1_{ci}$ = temperatura olla (s) inicial (°C)

Corrida 1

Tomando los valores de la estufa A, arranque en frío

$$\Delta t_c = 64 \text{ (min)}$$
 $T_{eb} = 91 \text{ °C}$
 $T1_{ci} = 20,3 \text{ °C}$

$$\Delta t_c^T = 64min * \frac{75 \, ^{\circ}C}{91 \, ^{\circ}C - 20,3 \, ^{\circ}C}$$
$$\Delta t_c^T = 68 \, min$$

Consumo específico de combustible

$$m_{cef} = \frac{m_c \left(LHV(1-H_s) - H_S(4,186(T_{eb}-T_{amb})+2,257)\right) - \Delta c_h * LVHc}{LHV}$$
 [Ecuación 12]

m_{cef} = combustible especifico final (g).

LHV = valor calorífico neto (kJ/kg).¹⁴

H_s = humedad en base seca. (%).

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

 T_{amb} = temperatura ambiente (°C).

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

 $^{^4}$ En el caso de los combustibles de madera, el LHV típicamente difiere del HHV en 1,32 MJ / kg^2 .

Corrida 1

Tomando los valores de la estufa A, arranque en frío

$$m_c = 1050 (g)$$
.

LHV = 18,200 kJ/kg.

$$H_s = 10$$
 (%).

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

$$T_{amb} = 20,3 (°C).$$

$$\Delta W_c = 140 (g)$$
.

$$m_{cef} = 143 \frac{g}{litro\ hervido}$$

Eficiencia térmica

$$h_c = \frac{4.186 * \sum_{j=1}^{2} (M_o - M_{ov}) * (T_{wi} - T_{wf}) + 2260 * w_{wv}}{m_c * LHV}$$

[Ecuación 13]

Corrida 1

Tomando los valores de la estufa A, arranque en frío

 $m_c = 1050 (g)$.

LHV = 18,200 kJ/kg.

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

 $T_{amb} = 20,3 (^{\circ}C).$

 $\Delta W_c = 140 (g)$.

 $P_2 = 370 g$

 $W_{wv} = 460 g$

 $M_{of} = 5110 \text{ (g)}$

 $M_{ov} = 420 \; (g)$

 $T_{wi} = 20,3 \; (^{\circ}C).$

 T_{wf} = 91 (°C).

$$h_c = 17\%$$

Área utilizada

$$Au = \frac{Ao^2}{At} * 100$$

[Ecuación 14]

Au = porcentaje área superficial utilizada

Ao = área de olla (s)

At = área total

Corrida 1

Tomando los valores de la estufa A, arranque en frío

 $Ao = \pi *D^2 = \pi * 24^2 = 1809,56 \text{ cm}^2$

 $At^* = \pi *D^2 = \pi * 48^2 = 7238,25 \text{ cm}^2$

At = 25 %

*Para determinar el área superficial total de la plancha, dependerá de la

morfología de la estufa.

Punto de ebullición local

El dato oficial obtenido fue de 91 º C determinado por equipo de medición

en el área de Sección De Tecnología de la Madera del Centro de Investigaciones

de Ingeniería.

Poder calorífico de la leña utilizada

El Ministerio de Energía y Ambiente realizó un trabajo en el donde

obtuvieron el poder calórico de la leña el cual fue de un valor de 19 520 HHV

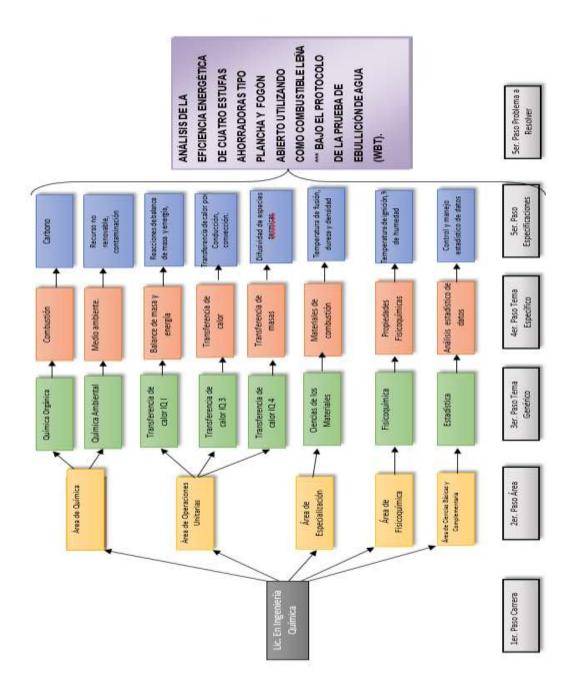
kJ/kg.5

Fuente: Elaboración propia

⁵ http://www.energia.gob.cl/sites/default/files/guia_buen_uso_de_la_lena_web.pdf

106

Apéndice 2 Tabla de requisitos académicos



Fuente: elaboración propia.

