



# **UNIVERSIDAD DE CIENCIAS Y ARTES DE CHIAPAS**

**INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN E INNOVACIÓN  
EN ENERGÍAS RENOVABLES**

## **T E S I S**

**“ESTUDIO EXPERIMENTAL DE LA  
ESTUFA ECOLÓGICA ENERCHÍA  
PARA MEJORAR SU EFICIENCIA”**

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:**

**MAESTRO EN MATERIALES Y  
SISTEMAS ENERGÉTICOS  
RENOVABLES**

**PRESENTA**

**EDWIN NEPTALÍ HERNÁNDEZ  
ESTRADA**

Tuxtla Gutiérrez, Chiapas.

Enero del 2018.



**UNIVERSIDAD DE CIENCIAS Y ARTES DE CHIAPAS**  
**Dirección de Investigación y Posgrado**



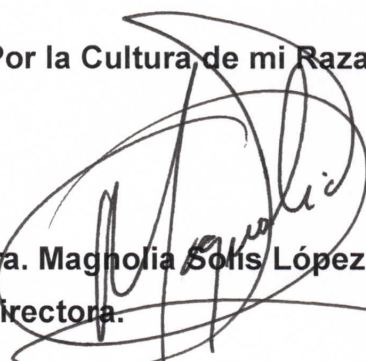
Tuxtla Gutiérrez, Chiapas  
23 de enero de 2018  
Oficio No. DIP- 077/2018

**C. Edwin Neptalí Hernández Estrada**  
**Candidato al Grado de Maestro en Materiales**  
**y Sistemas Energéticos Renovables**  
**Presente.**

En virtud de que se me ha hecho llegar por escrito la opinión favorable de la Comisión Revisora que analizó su trabajo terminal denominado “ **Estudio experimental de la estufa ecológica Enerchía para mejorar su eficiencia**”. y que dicho trabajo cumple con los criterios metodológicos y de contenido, esta Dirección a mi cargo le **autoriza la impresión** del documento mencionado, para la defensa oral del mismo, en el examen que usted sustentará para obtener el Grado de Maestro en materiales y Sistemas Energéticos Renovables. Se le pide observar las características normativas que debe tener el documento impreso y entregar en esta Dirección un tanto empastado del mismo.

**Atentamente**

“Por la Cultura de mi Raza”

  
**Dra. Magnolia Solís López**  
**Directora.**



C.c.p. Expediente

Unidad de Estudios de Posgrado  
Tuxtla Gutiérrez, Chiapas. México  
Libramiento Norte Poniente No 1150. C.P. 29000  
Teléfono: 61-70440 Ext.4360.  
investigacionyposgrado@unicach.mx

# Estudio Experimental de la Estufa Ecológica Enerchía para Mejorar su Eficiencia

**Edwin Neptalí Hernández Estrada**

Tesis de grado presentada(o) como requisito parcial para obtener el título de:  
**Maestro en Materiales y Sistemas Energéticos Renovables**

Director(a):  
Dr. Neín Farrera Vazquez

Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas  
Instituto de Investigación e Innovación en Energías Renovables  
Tuxtla Gutiérrez, Chiapas

2018

## Agradecimientos

Agradezco a la Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas, por el tiempo y el espacio que me otorgaron, al cuerpo académico que gracias a sus conocimientos me hicieron crecer profesionalmente.

Agradezco a los miembros de mi comité tutorial su tiempo y apoyo, a los Doctores Joel Moreira Acosta y Pascual López de Paz, y muy en especial al Dr. Neín Farrera Vázquez.

Agradezco a mis compañeros de posgrado, con quienes trabajé en algunos proyectos, gracias por todos los buenos y malos momentos que pasamos juntos, por apoyarme cuando lo necesité y por ser parte de este camino de logros y satisfacciones.

A mis padres por haberme forjado como la persona que hoy en día soy, todos mis logros se los debo a ustedes, gracias por guiarme siempre por el camino del bien, por el camino del trabajo. Muchas Gracias

## Resumen

La estufa de leña mejorada, conocida como Enerchía, es un modelo de estufa que fue creado en el Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico en Energías Renovables (CIDTER), esta estufa ha tenido aceptación por parte de las comunidades en las que se ha implementado, puesto que se han distribuido mas de 2500 en diversas poblaciones del estado de Chiapas, el método de construcción es empírico, basados en modelos regionales y con materiales de fácil accesibilidad.

Sin embargo esta estufa carece de un estudio técnico para determinar medidas óptimas de construcción, es por este motivo que en las siguientes páginas se muestra el proceso de mejoramiento de la eficiencia, pasando de un 14 % reportado en el año 2015 a una eficiencia de 19 % que se obtuvo con las mejoras propuestas. Estas mejoras incluyen procesos de búsqueda de nuevos materiales, tal es el caso de las cenizas, que se emplea en este modelo como aislante cuya conductividad térmica es de 0.062 W/m K. Y otros estudios en los cuales se analiza los tamaños adecuados del comal, la chimenea y la cámara de combustión para ofrecer un mejor desempeño de la estufa.

### **Palabras Claves**

Biomasa, Cenizas, Chimenea, Cámara de Combustión, Aislante, Eficiencia Térmica

# Contenido

|  |          |
|--|----------|
| <b>Resumen</b>   | iii      |
| <b>1. Introducción</b>   | <b>1</b> |
| 1.1. Planteamiento del problema                                | 3        |
| 1.2. Objetivos   | 4        |
| 1.2.1. General   | 4        |
| 1.2.2. Específicos   | 4        |
| 1.3. Justificación   | 4        |
| <b>2. Antecedentes</b>   | <b>5</b> |
| 2.1. Introducción  | 5        |
| 2.2. Aspectos históricos de uso del fogón                      | 5        |
| 2.3. Uso del fogón abierto en la actualidad                    | 7        |
| 2.3.1. Problemática del uso del fogón abierto                  | 8        |
| 2.4. Estufas Mejoradas de leña                                 | 11       |
| 2.4.1. Modelos de estufas mejoradas en el mundo                | 11       |
| 2.4.2. Modelos de estufas mejoradas en México                  | 18       |
| 2.5. Problemática de las estufas mejoradas en el sur de México | 20       |
| 2.6. Procesos de evaluación de una estufa mejorada             | 21       |
| 2.7. Estudios para optimizar estufas                           | 22       |

|   |           |
|---|-----------|
| <b>3. Marco Teórico</b>                                 | <b>30</b> |
| 3.1. Introducción                                       | 30        |
| 3.2. Biomasa  | 30        |
| 3.2.1. Leña   | 31        |
| 3.3. Combustión de la madera                            | 32        |
| 3.3.1. Poder calorífico y porcentaje de humedad         | 34        |
| 3.4. Formas de Transmisión de calor                     | 36        |
| 3.4.1. Conducción                                       | 36        |
| 3.4.2. Convección                                       | 37        |
| 3.4.3. Radiación  | 38        |
| 3.5. Protocolos Internacionales                         | 40        |
| 3.5.1. Prueba de Ebullición de Agua (WBT)               | 41        |
| 3.5.2. Cocinado Controlado (CCT)                        | 44        |
| 3.5.3. Funcionamiento en Cocina (KPT)                   | 47        |
| <b>4. Metodología</b>                                   | <b>48</b> |
| 4.1. Introducción                                       | 48        |
| 4.2. Rediseño de la estufa mejorada Enerchía 2015       | 48        |
| 4.2.1. Uso de software para dibujo y ensamble de estufa | 49        |
| 4.2.2. Construcción de estufa mejorada                  | 50        |
| 4.2.3. Pérdidas de calor en el comal                    | 50        |
| 4.3. Medición de conductividad térmica de materiales    | 51        |
| 4.4. Pérdidas de calor en la chimenea                   | 52        |
| 4.5. Medición de poder calorífico de materiales         | 52        |
| 4.5.1. Recolección de muestras de leños                 | 52        |
| 4.5.2. Costumbres en la cocción de alimentos            | 53        |
| 4.6. Estequiometría de la combustión                    | 53        |
| 4.7. Equipos de medición para evaluación                | 54        |

|   |           |
|---|-----------|
| 4.8. Evaluación de estufas mejoradas de leña . . . . .                        | 56        |
| 4.8.1. Prueba de Ebullición de Agua (WBT) . . . . .                           | 56        |
| 4.8.2. Cocinado Controlado (CCT) . . . . .                                    | 57        |
| 4.9. Conclusión . . . . .   | 59        |
| <b>5. Resultados</b>  | <b>60</b> |
| 5.1. Introducción. . . . .  | 60        |
| 5.2. Análisis teórico de las conductividades térmicas. . . . .                | 60        |
| 5.2.1. Comportamiento térmico en laboratorio de las cenizas. . . . .          | 63        |
| 5.2.2. Comportamiento térmico de ladrillos. . . . .                           | 64        |
| 5.3. Simulación de flujo de aire en la cámara de combustión. . . . .          | 66        |
| 5.4. Análisis y selección del tamaño adecuado para el comal. . . . .          | 69        |
| 5.4.1. Análisis de comportamiento térmico del comal. . . . .                  | 70        |
| 5.5. Análisis transferencia de calor en chimenea por flujo externo. . . . .   | 72        |
| 5.6. Análisis de flujo másico en chimenea. . . . .                            | 76        |
| 5.7. Construcción de estufa y evaluaciones con protocolos WBT Y CCT . . . . . | 77        |
| 5.7.1. Diseño y construcción de la estufa Enerchía modelo 2017. . . . .       | 78        |
| 5.7.2. Prueba de ebullición de agua (WBT). . . . .                            | 82        |
| 5.7.3. Prueba de cocinado controlado (CCT). . . . .                           | 85        |
| 5.7.4. Pruebas de seguridad. . . . .  | 87        |
| 5.8. Conclusiones y recomendaciones. . . . .                                  | 88        |
| <b>A. Anexo: Dibujo técnico de la estufa Enerchía</b>                         | <b>90</b> |
| <b>Bibliografía</b>   | <b>93</b> |



# 1. Introducción

Según la Agencia Internacional de Energía (IEA), cerca de 2500 millones de personas dependen de la leña como su principal combustible para calefacción y cocción de alimentos, cuya población puede aumentar a 2700 millones en el año 2030[3]. En México el 25 % de la población depende de la leña, es común que los campesinos utilicen el fogón de leña a campo abierto para cocinar sus alimentos debido al bajo poder adquisitivo del sector rural[13]. En los fogones a campo abierto (tres piedras) los gases producto de la combustión como el monóxido de carbono, alquitranes y material particulado son manejados de forma inadecuada, siendo nocivos para el medio ambiente y la salud humana, en especial para mujeres, niños y ancianos[3].

Buscando mejorar las condiciones de vida de las poblaciones menos favorecidas se han desarrollado diversos estudios con el objetivo de optimizar el desempeño energético y ambiental de las estufas de leña. Las estufas mejoradas son una forma de reducir la deforestación, mejorar la salud de las familias que las utilizan, aliviar una parte del trabajo diario que se asocia con la recolección de la leña y disminuir el impacto ambiental causado por la combustión de la madera[29]. La tecnología de las estufas mejoradas ya es conocida en varias partes del mundo, pero se han realizado adaptaciones y mejoras con base a las necesidades locales, disponibilidad de presupuesto o a solicitud de los usuarios.

Los programas que promueven el uso de esta tecnología empezaron en los años 1970 durante la crisis de la producción de petróleo[29]. Durante estos años, muchos programas fracasaron debido a que los diseñadores se centraron en la eficiencia de la estufa, sin considerar la apropiación de la población a la nueva tecnología. En la actualidad, el enfoque está más centrado en la utilidad de la estufa, y se toman en cuenta las costumbres de la población y la cultura en la que se implementará la tecnología. Esto permite que los programas actuales tengan mayor éxito.

Una parte esencial de la implementación de las estufas mejoradas está en los materiales que se utilizan para su construcción. El diseño de la estufa debe poder ser adaptado a los materiales locales existentes. Por ejemplo, en la India se ha desarrollado la industria de la cerámica, la cual se puede usar para el diseño de una estufa más eficiente, aprovechando el efecto aislante de este material. Las variaciones de las estufas son tantas como países en donde se implementan. Se modifican los materiales, el diseño y las costumbres locales. Estos cambios hacen que los usuarios prefieran seguir utilizando algo a lo que están acostumbrados.

De todos los países en donde se han implementado programas de estufas mejoradas, China e India tienen los programas de estufas mejoradas más extendidos. Para ambos casos, se ha implementado el proyecto de las estufas con la ayuda de los gobiernos de estos países. China es el líder mundial en la fabricación de las estufas mejoradas teniendo mucho éxito. Esto se debe a que hubo mayor participación local en la construcción y el diseño de la estufa[7].

En América Latina, la difusión de la estufa mejorada ha sido menos extendida. La difusión ha sido principalmente a través de organizaciones no gubernamentales que trabajan en la región. Hay muchos proyectos de estufas mejoradas y hay mucha variedad en la

forma de construirlas e implementar la tecnología[7]. Mientras en India y China hubo una producción partiendo de un solo modelo (la Anagui), en América Latina se ve una producción muy variada, incluso dentro de un determinado país. Por ejemplo en México las estufas Onil, Lorena, Justa y otros modelos implementados hasta la fecha, que difieren en su diseño.

A pesar de los grandes esfuerzos para promover las estufas mejoradas de leña en los hogares rurales de escaso recursos, su adopción ha sido limitada. Las estufas tradicionales de leña tienen atributos que los usuarios consideran importantes, como la rapidez de cocción y el bajo nivel de mantenimiento, los cuales son tomados en cuenta por parte del usuario al momento de seleccionar una estufa mejorada. Sin embargo, la gran mayoría de las estufas mejoradas son diseñadas con el objetivo de ahorrar leña y reducir el humo dentro de la casa, sin tomar en cuenta los atributos que son considerados importantes para el usuario[13].

## 1.1. Planteamiento del problema

En el estado de Chiapas, México; de los modelos de estufas mejoradas implementadas en las comunidades, muy pocas fueron diseñadas para el óptimo desempeño de la cámara de combustión. Sino que los modelos son empíricos basados en técnicas tradicionales y con materiales locales. Lo que ocasiona diversos problemas tales como: permitir el escape del calor generado en la cámara de combustión, el retorno de humos a la cocina, la combustión incompleta de la leña, el deterioro de los materiales aislantes, entre otros. Debido a estos inconvenientes aun se presentan eficiencias bajas, que no rebasan un 20 %.

## **1.2. Objetivos**

### **1.2.1. General**

Desarrollar un estudio experimental de la estufa ecológica Enerchía, encontrando los parámetros adecuados para mejorar su eficiencia.

### **1.2.2. Específicos**

- Seleccionar y analizar nuevos materiales aislantes.
- Analizar el comportamiento térmico del comal y su dimensionado.
- Estudiar y definir la geometría de la cámara de combustión.
- Estudiar el comportamiento de la chimenea en el proceso de la combustión.
- Construir un modelo de estufa empleando las mejoras encontradas en el estudio experimental.
- Evaluar el modelo propuesto con los protocolos internacionales.

## **1.3. Justificación**

La fabricación de estufas ecológicas en todo el mundo se realiza en muchas ocasiones sin una investigación previa, lo que ocasiona que los modelos tengan dificultades de operación y que terminen destruidas o abandonadas, además que existen muy pocos estudios de los procesos y fenómenos físicos que ocurren en la cámara de combustión, por tales motivos es necesario realizar un estudio experimental de la cámara de combustión que es considerada como la parte principal de una estufa ecológica, lo que aportara fundamentos científicos para las futuras innovaciones de las estufas mejoradas en el estado de Chiapas.

## 2. Antecedentes

### 2.1. Introducción

En este capítulo se describe el uso de la leña en un fogón abierto; se examina además la diversa problemática que ha ocasionado el uso del fogón abierto, y las posibles soluciones mediante el uso de artefactos conocidos como estufas de leña mejoradas. Estas a su vez presentan imperfecciones, por lo que se enunciarán algunos métodos que han utilizado diversos centros de investigación para hacerlas cada vez más eficientes.

### 2.2. Aspectos históricos de uso del fogón

Un fogón se define como el espacio destinado para la quema de algún combustible, en muchos casos el combustible es biomasa, como pueden ser la madera, estiércol de animales o aserrín, y los usos actuales pueden ser para la cocción de alimentos, la calefacción, y como ahumador para conservar alimentos; entre otros.

Los fogones más antiguos que se conocen datan de hace unos 400,000 años a.C. en China y 500,000 años a.C. en Europa [29]. El hombre prehistórico, vivía en cavernas, en las que encendía el fuego en un círculo formado de piedras. El fuego se encendía muy probablemente para dar calor. Sin embargo el uso del fuego para la preparación y conservación de los alimentos no fue realmente divulgado hasta, alrededor de 100,000 años a.C. [28]

Por la introducción de la agricultura, la ganadería y el desarrollo de tecnologías tales como la construcción de viviendas de barro y la alfarería, el fogón adopta la forma que conocemos desde hace unos 12,000 años. Este consta de varias piedras dispuestas para servir de soporte al recipiente de cocción: una olla, una rejilla o una fuente de barro cocido, es de tamaño variable y fácil de instalar [29].

El fogón mencionado en el párrafo anterior fue el modelo predominante durante miles de años, hasta el siglo XVIII en Europa, mientras que en las áreas rurales de África, Asia y América Latina aún se utiliza hasta nuestros días. En Europa, a partir de la época romana, comienza a manifestarse una cierta organización de la cocina, con la cual se producen mejoras notables del fogón [29].



**Figura 2-1.:** Fogón tradicional de tres piedras [7].

En la Edad Media, mejoras tales como la expulsión del humo a través de una chimenea o la construcción de un soporte de tierra-ladrillos sobre el cual se ponía el trípode de hierro que sostenía la cacerola de hierro fundido son poco frecuentes, reservadas a las clases medias [21].

La sobre explotación de bosques, hizo que la leña aumentara su precio, en el periodo conocido como la Revolución Industrial en el siglo XIX, además que se descubrieron nuevos combustibles como el petróleo[7]. Estos factores influyeron a que se estancara el desarrollo de nuevos modelos de fogones y dieran paso a nuevas tecnologías para cocinar.

### 2.3. Uso del fogón abierto en la actualidad

La Agencia Internacional de Energía reporta que en los países en desarrollo los combustibles de biomasa aportan en promedio el 22 % de la energía total, aunque hay países donde representan hasta el 80 %. Para el año 2008, la IEA estimó que 2,700 millones de personas usaban biocombustibles para cocinar sus alimentos, y se espera que esta cantidad alcance los 2,800 millones en el 2030. Si se agrega el carbón mineral, la cifra es de 3,000 millones de personas, es decir, la mitad de la población mundial cocina con combustibles sólidos[3].

En el año 2008 la biomasa aportó el 10.2% de la energía total mundial. Según la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO por sus siglas en inglés), más del 80 % de esta bioenergía proviene principalmente de la madera de árboles, ramas, arbustos y residuos forestales[4]. Estudios han demostrado que los fogones abiertos de tres piedras pueden usar una cantidad excesiva de madera para cocinar una pequeña cantidad de comida.

En los años 70 y a principios de los años 80, los fogones abiertos solían definirse como ineficientes. Pero fue al analizar el fogón abierto que los investigadores lograron desarrollar estufas realmente mejoradas. El Dr. Grant Ballard-Tremeer y el Dr. Kirk Smith fueron los primeros científicos en investigar que la combustión puede realizarse de una forma más eficiente y limpia. Un fogón abierto alcanza 90 % de eficacia a la hora de convertir madera a calor, pero sólo una proporción pequeña, de 10 % a 40 % del calor producido, llega a la olla[31].

Es necesario aumentar la eficiencia en la combustión para reducir el humo y las emisiones dañinas que perjudican a la salud. Mejorar la eficiencia del intercambio térmico entre el comal y el recipiente puede seriamente reducir el uso de combustible. Para poder reducir las emisiones y el uso de leña, el diseñador de estufas se esfuerza principalmente en que la combustión sea mejor y luego en que la mayor cantidad posible de calor pase a la olla o la plancha.

### **2.3.1. Problemática del uso del fogón abierto**

Los daños que puede tener un humano debido a la contaminación del aire depende del tiempo en que este en sitio contaminado y del grado de contaminación, por lo tanto gran parte de la contaminación incidente a un humano se produce en espacios cerrados, como ejemplo, una cocina que usa leña para cocinar, cuyo humo se queda atrapado en el espacio ocupado por la cocina.

Las mediciones efectuadas arrojan unos niveles de exposición, varias veces superiores a los niveles aceptables que establece la Organización Mundial de la Salud (OMS) y las normas nacionales, y por consiguiente pueden sobrepasar en mucho los del aire exterior de las ciudades más gravemente contaminadas.

Análisis estiman que el humo de combustibles sólidos en espacios cerrados, da origen aproximadamente al 35.7% de las infecciones respiratorias, el 22.0% de las enfermedades pulmonares obstructivas crónicas y el 1.5% de los cánceres de tráquea, bronquios y pulmón. La contaminación del aire de interiores está quizá relacionada también con la tuberculosis, la catarata y el asma[15].

En un estudio realizado en el año 2005 por el Grupo Interdisciplinario de Tecnología Rural Apropiada (GIRA) en una comunidad de la Meseta Purépecha en Michoacán, México;



se midió la concentración de partículas (PM 2.5), derivadas de la combustión de leña en fogones abiertos. Estas partículas forman parte de la fracción respirable, pero están asociadas a problemas de salud más graves porque pueden penetrar más profundamente en el sistema respiratorio.

Este material suspendido corresponde a partículas sólidas o líquidas con diámetro igual o menor a  $2.5 \mu\text{m}$ . En dicho estudio se encontró que la concentración de PM 2.5 al lado del fogón abierto es de  $593 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . La exposición promedio diaria para las mujeres, de acuerdo con el tiempo que pasan en cada lugar y la concentración respectiva, es de  $211 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Este nivel de exposición es muy elevado respecto de la norma oficial que marca el límite máximo de exposición diaria es  $65 \mu\text{g}/\text{m}^3$  [27].

El caso del monóxido de carbono (CO), en los hogares que usan biomasa para cocinar se reportan valores de entre 5 y 500 ppm durante el periodo de la cocción de alimentos, que corresponden a valores de entre 2 y 50 ppm en 24 horas. Para este gas, la EPA propone valores máximos permisibles de 9 ppm (o  $10 \text{mg}/\text{m}^3$ ) en ocho horas [15].

Las mujeres y los niños menores de 5 años representan el grupo de mayor riesgo debido al tiempo que pasan en la cocina con sus madres expuestos a altas concentraciones de contaminantes en el aire, producto de la combustión. Sus condiciones nutricionales los hacen susceptibles a padecer enfermedades respiratorias superiores e inferiores, siendo la principal causa de morbilidad y mortalidad en este grupo. El otro grupo susceptible son mujeres que pasan entre 8 y 10 horas dentro de la cocina. La Organización Mundial de la Salud (OMS) estima que el humo de estos fogones abiertos representa la cuarta causa de mortandad entre mujeres y niños en países en desarrollo, como México [2].

