

**UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA**



**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**DETERMINACIÓN DE LA EFICIENCIA TERMODINÁMICA  
MÁXIMA Y DE COMBUSTIÓN  
DE LA ESTUFA MEJORADA “DOÑA JUSTA”**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
POR

SEBASTIÁN DEL VALLE ROSALES

ASESORADO POR ING. FEDERICO GUILLERMO SALAZAR RODRÍGUEZ

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE  
INGENIERO QUÍMICO

GUATEMALA, OCTUBRE DE 2005

**UNIVERSIDAD SAN CARLOS DE GUATEMALA**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA**



**NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA**

<b>DECANO</b>	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
<b>VOCAL I</b>	
<b>VOCAL II</b>	Lic. Amahán Sánchez Álvarez
<b>VOCAL III</b>	Ing. Julio David Galicia Celada
<b>VOCAL IV</b>	Br. Kenneth Issur Estrada Ruiz
<b>VOCAL V</b>	Br. Elisa Yazminda Vides Leiva
<b>SECRETARIO</b>	Inga. Marcia Ivonne Véliz Vargas

**TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO**

<b>DECANO</b>	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
<b>EXAMINADOR</b>	Ing. José Eduardo Calderón García
<b>EXAMINADOR</b>	Ing. Manuel Galván Estrada
<b>EXAMINADOR</b>	Inga. Hilda Palma de Martini
<b>SECRETARIO</b>	Inga. Marcia Ivonne Véliz Vargas

## HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

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

### **Determinación de la Eficiencia Termodinámica Máxima y de Combustión de la Estufa Mejorada “Doña Justa”,**

tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Química con fecha de 13 de octubre de 2005.

Sebastián del Valle Rosales

**DEDICATORIA A:**

**EI TODO PODEROSO**

**MI FAMILIA**

José del Valle Monge

Ana María Rosales Arzú de del Valle

Federico del Valle Rosales

**TODOS MIS AMIGOS Y CATEDRÁTICOS QUE ME APOYARON A LO  
LARGO DEL ESTUDIO DE LA CARRERA**

## **AGRADECIMIENTOS:**

Al Ing. Federico Salazar y al Ing. Manuel Tay por su apoyo incondicional y dedicación en la elaboración de este trabajo, sobre todo, por enseñarme el valor de una investigación fundamentada.

A mis amigos: Claudia Chang, Meyling León, Carlos Fuentes, Astrid Pellecer, Cristian Salazar, Sergio Hernández, César Morales, ARCAS, Scott Handy. Personas que para mí siempre han sido y serán muy especiales, gracias por todo el apoyo.

## ÍNDICE GENERAL

<b>ÍNDICE DE ILUSTRACIONES</b>	<b>III</b>
<b>LISTADO DE SÍMBOLOS</b>	<b>V</b>
<b>GLOSARIO</b>	<b>IX</b>
<b>RESUMEN</b>	<b>XV</b>
<b>OBJETIVOS</b>	<b>XVII</b>
<b>INTRODUCCIÓN</b>	<b>XIX</b>
1. FENÓMENOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR	<u>1</u>
1.1 Transferencia de Calor por Conducción	<u>2</u>
1.2 Transferencia de Calor por Convección	<u>4</u>
1.3 Transferencia de Calor por Radiación	<u>5</u>
1.4 Temperatura	<u>6</u>
1.5 Calor Sensible y Latente	<u>7</u>
1.6 Capacidad Calorífica	<u>9</u>
1.7 Calor de Combustión	<u>10</u>
2. ESTUFAS MEJORADAS	<u>15</u>
2.1 Perspectivas del Desarrollo de una Estufa Mejorada	<u>16</u>
2.1 Implicaciones Medioambientales y de Salud	<u>18</u>
2.2 La Estufa Doña Justa	<u>20</u>
2.3 Tecnología de Codo de Misil ó “Rocky”	<u>21</u>
2.4 Ruta de Calor y Geometría Interna	<u>23</u>
2.5 Combustión	<u>25</u>
<u>2.5.1</u> Proceso de la Combustión	<u>25</u>
<u>2.5.2</u> Aire Teórico	<u>26</u>