ABIERTO UTILIZANDO EL PRUEBA DE EBULLICIÓN LENA CUATRO TIPO AHORRADORAS DE ENERGÉTICA DE ESTUFA FOGON PROTOCOLO DE ANÁLISIS DE LA PLANCHA Y UNA DE AGUA (WBT). EFICIENCIA ESTUFAS Emisión de gases Humedad de leña 8 Entorno Medidas Tiempo dé hervo Hora de inicio Combustible Temperatura ambiente Balanza analitica Tiempo Temperatura ebullición Temperatura Obtención de carbón Bandeja de metal Tenazas Equipo y cristalería Eficiencia energetica 8 Inicio en frio Eficiencia energética Procedimiento Analizador de gases Medidor de humedad Ollas estándar Cinco estufas ahorrativas (Tipo piancha) Fuego lento Combustible (lefia) Materia prima Recurso humano Agua (H_cO) Fósforos Estudiante: Noemi Mauricio Rivera Assort Inge. Hernández

Apéndice 3. Diagrama de Ishikawa

Fuente: elaboración propia

.

Apéndice 4. Resultados estufa A

1. HIGH POWER TEST (COLD START)					
Parameters	units	Test 1	Test 2	Test 3	Average
Time to boil Pot # 1	min	64	42	37	47.667
Temp-corrected time to boil Pot # 1	min	68	46	39	51
Burning rate	g/min	11	13	18	14
Thermal efficiency	%	17	19	16	0.171
Specific fuel consumption	g/liter	143	115	136	132
Temp-corrected specific consumption	g/liter	151	127	144	141
Temp-corrected specific energy cons.	kJ/liter	2,756	2,313	2,623	2564
Firepower	watts	3,220	3,986	5,403	4203.153
2. HIGH POWER TEST (HOT START)	<u>.</u>	•			•
Parameters	units	Test 1	Test 2	Test 3	Average
Time to boil Pot # 1	min	38	32	35	35
Temp-corrected time to boil Pot # 1	min	41	35	38	38
Burning rate	g/min	16	15	17	16
Thermal efficiency	%	17	20	17	0
Specific fuel consumption	g/liter	127	102	124	118
Temp-corrected specific consumption	g/liter	138	113	133	128
Temp-corrected specific energy cons.	kJ/liter	2,505	2,054	2,416	2325
Firepower	watts	4,872	4,696	5,175	4914
3. LOW POWER (SIMMER)	·				
Parameters	units	Test 1	Test 2	Test 3	Average
Burning rate	g/min	17	12	12	14
Thermal efficiency	%	19	17	18	0.177
Specific fuel consumption	g/liter	204	134	139	159
Temp-corrected specific energy cons.	kJ/liter	3,721	2,436	2,523	2893
Firepower	watts	5,099	3,699	3,746	4181
Turn down ratio		0.63	1.08	1.44	1

Apéndice 5. Resultados estufa B

Parameters	units	Test 1	Test 2	Test 3	Average	
Time to boil Pot # 1	min	64	82	72	72.667	
Temp-corrected time to boil Pot # 1	min	69	88	79	79	
Burning rate	g/min	22	19	16	19	
Thermal efficiency	%	8	8	10	0.086	
Specific fuel consumption	g/liter	300	333	241	292	
Temp-corrected specific consumption	g/liter	322	357	266	315	
Temp-corrected specific energy cons.	kJ/liter	5,858	6,497	4,846	5734	
Firepower	watts	6,763	5,768	4,780	5770.467	
2. HIGH POWER TEST (HOT START)						
Parameters	units	Test 1	Test 2	Test 3	Average	
Time to boil Pot # 1	min	41	39	42	40.667	
Temp-corrected time to boil Pot # 1	min	45	42	45	44	
Burning rate	g/min	15	23	16	18	
Thermal efficiency	%	17	11	17	0	
Specific fuel consumption	g/liter	127	190	142	153	
Temp-corrected specific consumption	g/liter	140	207	152	166	
Temp-corrected specific energy cons.	kJ/liter	2,540	3,759	2,766	3022	
Firepower	watts	4,474	7,094	4,846	5471	
3. LOW POWER (SIMMER)						
Parameters	units	Test 1	Test 2	Test 3	Average	
Burning rate	g/min	20	20	19	20	
Thermal efficiency	%	10	8	9	0.094	
Specific fuel consumption	g/liter	224	210	210	215	
Temp-corrected specific energy cons.	kJ/liter	4,069	3,820	3,823	3904	
Firepower	watts	6,073	5,929	5,777	5926	
Turn down ratio		1.11	0.97	0.83	1	