La contaminación en interiores puede causar enfermedades que incluyen infección respiratoria aguda de las vías inferiores, tales como neumonía, (35.7%); enfermedades como la bronquitis crónica (22%), cáncer de pulmón (15%), tuberculosis, asma y cataratas [2].

Varios programas alrededor del mundo han promovido la instalación de estufas mejoradas para reducir las emisiones contaminantes de los fogones abiertos. El estudio realizado por GIRA en varias comunidades de la meseta Purépecha, en el que realizaron diversas pruebas clínicas y monitoreo mes a mes, afirma con certeza que las familias que adoptan una estufa mejorada reducen significativamente su riesgo de padecer enfermedades respiratorias superiores.

**Tabla 2-1.:** Contaminantes y sus efectos [28].

| <b>Institución</b>                | <b>Disciplina de aplicación</b>                                      |
|-----------------------------------|--|
| Partículas inferiores a 10 micras | Irritación bronquial, infecciones respiratorias, bronquitis crónica. |
| Monóxido de carbono               | Reducción de oxigenación corporal, mortalidad perinatal              |
| Hidrocarburos aromáticos          | Cáncer de pulmón, cáncer de boca y laringe                           |
| Dióxido de nitrógeno              | Asma, Infecciones respiratorias.                                     |
| Dióxido de azufre                 | Asma, enfermedades cardiovasculares.                                 |
| Condensaciones de humo            | Cataratas.   |

## 2.4. Estufas Mejoradas de leña

Una estufa de leña mejorada es un artefacto que debido a su construcción permite que el proceso de combustión de la leña se lleve a cabo de forma más controlada en comparación al fogón abierto, en muchos casos permite retirar de la cocina los gases producidos en la combustión por medio de conductos o chimeneas. Estas pueden tener diferentes geometrías, dependiendo de la región del mundo y las necesidades que puedan satisfacer.

La manera tradicional de cocer los alimentos sobre el fuego abierto tiene varios riesgos: La dispersión de las llamas y del calor cuando hay corriente de aire, la impotencia que uno tiene de controlar el fuego, la exposición al calor y al humo; y el peligro de accidentes por las llamas[30]. A pesar de todo lo dicho anteriormente el humo y el calor también tienen ventajas, como puede ser la conservación de los alimentos, la difusión de calor por los espacios habitados durante las frías estaciones del año, y para mantener seco el techo de las viviendas[31].

Los países que emplean la leña como combustible para cocinar consumen per cápita de 12 a 28 veces más energía que el Japón, y por eso son capaces de aumentar su eficiencia energética en varias veces, introduciendo simplemente estufas mejoradas[28].

Las estufas rurales usan comúnmente varios combustibles, desde la leña y el estiércol de vaca hasta los numerosos residuos agrícolas. En muchos casos el combustible es más bien recogido que traído del mercado.

### 2.4.1. Modelos de estufas mejoradas en el mundo

Los primeros proyectos de estufas mejoradas se realizaron en la India e Indonesia en los años cincuenta. En África, particularmente en el Sahel, se iniciaron después de la sequía ocurrida a finales de la década de los setenta y en América Central, tras el terremoto de

Guatemala en 1976[27]. La primera generación de estufas, introducidas en su mayoría por iniciativa de los países industrializados occidentales, incluía dispositivos con chimenea, y eran para dos o tres ollas o cacerolas.



**Figura 2-2.:** Países en donde las Estufas Mejoradas han tenido mayor impacto [7].

Los modelos de la segunda generación (1980 a 1990) estaban mejor estudiados y adaptados a los problemas de la escasez de leña, las necesidades de las usuarias, de los productores y de los mercados. Este enfoque, mejor adaptado a las condiciones locales, se caracteriza por una clara participación de los especialistas y de las organizaciones de base.

Los tipos principales difundidos entonces eran los fogones de barro para una olla, sin chimenea, fabricados por las usuarias y las estufas de cerámica o metal fabricadas por artesanos y difundidas a través de los mercados tradicionales y de los proyectos. Actualmente se realizan esfuerzos por liberalizar la concepción y la difusión de estufas, adaptándolas a los particularismos locales inherentes a las regiones y los países de África, Asia y América Latina.

### Modelos de Asia

En Asia en 1879 se encuentra la primera estufa mejorada conocida como Sarvodaya, esta estufa tiene una difusión pequeña. Después, a finales de la década de los ochentas cuando Integrated Development Association (IDEA), que es una ONG local implementa el programa de EMC en cooperación con Intermediate Technology Development Group (ITDG), inician el proyecto de las estufas Anagi construidas por alfareros descentralizados, que producen en pequeñas escalas para todos los consumidores a través de los canales del mercado. La estufa Anagi, ha sido tan aceptada que actualmente se siguen produciendo y comercializando. La estufa Astra OLE, Astra Chula y OUAGA, son otro tipo de estufas que son promovidas actualmente para su aceptación [7].

En la República Popular China. Muchos modelos de estufas que consumían poca leña se fabricaban y promocionaban en áreas rurales, en la década de los ochenta. Estas estufas ahorradoras de leña se diferenciaban de las estufas tradicionales en bastantes aspectos. La eficacia en la utilización del carburante pasó de menos del 10 % a más del 25 %, significando un ahorro de leña que oscilaba entre la mitad y una tercera parte [7].

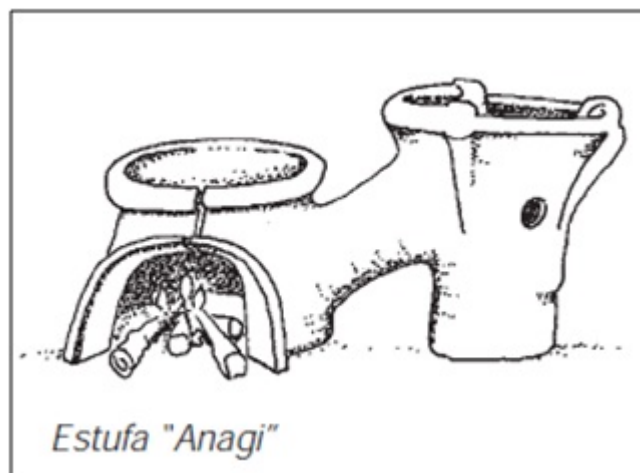


Figura 2-3.: Esquema de la estufa Anagi [7].

El ahorro de combustibles en comparación con el fogón de tres piedras que presenta esta relación de estufas, va desde un 27 % hasta un 70 %, y el 50 % cuenta con ducto de salida de humo [27].

### Modelos de África

Las estufas mejoradas fueron introducidas en Kenya y Rwanda, por ciudadanos de la India que construyeron los ferrocarriles en 1890 en África. De tal manera, en los años ochenta había una estufa mejoradas de leña en las cocinas de casi cada hogar urbano y en muchos de los rurales de Kenya [7]. A partir de 1982 las Organizaciones Kenianas de Energía y Medio Ambiente (KENGO) han sido pioneros en la promoción de la estufa Kenya Ceramic Jiko (KCJ); La estufa es suministrada principalmente por el Ministerio Keniano de Energía mediante los medios de comunicación masivos (periódicos, radio y televisión); hacen demostraciones en los mercados y en las ferias comerciales.

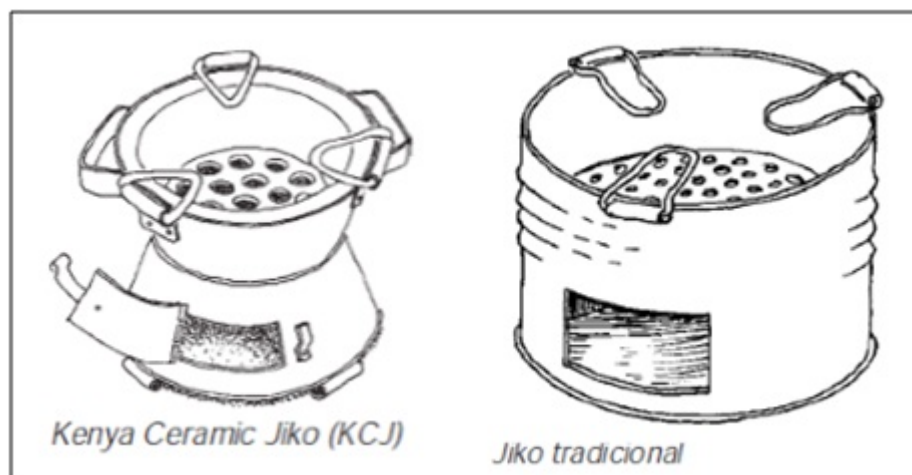


Figura 2-4.: variantes de la estufa Jiko [7].

**Tabla 2-2.:** Estufas Jiko difundidas en África [7].

| <b>País</b> | <b>Total</b> |
|-------------|--------------|
| Burundi     | 20,500       |
| Etiopía     | 20,000       |
| Kenya       | 690,000      |
| Malawy      | 3,700        |
| Rwanda      | 30,000       |
| Somalia     | 15,400       |
| Sudán       | 27,960       |
| Tanzania    | 54,000       |
| Uganda      | 25,200       |

El ahorro de combustibles en comparación con el fogón de tres piedras, para las estufas Jiko varía desde un 30 % hasta un 60 %, dependiendo del modelo, el 90 % de las estufas relacionadas a esta, no cuentan con ducto de salida para el humo.

Más de 600,000 estufas han sido difundidas en Kenia. La estufa KCJ está hecha con componentes de cerámica y de metal, y se fabrica y comercializa a través del sector informal. El diseño de la estufa se ha reproducido en la actualidad con éxito en Uganda, Ruanda, Tanzania, Sudán, Senegal, Etiopía y Malawi.

En Tanzania, el Proyecto Nacional de la Estufa financiado por el Banco Mundial ha propagado más de 50,000 estufas del modelo KCJ Jiko Bora [25]. La estufa KCJ ha creado puestos de trabajo recurriendo a la mano de obra y a los conocimientos de expertos locales para su fabricación y comercialización.

### Modelos de América Central

América Central tiene una vasta historia en el campo de la innovación de estufas mejoradas para cocinar. En la década de 1970, el desarrollo de la estufa Lorena alcanzó popularidad tanto en la región como en numerosos países en desarrollo [16]. Esta estufa fue creada en Guatemala, es una estufa de construcción in situ, hecha de arena y lodo, con una plancha o comal grande y una chimenea, y define el estándar para muchos modelos de estufas tipo Lorena posteriores.



**Figura 2-5.:** Variante de la estufa Lorena. [16].

Las estufas actuales tipo Lorena se llaman estufas de plancha, tienen una base hecha de bloques o ladrillos para crear una superficie plana. Luego se construyen tres paredes alrededor de la base y se coloca encima una lámina de hierro (plancha). La chimenea se instala en uno de los extremos. Se estima que hasta el año 2000, se habían construido 150,000 estufas de plancha, principalmente en Guatemala [16]. No existen dimensiones estándares para las estufas de plancha y la mayoría de ellas no tienen una cámara de combustión propiamente dicha. La principal mejora de las estufas de plancha respecto de los fogones abiertos es la chimenea.



Por la chimenea, estas estufas ayudan a reducir la contaminación del aire en el interior de las viviendas, si se las usa adecuadamente, ya que la chimenea extrae el humo fuera de la vivienda. Las estufas de plancha construidas antes del año 2000 fueron fabricadas bajo programas altamente subsidiados con un bajo o nulo control de calidad y sin ningún monitoreo y evaluación.

La mayoría de los modelos distribuidos en la región tienen una plancha superior de hierro que se utiliza para la elaboración de tortillas, una chimenea e incorporan el diseño del codo rocket en la cámara de combustión.

**Tabla 2-3.:** Estufas en Centroamérica [16].

| <b>Estufa</b> | <b>Ahorro de combustible</b> |
|---------------|------------------------------|
| Ecocina       | 50 %                         |
| Mimosa        | 80 %                         |
| Turbococina   | 95 %                         |
| Onil          | 50 %                         |
| Noya          | 50 %                         |
| Justa         | 55 %                         |
| Copan         | -                            |
| Ecofogón      | 50 %                         |
| Mifogón       | -                            |
| Rapidita      | -                            |
| La chapina    | 60 %                         |

Los modelos más populares acomodan el uso de múltiples ollas y tienen una cámara de combustión grande en la que se puede colocar grandes trozos de leña. La eficiencia térmica

de estas estufas, por lo general, es superior al 50% comparado con los fogones abiertos; por otra parte, existe una reducción sustancial en las emisiones de partículas y monóxido de carbono[16].

### 2.4.2. Modelos de estufas mejoradas en México

La tecnología que mayor difusión ha tenido en México es la estufa Lorena con algunas variantes. Es importante señalar la estufa Lorena no es un modelo, es un principio de construcción que tomó su nombre de los materiales usados lodo (tierra y agua) y arena; surge en Guatemala a mediados de la década de los setenta y posteriormente se difunde en varios países, México entre ellos.

Se estima que la necesidad total en el país es de 5 millones de estufas, es decir, en la actualidad 5 millones de familias cocinan con leña[27]. Existe experiencia en México sobre el tema de estufas de leña, aunque su alcance es limitado comparación la demanda actual. A principios de los años ochenta, instituciones gubernamentales efectuaron un esfuerzo de mediana escala con resultados pobres y como consecuencia se abandonó el tema.

A finales de la década de los noventa se desarrollaron varias iniciativas en diferentes regiones de México, particularmente en los estados de Michoacán, Chiapas y Oaxaca, donde se trabajó con una diversidad de diseños de estufas y planes de disseminación. La mayoría de los grupos difundieron alguna variante de la estufa Lorena, como el caso de la estufa Patsari, y en el sureste se promovió la estufa Justa y la Rocket portátil.

A partir del año 2003 se incrementó el esfuerzo de desarrollo y difusión de estufas de leña por parte de algunas organizaciones, particularmente de GIRA y el Centro de Investigaciones en Ecosistemas (CIECO) de la UNAM, y se logró involucrar a dependencias de

gobierno e instituciones de investigación como: la Comisión Federal para la Protección contra Riesgos Sanitarios (COFEPRIS), la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR), la Secretaría de Desarrollo Social (SEDESOL), el Instituto Nacional de Salud Pública (INSP), el Instituto de Ingeniería (II UNAM) y el Instituto Nacional de Ecología (INE).

En Chiapas se han adoptado estufas ahorradoras de leña como es el caso de la región de la Reserva El Ocote en donde se implementaron estufas tipo Ceta y Lorena desde 1996. El Centro de Investigación y desarrollo tecnológico en Energías Renovables (CIDTER) también ha puesto en marcha algunos modelos, de los cuales destacan una estufa multifuncional llamada Lekil Vaj, que cuenta con un termotanque para almacenar agua caliente y un ahumador para la conservación de ciertos alimentos, además de las funciones ordinarias de una estufa de leña. Otro modelo implementado es la estufa Enerchía la cual a la fecha (2016) han sido implementadas más de 2500 en diversas comunidades del estado, su principal característica es que está elaborada en la parte exterior con madera de pino y su ahorro de leña está registrada en un 70 %.

Lamentablemente muy pocos proyectos sobre difusión de estufas eficientes de leña han sido documentados o sistematizados, razón por la cual la información sobre sus logros, fracasos e impacto es muy limitada.

## 2.5. Problemática de las estufas mejoradas en el sur de México

En general se puede afirmar que el poco éxito de los programas efectuado en nuestro país se debe a los siguientes aspectos: técnicos, socioculturales y falta de seguimiento.

**Problemas técnicos:** En general los diseños han sido inapropiados para satisfacer las necesidades de la población local, asimismo se ha asumido que el funcionamiento de la estufa es igual en laboratorio que en el campo. También han existido deficiencias en la capacitación de los constructores, y casi nunca se ha considera que el mantenimiento es indispensable para el buen funcionamiento del dispositivo.

**Aspectos socioculturales:** En la mayoría de los programas no se ha involucrado a las mujeres, por lo tanto se desconocen las necesidades y prioridades de las usuarias. No se han respetado las costumbres de cocinado, es decir, se pide que las usuarias se adapten a un modelo de estufa, cuando la estufa debería adecuarse a las necesidades regionales e incluso de cada usuaria. La población no se ha apropiado de la tecnología y los programas porque en su mayoría han sido altamente subsidiados y por lo tanto no se valoran adecuadamente.

**Falta de seguimiento:** El objetivo fundamental de los programas ejecutados en México, ha sido únicamente la construcción de estufas, descuidando el seguimiento del funcionamiento de la tecnología. El análisis de las debilidades de estos proyectos y la incorporación de las experiencias positivas permite la elaboración de un programa integral que garantice la aceptación y apropiación de tecnologías eficientes de leña.

## 2.6. Procesos de evaluación de una estufa mejorada

El proceso de construcción de una estufa en América Latina es generalmente a prueba y error, cuyo fin es poder satisfacer una necesidad rápidamente, usando materiales locales y que si es posible que no presenten algún costo. Por tal motivo, es muy poco probable que se realicen estudios técnicos antes del proceso de elaboración de estas estufas, lo que lleva a que de acuerdo al grado de impacto social posteriormente se seleccionen algunos modelos para realizarles pruebas.

Este tipo de pruebas son de carácter internacionales y se pueden definir de acuerdo a lo siguiente:

### Prueba de Ebullición de Agua (WBT)

La prueba de Ebullición de Agua es una simulación simple del proceso de cocción con la finalidad de medir cuan eficiente es una estufa en utilizar combustible para calentar el agua en una olla y la cantidad de emisiones producidas durante el proceso[5].

### Prueba de Cocción Controlada (CCT)

La prueba de cocinado controlado está diseñada para evaluar el desempeño de la estufa mejorada con respecto a las estufas comunes o tradicionales. Estas estufas se comparan mediante una tarea de cocinado estándar que sea común y cotidiana en la localidad[8].

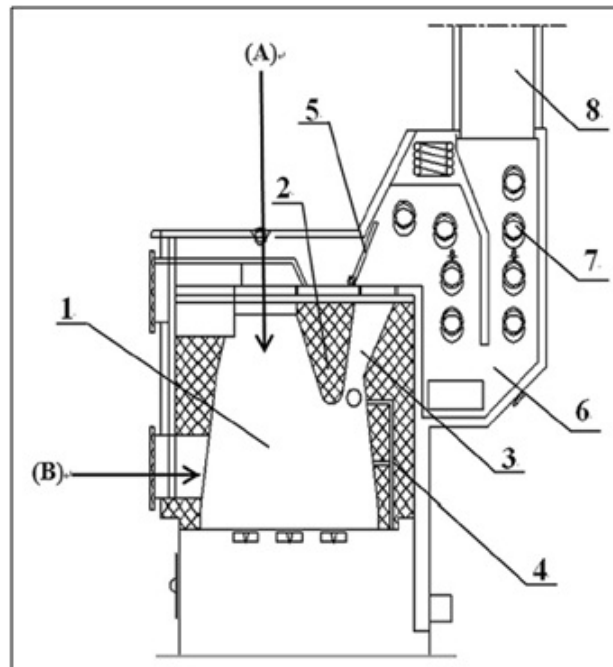
### Prueba de Rendimiento en Cocina (KPT)

Esta prueba evalúa el comportamiento de la estufa simulando la realidad de su uso. Compara estufas eficientes ahorradoras de leña entre sí y con respecto a las tradicionales fogones abiertos o de tres piedras. También se puede comparar el uso de diferentes combustibles. Se pueden hacer mediciones diarias de consumo de combustible de la estufa tradicional y la mejorada y compararlas[2].

## 2.7. Estudios para optimizar estufas

A medida que los gobiernos y las organizaciones civiles han visto el impacto que ha tenido la implementación de las estufas de leña mejoradas, varios centros de investigación y especialistas se han estado involucrando para desarrollar nuevos modelos, estos nuevos diseños tienen sustento científico y tecnológico; algunos ejemplos de estos estudios se presentan a continuación:

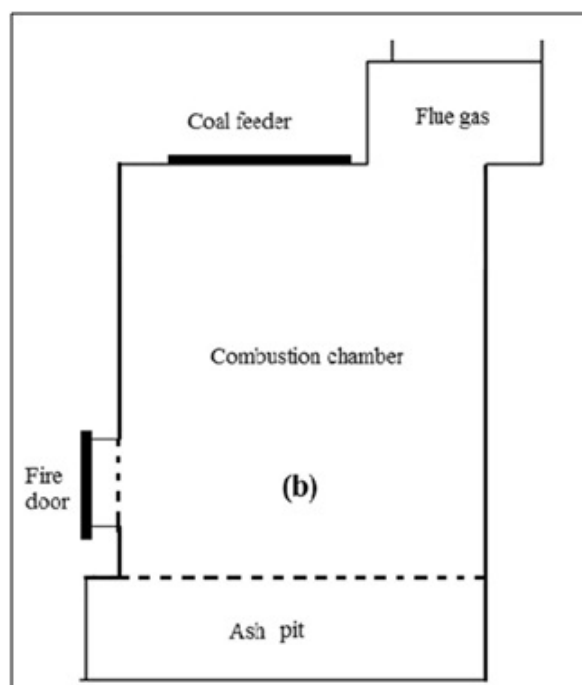
- Diseño y Evaluación de Estufa de Emisiones Limpias, China.



**Figura 2-6.:** Estufa de carbón de doble propósito de combustión limpia. (1) Cámara de combustión primaria. (2) Arco de la estufa. (3) Cámara de combustión secundaria. (4) Ducto de aire secundario. (5) Placa móvil. (6) Cámara de flujo de gas. (7) Tubo de agua. (8) Chimenea. (A) Alimentador de carbón. (B) Entrada principal. [20].

Esta estufa está diseñada con una cámara de pirolisis y una cámara de combustión, con el fin de mejorar el rendimiento térmico, los conductos de aire secundarios están dispuestos para recuperar el calor residual en el pozo de ceniza y utilizarlo para calentar el aire secundario de entrada.

La biomasa de maíz y trigo de bajo costo se mezcló con el carbón para utilizar los residuos agrícolas y reducir el costo del combustible. La eficiencia térmica y la emisión de contaminantes de esta nueva estufa se compararon con la estufa de una cámara convencional.



**Figura 2-7.:** Diagrama esquemático de la estufa convencional. [20].

Los resultados revelaron que la eficiencia térmica de la estufa fue mejorada a 68 %, comparada con la estufa convencional de 50 %, mientras que las emisiones de dióxido de azufre, óxidos de nitrógeno y monóxido de carbono se redujeron significativamente. Además, se confirmó una reducción significativa en la concentración de monóxido de carbono y PM en el interior utilizando la biomasa de carbón o briquetas en la nueva estufa [20].

La información de este estudio demuestra la alta eficiencia térmica y la característica respetuosa con el medio ambiente de la estufa de carbón de nuevo diseño y la biomasa de carbón o briqueta. Esta nueva tecnología limpia del carbón ha sido demostrada con éxito en dos condados de la provincia de Shanxi en China, y tiene un gran potencial para mejorar la calidad del aire regional e interior.