__2.5.3 Relación Aire - Combustible	<u>28</u>
__2.5.4 Tiro de Chimenea	<u>29</u>
2.6 Combustión de Biomasa	<u>31</u>
__2.6.1 Características Químicas	<u>31</u>
__2.6.2 Características Físicas	<u>32</u>
2.7 Valor Calorífico	<u>34</u>
2.8 Proceso de Combustión de Leña	<u>34</u>
2.9 Aparato Orsat	<u>38</u>
<b>3. METODOLOGÍA</b>	<u>41</u>
3.1 Medición de Eficiencias	<u>41</u>
3.2 Modelo Experimental	<u>45</u>
<b>4. RESULTADOS</b>	<u>47</u>
4.1 Eficiencia Termodinámica Máxima de la Estufa Doña Justa	<u>47</u>
4.2 Eficiencia de Combustión de la Estufa Doña Justa	<u>50</u>
<b>5. DISCUSIÓN DE RESULTADOS</b>	<u>51</u>
<b>CONCLUSIONES</b>	<u>55</u>
<b>RECOMENDACIONES</b>	<u>57</u>
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<u>59</u>
<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	<u>61</u>
<b>APÉNDICES</b>	<u>63</u>

## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

### FIGURAS

1.	Procesos involucrados en el desarrollo de una estufa mejorada	15
2.	Gráfica de eficiencia termodinámica máxima	47
3.	Vista en perspectiva de la estufa Doña Justa	65
4.	Elevaciones laterales de la estufa Doña Justa	66
5.	Planta de la Estufa Doña Justa	67
6.	Elevación frontal de la estufa Doña Justa	68
7.	Esquema de las rutas de calor de la estufa Doña Justa	69

### TABLAS

I.	Calores específicos de combustión	11
II.	Efectos de salud por inhalación de gases de combustión	47
III.	Datos de eficiencia termodinámica máxima de combustión	46
IV.	Temperatura de los gases de combustión a la salida de la estufa	47
V.	Composición de los gases a la salida de la estufa	48
VI.	Datos termodinámicos de la estufa 1	71
VII.	Datos termodinámicos de la estufa 2	71

VIII.	Datos termodinámicos de la estufa 3	72
IX.	Datos termodinámicos de la estufa 4	72
X.	Datos termodinámicos de la estufa 5	73
XI.	Datos de combustión de la estufa 4	73
XII.	Datos de combustión de la estufa 5	73

## LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
%	Porcentaje
Q	Flujo de calor (J/s)
CO <sub>2</sub>	Dióxido de carbono
O <sub>2</sub>	Oxígeno
CO	Monóxido de carbono
H <sub>2</sub>	Hidrógeno
S	Azufre
N	Nitrógeno
C	Carbono
HCs	Hidrocarburos
N <sub>2</sub> O	Óxido nítrico
K	Conductividad térmica J/(s)(m <sup>2</sup> )(K /m)

<b>A</b>	Área (m <sup>2</sup> )
<b>L</b>	Grosor de pared (m)
<b>T</b>	Temperatura (K)
<b>Hi</b>	Coeficiente de película (J/(s)(m <sup>2</sup> )(K))
<b>Ai</b>	Área interna de transferencia de calor (m <sup>2</sup> )
<b>Ti</b>	Temperatura de la parte interna de la pared (m <sup>2</sup> )
<b>ΔH</b>	Calor latente (J/Kg)
<b>ΔV</b>	Cambio de volumen (m <sup>3</sup> )
<b>P<sup>sat</sup></b>	Presión de vapor (pas)
<b>L</b>	Calor específico de combustión (J/Kg)
<b>P<sub>fr</sub></b>	Pérdida de presión por fricción (Pa)
<b>h<sub>ch</sub></b>	Altura de la chimenea (m)