Apéndice 6. Resultados estufa C

1. HIGH POWER TEST (COLD START)					
Parameters	units	Test 1	Test 2	Test 3	Average
Time to boil Pot # 1	min	44	33	43	40
Temp-corrected time to boil Pot # 1	min	47	36	47	43
Burning rate	g/min	18	24	22	21
Thermal efficiency	%	22	23	20	0.215
Specific fuel consumption	g/liter	99	83	110	97
Temp-corrected specific consumption	g/liter	106	91	119	105
Temp-corrected specific energy cons.	kJ/liter	1,930	1,658	2,172	1920
Firepower	watts	5,530	7,262	6,558	6450.011
2. HIGH POWER TEST (HOT START)					
Parameters	units	Test 1	Test 2	Test 3	Average
Time to boil Pot # 1	min	44	33	43	40
Temp-corrected time to boil Pot # 1	min	47	36	47	43
Burning rate	g/min	18	24	22	21
Thermal efficiency	%	22	23	20	0
Specific fuel consumption	g/liter	99	83	110	97
Temp-corrected specific consumption	g/liter	106	91	119	105
Temp-corrected specific energy cons.	kJ/liter	1,930	1,658	2,172	1920
Firepower	watts	5,530	7,262	6,558	6450
3. LOW POWER (SIMMER)					
Parameters	units	Test 1	Test 2	Test 3	Average
Burning rate	g/min	11	11	12	11
Thermal efficiency	%	23	24	25	0.243
Specific fuel consumption	g/liter	66	65	69	67
Temp-corrected specific energy cons.	kJ/liter	1,202	1,181	1,253	1212
Firepower	watts	3,253	3,278	3,567	3366
Turn down ratio		1.60	1.73	1.94	2

Apéndice 7. Resultados estufa D

1. HIGH POWER TEST (COLD START)					
Parameters	Units	Test 1	Test 2	Test 3	Average
Time to boil Pot # 1	Min	84	79	72	78.333
Temp-corrected time to boil Pot # 1	Min	91	83	77	83.966
Burning rate	g/min	15	23	28	22.188
Thermal efficiency	%	12	10	11	0.112
Specific fuel consumption	g/liter	188	229	213	209.996
Temp-corrected specific consumption	g/liter	204	242	229	224.819
Temp-corrected specific energy cons.	kJ/liter	3,720	4,396	4,159	4091.699
Firepower	Watts	4,674	7,041	8,476	6730.282
2. HIGH POWER TEST (HOT START)					
Parameters	Units	Test 1	Test 2	Test 3	Average
Time to boil Pot # 1	Min	58	52	41	50.333
Temp-corrected time to boil Pot # 1	Min	64	57	43	55
Burning rate	g/min	35	30	31	32
Thermal efficiency	%	12	14	17	0.144
Specific fuel consumption	g/liter	220	172	133	175
Temp-corrected specific consumption	g/liter	242	187	141	190
Temp-corrected specific energy cons.	kJ/liter	4,409	3,395	2,566	3457
Firepower	Watts	10,524	8,985	9,440	9649
3. LOW POWER (SIMMER)					
Parameters	Units	Test 1	Test 2	Test 3	Average
Burning rate	g/min	10	25	26	20
Thermal efficiency	%	19	14	16	0.162
Specific fuel consumption	g/liter	102	142	151	132
Temp-corrected specific energy cons.	kJ/liter	1,864	2,588	2,747	2399
Firepower	Watts	3,005	7,475	7,917	6132
Turn down ratio		1.56	0.94	1.07	1