- Estudio de Combustión Limpia de Madera en Estufa-Chimenea con Acumulación, Polonia

La chimenea de estufa estudiada con acumulación está compuesta por un horno acumulador de 550 kg y un intercambiador de calor acumulativo de 1050 kg colocado junto al horno. El control del funcionamiento de la estufa con la acumulación se alcanza generalmente por un solo acelerador de aire que proporciona aire a la zona del horno. En los sistemas más simples, el acelerador se controla manualmente, mientras que en las unidades más avanzadas se controlan con servomotores para optimizar la combustión. El control del acelerador se basa en la medición de la temperatura del flujo de gases de combustión [13].

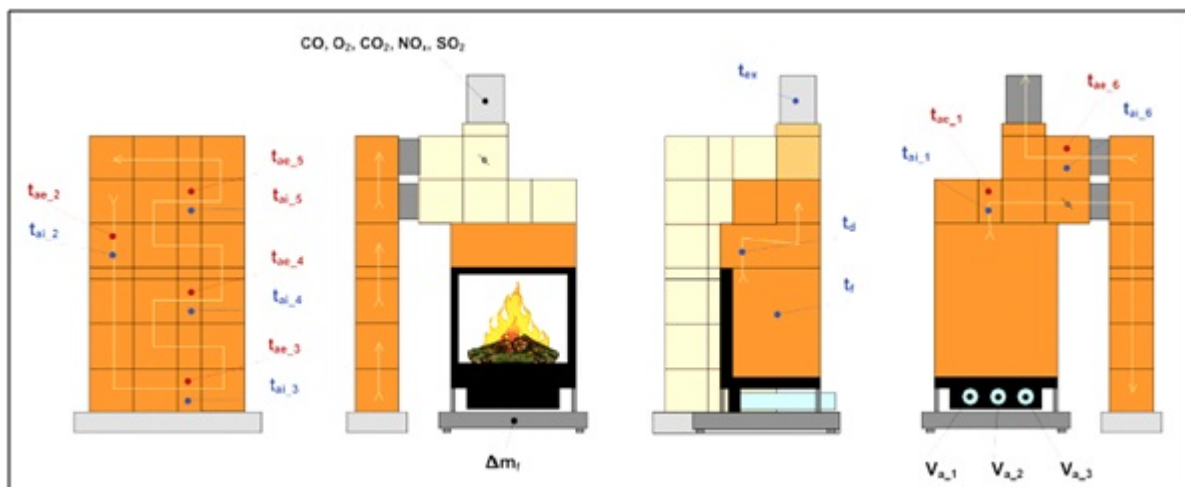


Figura 2-8.: Esquema de estufa-chimenea con acumulación. [13].

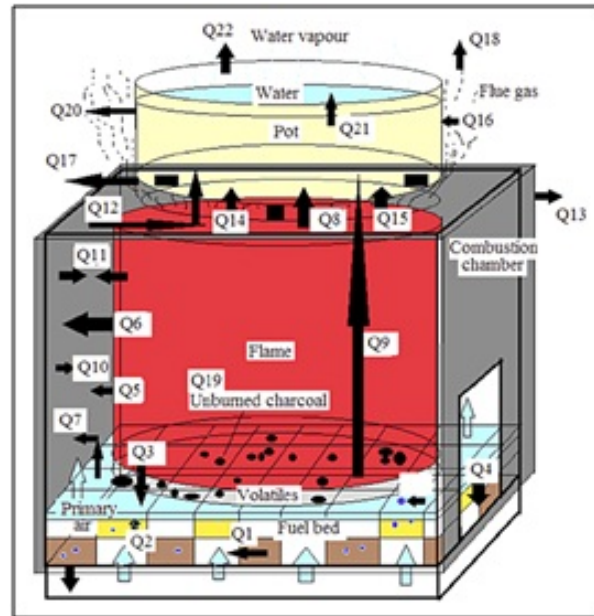


Este sistema se aplicó en la primera versión de la unidad ensayada. Debido a problemas de combustión incompleta del monóxido de carbono (CO), la estructura del horno se complementó con entradas de aire adicionales. La nueva estructura del horno permitió suministrar aire al área del horno usando entradas de aire situadas debajo del panel y en la pared trasera del horno. Para lograr un mejor control del funcionamiento de la estufa con acumulación, se introdujo un sistema de control y medición dedicado para sustituir un optimizador estándar. Este sistema abarca un controlador PLC modular avanzado combinado con un conjunto de instrumentos y actuadores.

Los resultados con simulaciones numéricas muestran que la geometría modificada de la cámara de combustión permite disminuir la emisión de CO y muestra que la combustión limpia requiere tener en cuenta otros factores como cantidad, tamaño, tipo, humedad y composición de la carga de combustible. Los resultados muestran que debido al gran número de combinaciones de este factor no es posible desarrollar un algoritmo de control universal. Por otro lado, considerando el hecho de que el proceso de combustión dura alrededor de 65 min, pero el calor acumulado en el intercambiador de calor se transfiere a las habitaciones durante 6 u 8 horas después de que el fuego se apague [13].

- Modelado de Transferencia de Calor en Estado Estacionario de una Estufa de Biomasa de Combustible Sólido, India

Se desarrolla un modelo de transferencia de calor en estado estacionario para predecir el rendimiento de la estufa de biomasa con diferentes condiciones de operación (composición, tamaño de partícula y humedad del combustible, flujo de aire, condiciones ambientales) y condiciones de diseño (tamaño, forma y material de la cámara de combustión). El modelo se evalúa para una estufa comercial (Harsha) para condiciones de prueba.



**Figura 2-9.:** Diagrama esquemático del modelado de transferencia de calor en estado estacionario para la estufa Harsha. [17].

El modelo presentado en este estudio da una visión clara de los procesos de transferencia de calor dentro de una estufa de biomasa. Los modelos también indican claramente el efecto de las propiedades físicas y químicas del combustible, las propiedades físicas de la estufa, las propiedades físicas de la olla y las condiciones ambientales en el rendimiento de la estufa. El modelo se puede utilizar para cualquier tipo de estufa de biomasa de combustibles sólidos o cámaras de combustión.

La eficiencia de la estufa de Harsha es 23.63% y el tiempo para hervir 5 L de agua como 16.94 min [17]. El valor es similar al reportado en las literaturas, validando así el modelo. La eficacia se puede aumentar adicionalmente en la selección de menos altura de la olla. Se espera que el modelo sea útil para los diseñadores, ya que podría lograrse una mejor comprensión de los procesos de transferencia de calor.

- Influencia de la Chimenea en una estufa de Biomasa, Estados Unidos de América y Guatemala



**Figura 2-10.:** Modelos de estufas empleadas para el estudio de la chimenea. Variantes de la estufa La Justa. [19].

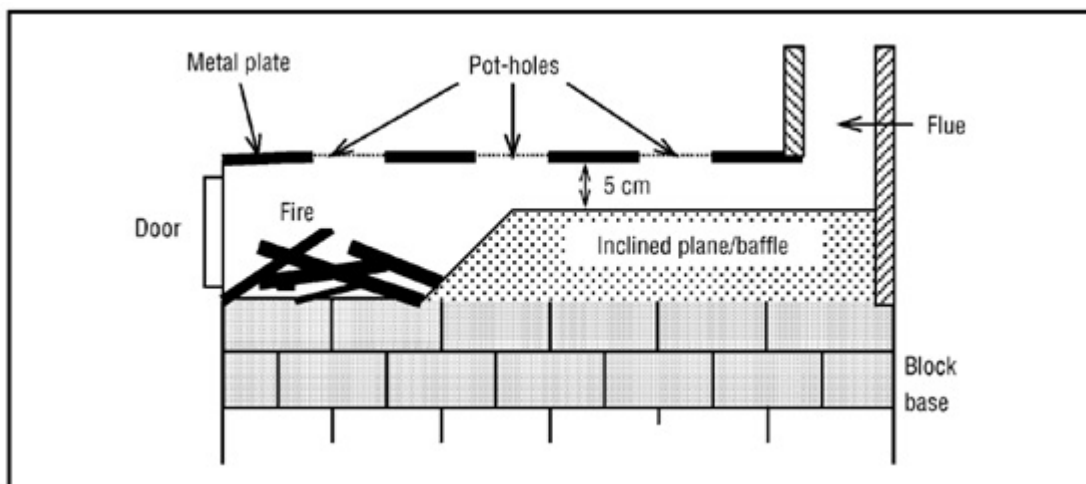
Este trabajo examina si una chimenea tiene influencia sobre las características de combustión de la biomasa dentro de una estufa. El trabajo experimental así como un modelo cinético químico simplificado sugieren que una chimenea desempeña un papel activo en el funcionamiento de una estufa influyendo en la proporción total aire y combustible, y subsecuentemente la producción de monóxido de carbono.

Se demostró que dos estufas diferentes, operadas a múltiples tasas de consumo de madera, funcionaban con un exceso de aire en el estado estable de 300 % a 1250% [19]. Se encontró que la tasa de consumo de madera era independiente del tamaño de la chimenea para ambas estufas. Se aumentó el número de pruebas para aumentar el exceso de aire. El aumento del exceso de aire disminuyó la eficiencia de la combustión modificada en los

experimentos y el modelado cinético. Se ha demostrado que el aumento del coeficiente de pérdida por fricción de una chimenea al disminuir el diámetro reduce la producción de CO a través de una reducción del exceso de aire.

- Mejora de la Eficiencia Energética de una Estufa de Leña, Guatemala

Este estudio informa sobre la eficiencia de combustible de una estufa de leña popular La plancha en el oeste de Guatemala, en comparación con el tradicional fogón abierto. En esta estufa se ha demostrado anteriormente reducir sustancialmente los niveles de contaminación del aire en interiores. En las pruebas estándar de cocción y ebullición en agua, la plancha consumía más combustible y tardaba más que el fogón abierto.



**Figura 2-11.:** Vista de la sección transversal de la estufa La Plancha [14].

La modificación de la cámara de combustión de la plancha mediante la inclusión de un deflector dio como resultado una mejora del 12 % de la eficiencia térmica global, elevándola al valor del fogón abierto. En las pruebas de cinco días de cocción de rutina, la plancha modificada (con el deflector) se encontró que usa 39 % menos leña que el fogón abierto [14].

- Mejoras en la Eficiencia Térmica de una Estufa de Biomasa para Producir Vapor, Tailandia

Una nueva estufa de vapor es diseñada y construida para utilizar la biomasa como combustible. La eficiencia térmica de la estufa es determinada y comparada con una estufa convencional en la prueba estándar de ebullición en agua utilizando madera de eucalipto como combustible. La estufa tiene una pared de doble relleno con ceniza de cáscara de arroz como aislante. Los resultados muestran que la eficiencia térmica de la estufa convencional es del 15 % mientras que la eficiencia de la nueva estufa es 21 %. El consumo de combustible disminuye en 15 %. El ahorro de combustible sería equivalente a la mitigación de emisiones de gases de efecto invernadero de 9.9 Ton de CO<sub>2</sub> al año [26].

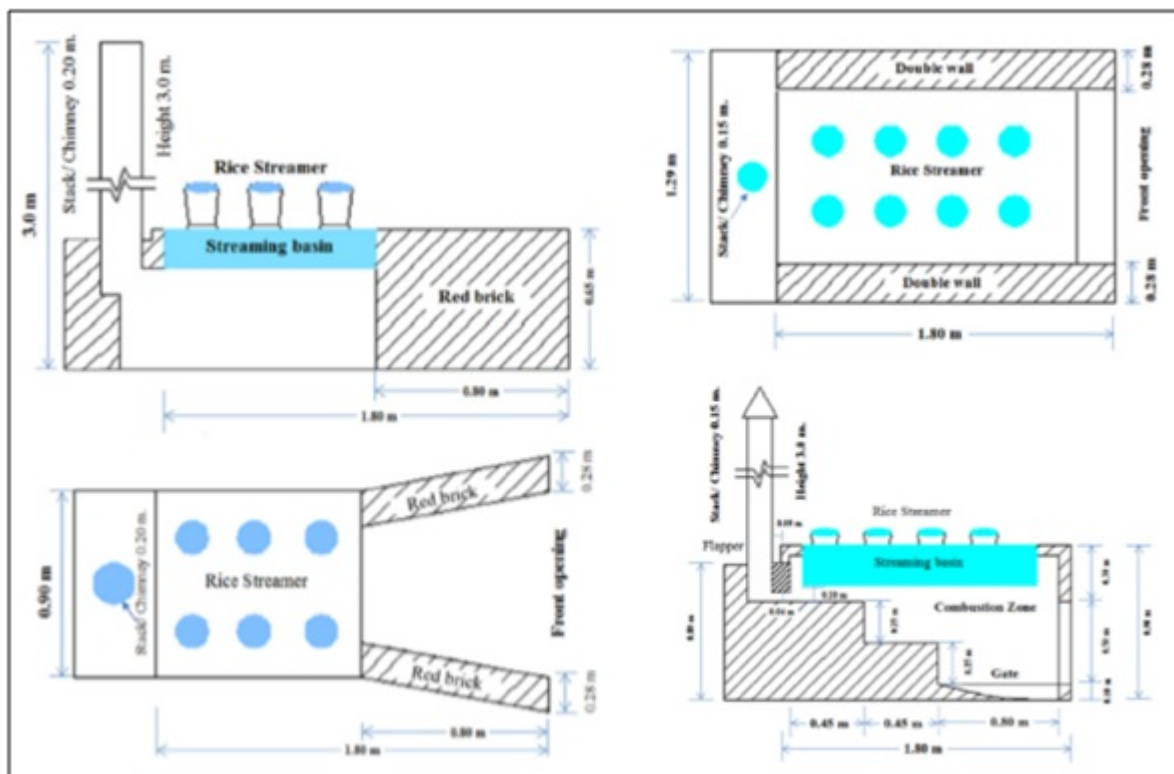


Figura 2-12.: Estufas que producen vapor para germinar arroz. Izquierda: Estufa Convencional. Derecha: Estufa Mejorada [26].

## 3. Marco Teórico

### 3.1. Introducción

En este capítulo se describen teóricamente los elementos que se requieren para que se lleve a cabo la combustión de la leña, también se enuncian los principios de transmisión de calor para varios fenómenos físicos entre ellos la combustión y por último se presentan los protocolos internacionales que se usan para evaluar una estufa de leña mejorada.

### 3.2. Biomasa

Como en la mayoría de las energías renovables, la energía de la biomasa procede del Sol. Por lo tanto la energía de la biomasa es la energía solar convertida por la vegetación en materia orgánica, mediante el proceso de fotosíntesis. Según el diccionario de la Real Academia Española, La biomasa es la suma total de la materia de los seres que viven en un lugar determinado, expresada habitualmente en peso estimado por unidad de área o de volumen[6].

La biomasa primaria, como ya se indicó anteriormente es la energía solar convertida en materia orgánica, mediante el proceso de la fotosíntesis. Sin embargo, esta biomasa puede ser transformada por otros seres vivos, que aprovechan la energía contenida y desechan otra parte de la materia llamada biomasa de residuos animales. Así también otras actividades industriales generan residuos al aprovechar una parte de la materia vegetal. Por

último se generan residuos provenientes de núcleos poblacionales. En nuestro caso este trabajo se basa únicamente en la biomasa primaria, directamente al uso de leña como combustible para la cocción de alimentos.

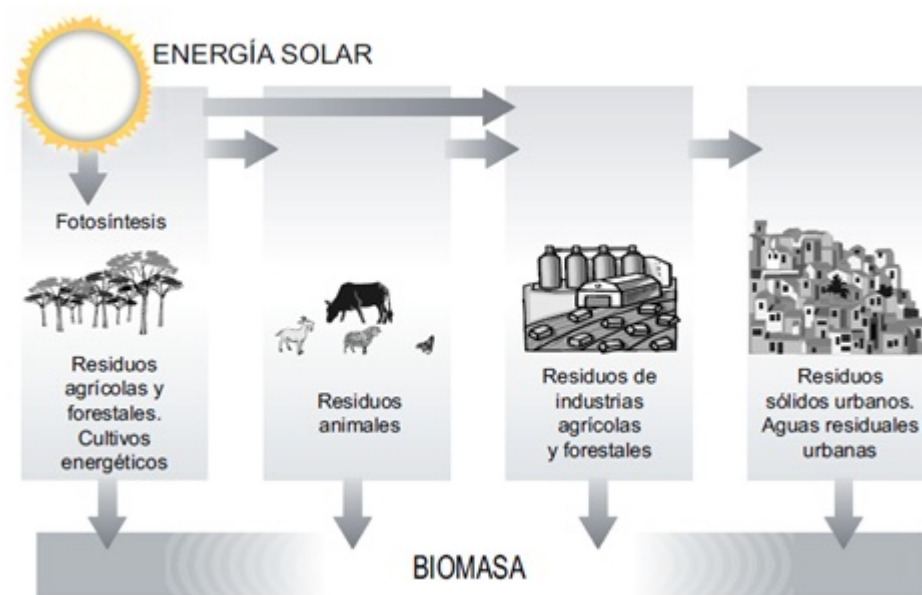


Figura 3-1.: Fuentes de Biomasa [6].

### 3.2.1. Leña

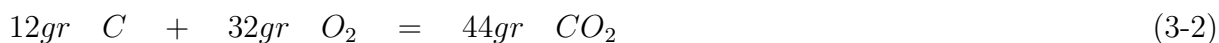
La madera en forma de leña se compone especialmente de carbono, hidrogeno y oxígeno, estos elementos se combinan haciendo posible la obtención de celulosa, hemicelulosa y lignina. Por lo tanto la madera en proporción general posee un 50 % de carbono, 43 % de oxígeno y 6 % de hidrogeno[9]. Estos valores varían de acuerdo a cada especie de donde se obtiene la madera.

### 3.3. Combustión de la madera

La combustión directa es el sistema de extracción de energía más antiguo que existe, el proceso de combustión de materia orgánica (combustible), reacciona químicamente con el oxígeno (comburente) en una reacción que cede calor al medio. El resultado de la reacción es dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), agua ( $\text{H}_2\text{O}$ ) y otros elementos como azufre y nitrógeno [22]. Con el objeto de analizar este tipo de reacción es necesario distinguir entre tres distintos tipos de combustión, la denominada combustión perfecta, la incompleta y la completa.

#### Combustión Perfecta

La combustión perfecta es la que se produce, teóricamente, de acuerdo a cantidades estequiométricas de combustible y comburente. Este tipo de reacción sólo se puede lograr en un laboratorio y no se da en la práctica industrial. Un ejemplo de reacción perfecta sería el siguiente:



Es decir que reaccionen completamente 12g de carbono con 32g de oxígeno para dar 44g de dióxido de carbono y desprender calor. Como se ve, en este caso, han reaccionado un átomo-gramo de carbono con una molécula de oxígeno para dar una molécula-gramo de dióxido de carbono, ello implicaría que hasta el último átomo de carbono ha reaccionado con la última molécula de oxígeno para dar una molécula de dióxido de carbono, lo cual es imposible en las reacciones de combustión industrial.



### Combustión Incompleta

Se llama así a la reacción en la cual no se quema todo el carbono del combustible dando dióxido de carbono, sino que reacciona para dar monóxido de carbono y en algunos casos queda carbono libre incandescente. Esta última situación se puede visualizar en la llama de color amarillo de un mechero Bunsen cuando el gas se quema con poco aire [18]. Un ejemplo de combustión incompleta, se da en la reacción siguiente:



También esta reacción es exotérmica, pero la cantidad de calor desprendido es menor que en el caso de la combustión perfecta. El monóxido de carbono resultante podría entrar nuevamente en combustión y desprender más calor, según la siguiente reacción:



### Combustión Completa

La combustión completa es aquella en la cual todo el carbono del combustible reacciona con el oxígeno del comburente para dar dióxido de carbono. La reacción es similar a la de la combustión perfecta, con la diferencia que, para que ocurra, es necesario agregar una mayor cantidad de oxígeno que la requerida de acuerdo al cálculo estequiométrico. Dicha cantidad en exceso se denomina exceso de aire.

### Exceso de Aire

Es la cantidad de aire en exceso, sobre el estequiométrico, necesario para producir una combustión completa. Generalmente se mide en por ciento en volumen:

$$e \text{ (\%)} = \frac{\text{aire real} - \text{aire estequiometrico}}{\text{aire estequiometrico}} \times 100 \quad (3-5)$$

Ahora bien, para que en un proceso térmico en un horno, un combustible entregue el máximo de calor que puede entregar, se debe agregar un exceso de aire, pero si el exceso de aire es agregado es muy grande, el volumen de gases al calentarse en el horno es también grande, y por consiguiente la temperatura disminuye. Por esto es necesario llegar a un balance, que consiste en lograr que el combustible entregue todas las calorías posibles, pero al mismo tiempo que el exceso de aire no sea demasiado grande como para que disminuya la temperatura en el horno[9].

Los factores fundamentales que afectan al proceso de combustión son: características físicas, químicas y energéticas de la biomasa, el porcentaje de oxígeno y la temperatura a la que se realiza la combustión, entre 600 y 1300 grados Celcius.

#### 3.3.1. Poder calorífico y porcentaje de humedad

El poder calorífico es la cantidad de calor emitida por un combustible por unidad de masa. Generalmente se mide en kilocalorías por kilogramo de combustible (kcal/kg)[12].

Se pueden distinguir dos tipos de poderes caloríficos para cada combustible, el poder calorífico superior y el inferior. Se diferencian entre sí en que el primero comprende todo el calor producido, incluyendo el requerido para vaporizar la humedad que contiene el mismo.

El inferior no considera las calorías consumidas para vaporizar la humedad que contiene el combustible, por consiguiente éste es que el nos da las calorías que realmente son aprovechables en un proceso térmico. A continuación se presenta una tabla de algunos materiales y su poder calorífico promedio:

**Tabla 3-1.:** Poder Calorífico de algunos materiales [12].

| Combustible | Estado físico | Poder Calorifico (kJ/kg) |
|-------------|---------------|--------------------------|
| Antracita   | Sólido        | 8,200                    |
| Leña        | Sólido        | 4,500                    |
| Hulla       | Sólido        | 8,500                    |
| Coque       | Sólido        | 7,200                    |
| Metano      | Gas           | 13,000                   |
| Fuel Oíl    | Líquido       | 9,600                    |
| Hidrogeno   | Gas           | 34,000                   |

Conocida la composición química de un combustible resulta posible el cálculo de su poder calorífico [12]

$$PC = (81) (\%C) + 288 \left[ \%H - \left( \frac{\%O}{8} \right) \right] + (22,3) (\%S) \quad (3-6)$$

Donde:

%C: es el porcentaje en peso de Carbono

%H: es el porcentaje en peso de Hidrógeno

%O: es el porcentaje en peso de Oxígeno

%S: es el porcentaje en peso de Azufre

## 3.4. Formas de Transmisión de calor

Se define Calor como una forma de energía que se puede transferir de un sistema a otro, como resultado de la diferencia de temperatura. La ciencia que trata de la determinación de las razones de esas transferencias de energía es la transferencia de calor. La transferencia de energía como calor siempre se produce del medio que tiene la temperatura más elevada hacia el de temperatura más baja, y la transferencia de calor se detiene cuando los dos medios alcanzan la misma temperatura [10].