<b>V</b>	Velocidad lineal del gas (m/s)
<b>G</b>	Constante gravitacional (9.8 m/s <sup>2</sup> )
<b>d<sub>h</sub></b>	Diámetro hidráulico (m)
<b>M</b>	Flujo de los gases de combustión através de la estufa (g/s)
<b>C<sub>p</sub></b>	calor específico de los gases de combustión (kJ/Kg)
<b>f<sub>fo</sub></b>	Fracción del calor que se pierde hacia el cuerpo de la estufa (J)
<b>F<sub>fp</sub></b>	fracción del calor que es absorbida por la plancha metálica (J)
<b>ρ</b>	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )
<b>η</b>	Eficiencia (%)
<b>B<sub>w</sub></b>	Contenido calórico (J/Kg)
<b>P<sub>s</sub></b>	Succión neta ó tiro de la chimenea (Pa)

<b>X</b>	Media aritmética
<b>N</b>	Número de datos
<b><math>\sigma^2</math></b>	Varianza

## GLOSARIO

<b>Biomasa</b>	Cantidad de materia viva producida en un área determinada de la superficie terrestre, o por un organismo de un tipo específico.
<b>Calor</b>	Energía que pasa de un cuerpo a otro y es causa de que se equilibren sus temperaturas.
<b>Calor Latente</b>	Energía en forma de calor generado por un cambio de fase de un elemento o compuesto.
<b>Calor Sensible</b>	Calor que se percibe en un elemento o compuesto.
<b>Calor de Combustión</b>	Desprendimiento de energía en forma de calor que se tiene durante un proceso de combustión.
<b>Capacidad Calorífica</b>	Cantidad de energía en forma de calor necesaria para aumentar la temperatura de un compuesto o elemento en un grado.
<b>Chimenea</b>	Conducto para dar salida al humo resultante de la combustión.
<b>Combustible</b>	Sustancia o compuesto capaz de combinarse con un cuerpo oxidante para generar energía.

<b>Combustión</b>	Reacción química entre el oxígeno y un material oxidable, acompañada de desprendimiento de energía y que habitualmente se manifiesta por incandescencia o llama.
<b>Conducción</b>	Acción o efecto de conducir a través de paredes.
<b>Convección</b>	Transporte en un fluido de una magnitud física, como masa, electricidad o calor, por desplazamiento de sus moléculas debido a diferencias de densidad.
<b><i>Damper</i></b>	Plato de hierro movable que regula la corriente de aire entrante a una chimenea u horno.
<b>Eficiencia</b>	Capacidad de disponer de algo para conseguir un efecto determinado.
<b>Eficiencia Única</b>	Único valor de eficiencia que muestra tener un equipo al estarle variando un parámetro.
<b>Eficiencia Máxima</b>	Máximo valor de eficiencia que se puede obtener.
<b>Energía</b>	Capacidad para realizar un trabajo.
<b>Estufa</b>	Aparato en donde se realiza la combustión con fines de cocina.

<b>Estufa Mejorada</b>	Sistema que quema combustible de una manera más eficiente que una estufa de tres piedras (fogón abierto) en el que se produce calor por combustión para uso inmediato en la cocina.
<b>Fase</b>	Cada una de las partes homogéneas físicamente separables en un sistema formado por uno o varios componentes.
<b>Gases de Combustión</b>	Emisiones gaseosas resultado de la combustión.
<b>Geometría Interna</b>	Formas geométricas que presenta un instrumento en su interior por el que puede circular un fluido.
<b>Leña</b>	Parte de los árboles y matas que, cortada y hecha trozos, se destina a lumbre.
<b>Llama</b>	Masa gaseosa en combustión, que se eleva de los cuerpos que arden y despiden luz de varios colores.
<b>Radiación</b>	Energía ondulatoria o partículas materiales que se propagan a través del espacio.
<b>Ruta de Calor</b>	Camino por el cual se transporta los flujos de energía en forma de calor dentro de un conducto.