Apéndice 8. Resultados fogón abierto

1. HIGH POWER TEST (COLD START)					
Parameters	units	Test 1	Test 2	Test 3	Average
Time to boil Pot # 1	min	35	33	37	35
Temp-corrected time to boil Pot # 1	min	39	35	39	38
Burning rate	g/min	23	24	20	22
Thermal efficiency	%	15	16	15	0.155
Specific fuel consumption	g/liter	171	170	151	164
Temp-corrected specific consumption	g/liter	192	182	159	178
Temp-corrected specific energy cons.	kJ/liter	3,492	3,308	2,894	3231
Firepower	watts	6,877	7,212	5,924	6671.07027
2. HIGH POWER TEST (HOT START)					
Parameters	units	Test 1	Test 2	Test 3	Average
Time to boil Pot # 1	min	31	26	24	27
Temp-corrected time to boil Pot # 1	min	34	28	26	29
Burning rate	g/min	20	28	31	26
Thermal efficiency	%	16	17	16	0.163
Specific fuel consumption	g/liter	131	154	160	148
Temp-corrected specific consumption	g/liter	144	165	171	160
Temp-corrected specific energy cons.	kJ/liter	2,624	2,996	3,115	2911
Firepower	watts	6,139	8,389	9,468	7999
3. LOW POWER (SIMMER)					
Parameters	units	Test 1	Test 2	Test 3	Average
Burning rate	g/min	20	26	16	21
Thermal efficiency	%	17	18	16	0.169
Specific fuel consumption	g/liter	245	387	185	272
Temp-corrected specific energy cons.	kJ/liter	4,457	7,037	3,370	4955
Firepower	watts	5,942	7,766	4,955	6221
Turn down ratio		1.16	0.93	1.20	1

Apéndice 09. ANOVA de la eficiencia energética, arranque en frío

RESUMEN									
Grupos	rupos Cuenta Suma Promedio Varianza								
Estufa A	3	0.51255008	0.170850027	0.00028016					
Estufa B	Estufa B 3 0.257036179 0.085678726 0.00019427								
Estufa C	3	0.645483008	0.215161003	0	.00021631				
Estufa D	3	0.432830316	0.144276772	0.00057943					
Fogón abierto	3	0.464312814	0.154770938	5.3154E-05					
ANÁLISIS D	E VARIANZA								
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F			
Entre grupos	0.026362244	4	0.006590561	24.9016744 3.5045E-05 3.47804969		3.478049691			
Dentro de los grupos	0.002646634	10	0.000264663						
Total	0.029008878	14							
F > Fc se rechaza la hipótesis nula									

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 10. ANOVA de la eficiencia energética, hervir a fuego lento

RESUMEN							
Grupos	Cuenta Suma Promedio Varianza						
Estufa A	3 0.536860618 0.178953539 0.00027921						
Estufa B	3	0.458650406	0.152883469		0.00112592		
Estufa C	tufa C 3 0.645483008 0.215161003 0.00021631						
Estufa D	3	0.432830316	0.144276772	0.00057943			
Fogón abierto	3	0.490296215	0.163432072	2 1.805E-05			
ANÁLISIS DI	E VARIANZA						
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F	
Entre grupos	0.00933914 7	4	0.002334787	5.26112329	0.0152224	3.4780 49691	
Dentro de los grupos	0.00443781	10	0.000443781				
Total	0.01377695 7	14					
Total	0.01297781 5	11					
F > Fc se rechaza la hipótesis nula							

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 11. ANOVA de la eficiencia energética, baja potencia

RESUMEN								
Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza				
Estufa A	3	0.531721	0.177240333	0.000106108				
Estufa B	3	0.282453 974	0.094151325	(0.000107378			
Estufa C	3	0.727900 346	0.242633449		7.71784E-05			
Estufa D	3	0.485178 902	0.161726301	0.000813372				
Fogón abierto	3	0.508416 682	0.169472227	0.000204475				
ANÁLISIS DE VARIANZ	A							
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F		
Entre grupos	0.0334356 95	4	0.008358924	31.94060305	1.1361E-05	3.47804 9691		
Dentro de los grupos	0.0026170 21	10	0.000261702					
Total	0.0360527 16	14						
F>Fc se rechaza la hipótesis nula								

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 12. Área superficial de las estufas ahorradoras de leña

Estufa ahorradora	Área de la olla cm²	Área total de cada estufa cm²	Área superficial (%)
А		7238,25	25
В		7238,25	25
С	1809,56	6605,62	54,79
D		5582,23	64,83
E			100

Fuente: elaboración propia

ANEXOS

Anexo 1. Prueba WBT, estufa A



Anexo 2. Prueba WBT, estufa B



Anexo 3. Prueba WBT, estufa C



Anexo 4. Prueba WBT, estufa D



Anexo 5. **Prueba WBT, Fogón abierto**



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



Anexo 7. Higrómetro



Anexo 8. Termómetro digital



Anexo 9. Campana de extracción de gases



Anexo 10. Ollas utilizadas para la prueba WBT



Anexo 11. Balanza digital



Anexo 12. Leña



Anexo 13. Horno