El calor se puede transferir en tres modos diferentes: conducción, convección y radiación. Todos los modos de transferencia de calor requieren la existencia de una diferencia de temperatura y todos ellos ocurren del medio que posee la temperatura más elevada hacia uno de temperatura más baja.

### 3.4.1. Conducción

La conducción es la transferencia de energía de las partículas más energéticas de una sustancia hacia las adyacentes menos energéticas, como resultado de interacciones entre esas partículas. La conducción puede tener lugar en los sólidos, líquidos o gases. En los gases y líquidos la conducción se debe a las colisiones y a la difusión de las moléculas durante su movimiento aleatorio [10]. En los sólidos se debe a la combinación de las vibraciones de las moléculas en una retícula y al transporte de energía por parte de los electrones libres.

La rapidez o razón de la conducción de calor a través de un medio depende de la configuración geométrica de éste, su espesor y el material de que esté hecho, así como de la diferencia de temperatura a través de él.

$$Q_{cond} = k A \frac{T_1 - T_2}{\Delta x} \quad (3-7)$$

Donde:

$k$  = Conductividad térmica del material

$A$  = Área superficial por donde fluye el calor

$T_1$  y  $T_2$  = Diferencia de temperatura entre las caras

$\Delta x$  = Espesor del material

### 3.4.2. Convección

La convección es el modo de transferencia de energía entre una superficie sólida y el líquido o gas adyacente que está en movimiento y comprende los efectos combinados de la conducción y el movimiento de fluidos. Entre más rápido es el movimiento de un fluido, mayor es la transferencia de calor por convección. En ausencia de cualquier movimiento masivo de fluido, la transferencia de calor entre una superficie sólida y el fluido adyacente es por conducción pura[10]. La presencia de movimiento masivo del fluido aumenta la transferencia de calor entre la superficie sólida y el fluido.

La convección recibe el nombre de convección forzada si el fluido es forzado a fluir sobre la superficie mediante medios externos como un ventilador, una bomba o el viento. Como contraste, se dice que es convección natural si el movimiento del fluido es causado por las fuerzas de empuje que son inducidas por las diferencias de densidad debidas a la variación de la temperatura en ese fluido[10].

Se sabe que la rapidez de la transferencia de calor por convección es proporcional a la diferencia de temperatura y se expresa en forma conveniente por la ley de Newton del enfriamiento como:

$$Q_{conv} = h A_S (T_S - T_\infty) \quad (3-8)$$

Donde:

$h$  = Coeficiente de transferencia de calor por convección

$A_S$  = Área superficial sobre la cual tiene lugar la transferencia de calor

$T_S$  = Temperatura de la superficie

$T_\infty$  = Temperatura del ambiente

El coeficiente de transferencia de calor por convección  $h$  no es una propiedad del fluido. Es un parámetro que se determina en forma experimental y cuyo valor depende de todas las variables que influyen sobre la convección, como la configuración geométrica de la superficie, la naturaleza del movimiento del fluido, las propiedades de éste y la velocidad masiva del mismo. En la siguiente tabla se muestran algunos valores típicos de coeficientes de transferencia de calor por convección.

**Tabla 3-2.:** Coeficientes de transferencia de calor [10].

| Tipo de convección             | $h$ W/m <sup>2</sup> C |
|--------------------------------|------------------------|
| Convección libre de gases      | 2-5                    |
| Convección libre de líquidos   | 10-1000                |
| Convección forzada de gases    | 25-250                 |
| Convección forzada de líquidos | 50-20,000              |
| Ebullición y condensación      | 2,500-100,000          |

### 3.4.3. Radiación

La radiación es la energía emitida por la materia en forma de ondas electromagnéticas como resultado de los cambios en las configuraciones electrónicas de los átomos o moléculas. A diferencia de la conducción y la convección, la transferencia de calor por radiación no requiere la presencia de un medio interventor. De hecho, la transferencia de calor por

radiación es la más rápida pues se lleva a cabo a la velocidad de la luz y no sufre atenuación en un vacío [10]. Ésta es la manera en la que la energía del Sol llega a la Tierra.

Todos los cuerpos a una temperatura arriba del cero absoluto emiten radiación térmica. La razón máxima de la radiación que se puede emitir desde una superficie a una temperatura termodinámica  $T_s$  es expresada por la ley de Stefan-Boltzmann como:

$$Q_{emitida \ max} = \sigma A_S T_s^4 \quad (3-9)$$

Donde:

$\sigma$  = Es la constante de Stefan-Boltzmann. Es igual a  $5.67108 \text{ W/m}^2\text{K}^4$

$A_s$  = Es el área superficial

$T_s$  = temperatura de la superficie del cuerpo

La superficie idealizada que emite radiación a esta razón máxima se llama cuerpo negro y la radiación emitida por éste es la radiación del cuerpo negro. La radiación emitida por todas las superficies reales es menor que la emitida por un cuerpo negro a la misma temperatura y se expresa como:

$$Q_{emitida \ max} = \varepsilon \sigma A_S T_s^4 \quad (3-10)$$

Donde:

$\varepsilon$  = Es la emisividad de la superficie. Cuyo valor es del 0 al 1 en la que un cuerpo negro es 1.

En la tabla siguiente se dan algunos valores de emisividades de materiales.

**Tabla 3-3.:** Emisividades de algunos materiales a 300 K [10].

| Material                | Emisividad |
|-------------------------|------------|
| Aluminio                | 0.07       |
| Cobre pulido            | 0.03       |
| Oro pulido              | 0.03       |
| Acero inoxidable pulido | 0.02       |
| Pintura blanca          | 0.9        |
| Pintura negra           | 0.98       |
| Ladrillo rojo           | 0.93-0.96  |
| Piel humana             | 0.95       |
| Madera                  | 0.82-0.92  |
| Agua                    | 0.96       |
| Vegetación              | 0.92-0.96  |

### 3.5. Protocolos Internacionales

Para determinar la eficiencia y el ahorro potencial de leña de un nuevo prototipo de estufa de leña, se ejecutan los tres protocolos utilizados internacionalmente para este propósito: (1) la prueba de ebullición de agua (WBT sus siglas en inglés), que evalúa la eficiencia térmica, el tiempo de ebullición, la tasa de incineración y el consumo específico de combustible (CEC) de la estufa; (2) la prueba de cocción controlada (CCT, sus siglas en inglés), que se aplica a un determinado número de hogares para determinar la eficiencia de la estufa en función del CEC; (3) la prueba de funcionamiento en cocina (KPT, sus



siglas en inglés), que se aplica de igual manera a cierto número de hogares de acuerdo a las estufas que se puedan fabricar como prototipo, para medir el impacto real de la estufa mejorada en condiciones de campo.

### **3.5.1. Prueba de Ebullición de Agua (WBT)**

La prueba de Ebullición de Agua es una simulación simple del proceso de cocción con la finalidad de medir cuan eficiente es una estufa en utilizar combustible para calentar el agua en una olla y la cantidad de emisiones producidas durante el proceso[23].

La prueba de ebullición de agua fue desarrollada para evaluar la actuación de la estufa en una forma controlada, y por lo tanto es probable que no se parezca a las costumbres de cocción locales como otras pruebas descritas. Es una aproximación del proceso de cocción y se lleva a cabo en condiciones controladas por técnicos capacitados. Los resultados de las pruebas de laboratorio pueden diferir de los resultados obtenidos al cocinar los alimentos reales con los combustibles locales, incluso si la eficiencia y las emisiones se midieron exactamente de la misma manera para ambas pruebas. Para confirmar los efectos deseados las estufas deben ser evaluadas en condiciones reales de uso.

El WBT consta de tres fases que siguen inmediatamente una a la otra. Todo el WBT debe llevarse a cabo al menos tres veces para cada estufa, que constituye un conjunto de pruebas WBT.

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. El evaluador luego reemplaza el agua hervida con una nueva olla de agua a temperatura ambiente para realizar la segunda fase.

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. Al 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. 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. Este paso simula el tiempo de cocción de las legumbres o leguminosas comunes en gran parte del mundo.

Una prueba de estufa completa debe incluir siempre las tres fases. Una prueba rápida para el uso interno de un laboratorio puede incluir sólo el arranque en frío y cocinar a fuego lento si la estufa tiene poca masa y pruebas de ebullición anteriores han demostrado que las fases de arranque en frío y de arranque en caliente producen los mismos resultados [23].

Los resultados principales del WBT son:

El tiempo para llevar a ebullición 5 L o en su variante 3.5 L de agua ( $t_{eb}$ ): Se calcula restando la hora de inicio y de fin de la prueba.

La eficiencia térmica de la estufa ( $E_{ft}$ ): Es el cociente de la energía útil otorgada a la olla con agua entre la energía total de entrada. Se calcula para las tres fases.

$$E_{ft} = \frac{E_0}{E_e} \quad (3-11)$$

$$E_e = m_{comb} PCI_{comb} \quad (3-12)$$

$$E_0 = (0,00418 \Delta_T t_{eb}) + (2,257 m_{ev}) \quad (3-13)$$

El combustible consumido ( $m_{comb}$ ): Es la diferencia de peso del combustible al inicio y al final de cada fase.

La tasa de combustión ( $\tau$ ): Es el consumo promedio de combustible durante cada fase de la prueba.

$$\tau = \frac{m_{comb}}{t_{eb}} \quad (3-14)$$

La potencia de la estufa ( $P_t$ ): es la energía de entrada por unidad de tiempo (kW). Se calcula dividiendo la energía total de entrada entre el tiempo total de cada fase en segundos.

$$P_t = \frac{E_e}{(60) (t_{eb})} \quad (3-15)$$

Donde:

$t_{eb}$  = Tiempo para alcanzar el punto de ebullición (min).

$E_{ft}$  = Eficiencia térmica (%).

$m_{comb}$  = Masa del combustible quemado (kg).

$PCI_{comb}$  = Poder calorífico inferior del combustible (18 MJ/kg de leña seca).

$\Delta T$  = Diferencia de temperatura en el agua, entre la inicial y la de ebullición (°C).

$E_o$  = Energía útil otorgada (MJ).

$E_e$  = Energía total de entrada (MJ).

$m_{ev}$  = Masa de agua evaporada (kg).

$m_{eb}$  = Masa de agua llevada al punto de ebullición (kg).

$\tau$  = Tasa de combustión (kg/min).

$P_t$  = Potencia (kW).

### 3.5.2. Cocinado Controlado (CCT)

La prueba de cocinado controlado (CCT) está diseñada para evaluar el desempeño de la estufa mejorada con respecto a las estufas comunes o tradicionales. Estas estufas se comparan mediante una tarea de cocinado estándar que sea común y cotidiana en la localidad. Sin embargo, las pruebas están diseñadas para minimizar la influencia de otros factores y permitir que las condiciones de prueba sean reproducidas [24].

Se utiliza una estufa que no ha sido encendida por lo menos en las últimas 24 horas. Los pasos a seguir son:

1. Se registra el peso del alimento o alimentos en gramos o piezas según sea el caso.
2. Se ponen las ollas sobre las superficies de cocción.

3. Se posicionan los termómetros en la cámara de combustión y la chimenea.
4. La cocinera forma un arreglo con trozos de combustible que permita el paso del aire.
5. La cocinera enciende fuera de la cámara de combustión un trozo de iniciador de fuego (ocote, trozo de leña con alcohol en gel, papel con aceite, etc.) y lo posiciona dentro del arreglo de combustible en la cámara de combustión. A partir de este paso se comienza a contar el tiempo.
6. La cocinera vigila el fuego y al mismo tiempo comienza la labor de cocinado. Si el fuego se apaga y se consumió combustible, se mide y registra de nuevo el peso del combustible.
7. Una vez que la cámara de combustión está encendida se debe continuar alimentando combustible a la cámara de combustión. Se debe mantener el fuego en alto poder o bajo poder según los requerimientos de cocinado. La frecuencia de alimentación y la cantidad de combustible dependerán del comportamiento de la cámara de combustión y de la destreza de la cocinera.
8. Cuando la cocinera termina la cocción de los alimentos se registra el tiempo.
9. El responsable técnico se pone la máscara contra humo.
10. El responsable técnico retira de la cámara de combustión el combustible no quemado y lo introduce en el ahogador de fuego.
11. El responsable técnico retira el carbón y las cenizas de la cámara de combustión y los

deposita en el ahogador para carbón.

12. El responsable técnico mide y registra el peso de la(s) olla(s) con el alimento cocinado.

13. El responsable técnico mide y registra el peso de la charola con el carbón.

14. Se mide y registra el peso de todo el combustible que no se quemó en la prueba.

15. Se limpia y ordena el área de trabajo.

Los resultados principales del CCT son:

- El tiempo para realizar la cocción: se calcula restando la hora de inicio y fin del cocinado.
- El combustible consumido: es la diferencia de peso del combustible al inicio y al final de la prueba de cocinado.
- La tasa de combustión: es el consumo promedio de combustible durante la cocción.
- La potencia de la estufa: es la energía de entrada por unidad de tiempo. Se calcula dividiendo la energía total de entrada entre el tiempo total de la prueba en segundos.

$$E_e = (m_{comb}) (PCI_{comb}) \quad (3-16)$$

$$P_t = \frac{E_e}{(60) (t_c)} \quad (3-17)$$

Donde:

$t_c$  = Tiempo para realizar la cocción (min).

$E_e$  = Energía total de entrada.

$m_{comb}$  = Masa del combustible quemado (kg).

$PCI_{comb}$  = Poder calorífico inferior del combustible (kcal/kg)

$P_t$  = Potencia (kW).

$t_c$  = Tasa de combustión (gr/min).

### 3.5.3. Funcionamiento en Cocina (KPT)

Esta prueba evalúa el comportamiento de la estufa simulando la realidad de su uso. Se analiza el consumo de energía durante un ciclo y se evalúan aspectos relacionados con su funcionamiento. Algunas cualidades a evaluar son:

- Aceptación de la tecnología
- Consumo de leña por habitante
- Ergonomía
- Seguridad anti-volteo
- Entre otras pruebas que se pueden sugerir para comparar con otras estufas.

## **4. Metodología**

### **4.1. Introducción**

En este capítulo se presentan los medios utilizados para realizar los experimentos que se necesitan en el estudio de la cámara de combustión de la estufa mejorada de leña conocida como Enerchía. Las herramientas utilizadas para esta investigación son: el uso de SolidWorks como herramienta computacional para la simulación térmica de algunas piezas y de igual forma para realizar el ensamblaje previo para reducir errores de construcción, se siguen además los principios de transferencia de calor para analizar teóricamente las pérdidas de calor en algunos elementos como son el comal y la chimenea. Por último se presentan los protocolos internacionales para la evaluación de las estufas ecológicas. Así como las herramientas y equipos destinados para las evaluaciones.

### **4.2. Rediseño de la estufa mejorada Enerchía 2015**

El rediseño de la estufa Enerchía es necesario debido a que el modelo actual presenta algunos inconvenientes, como es el caso del material aislante que al ser fabricado de piedra pómez y cemento, tiende a formar grietas, lo que ocasiona que la madera que es la estructura base carbonice en algunos casos. Por lo tanto se deben realizar las mediciones para el modelo actual y consultar costos y medidas de los materiales usados en la construcción de este modelo, con el objetivo de reducir pérdidas de material y obtener medidas de la nueva estufa que estén acorde a las costumbres de cocinado en la región de estudio.





Figura 4-1.: Proceso de estudio de mejora de la estufa Enerchía [6].

#### 4.2.1. Uso de software para dibujo y ensamble de estufa

Se emplea el software SolidWorks 2014 para el dibujo de las piezas que conforman la nueva estufa, esto para reducir errores de construcción ya que nos genera los planos y las diferentes vistas, para que los futuros trabajos no presenten variaciones en cuanto al método de ensamble y construcción. También se pretende usar el software con dos herramientas que posee; la primera es de simulación térmica y la segunda de simulación de flujos en el interior y exterior de la geometría a estudiar. La simulación térmica se realiza para analizar los diferentes materiales propuestos como aislantes y la simulación de flujo para observar el comportamiento del aire y los gases generados en la combustión.

### 4.2.2. Construcción de estufa mejorada

Con los datos obtenidos de los materiales de construcción para la nueva estufa Enerchía, así como los estudios previos de transferencia de calor y de conductividad térmica de los aislantes, se hace un acopio de herramientas básicas para corte de madera, atornillador, corte de láminas, entre otros, y se ensamblara una nueva estufa, cuyas medidas se presentan en el capítulo de resultados, también se podrán obtener los planos y los materiales utilizados en su elaboración.

### 4.2.3. Pérdidas de calor en el comal

Se realiza un estudio físico y teórico para evaluar las pérdidas de calor en el comal de la estufa, este estudio incluye una fase de calentamiento controlado con diferentes fuentes de energía térmica, se emplean las ecuaciones de la aleta para analizar las pérdidas de calor, y por último se valoraran los resultados de simulaciones de flujo de aire en la cámara de combustión y sus efectos de turbulencia hacia el comal.

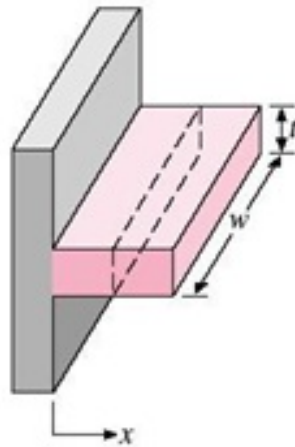


Figura 4-2.: Esquema representativo a la pérdida de calor por aletas [6].

### 4.3. Medición de conductividad térmica de materiales

Actualmente no se tienen mediciones de conductividad térmica de los materiales aislantes usados en la fabricación de la estufa Enerchía, por lo tanto es necesario realizar un estudio de las conductividades térmicas, para lo cual se necesita de un medidor, que se elaborara siguiendo con las normas: IRAM 11559:1995 y NMX-C-189-1984. Se tiene planeado utilizar diversos materiales que sean económicos y fáciles de conseguir en la región, algunos de estos materiales son: tezontle, vermiculita, cenizas, arcilla expandida, entre otros. Los cuales se analizarán para su posterior utilización como aislante térmico en las paredes de la cámara de combustión.

Posteriormente se evalúan las resistencias térmicas equivalentes debido a que usan tres capas de material, una será de ladrillo, cuyo espesor se evaluara con las ecuaciones de transferencia de calor, de igual forma se evaluara el espesor del material aislante principal, y por último se usara madera de pino como estructura principal, cuya medida de espesor es comercial.

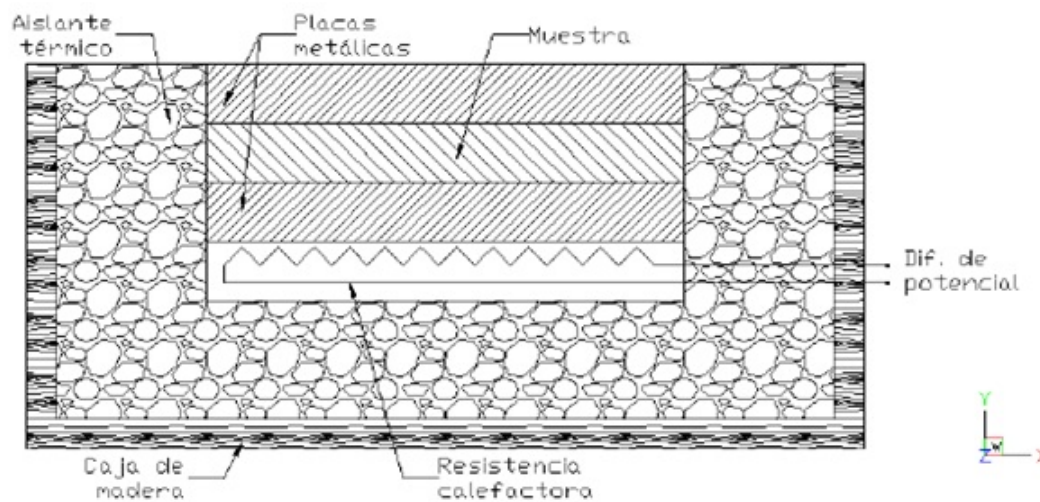


Figura 4-3.: Diagrama representativo de medición de conductividad térmica. [11].

## 4.4. Pérdidas de calor en la chimenea

Los cálculos de pérdidas de calor en la chimenea se calculan de dos formas:

- Se simulan diferentes velocidades de viento en el exterior de la chimenea de tal forma que enfríen el tubo circular haciendo que la diferencia de presiones sea tal que el flujo másico interno disminuya, lo que ocasiona que la combustión en el interior de la estufa disminuya.
- Se realizan los cálculos para evaluar el flujo másico interno, tratando de calcular el porcentaje de oxígeno que requiere la estufa en su máxima combustión.

## 4.5. Medición de poder calorífico de materiales

Un experimento que es necesario para realizar el cálculo de la eficiencia térmica de una estufa mejorada de leña es medir el poder calorífico del combustible usado en la estufa, debido a que cada especie de árbol posee propiedades diferentes, tanto en su composición química y física. Se emplea un calorímetro para la medición del poder calorífico, el calorímetro es de la marca Parr modelo 6400. Los resultados se comparan con la lista de poder calorífico que se tiene en la hoja 4.2.2 de WBT en los protocolos internacionales.

### 4.5.1. Recolección de muestras de leños

Para realizar los protocolos internacionales es necesario usar la leña que más se tiene acceso a las comunidades, para ello se realiza una visita a la región donde se pretende implementar el uso de las estufas ecológicas. De los datos que se necesitan recolectar son los tamaños promedios de leños, los diámetros en que se leñan, y por último sacar muestras de cada leño para posteriormente medir su poder calorífico.



Figura 4-4.: Calorímetro marca Parr 6400.

#### 4.5.2. Costumbres en la cocción de alimentos

Se recolectó información sobre las costumbres que se tienen en cuanto a la cocción de alimentos, principalmente el tamaño de sus ollas y la cantidad de alimento que consumen por día. Debido a que por medio de esta información se podrá recalcular el tamaño adecuado del comal.