<b>Temperatura</b>	Magnitud física que expresa el grado o nivel de calor de los cuerpos o del ambiente.
<b>Termodinámica</b>	Parte de la física en que se estudian las relaciones entre el calor y las restantes formas de energía.
<b>Transferencia de Calor</b>	Razón de intercambio de energía en forma de calor entre cuerpos calientes y fríos llamados fuente y receptor respectivamente.

## RESUMEN

El estudio que se llevó a cabo en este trabajo de graduación fue la evaluación de la eficiencia de un modelo específico de estufa mejorada la cual se ha introducido a Guatemala recientemente.

El aporte que da a la Ingeniería Química es la aplicación de conocimientos sobre combustión, transferencia de calor y termodinámica. Dicha estufa se considera como una máquina térmica, la eficiencia termodinámica máxima de la misma se refleja con la relación entre la cantidad de energía que es capaz de suministrar, y la energía total generada al quemar la leña. La eficiencia de combustión es la relación de emisión de CO<sub>2</sub> a la atmósfera entre la cantidad de carbono que se le suministró.

Con los resultados que se obtuvieron se determinó que la estufa Doña Justa, no cuenta con una eficiencia termodinámica propia, sino que dicha eficiencia está netamente en función del uso que se le esté dando. También se determinó que la estufa Doña Justa tiene un rendimiento de combustión elevado de la biomasa que se utilice como combustible, pero se recomienda una readecuación de la cámara de combustión.

Con la conclusión del estudio se obtuvo un procedimiento para determinación de eficiencia máxima termodinámica y de combustión susceptible de réplica en condiciones similares a equipos de combustión de biomasa, con una metodología experimental que puede aplicarse sin mayores cambios a otros modelos, conceptos y aplicaciones de estufas mejoradas.



## OBJETIVOS

### General

Determinar la eficiencia termodinámica máxima y de combustión de un modelo de estufa mejorada que se ha introducido al medio guatemalteco, conocida como Doña Justa.

### Específicos

1. Aplicar técnicas fisicoquímicas para la determinación del uso de energía en la Estufa Doña Justa.
2. Contar con valores respaldados técnicamente con equipos accesibles que sirvan como punto de comparación para el desarrollo de nuevas técnicas de combustión de biomasa.
3. Plantear un procedimiento para determinación de eficiencia máxima termodinámica y de combustión susceptible de réplica en condiciones similares a equipos de combustión de biomasa.



## INTRODUCCIÓN

Se estima que la mitad de la población del mundo, utiliza biomasa para cocinar sus alimentos. (Informe final del Grupo Interdisciplinario de Tecnología Rural Apropiable (GIRA), A.C. 2003). Trossero (2002) reporta que el 60% de la madera usada en el mundo se destina a energía; siendo los países en desarrollo, que concentran alrededor del 77% de la población mundial, los que utilizan el 76% del total.

Durante mucho tiempo se consideró que la dinámica de uso de la leña era función directa del crecimiento de la población, sin embargo estudios detallados muestran una relación más compleja. Actualmente se considera que la dinámica de uso de la leña es función de la interacción de factores relacionados con la oferta y la demanda, entre los que destacan: los sistemas locales de producción, las condiciones biofísicas asociadas con el estado de los recursos naturales, variables socioculturales y tecnológicas y la estructura socioeconómica (Masera, 1995).

Del total del territorio guatemalteco, el 39.9% se encuentra cubierto por bosques, cifra que a comparación de años anteriores ha ido en aumento (37.1% en 2002). En Guatemala el 36.5 % de la producción forestal se destina para producción de leña (Boletín de Estadística Forestal INAB, 2003) y 57.3% de los hogares utiliza leña en sus cocinas (Características de la Población y de los Locales de Habitación Censados, INE 2002)

Para Guatemala, las tecnologías de energía renovable a pequeña escala representan una alternativa económica y ambientalmente factible para la provisión de energía a comunidades. Adicionalmente, estas tecnologías pueden disminuir la contaminación del medio ambiente, causada por las emisiones de gases de los sistemas convencionales que utilizan combustibles fósiles, como el carbón, y productos derivados del petróleo. Estos gases contribuyen al efecto invernadero y al calentamiento global de nuestro planeta.

Según datos del Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales de Guatemala, la fuente de energía de mayor consumo en el país es la biomasa; con el 79% de la oferta energética (dato del año 1990). El término biomasa se refiere a toda la materia orgánica que proviene de árboles, plantas y desechos de animales que pueden ser convertidos en energía; o provenientes de la agricultura (residuos de maíz, café, arroz, macadamia), del aserradero (podas, ramas, aserrín, cortezas) y de los residuos urbanos (aguas negras, basura orgánica y otros). Esta es la fuente de energía renovable más antigua conocida por el ser humano, pues ha sido usada desde que nuestros ancestros descubrieron el secreto del fuego.

Desde la prehistoria, la forma más común de utilizar la energía de la biomasa ha sido por medio de la combustión directa: quemándola en hogueras a cielo abierto, en hornos y cocinas artesanales e, incluso, en calderas; convirtiéndola en calor para suplir las necesidades de calefacción, cocción de alimentos, producción de vapor y generación de electricidad.

Cuando se quema la biomasa, se efectúa una reacción química que combina su carbono con oxígeno del ambiente, formándose dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) y combinando el hidrógeno con oxígeno para formar vapor de agua. Cuando la combustión es completa, o sea la biomasa se quema totalmente, todo el carbón se transforma en  $\text{CO}_2$ . Sin embargo, los árboles y plantas que están creciendo capturan nuevamente el  $\text{CO}_2$  de la atmósfera y, al usar la biomasa en forma sostenible, en términos netos, no se agrega  $\text{CO}_2$  a la atmósfera.

No obstante, cuando la combustión no es completa, se forman monóxido de carbono (CO), hidrocarburos (HCs, e.g. metano),  $\text{N}_2\text{O}$  y otros materiales. Estos sí pueden generar impactos serios en la salud de los usuarios. También son gases de efecto invernadero, por lo que se debería minimizar su formación.

Como se mencionaba anteriormente, el uso de la biomasa representa una gran ventaja en nuestro medio en la generación de energía. Para ello se han desarrollado tecnologías a nivel local para el aprovechamiento de los recursos naturales. La siguiente propuesta de trabajo de graduación contempla investigar la eficiencia de una estufa de biomasa que recientemente ha empezado a cobrar protagonismo en el medio rural guatemalteco: La Estufa Doña Justa.

Por medio de estudios fisicoquímicos y termodinámicos, que se presentan a continuación, se determinó la eficiencia de dicha estufa. Se tomó en cuenta la eficiencia de combustión y la eficiencia termodinámica máxima de la misma. Con estos resultados se determinó que la estufa Doña Justa, no cuenta con una eficiencia termodinámica propia, sino que dicha eficiencia está netamente en función del uso que se le esté dando, el aprovechamiento de la plancha. También se determinó que la estufa Doña Justa tiene una combustión elevada de la biomasa que se utilice como combustible, pero se recomienda hacerle modificaciones a la cámara de combustión. Con la conclusión del estudio se obtuvo un procedimiento para determinación de eficiencia máxima termodinámica y de combustión susceptible de réplica en condiciones similares a equipos de combustión de biomasa, con una metodología experimental que puede aplicarse sin mayores cambios a otros modelos, conceptos y aplicaciones de estufas mejoradas.