### 4.6. Estequiometría de la combustión

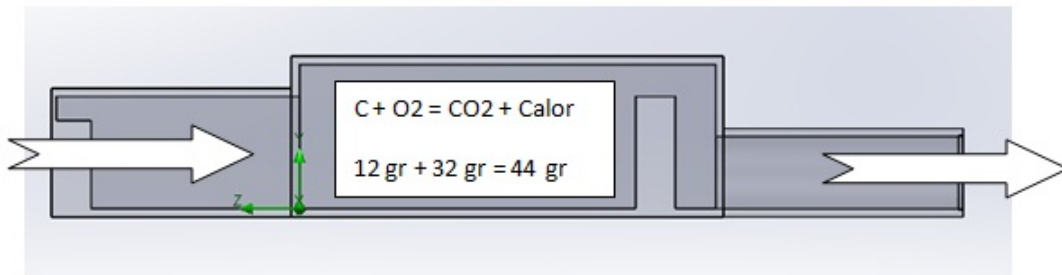


Figura 4-5.: Diagrama representativo a la cámara de combustión de la estufa de leña Enerchía

Se emplean ecuaciones de balance de masa para realizar el cálculo teórico del fenómeno de la combustión, lo cual se podrá analizar el flujo de aire teórico y real de la combustión en la nueva estufa.

## 4.7. Equipos de medición para evaluación

A continuación se describen los equipos que se utilizaran para realizar las pruebas de ebullición de agua y de cocinado controlado.



Termómetro infrarrojo: Se empleará para realizar mediciones altas de temperatura sin tener contacto con las superficies. El rango es de  $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$  a  $800\text{ }^{\circ}\text{C}$



Báscula gramera: Se usará para pesar la madera que se usaran en las pruebas, además de pesar el agua para las pruebas de WBT. Tiene una capacidad de 5 kg con una resolución de 1 gr.



Medidor de humedad: Este instrumento se pretende usar para medir la humedad de la madera, se parte a la mitad la madera y se toma la medición con las agujas. Tiene una capacidad de medición de 0 a 70 % de humedad



Anemómetro: Se empleara para realizar mediciones de aire ambiental en la habitación de pruebas, también para medir el flujo de aire en la chimenea. Tiene una capacidad de 20 m/s. Es de la marca Wind Mate.



Cronometro: Se usará para llevar el tiempo en las diferentes pruebas de WBT y CCT. Es de la marca Steren.



Termómetro sumergible: se pretende usar este instrumento de medición de temperatura de líquidos, para mantener el registro continuo de la temperatura en las pruebas de WBT y CCT. Tiene una capacidad de -20 °C a 150 °C.

## 4.8. Evaluación de estufas mejoradas de leña

Para determinar la eficiencia y el ahorro potencial de leña de un nuevo prototipo de estufa de leña, se ejecutan los tres protocolos utilizados internacionalmente para este propósito: La prueba de ebullición de agua (WBT sus siglas en inglés), que evalúa la eficiencia térmica, el tiempo de ebullición, la tasa de incineración y el consumo específico de combustible (CEC) de la estufa. La prueba de cocción controlada (CCT, sus siglas en inglés), que se aplica a un determinado número de hogares para determinar la eficiencia de la estufa en función del CEC. La prueba de funcionamiento en cocina (KPT, sus siglas en inglés), que se aplica de igual manera a cierto número de hogares de acuerdo a las estufas que se puedan fabricar como prototipo, para medir el impacto real de la estufa mejorada en condiciones de campo. Para este estudio no se incluye la prueba de funcionamiento en cocina debido a que no es el alcance del estudio en esta tesis.

### 4.8.1. Prueba de Ebullición de Agua (WBT)

El WBT consta de tres fases que siguen inmediatamente una a la otra. Estos se discuten a continuación y se muestra gráficamente en la figura 4.6. Todo el WBT debe llevarse a cabo al menos cinco veces para cada estufa.

- 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. El evaluador luego reemplaza el agua hervida con una nueva olla de agua a temperatura ambiente para realizar la segunda fase.
- 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. Al 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.

- 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. Este paso simula el tiempo de cocción de las legumbres o leguminosas comunes en gran parte del mundo.

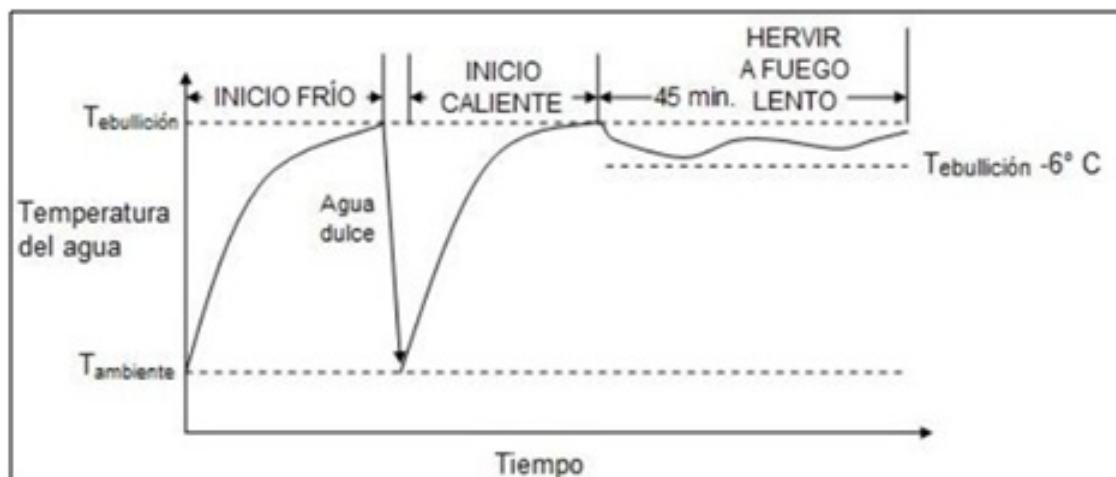


Figura 4-6.: Fases de la Prueba de Ebullición de Agua. [6].

Una prueba de estufa completa debe incluir siempre las tres fases. Una prueba rápida para el uso interno de un laboratorio puede incluir sólo el arranque en frío y cocinar a fuego lento si la estufa tiene poca masa y pruebas de ebullición anteriores han demostrado que las fases de arranque en frío y de arranque en caliente producen los mismos resultados

#### 4.8.2. Cocinado Controlado (CCT)

La prueba de cocinado controlado (CCT) está diseñada para evaluar el desempeño de la estufa mejorada con respecto a las estufas comunes o tradicionales. Estas estufas se comparan mediante una tarea de cocinado estándar que sea común y cotidiana en la

localidad. Sin embargo, las pruebas están diseñadas para minimiza la influencia de otros factores y permitir que las condiciones de prueba sean reproducidas. Se utiliza una estufa que no ha sido encendida por lo menos en las últimas 24 horas. Los pasos a seguir son:

- Se registra el peso del alimento o alimentos en gramos o piezas según sea el caso.
- Se ponen las ollas sobre las superficies de cocción.
- Se posicionan los termómetros en la cámara de combustión y la chimenea.
- La cocinera forma un arreglo con trozos de combustible que permita el paso del aire.
- La cocinera enciende fuera de la cámara de combustión un trozo de iniciador de fuego (ocote, trozo de leña con alcohol en gel, papel con aceite, etc.) y lo posiciona dentro del arreglo de combustible en la cámara de combustión. A partir de este paso se comienza a contar el tiempo.
- La cocinera vigila el fuego y al mismo tiempo comienzas la labor de cocinado. Si el fuego se apaga y se consumió combustible, se mide y registra de nuevo el peso del combustible.
- Una vez que la cámara de combustión está encendida se debe continuar alimentando combustible a la cámara de combustión. Se debe mantener el fuego en alto poder o bajo poder según los requerimientos de cocinado. La frecuencia de alimentación y la cantidad de combustible dependerán del comportamiento de la cámara de combustión y de la destreza de la cocinera.
- Cuando la cocinera termina la cocción de los alimentos se registra el tiempo.
- El responsable técnico se pone la máscara contra humo.
- El responsable técnico retira de la cámara de combustión el combustible no quemado y lo introduce en el ahogador de fuego.

- El responsable técnico retira el carbón y las cenizas de la cámara de combustión y los deposita en el ahogador para carbón.
- El responsable técnico mide y registra el peso de la(s) olla(s) con el alimento cocinado.
- El responsable técnico mide y registra el peso de la charola con el carbón.
- Se mide y registra el peso de todo el combustible que no se quemó en la prueba.
- Se limpia y ordena el área de trabajo.

## 4.9. Conclusión

Esta metodología utilizada se lleva a cabo considerando algunos experimentos encontrados en artículos de relevancia, sin embargo es necesario seguir estudiando más métodos y fenómenos que no se tomaron en cuenta para el estudio de la cámara de combustión, tal caso es el fenómeno de la geometría por donde pasa el aire y el efecto de la radiación hacia el espacio estudiado. Por lo tanto se aporta algunas piezas que servirán para trabajos futuros que complementara el estudio más complejo de la cámara de combustión de una estufa ecológica.

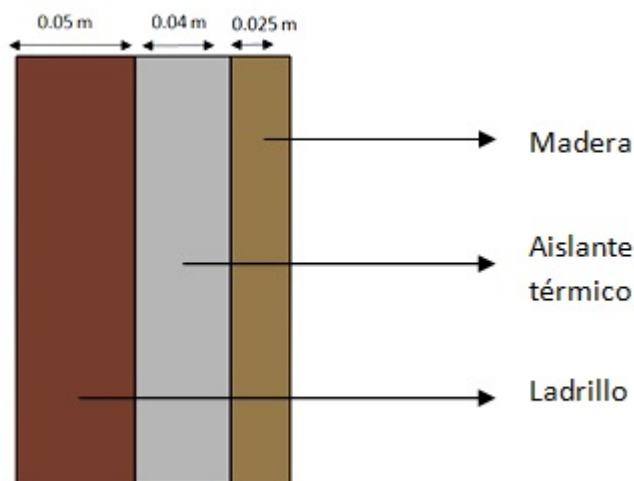
# 5. Resultados

## 5.1. Introducción.

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos en el estudio experimental de la estufa ecológica Enerchía. Se inicia analizando los materiales que se usan como aislante térmico, posteriormente se analizan los componentes principales de la estufa como es la chimenea y el comal que son las partes por los que se transfiere gran parte de la energía en forma de calor. Se procede a evaluar la geometría de la cámara de combustión, por medio de simulaciones de flujo de gases. Por último se dan a conocer los resultados de las evaluaciones de los protocolos internacionales, después que se implementaron las mejoras analizadas en este trabajo.

## 5.2. Análisis teórico de las conductividades térmicas.

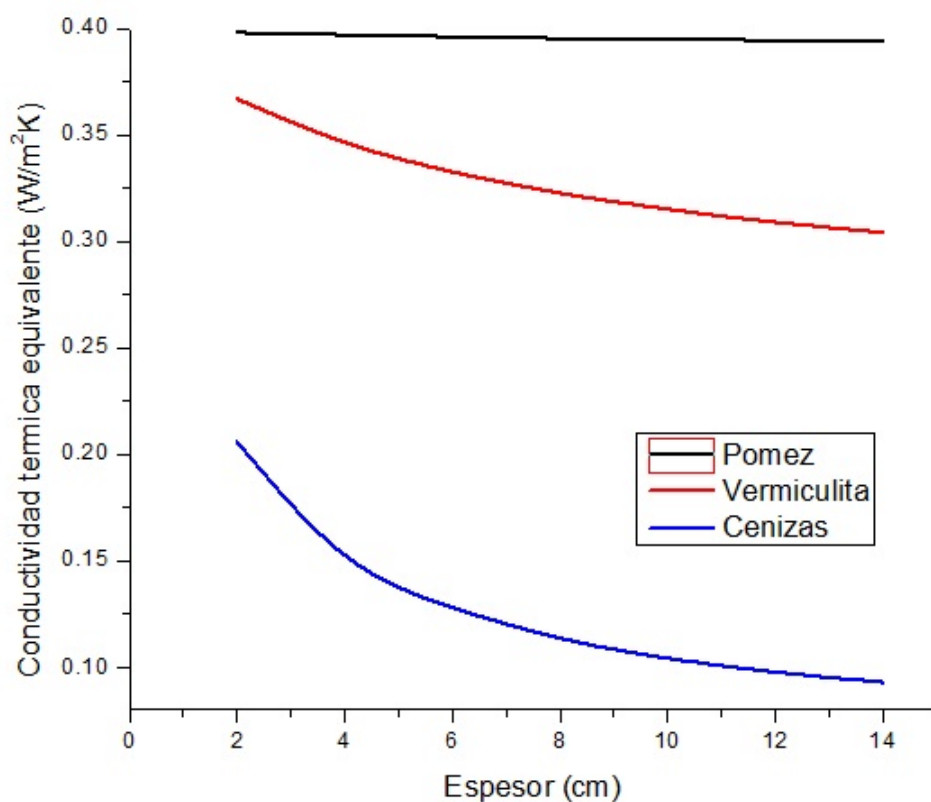
Como resultado de la búsqueda de nuevos materiales que sirvan como aislantes térmicos en las estufas ecológicas, se llevó a cabo la medición de la conductividad térmica de varios materiales, en los que destacan la vermiculita con una conductividad de  $0.26 \text{ W/m}^\circ\text{C}$ , mientras que la conductividad del material usado actualmente es una mezcla de piedra pómez con cemento en una proporción de 3:1, esta mezcla tiene una conductividad térmica de  $0.39 \text{ W/m}^\circ\text{C}$ . Las cenizas de madera presentan un comportamiento térmico aun mejor, el resultado de la conductividad térmica de este material sin compactar es de  $0.062 \text{ W/m}^\circ\text{C}$ . Y su densidad es de  $350 \text{ kg/m}^3$ .



**Figura 5-1.:** Sección transversal de la pared de la estufa Enerchía.

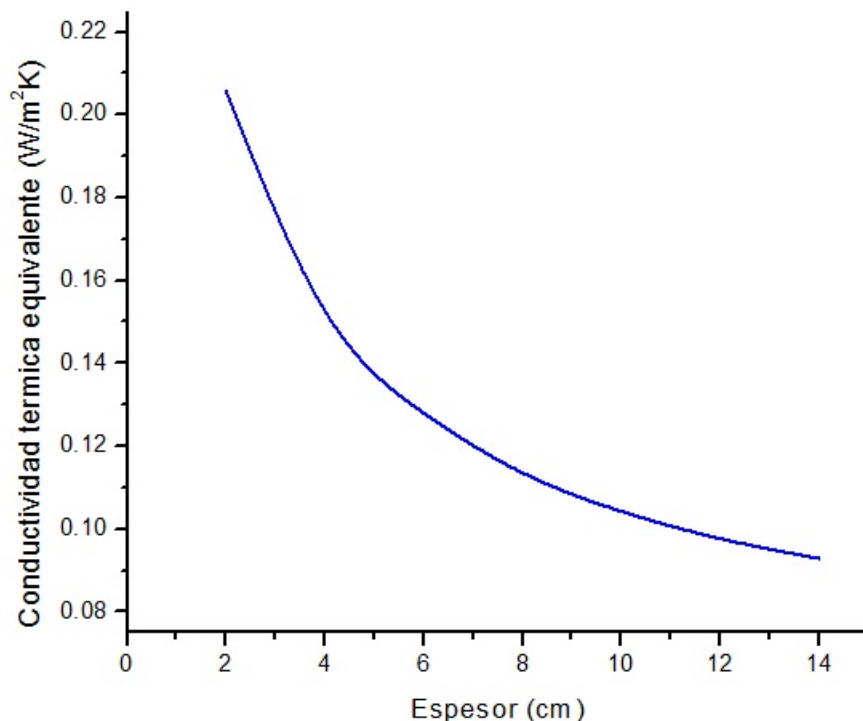
Se realizaron los cálculos correspondientes para la medición teórica de la resistencia térmica que adoptan los tres elementos que conforman la pared de una estufa, dichos elementos son: ladrillo, aislante y madera. Las medidas del ladrillo y la madera no se modificaron para este estudio, únicamente se inicia el cálculo a partir de un espesor mínimo del aislante que fue de 2 cm, hasta llegar a 14 cm de aislante. En la simulación se obtuvo que el periodo de estabilidad térmica se llega después de 12 horas para cada material simulado, que fueron: tezontle rojo, vermiculita, pómez y cenizas.

En la figura 5.2 se muestran los resultados de los cálculos realizados a diferentes espesores en aislantes, se observa que el material empleado actualmente a pesar que se haga más grueso, este no mejora su conductividad térmica equivalente, es decir por la unión de los tres materiales como se muestra en la figura 5.1. Se observa además que para el comportamiento térmico de las cenizas mejora bastante bien, estabilizándose en  $0.1 \text{ W/m}^{\circ}\text{C}$  a los 10 cm de espesor. Sin embargo el espesor de 10 cm podría considerarse para modelos futuros en cuyas medidas del conjunto de la estufa pueda aplicarse este tamaño de espesor.



**Figura 5-2.:** Medición de conductividad térmica equivalente de forma teórica.

La figura 5.3 nos muestran los cálculos teóricos de usar las cenizas como aislante, se observa que de 2 a 4 cm de espesor posee una reducción de  $0.05 \text{ W/m}^2\text{K}$ , lo que representa casi un 50% de la mejora en este estudio, sin embargo al realizar el estudio en laboratorio se llega a la conclusión de utilizar 6 cm de espesor como material aislante, debido al diseño final que evita la pérdida de material.



**Figura 5-3.:** Comportamiento de la conductividad térmica equivalente usando cenizas como material central.

### 5.2.1. Comportamiento térmico en laboratorio de las cenizas.

Para validar los estudios teóricos que se llevaron a cabo, se realizan experimentos que consiste en calentar una de las caras de un bloque de cenizas, este calentamiento se hace con una parrilla eléctrica con temperatura controlada de  $500\text{ }^{\circ}\text{C}$  en la base y se realizaron mediciones de temperatura cada 5 minutos durante 70 minutos. Posteriormente se dejaba enfriar la muestra durante un día hasta que alcanzara la temperatura ambiente, después se incrementaba el espesor del material en 2 cm hasta llegar a los 14 cm.

Los resultados de estos experimentos se aprecian en la figura 5.4, se observa que las cenizas con un espesor de 2 cm tienen una estabilización de alrededor de los  $160\text{ }^{\circ}\text{C}$  y este

valor es aun mejor comparado con el material usado actualmente que es de piedra pómez, cuyo espesor es de 4 cm.

También se confirman los resultados obtenidos mediante los cálculos teóricos en donde se tiene una mejora considerable de 2 a 4 cm de espesor y la segunda mejora ocurre de 4 a 6 cm de espesor.

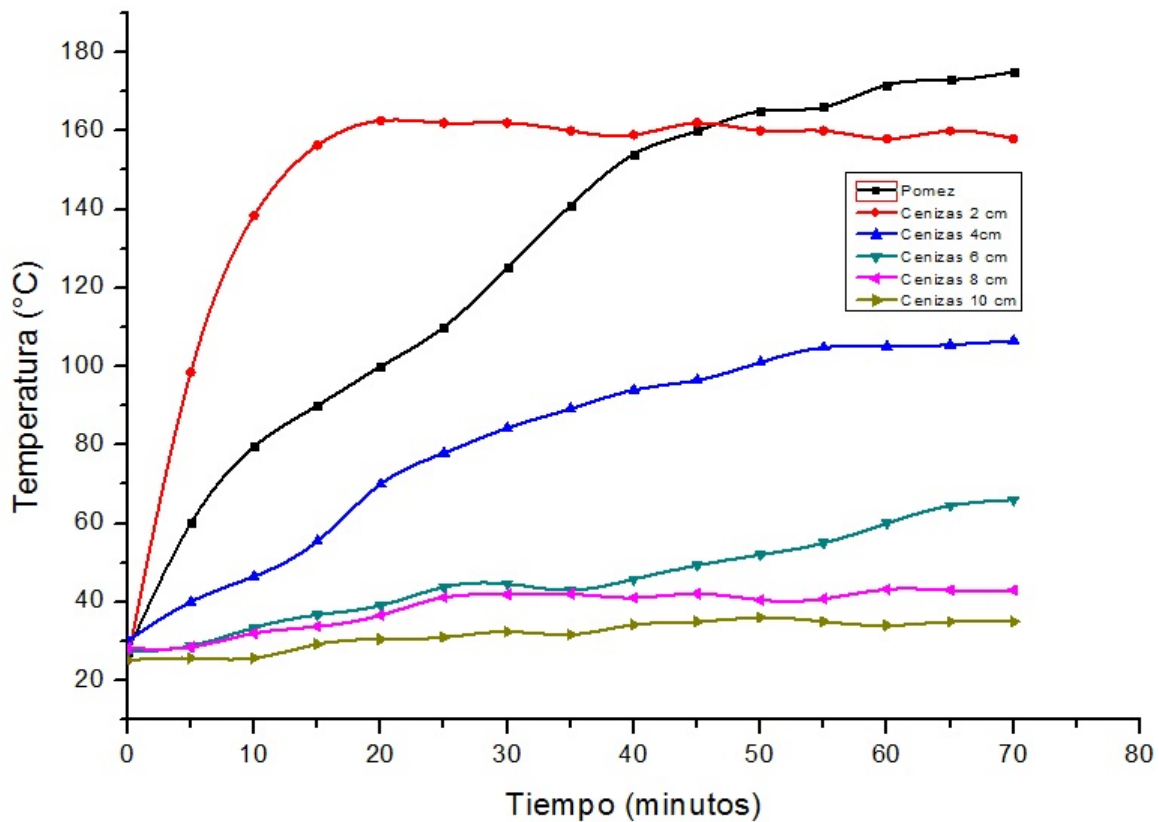


Figura 5-4.: Curva de calentamiento de las cenizas a diferentes espesores.

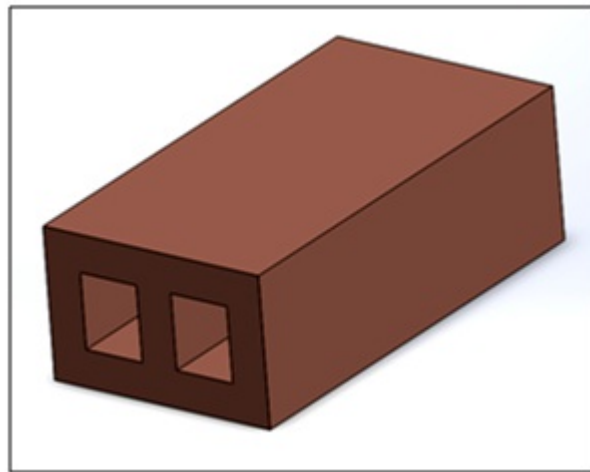
### 5.2.2. Comportamiento térmico de ladrillos.

Se sigue el mismo método utilizado en la obtención de las curvas de calentamiento para las cenizas. Se colocaron diferentes ladrillos que se fabrican en la región, estos van desde los



2 cm hasta los 7.5 cm para los ladrillos huecos. Los resultados nos arrojan que el tamaño adecuado para realizar esta tarea es un ladrillo hueco que se consigue comercialmente en la región con un precio de 4 pesos, las medidas de este ladrillo son 24 cm de largo por 12 cm de ancho y 7.5 cm de espesor. Por lo cual se adapta también al diseño final de la estufa.

La figura 5.5 ilustra el diseño de este ladrillo que posee ventilación en la parte interna a través de dos huecos, estos huecos en el momento de la construcción quedaran sellados por lo que se considera como un aislante térmico bastante bueno como es el aire, con una conductividad térmica de  $0.04 \text{ W/m}^\circ\text{C}$ .



**Figura 5-5.:** Ladrillo empleado en la elaboración de la estufa Enerchía 2017.

La figura 5.6 ilustra las curvas de calentamiento de cuatro ladrillos comerciales en la región, se destaca que para el ladrillo hueco con un espesor de 7.5 cm solamente tiene 3.5 cm de espesor ocupado por el barro, el resto es hueco, y al realizar esta configuración se mejora bastante la retención de calor, llegando a su fase estable a los  $100^\circ\text{C}$ .

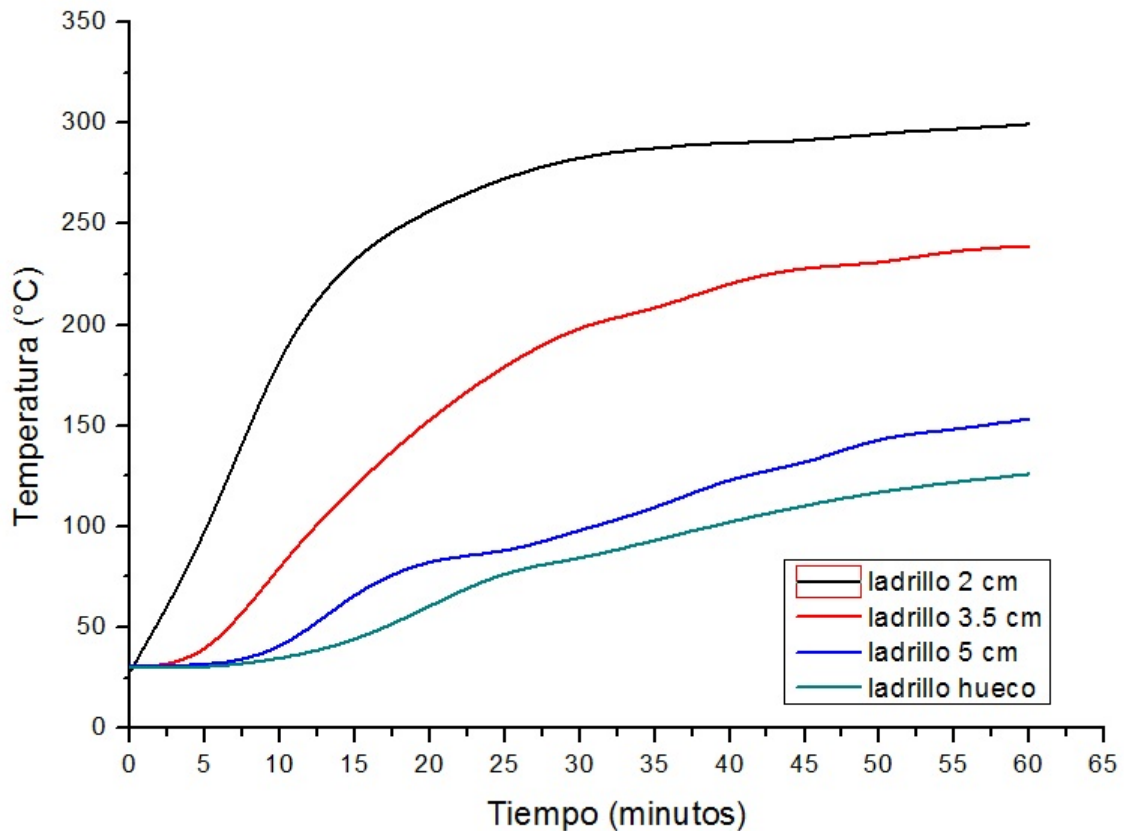
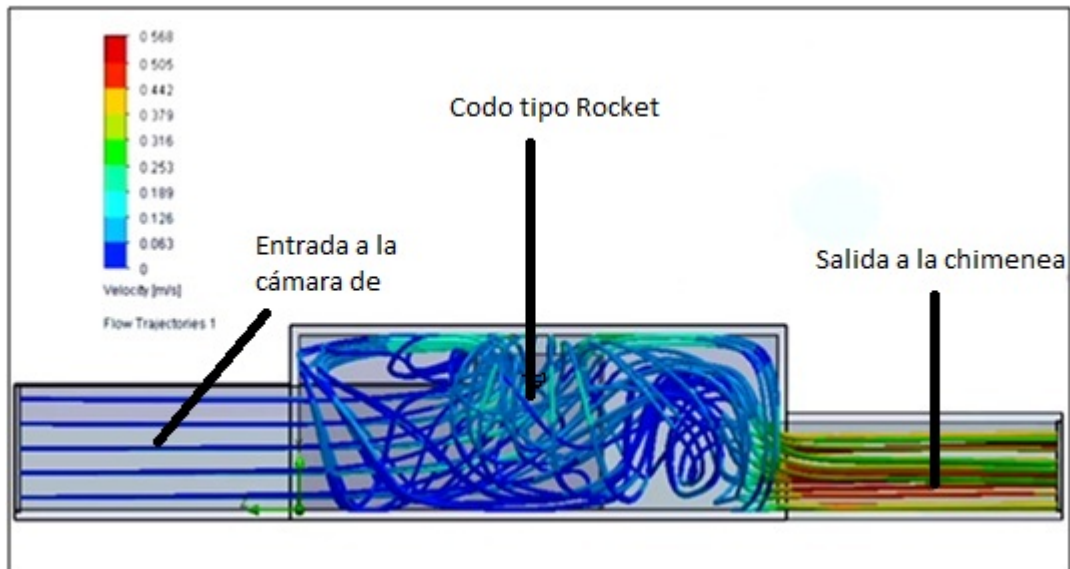


Figura 5-6.: Comportamiento térmico por calentamiento en diferentes espesores de ladrillos.

### 5.3. Simulación de flujo de aire en la cámara de combustión.

Se elaboraron dos geometrías base para la simulación de flujo de aire, la primera se observa en la figura 5.7, éste se conforma por un tubo tipo rocket de igual dimensión que la entrada de aire, la simulación de aire demostraba una turbulencia ideal para el intercambio de calor en todo el comal, distribuyéndose de manera uniforme, sin embargo en las pruebas reales se observa que la combustión se lleva a cabo de manera lenta ocasionada por el tamaño de los leños usados en la región de estudio, en muchas ocasiones se presenta

un ahogamiento del fuego llegándose a apagar. Por lo que se optó por desechar la idea y continuar con el siguiente modelo.

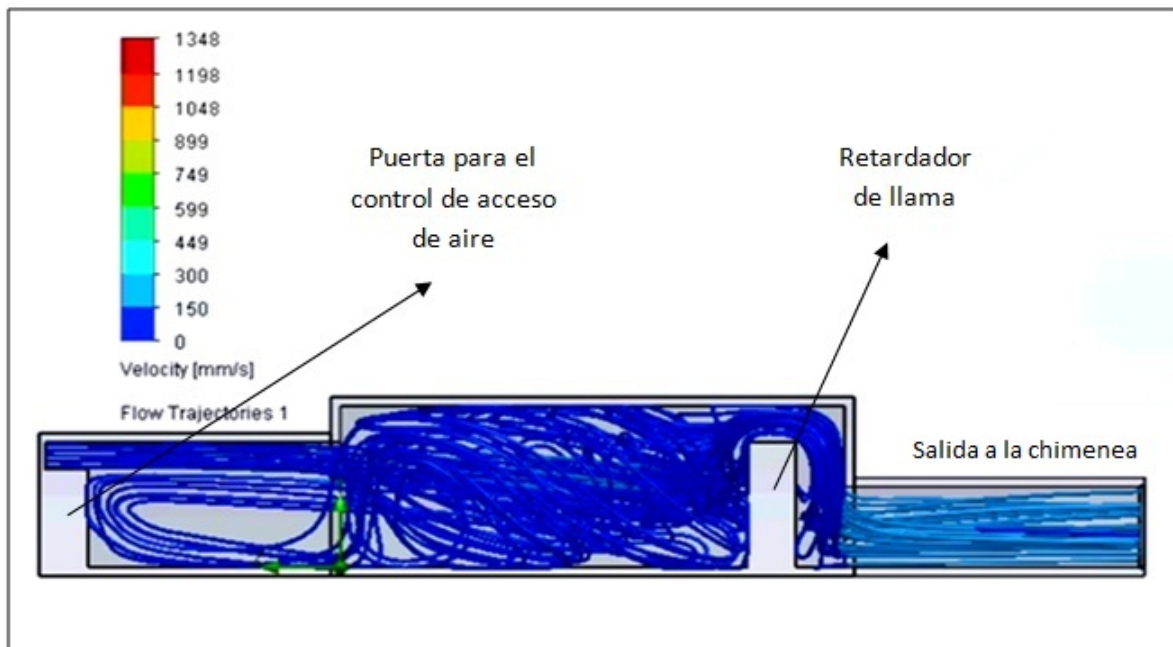


**Figura 5-7.:** Corte de sección de estufa con codo tipo rocket.

La siguiente geometría que se estudia es la usada en las estufas del año 2015 en adelante, el cual presenta una barrera que se denominó retardador de llama. El objetivo de las simulaciones es identificar velocidades y turbulencias, debido que la transferencia de calor de las llamas a la plancha se lleva a cabo de una manera más apropiada cuando la turbulencia es mayor, sin embargo si la turbulencia es demasiada puede ocasionar un ahogamiento en la combustión y tender a apagarse.

Tanto en la simulación como en las pruebas experimentales se concluye que la mejor de estas dos geometrías estudiadas es la que presenta un retardador de llamas, debido a que se tiene el espacio necesario en el interior de la cámara de combustión y se obtiene buena combustión al controlar el área para el acceso de aire. La entrada de aire por lo tanto será la necesaria para mantener la combustión cuando el fuego se mantenga estable, sin

embargo se observa que es necesario que la entrada de aire al inicio de la combustión se mantenga totalmente abierta, puesto que se necesita una cantidad de aire, que no logra absorberse por el efecto sifón puesto que aún se encuentra fría la estufa.




**Figura 5-8.:** Vista de perfil de la cámara de combustión con retardador de llama.

Las simulaciones se llevaron a cabo con los datos obtenidos de forma teórica para una combustión perfecta de leña este valor es de 182 mm/seg, por cada kg de leña presente en la cámara de combustión. Estas velocidades son ideales, pues en la simulación no dependían de la temperatura del medio, sino se ilustraba con condiciones muy ideales para identificar posibles mejoras en el flujo de aire de las geometrías estudiadas.

## 5.4. Análisis y selección del tamaño adecuado para el comal.

En el modelo de estufa Enerchía 2015 se tiene un tamaño para el comal de 2852 cm<sup>2</sup>, aun se han tenido modelos anteriores con geometría circular, en los cuales se presentan desperdicios de material. Para el modelo 2017 se hicieron revisiones de placas comerciales, de tal forma que se obtuvieran medidas en los cuales no se tengan desperdicios a la hora de realizar los cortes. Se observa por lo tanto que las medidas comerciales son las que se muestran en la figura 5.9, se opta por lo tanto realizar planchas de 2 x 1 pie, de tal forma que se relazaran los cortes sin que se desperdicie material.



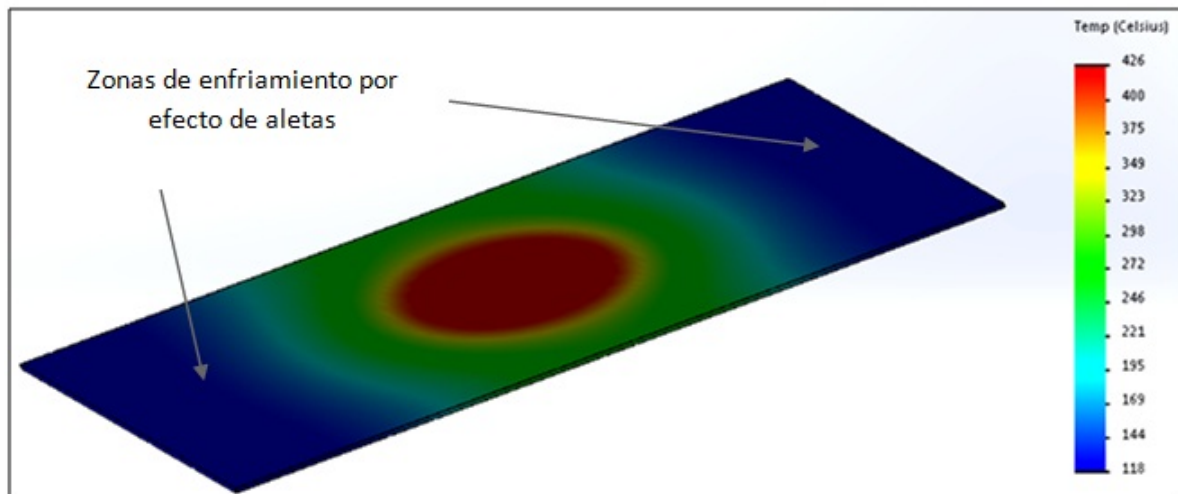
| pies                     | metros        | mm.    | mm.    | mm.    | mm.    |
|--------------------------|---------------|--------|--------|--------|--------|
| 3' x 6'                  | (.914 x 1.83) | 333    | 312    | 291    | 271    |
| 3' x 8'                  | (.914 x 2.44) | 444    | 416    | 389    | 361    |
| 3' x 10'                 | (.914 x 3.05) | 555    | 521    | 486    | 451    |
| 4' x 8'                  | (1.22 x 2.44) | 592    | 555    | 518    | 481    |
| 4' x 10'                 | (1.22 x 3.05) | 740    | 694    | 648    | 601    |
| 4' x 12'                 | (1.22 x 3.66) | 888    | 833    | 777    | 722    |
| 5' x 10'                 | (1.52 x 3.05) | 925    | 868    | 810    | 752    |
| 5' x 15'                 | (1.52 x 4.57) | 1388   | 1301   | 1215   | 1128   |
| 5' x 20'                 | (1.52 x 6.10) | 1851   | 1735   | 1619   | 1504   |
| 6' x 12'                 | (1.83 x 3.66) | 1333   | 1249   | 1166   | 1083   |
| 6' x 18'                 | (1.83 x 5.49) | 1999   | 1874   | 1749   | 1624   |
| 6' x 20'                 | (1.83 x 6.10) | 2221   | 2082   | 1943   | 1804   |
| Kilos por m <sup>2</sup> |               | 199.21 | 186.75 | 174.31 | 161.85 |

Figura 5-9.: Placas comerciales de acero al carbón. [1]

### 5.4.1. Análisis de comportamiento térmico del comal.

El comportamiento del fuego es variable, para realizar el análisis de comportamiento térmico en el comal se necesita idealizar la llama, el poder calorífico y su temperatura. Se llevo a cabo una simulación con valores idealizados, estos son de una temperatura de 500 °C en la parte inferior, y con convección natural en la parte superior, además se idealiza la circunferencia de la flama como 15 cm de diámetro, según lo observado en la práctica.

Del modelo 2015 al modelo 2017, se obtiene una reducción del 34.8% en el tamaño de la plancha, se calcula además la disipación de calor por efecto aletas, el cual consiste en que el material restante de donde se transfiere el calor servirá como disipador, enfriando al comal. Estos cálculos teóricos e idealizados nos dan una reducción del 40% en disipación de calor, de los 858 Watts que se disipan en el modelo 2015, con las nuevas medidas se disipan 516 Watts.

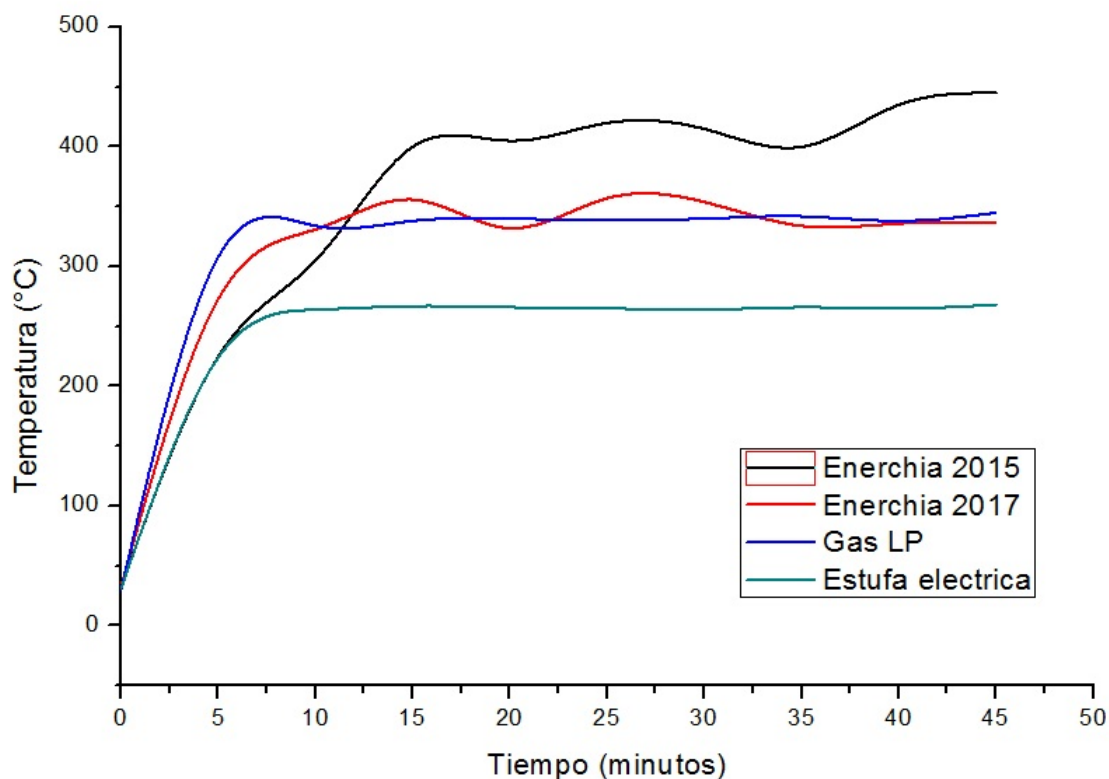


**Figura 5-10.:** Simulación del enfriamiento de la plancha por efecto de aletas.

En la figura 5.11 se observa una comparación de tres tipos de estufas, dos de ellas pertenecen a la estufa Enerchía, se realizaron comparaciones con una estufa estándar de gas LP que es la más usada en el país, y una estufa eléctrica que simula la cocción lenta de

ciertos alimentos. Se observa por lo tanto que la estufa de leña Enerchía 2017 se comporta como una estufa de gas LP, sin embargo la eficiencia de la estufa de gas es de 50% y de la estufa de leña es de 19%.

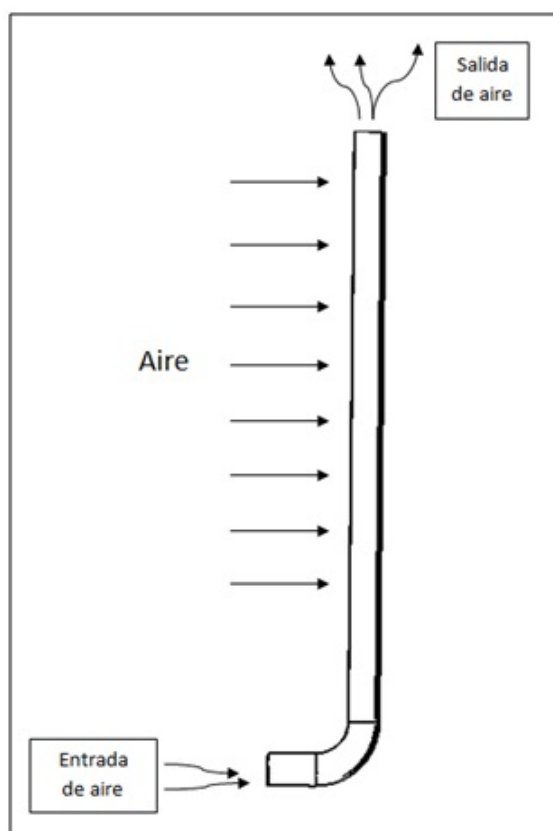
La temperatura de la estufa de leña se mantiene estable cerca de los 350 °C para el centro del comal, esta temperatura es común para cocción de muchos alimentos, en la práctica se observa que ciertos alimentos necesitan una temperatura más baja para su cocción, las temperaturas bajas se logran en las orillas del comal, donde se obtienen temperaturas alrededor de los 200 °C.



**Figura 5-11.:** Temperatura máxima de comales con diferentes tipos de estufas estudiadas.

## 5.5. Análisis transferencia de calor en chimenea por flujo externo.

El siguiente caso de estudio es un fenómeno conocido como efecto chimenea en el cual existirá un flujo de aire dependiendo de la diferencia de temperatura entre la parte baja y la parte alta del tubo, que funciona como conductor de humo para expulsarlo al exterior de la cocina. La figura 5.12 representa un modelo estudiado para obtener las pérdidas de energía en forma de calor, cuando existe un enfriamiento por las paredes externas, este enfriamiento se debe a la circulación de aire en el medio ambiente.