## 1. FENÓMENOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR

El flujo de calor es la transferencia de energía desde un cuerpo a mayor temperatura que otro con el simple objeto de llegar a un equilibrio térmico entre los dos cuerpos. En el siglo XVIII y comienzos del XIX, los científicos imaginaban que todos los cuerpos contenían un fluido invisible al cual llamaron calórico. Al calórico se le asignó una variedad de propiedades, algunas que probaron ser inconsistentes con la [naturaleza](#). Pero su más importante [propiedad](#) era que fluía de cuerpos calientes a fríos. Era una manera útil de pensar acerca del calor. (1)

Hoy en día, en la [física](#), a este flujo de calor, más propiamente transferencia de calor, se le define como el [proceso](#) por el que se intercambia energía en forma de calor entre distintos cuerpos, o entre diferentes partes de un mismo cuerpo que están a distinta [temperatura](#). El calor se puede transferir por convección, [radiación](#) o conducción. Aunque estos tres [procesos](#) pueden tener lugar simultáneamente, puede ocurrir que uno de los mecanismos predomine sobre los otros dos. (2)

## 1.1 Transferencia de Calor por Conducción

En los sólidos, la única forma de transferencia de calor es la conducción. Si se calienta un extremo de una varilla metálica, de forma que aumente su temperatura, el calor se transmite hasta el extremo más frío por conducción. No se comprende en su totalidad el mecanismo exacto de la conducción de calor en los sólidos, pero se cree que se debe, en parte, al movimiento de los electrones libres que transportan energía cuando existe una diferencia de temperatura. Esta teoría explica por qué los buenos conductores eléctricos también tienden a ser buenos conductores del calor. En 1822, el matemático francés Joseph Fourier dio una expresión matemática precisa que hoy se conoce como ley de Fourier de la conducción del calor. Esta ley afirma que la velocidad de conducción de calor a través de un cuerpo por unidad de sección transversal es proporcional al gradiente de temperatura que existe en el cuerpo.

(3)

Cuando un sistema trabaja en estado estable, entonces la transferencia de calor por conducción se expresa de la siguiente manera:

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

Donde: Q= flujo de calor (J/s)

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

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

L= grosor de la pared, m

t= temperatura, K

## 1.2 Transferencia de Calor por Convección

Si existe una diferencia de temperatura en el interior de un líquido o un gas, es casi seguro que se producirá un movimiento del fluido. Este movimiento transfiere calor de una parte del fluido a otra por un proceso llamado convección. El movimiento del fluido puede ser natural o forzado. Si se calienta un líquido o un gas, su densidad (masa por unidad de volumen) suele disminuir. Si el líquido o gas se encuentra en el campo gravitatorio, el fluido más caliente y menos denso asciende, mientras que el fluido más frío y más denso desciende. Este tipo de movimiento, debido exclusivamente a la no uniformidad de la temperatura del fluido, se denomina convección natural. La convección forzada se logra sometiendo el fluido a un gradiente de presiones, con lo que se fuerza su movimiento de acuerdo a las leyes de la mecánica de fluidos. (4)

Para describir la transferencia de calor ( $Q$ ) por convección natural se tiene la siguiente expresión:

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

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

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

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

### 1.3 Transferencia de Calor por Radiación

La radiación presenta una diferencia fundamental respecto a la conducción y la convección: las sustancias que intercambian calor no tienen que estar en contacto, sino que pueden estar separadas por un vacío. La radiación es un término que se aplica genéricamente a toda clase de fenómenos relacionados con [ondas](#) electromagnéticas. Algunos fenómenos de la radiación pueden describirse mediante la [teoría](#) de [ondas](#), pero la única explicación general satisfactoria de la radiación electromagnética es la teoría cuántica. En 1905, [Albert Einstein](#) sugirió que la radiación presenta a veces un [comportamiento](#) cuantizado: en el efecto fotoeléctrico, la radiación se comporta como minúsculos proyectiles llamados fotones y no como ondas. La [naturaleza](#) cuántica de la energía radiante se había postulado antes de la aparición del artículo de Einstein, y en 1900 el físico alemán Max Planck empleó la teoría cuántica y el formalismo matemático de la [mecánica estadística](#) para derivar una ley fundamental de la radiación. La expresión [matemática](#) de esta ley, llamada [distribución](#) de Planck ( $dN_\nu \propto (8\pi\nu^2 dv/c^3) \{ \exp (h\nu/kT) - 1 \}^{-1}$ ), relaciona la intensidad de la energía radiante que emite un cuerpo en una longitud de onda determinada con la temperatura del cuerpo. Para cada temperatura y cada longitud de onda existe un máximo de energía radiante. Sólo un cuerpo ideal (cuerpo negro) emite radiación ajustándose exactamente a la ley de Planck. Los cuerpos reales emiten con una intensidad algo menor. (5)