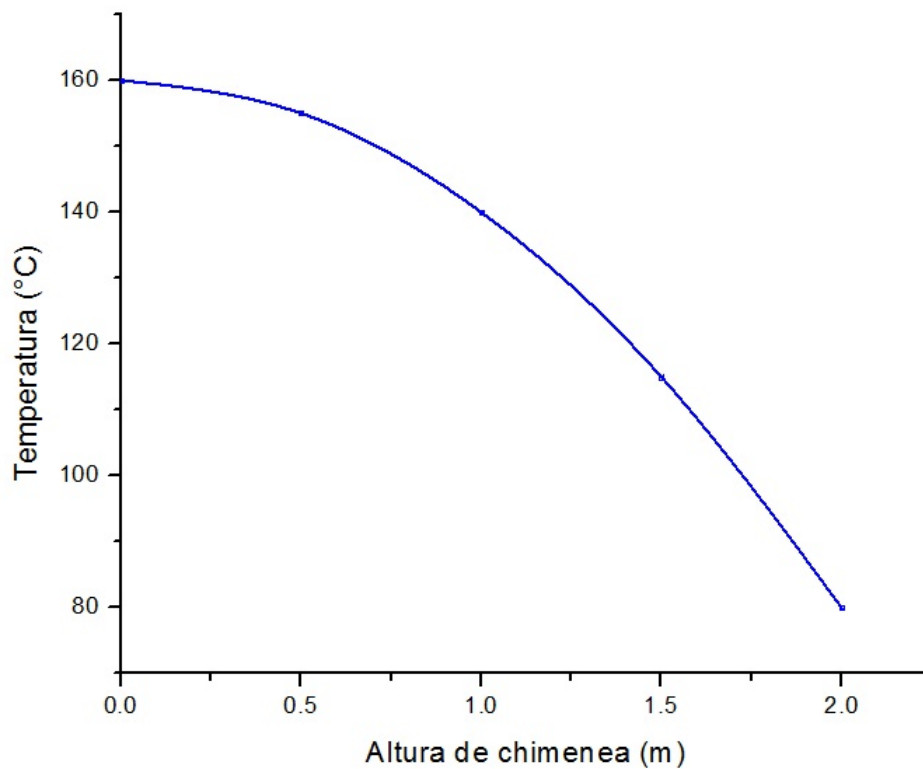


**Figura 5-12.:** Esquema del estudio del enfriamiento de la chimenea por efecto del viento.



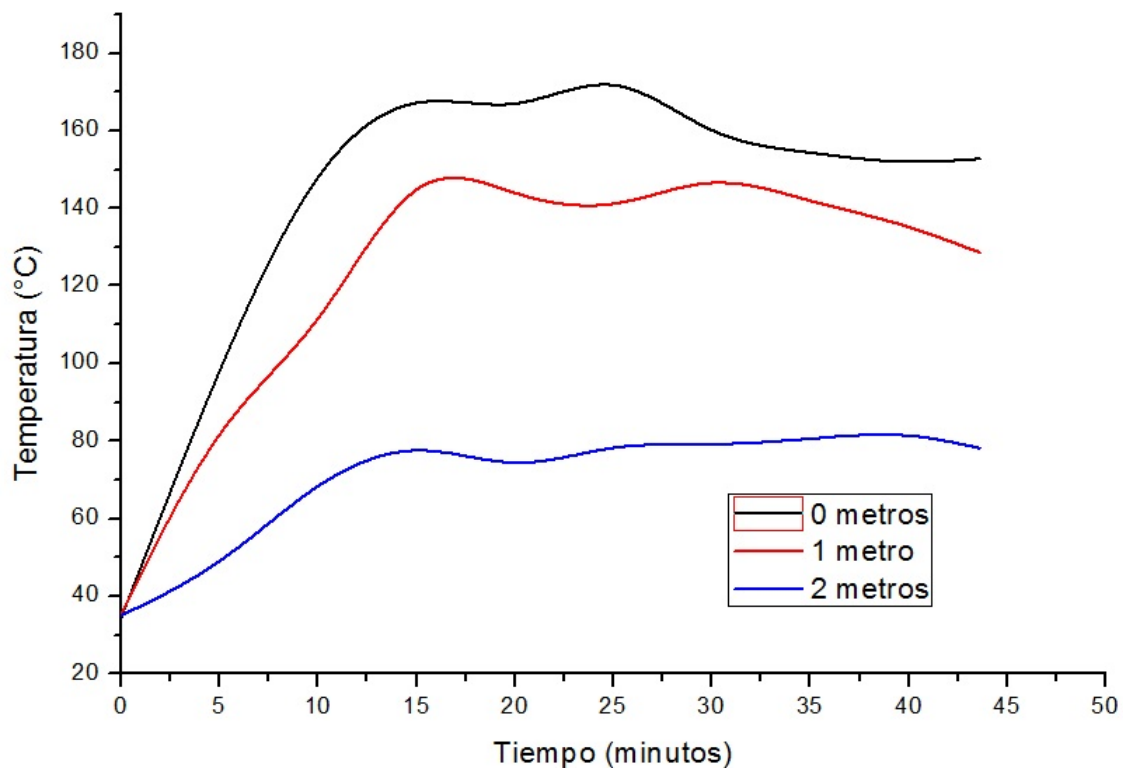
Se llegó a la conclusión que para el caso de la estufa Enerchía modelo 2017, con un diámetro en la chimenea de 10 cm y con los resultados de la evaluación de WBT el comportamiento del enfriamiento se describe bajo una parábola de la forma:

$$y = -\frac{x^2}{0,05} + 160 \quad (5-1)$$



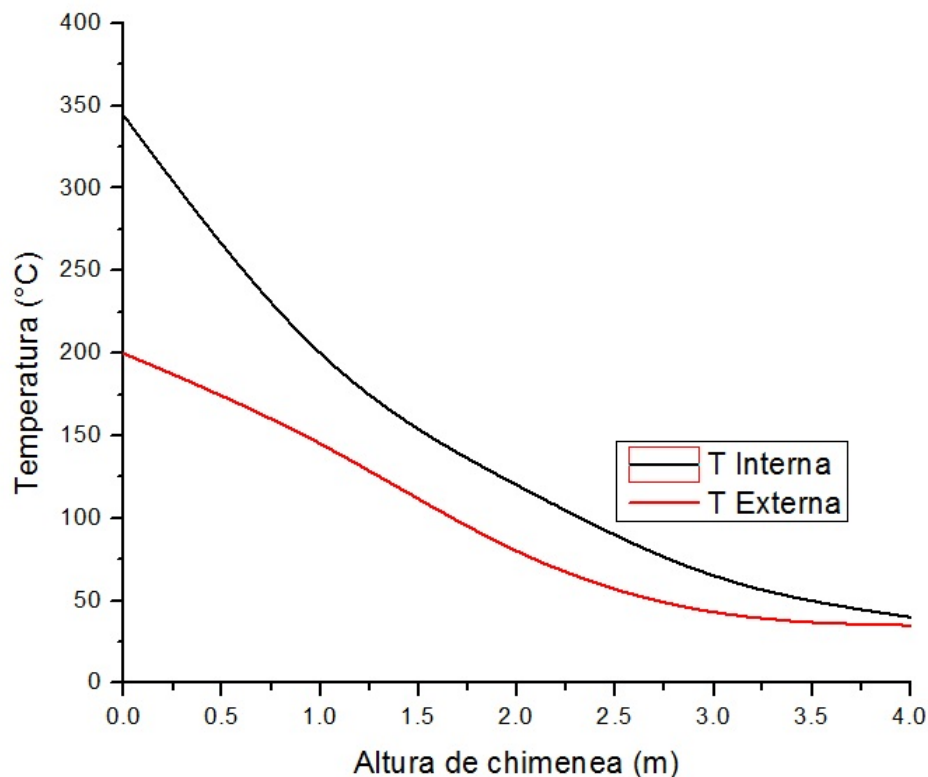
**Figura 5-13.:** Enfriamiento externa de la chimenea con convección natural.

Durante la realización de las pruebas de WBT se tomaron datos para realizar la figura 5.13, la cual consiste en analizar el comportamiento de la temperatura en la chimenea durante el proceso de hervir los 5 litros de agua, estas mediciones se realizaron a tres diferentes alturas, se llega a la conclusión que la altura de 2 metros en la chimenea presenta una diferencia de temperatura de solo  $50\text{ }^{\circ}\text{C}$  con respecto a la temperatura promedio del ambiente, esto reduce significativamente el efecto chimenea que se produce debido a la diferencia de temperaturas entre la entrada y salida. Se determina también que de 1 a 2 metros la curva tiende a caer drásticamente perdiendo cerca de  $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ .



**Figura 5-14.:** Comportamiento real de la temperatura externa en la chimenea a diferentes alturas durante la prueba de WBT.

La figura 5.14 ilustra las mediciones promedio realizadas durante la prueba de WBT, en la cual se aprecia claramente la diferencia de temperaturas entre 1 y 2 metros de altura, comparando a lo que se pierde de 0 a 1 metro. Se concluye que en el primer metro de altura de la chimenea se pierde una cuarta parte de la temperatura, mientras que en el segundo metro de tubo se pierden las otras tres partes del total de pérdidas; se consideraría entonces para trabajos futuros colocar un intercambiador de calor en el primer metro de chimenea para aprovechar la temperatura más alta.



**Figura 5-15.:** Curva de enfriamiento real de la chimenea a diferentes alturas.

Las últimas pruebas realizadas a la estufa Enerchía modelo 2017, describen una relación entre el enfriamiento del aire interno por efecto del calor que se desperdicia al hacer más alta la chimenea, ambas curvas se estabilizan después de los 4 metros de altura. En la

figura 5.15 se observan dos curvas de temperatura, las cuales se hicieron en vacío, es decir sin estar cocinando, se determina que se pierde cerca de  $150\text{ }^{\circ}\text{C}$  de la temperatura interna en el primer metro de altura de chimenea y en el segundo metro de chimenea se pierde la mitad de temperatura, es decir  $75\text{ }^{\circ}\text{C}$ , es por esto que la temperatura en el exterior de la chimenea se mantiene elevada en el primer metro de altura.

## 5.6. Análisis de flujo másico en chimenea.

Otro parámetro que depende del efecto chimenea es el flujo másico, que se considera como la cantidad de gases resultantes después de la combustión y que son expulsados por medio de la chimenea. Estos gases se calcularon de forma teórica tomando en consideración la ecuación para los el efecto del flujo másico en chimeneas de estufas de conductos circulares.

La figura 5.16 se elabora obteniendo datos reales en la prueba de enfriamiento de la chimenea, por tanto se observa que el punto de máximo flujo de aire en la salida es a 1.6 metros, lo que representa que el fenómeno de la combustión se lleva a cabo de manera adecuada, se observa además que si se retiran los tubos de la chimenea el fuego llega a apagarse, en la gráfica se representa como una disminución en el flujo másico de gases resultantes después de la combustión, también se observa el mismo fenómeno cuando se aumenta la altura de la chimenea. Si se llegaran a implementar este tipo de estufas se concluye que para ahorrar material se puede poner un metro de chimenea lo que corresponde una disminución del 10% del flujo másico en la salida, esto se supone que no afecta al proceso de combustión, y se estaría ahorrando lo equivalente a un metro de chimenea, sin embargo esto dependerá de la cocina en donde se instale.

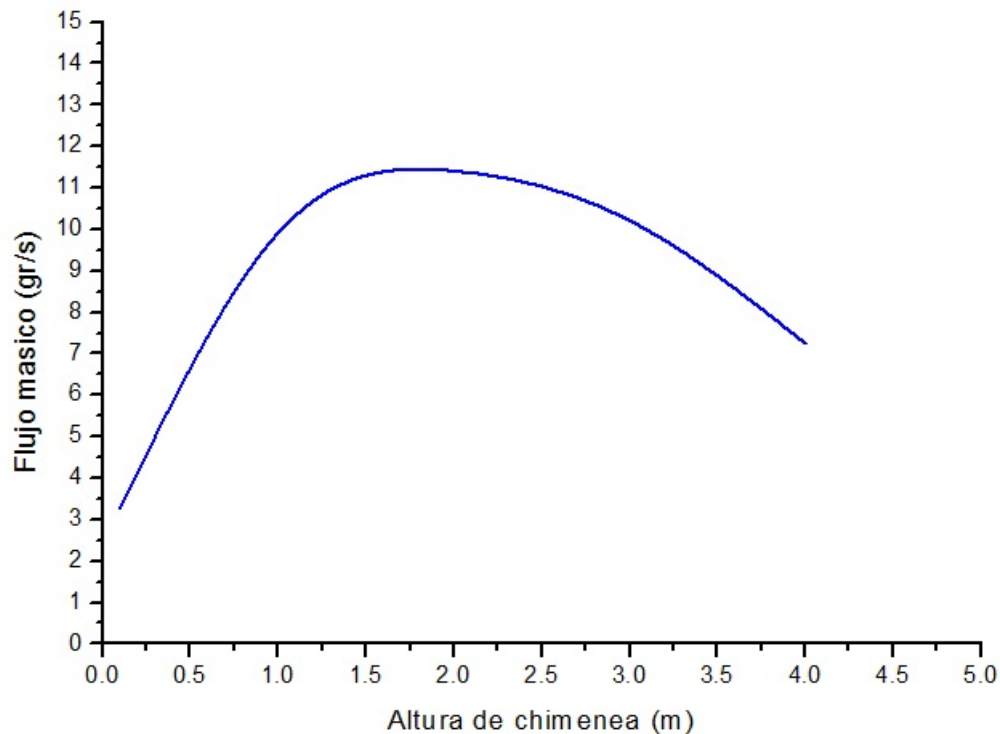


Figura 5-16.: Flujo másico de aire en la chimenea.

## 5.7. Construcción de estufa y evaluaciones con protocolos WBT Y CCT

Después de analizar algunos factores descritos anteriormente se realizaron dibujos y diseños preliminares que se muestran a continuación. Una vez realizado el prototipo se procede a realizar unas pruebas de laboratorio que se conocen como protocolos internacionales para la evaluación de estufas de biomasa, los resultados se muestran de igual forma a continuación.

### 5.7.1. Diseño y construcción de la estufa Enerchía modelo 2017.

La figura 5.17 nos muestra un despiece de la estufa Enerchía modelo 2017, se realizan las piezas por medio del software SolidWorks, se hace este ensamble debido a que se pueden predecir errores de construcción al realizar un ensamble virtual, otra motivo por el cual se realiza el ensamble es para que futuras investigaciones puedan acceder a las medidas utilizadas y poder continuar con los estudios, además que si se pretende reproducir este diseño se tengan planos y se pueda realizar una construcción más sencilla.

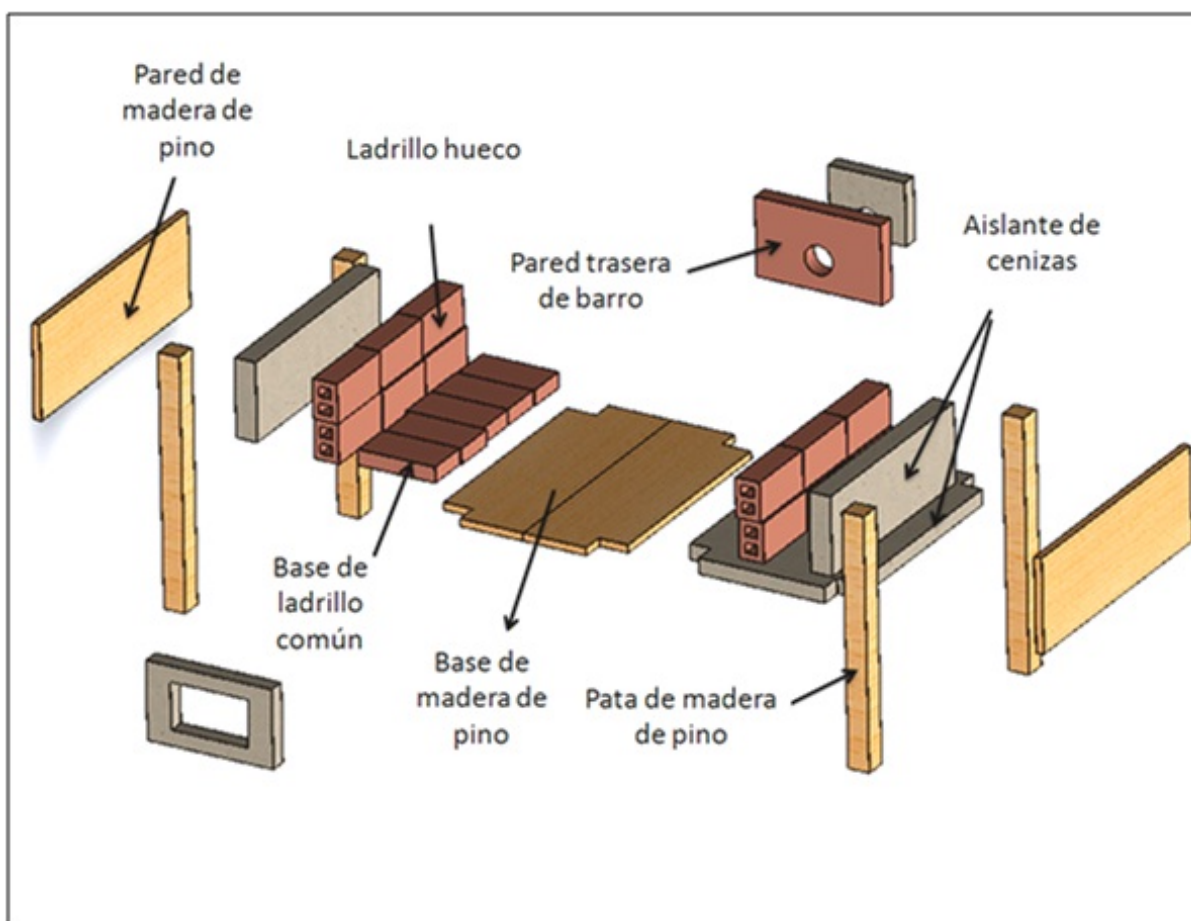
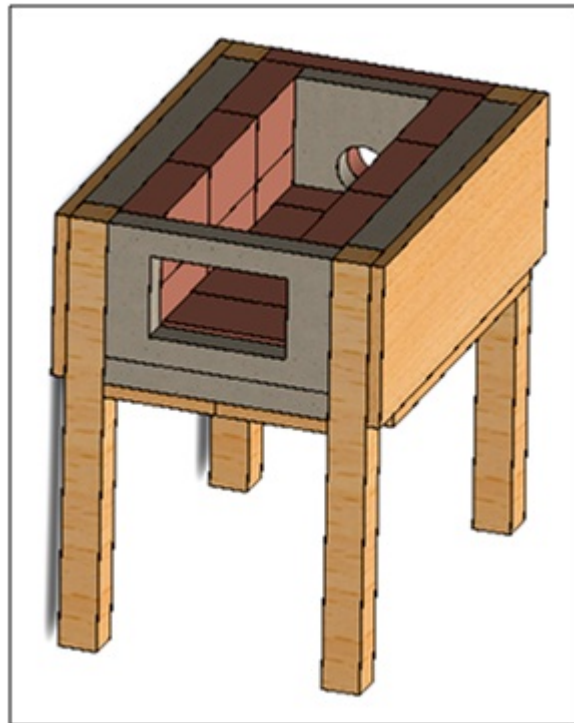


Figura 5-17.: Despiece de estufa Enerchía modelo 2017.

Por medio de la figura 5.18 se puede dar a conocer el modelo de la estufa terminada, este modelo también nos permite realizar algunas pruebas tanto térmicas como de cálculo de volúmenes, también nos da antecedentes para desarrollar proyectos sociales con aportaciones gubernamentales, haciendo más gráfico y detallado el modelo a presentar.



**Figura 5-18.:** Ensamble de estufa Enerchía modelo 2017.

El proceso de construcción de una estufa Enerchía tiene la característica que se pueda ensamblar de forma rápida, su bajo costo de material también es una característica fundamental, sin olvidar que su practicidad para moverla la hace bastante aceptada por las comunidades en donde ha sido empleada. Es por esto que para la construcción del prototipo modelo 2017 se siguieron los mismos criterios, se emplearon materiales de muy bajo coste, siendo el comal el de mayor costo.

En la figura 5.19 se observa al interior de la estufa que posee el espacio suficiente para realizar la quema de los leños, se observa también que fue revestido por un material que fue propuesto por habitantes de la comunidad de Copainalá en el estado de Chiapas, México. Este material se caracterizó por medio de la fluorescencia de rayos X teniendo un contenido del 88 % de calcio, lo que ocasiona que funcione como un buen aislante; el recubrimiento con este material se hace de manera periódica en las comunidades, como parte del mantenimiento que se le realiza a cualquier tipo de fogón.



**Figura 5-19.:** Vista superior de estufa Enerchía modelo 2017.

En la figura 5.20 se observa que se emplea lamina lisa como parte de la construcción de este nuevo modelo, sin embargo al realizar los experimentos se llega a la conclusión que no representa peligro por calentamiento, la temperatura más alta alcanzada durante las pruebas en las zonas frontales rondan los 40 grados centígrados. La lámina se coloca de



forma que pueda contener a las cenizas en forma de polvo. Otro dato a considerar es la obtención de las cenizas, se calcula que cerca del 1 al 2% del peso de la leña es lo que queda después de pasar por la combustión, en las comunidades se gasta un promedio de 8 kg de leña diarios, lo que corresponde un promedio diario de 80 gramos de cenizas diarias, esto es en términos generales que se necesitan 2 meses para llenar los espacios que funcionarían como aislante en la estufa. En el caso de este estudio las cenizas se consiguieron en una panadería artesanal donde tardaron 2 días para juntar el volumen requerido.



**Figura 5-20.:** Vista de perfil de estufa Enerchía modelo 2017.

A considerar que en este modelo no se tienen desperdicios de material por efectos de corte de madera o ajustes de ladrillo, se realizaron las medidas de forma que todo pueda calzar de manera adecuada.

### 5.7.2. Prueba de ebullición de agua (WBT).



**Figura 5-21.:** Prueba de ebullición de agua (WBT).

La prueba de ebullición de agua se llevo a cabo en el Centro de Evaluación de Estufas Ecológicas que se ubica en la Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas. La figura 5.21 ilustra el proceso de evaluación, el cual se realiza en una habitación de tres paredes, simulando una cocina tradicional de la región Zoque. También se utiliza una olla de 7 litros de capacidad, cabe declarar que en otras partes del mundo esta prueba se realiza con dos o tres ollas dependiendo de la capacidad del comal, siendo que al aumentar el volumen de agua se aumenta la eficiencia térmica del proceso, sin embargo se realizara la comparación con los resultados obtenidos bajo los mismos procedimientos.

La tabla 5.1 resume los resultados obtenidos después de 7 pruebas realizadas en el mes de mayo del año 2017. Los resultados de la siguiente tabla se hicieron con las ecuaciones dadas en el marco teórico.

**Tabla 5-1.:** Resultados de la prueba de ebullición de agua

| Mediciones promedio                      | Valor    | Unidades |
|--|----------|----------|
| Temperatura ambiente                     | 33.7     | °C       |
| Tiempo de ebullición de 5 litros de agua | 43.6     | minutos  |
| Poder calorífico de la madera            | 18684    | kJ/kg    |
| Peso del agua al final de la prueba      | 4670.8   | gr       |
| Masa evaporada de agua                   | 330      | gr       |
| Temperatura máxima de la habitación      | 42.2     | °C       |
| Consumo de leña                          | 1.4518   | kg       |
| Rango de consumo                         | 33.29    | gr/min   |
| Energía absorbida por el agua            | 1972.79  | kJ       |
| Energía liberada durante el proceso      | 27125.43 | kJ       |
| Eficiencia térmica                       | 7.27     | %        |
| Potencia de fuego                        | 10.36    | kW       |
| Consumo específico de combustible        | 310.82   | gr/Lit   |

Al analizar los resultados de ciertos artículos se llega a la conclusión que los resultados presentados no cuadran con los resultados de la ecuaciones, el ejemplo más representativo es en las eficiencias térmicas, estas no cuadran con los resultados obtenidos de forma analítica, sino que utilizan una versión dada de Excel disponible para la evaluación de estufas, sin embargo al utilizar esta hoja de cálculos los resultados obtenidos son idénticos a los de forma analítica, por lo que se llega a la conclusión de que fueron alterados estos resultados para poder publicarlos.

Al realizar la comparación de los resultados se resumen en la tabla 5.2, en la cual se extrapolan los resultados obtenidos en esta investigación y los resultados presentados en la tesis de la evaluación del modelo 2015. Se incluyen además los resultados de las tres fases que determina el proceso de WBT que son el arranque en frío, arranque en caliente y la de fuego lento. En varios artículos consultados no se especifica si las eficiencias obtenidas corresponden a un promedio de las tres fases o solo incluyen una de ellas.

**Tabla 5-2.:** Comparación de eficiencias

| <b>Eficiencias</b>   | <b>%</b> | <b>%</b> |
|----------------------|----------|----------|
| Arranque en Frío     | 7.27     | 19.68    |
| Arranque en Caliente | 8.61     | 23.31    |
| Fuego lento          | 12.88    | 34.87    |
| Promedio             | 9.58     | 25.95    |

**Tabla 5-3.:** Comparación de resultados entre dos modelos de estufas

| <b>Prueba WBT</b>                 | <b>Enerchía 2015</b> | <b>Enerchía 2017</b> |
|-----------------------------------|----------------------|----------------------|
| Tiempo de ebullición              | 42 min               | 43 min               |
| Consumo de combustible            | 1.97 kg              | 1.45 kg              |
| Rango de combustión               | 47 gr/min            | 33 gr/min            |
| Consumo específico de combustible | 430 gr/lit           | 310 gr/lit           |
| Potencia de fuego                 | 13805 watts          | 9786 watts           |
| Eficiencia térmica                | 14 %                 | 19 %                 |
| Temperatura lateral               | 75 °C                | 42 °C                |

El resumen de la comparación de resultados con los dos modelos de estufas se presenta en la tabla 5.3, de los resultados más significativos se tiene que la eficiencia térmica de la estufa aumenta un 5 %, aunque la potencia del fuego es menor se tiene casi el mismo tiempo de ebullición de los 5 litros de agua, se reduce también un 26 % de combustible y un logro bastante bueno es que la pared lateral de la estufa se calentaba bastante, llegando a temperaturas cercanas a los 80 °C, al aplicar el material propuesto se reduce bastante la temperatura de los costados en la estufa nueva.

**Tabla 5-4.:** Comparación física de dos modelos de estufas

| Medidas                                     | Enerchía 2015          | Enerchía 2017          |
|---|------------------------|------------------------|
| Volumen                                     | 0.03369 m <sup>3</sup> | 0.02782 m <sup>3</sup> |
| Área del comal                              | 2852 cm <sup>2</sup>   | 1852 cm <sup>2</sup>   |
| Pérdidas de energía en el comal             | 859 Watts              | 516 Watts              |
| Conductividad térmica del material aislante | 0.39 W/m K             | 0.062 W/m K            |
| Flujo másico                                | -                      | 11.4 gr/seg            |
| Temperatura máxima del comal                | 448 °C                 | 340 °C                 |

### 5.7.3. Prueba de cocinado controlado (CCT).

Esta prueba se realizó teniendo en cuenta que el proceso de cocción de alimentos es diferente para cada parte del mundo, por lo general en el sureste de México se realizan pruebas de cocción de maíz y de frijol; para realizar estas pruebas se obtienen datos de las comunidades de estudio, se realizaron censos en los cuales se tiene que en promedio se cocinan 2 kg de maíz y 1 kg de frijol cada 2 días. También se obtienen datos del proceso de cocción, el sabor del frijol es mejor cuando se hace con fuego lento, sin embargo para frituras no se puede hacer a fuego lento para ciertos alimentos por que se desintegra.

Los resultados por tanto para ambos alimentos pueden variar dependiendo del contenido de humedad en los granos de maíz y frijol, por lo que no se puede comparar estos resultados con los obtenidos en fechas anteriores, es por esto que se decide hacer la prueba con otra estufa simultáneamente, esta estufa tiene la peculiaridad que la cámara de combustión se asemeja al modelo Enerchía 2015, sin embargo es fija, hecha con tabiques de cemento con piedra pómez.

Se puede observar que el proceso de cocción de maíz supera las 2 horas para ambas estufas, sin embargo es una medida de tiempo muy incierta puesto que en la práctica se requieren diferentes grados de cocción para la preparación de alimentos como tortillas, tamales o pozol. Al comparar los resultados se tiene que el nuevo modelo presenta una mayor rapidez en la cocción del maíz, sin embargo consume 130 gramos de leña más que el otro modelo, lo que representa una potencia de fuego mayor.

**Tabla 5-5.:** Cocción de 2 kg maíz en 5 litros de agua

|                   | <b>Enerchía 2017</b> | <b>Block térmico</b> |
|-------------------|----------------------|----------------------|
| Tiempo de cocción | 138 min              | 152 min              |
| Consumo de leña   | 4.035 kg             | 3.905 kg             |

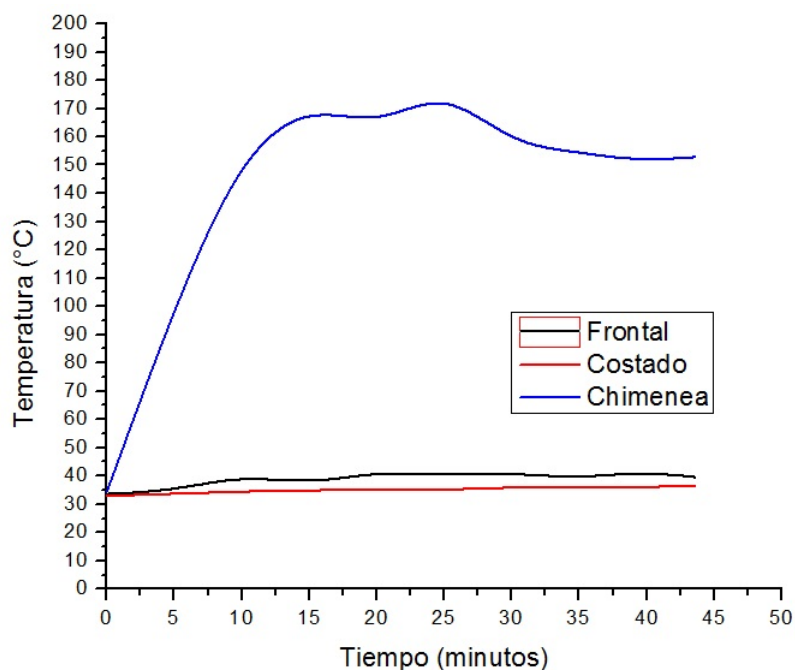
La segunda evaluación corresponde a la cocción de 1 kg de frijol en 4 litros de agua se puede analizar que de igual forma el nuevo modelo de estufa tiene una mayor rapidez en la cocción de este alimento y se logra ahorrar cerca de 500 gramos de leña. Se concluye por lo tanto que el espacio ocupado por la cámara de combustión es la adecuada para que el volumen de leña no se apague y el calor producido se transfiera más rápidamente hacia el comal y posteriormente a la olla.

**Tabla 5-6.:** Cocción de 1 kg de frijol en 4 litros de agua

|                   | <b>Enerchía 2017</b> | <b>Block térmico</b> |
|-------------------|----------------------|----------------------|
| Tiempo de cocción | 152 min              | 163 min              |
| Consumo de leña   | 4.335 kg             | 4.815 kg             |

#### 5.7.4. Pruebas de seguridad.

Existen varias pruebas de seguridad, de las cuales únicamente se tomara en consideración la prueba por quemaduras debido a las zonas de contacto con el cuerpo y las demás pruebas son sociales. Se tomaron registros de tres zonas principales de riesgo a quemaduras, la primera es la chimenea que dependiendo la altura representara una temperatura diferente, teniendo un promedio de 130 °C, para la zona de contacto después del primer metro de altura.

**Figura 5-22.:** Temperaturas de partes de riesgo a quemaduras.

La siguiente zona de interés es la frontal, pues representa un contacto directo con el cuerpo, se observa en la figura 5.22 que la temperatura en esta parte de la estufa ronda los 42 °C esto no representa un peligro para la manipulación de la estufa. El último punto que se evaluó es el costado, puesto que en la versión anterior de la estufa se tenían temperaturas que rondaban los 80 grados, teniendo serias implicaciones en el ámbito de la salud; sin embargo en este modelo y gracias al aislante propuesto se logra bajar esta temperatura a menos de 40 °C, lo que representa que el riesgo por quemadura debido a la cercanía del cuerpo es muy baja.

## 5.8. Conclusiones y recomendaciones.

El punto principal del trabajo se logró por las mejoras que se obtuvieron como resultado de los estudios experimentales, el aumento de la eficiencia térmica en la prueba de ebullición de agua se discute de dos formas, una es usando formulas y la otra es controversial, los resultados usando las ecuaciones nos arrojan un aumento de 5.17% a 7.27%, lo que corresponde al 40.61% de mejora. Si se realiza con los datos publicados en el modelo 2015 y extrapolando los resultados se tiene un aumento de 14% a 19%, lo que corresponde al 35.71% de mejora respecto a la versión anterior.

Debido a la investigación previa que se realiza antes de construir el prototipo de estufa Enerchía, se pudieron obtener varias mejoras en cuanto a la pérdida de material en la fabricación del prototipo, lo que también representa un aumento en la eficiencia térmica de la estufa, debido a los materiales que se usaron, se logra disminuir el volumen de la cámara de combustión, bajando un 17% su volumen, esto representa que se calentará significativamente más rápido, dando lugar a que el proceso de combustión se establezca más rápido; las medidas usadas en el prototipo están respaldadas en las investigaciones de campo que se realizaron para analizar el tamaño adecuado.

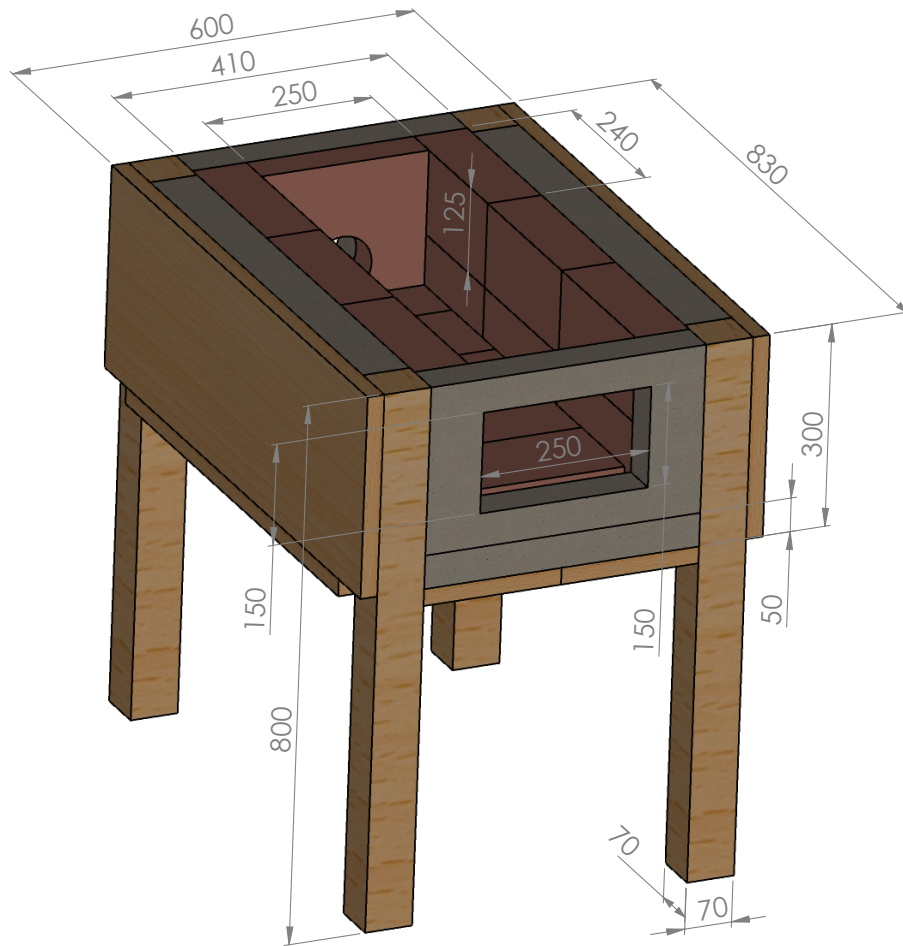


El área del comal se redujo un 37% respecto a la versión anterior, esto ocasiona que las pérdidas en los extremos sea menor, y se adecuan los espacios para realizar hasta 2 cocciones en ollas, o una coccion y una de calentamiento de tortillas, puesto que la región de estudio nos arroja esos resultados. Por el proceso de reducción del área del comal, se analiza también las pérdidas de calor de forma analítica, estos resultados nos arrojan que existe un 40% menos de pérdidas por efecto de enfriamiento en los bordes.

En la parte de materiales, se propone usar las cenizas cuya conductividad se asemeja a la espuma de poliuretano, pero resiste mucho mejor a las condiciones de temperaturas altas, y se dispone de un segundo material que es la vermiculita, sin embargo este tiene un costo que las cenizas no presenta actualmente.

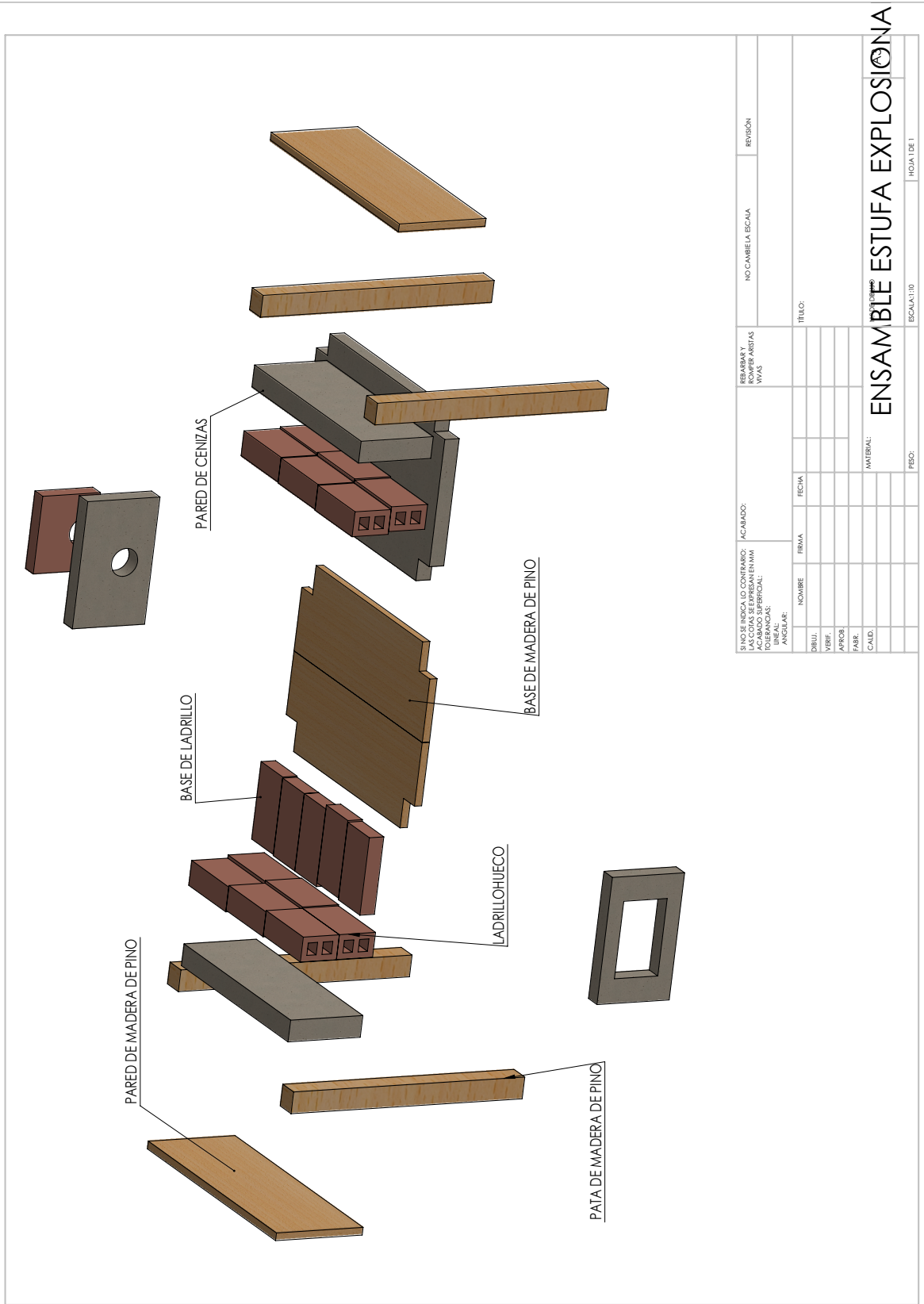
Se recomienda realizar un estudio especial en los gases resultantes en la combustión debido a que se puede obtener mucha información respecto a los fenómenos que están ocurriendo en la cámara de combustión, el equipo para realizarlo es especial y costoso por lo que se le dedicaría una investigación individual.

# **A. Anexo: Dibujo técnico de la estufa Enerchía**



|   |  |  |          |                                       |                     |          |
|---|--|--|----------|---------------------------------------|---------------------|----------|
| SI NO SE INDICA LO CONTRARIO:<br>LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM<br>ACABADO SUPERFICIAL:<br>TOLERANCIAS:<br>LINEAL:<br>ANGULAR: |  |  | ACABADO: | REBARBAR Y<br>ROMPER ARISTAS<br>VIVAS | NO CAMBIE LA ESCALA | REVISIÓN |
| NOMBRE  |  |  | FIRMA    | FECHA                                 | TÍTULO:             |          |
| DIBUJ.  |  |  |          |                                       |                     |          |
| VERIF.  |  |  |          |                                       |                     |          |
| APROB.  |  |  |          |                                       |                     |          |
| FABR.   |  |  |          |                                       |                     |          |
| CALID.  |  |  |          | MATERIAL:                             | N.º DE DIBUJO       |          |
|   |  |  |          | PESO:                                 | ESCALA:1:20         |          |
|   |  |  |          |                                       | HOJA 1 DE 1         |          |

ENSAMBLE ESTUFA A4



|   |  |                     |          |
|---|--|---------------------|----------|
| FIN DE SERVICIO, CONVENIO:<br>ACABADO SUPERFICIAL:<br>LINEAL:<br>ANGULAR: | ACABADO:<br>REBARBA Y<br>CORNER ARISTAS<br>VIVAS | NO CAMBIA LA ESCALA | REVISIÓN |
| NOMBRE  | FECHA  | TÍTULO:             |          |
| DBU:  |  |                     |          |
| VERIF:  |  |                     |          |
| APROB:  |  |                     |          |
| FABR:   |  |                     |          |
| CALE:   |  |                     |          |
| MATERIAL:   |  | ESCALA: 1:10        |          |
| PEO:  |  | HOJA 1 DE 1         |          |

# Bibliografía

- [1] *www.aamsa.com*
- [2] Organización Mundial de la Salud. 2002. – Informe de Investigación
- [3] Agencia internacional de energía. 2010. – Informe de Investigación
- [4] Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. 2011. – Informe de Investigación
- [5] Prueba de ebullición de agua. 2014. – Informe de Investigación
- [6] ANTONIO, Carta G. J.: *Centrales de Energías Renovables*. Madrid : Prentice hall, 2009
- [7] BEATRIZ, W.: *Estufas en Imágenes*. (1995)
- [8] DE INNOVACIÓN Y EVALUACIÓN EN ESTUFAS DE BIOMASA, Laboratorio: Prueba de Cocinado controlado CCT para estufas de biomasa. 2014. – Informe de Investigación
- [9] BUENO, J.: *La madera como combustible / Facultad de ciencias forestales CENIFOR*. 2000. – Informe de Investigación. – 38 p.
- [10] CENGEL, Y. A.: *Transferencia de Calor y Masa*. Mexico : Mc Graw Hill, 2011
- [11] CHENEIDER, S.: *Determinación de la conductividad térmica en aglomerado aislante*. (2013)

- 
- [12] COMBUSTIBLES: Comisión Nacional para el Ahorro de Energía / Revista Shell. 2010. – Informe de Investigación. – 28 p.
- [13] D. JIMENEZ, O. M.: El uso de la bioenergía en los hogares: impactos ambientales y en la salud / UNAM. 2003. – Informe de Investigación
- [14] E. BOY, K. R. S. ; HERNANDEZ, R.: Fuel efficiency of an improved wood-burning stove in rural Guatemala: implications for health, environment and development. (2000)
- [15] E. J. S. MITCHELL, J. M. Jones A. Williams P. L. ; JOHNSON, R.: The impact of fuel properties on the emissions from the combustion of biomass and other solid fuels in a fixed bed domestic stove. (2016)
- [16] FRANCO, J. ; MASERA, O. R.: Qué hemos aprendido del uso de biomasa para cocinar en América Central. – Informe de Investigación
- [17] GOGOI, B. ; BARUAH, D. C.: Steady state heat transfer modeling of solid fuel biomass stove: Part 1. (2016)
- [18] GOLSTEIN: Acid processes for Cellulose Hydrolysis and their mecanismos in Wood and Agricultural Residues. (1983)
- [19] J. PRAPAS, A. J. Marchese B. W. ; DEFOORT, M.: Influence of chimneys on combustion characteristics of buoyantly driven biomass stoves. (2014)
- [20] J. WANG, et a.: Development and performance evaluation of a clean-burning stove. 2016. – Informe de Investigación
- [21] JON, C. E.: Fogones mejorados de adobe. Comunidad de la Prusia, Granada, Nicaragua. (2013)
- [22] KOLLMAN, F.: Tecnología de la madera y sus aplicaciones. (1959)

- 
- [23] MASERA, O.: Prueba de Ebullición de Agua para estufas de biomasa / UNAM. 2014. – Informe de Investigación. – 60 p.
- [24] O.MASERA: Prueba de Cocinado Controlado para estufas de biomasa / UNAM. 2014. – Informe de Investigación. – 35 p.
- [25] OTITI, T.: Improved Stoves in Tanzania. (1991)
- [26] PHUSRIMUANG, J. ; WONGWUTTANASATIAN, T.: Improvements on thermal efficiency of a biomass stove for a steaming process in Thailand. (2016)
- [27] R. DÍAZ, V. B. ; MASERA, O.: Estufas de leña. (2011)
- [28] R. DÍAZ, V. Berrueta y O. M.: Uso de biomasa para preparación de alimentos y calentamiento de hogares y su impacto al ambiente y a la salud de la población expuesta a los productos de la combustión. (2011)
- [29] S. BLANCO, P. Maíz V. Berrueta O. M.: Estudio Comparativo de Estufas Mejoradas para sustentar un programa de intervención masiva en México. (2012)
- [30] S. SHARMA, K: Improved Solid Biomass Burning Cookstoves. (1993)
- [31] SMITH, K. R.: Fuel Combustion, Air Pollution Exposure, and Health: The Situation in Developing Countries. (2003)