La contribución de todas las longitudes de onda a la energía radiante emitida se denomina poder emisor del cuerpo, y corresponde a la cantidad de energía emitida por unidad de superficie del cuerpo y por unidad de tiempo. Como puede demostrarse a partir de la ley de Planck, el poder emisor de una superficie es proporcional a la cuarta potencia de su temperatura absoluta. El factor de proporcionalidad se denomina constante de Stefan-Boltzmann ( $\sigma = 5670400 \cdot 10^{-8} \text{ JK}^{-4} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ) en honor a dos físicos austriacos, Joseph Stefan y Ludwig Boltzmann que, en 1879 y 1884 respectivamente, descubrieron esta proporcionalidad entre el poder emisor y la temperatura. Según la ley de Planck, todas las sustancias emiten energía radiante sólo por tener una temperatura superior al cero absoluto. Cuanto mayor es la temperatura, mayor es la cantidad de energía emitida. Además de emitir radiación, todas las sustancias son capaces de absorberla. Por eso, aunque un cubito de hielo emite energía radiante de forma continua, se funde si se ilumina con una lámpara incandescente porque absorbe una cantidad de calor mayor de la que emite.

#### **1.4 Temperatura**

La sensación de calor o frío al tocar una sustancia depende de su temperatura, de la capacidad de la sustancia para conducir el calor y de otros factores. Aunque, si se procede con cuidado, es posible comparar las temperaturas relativas de dos sustancias mediante el tacto, es imposible evaluar la magnitud absoluta de las temperaturas a partir de reacciones subjetivas. (6)

Cuando se aporta calor a una sustancia, no sólo se eleva su temperatura, con lo que proporciona una mayor sensación de calor, sino que se producen alteraciones en varias propiedades físicas que se pueden medir con precisión. Al variar la temperatura, las sustancias se dilatan o se contraen, su resistencia eléctrica cambia y, en el caso de un gas, su presión varía. La variación de alguna de estas propiedades suele servir como base para una escala numérica precisa de temperaturas.

La temperatura depende de la energía cinética media (o promedio) de las moléculas de una sustancia; según la teoría cinética, la energía puede corresponder a movimientos rotacionales, vibracionales y traslacionales de las partículas de una sustancia. La temperatura, sin embargo, sólo depende del movimiento de traslación de las moléculas. En teoría, las moléculas de una sustancia no presentarían actividad traslacional alguna a la temperatura denominada cero absoluto.

## **1.5 Calor Sensible y Latente**

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

Los cambios de fase en sustancias puras tienen lugar a temperaturas y presiones definidas. El paso de sólido a gas se denomina sublimación, de sólido a líquido fusión, y de líquido a vapor vaporización. Si la presión es constante, estos procesos tienen lugar a una temperatura constante. La cantidad de calor necesaria para producir un cambio de fase se llama calor latente; existen calores latentes de sublimación, fusión y vaporización. Si se hierve agua en un recipiente abierto a la presión de 1 atmósfera, la temperatura no aumenta por encima de los 100 °C por mucho calor que se suministre. El calor que se absorbe sin cambiar la temperatura del agua es el calor latente; no se pierde, sino que se emplea en transformar el agua en vapor y se almacena como energía en el vapor. Cuando el vapor se condensa para formar agua, esta energía vuelve a liberarse. Del mismo modo, si se calienta una mezcla de hielo y agua, su temperatura no cambia hasta que se funde todo el hielo. El calor latente absorbido se emplea para vencer las fuerzas que mantienen unidas las partículas de hielo, y se almacena como energía en el agua. Así que el calor latente que acompaña a un cambio de fase es una función sólo de la temperatura, y esta relacionada con otras propiedades del sistema mediante una ecuación termodinámicamente exacta:

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

Donde para una especie pura a temperatura dada T,

$\Delta H$  = calor latente (Btu/lb)

$\Delta V$  = cambio de volumen (gal)

$P^{sat}$  = presión de vapor (psi)

(7)

## 1.6 Capacidad Calorífica

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

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

$$C_v = (dU/dT)_v$$

Análogamente si se está trabajando a presión (p) constante, se tiene la siguiente expresión que involucra la entalpía (H) y temperatura (T):

$$C_p = (dH/dT)_p$$

Nótese que en el caso de volumen constante se expresa la capacidad calorífica como función directamente proporcional a la energía interna (U) molar o específica y en el caso de presión constante es directamente proporcional a la entalpía (H) molar o específica. (8)

## 1.7 Calor de Combustión

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

Se define el calor específico de combustión ( $l$ ) como la cantidad de calor ( $Q$ ) que cede la unidad de masa del cuerpo al quemarse totalmente. El calor específico de combustión ( $l$ ) se expresa en unidades de energía ( $J$ ) por unidades de masa ( $kg$ ) y depende del tipo de combustible. Iguales masas de combustibles diferentes, desprenden diferentes cantidades de calor ( $Q$ ) al quemarse totalmente. De otro modo, masas diferentes del mismo combustible desprenden, también, diferentes cantidades de calor ( $Q$ ). La cantidad de calor ( $Q$ ) desprendida por cierta masa ( $m$ ) de combustible, al quemarse totalmente, puede ser calculada mediante la fórmula:  $Q = l \cdot m$ . (9)

**Tabla I.** Calores específicos de combustión

Material combustible	Calor específico de Combustión	
	(KCal/Kg)	(MJ/Kg)
Hidrógeno	33915.9	142
Gas metano	13136.4	55
Gasolina	11225.7	47
Petróleo crudo	11225.7	47
Queroseno	10986.8	46
Carbón butiminoso	8598.4	36
Antracita	8359.5	35
Coque	8120.7	34
Alcohol etílico	7165.3	30
Carbón vegetal	7165.3	30
Alcohol metílico	5254.5	22
Madera de pino	5015.7	21
Cascarón de coco	4776.9	20
Turba seca	4776.9	20
Leña seca	4299.2	18
Turba húmeda	3821.5	16
Aserrín seco	3582.6	15
Cáscara de arroz	3582.6	15
Lignito	3104.9	13
Bagazo de caña seco	2149.6	9
Leña verde	2149.6	9
Planta de maíz seca	2149.6	9
Aserrín húmedo	1910.7	8

Cuando se estudian los valores relativos a los calores específicos de combustión de los combustibles, se pueden extraer algunas conclusiones de relevante importancia para lograr mayor eficiencia en su empleo.

Resulta interesante apreciar cómo el calor de combustión de la leña seca es el doble del correspondiente a la leña verde. Este hecho nos conduce a concluir que si cierta masa ( $m$ ) de leña húmeda desprende una cantidad de calor ( $Q$ ) al quemarse totalmente, entonces, cuando quemamos una masa ( $m/2$ ) de leña seca podemos obtener la misma cantidad de calor. En otras palabras, al utilizar la leña seca se ahorra la mitad de la madera que se quema. Esto nos indica que durante la utilización de la madera como combustible siempre será más conveniente emplear la leña seca, en consideración a su calor de combustión. En los fogones que emplean leña se puede incrementar la eficiencia de estos, mediante la sustitución del empleo de la leña verde por leña seca.



## 2. ESTUFAS MEJORADAS

En la década de 1950 India fue el primer país en empezar a desarrollar tecnologías para mejorar la forma en que se quemaba la leña en las cocinas. La crisis del petróleo en la década de 1970 trajo una nueva ola de interés por el desarrollo de las ya llamadas estufas mejoradas. Fue en esta fase cuando se empezaron a hacer estudios técnicos más serios de eficiencias termodinámica, transferencia de calor y estudios aerodinámicos. En la década de 1980, considerada la tercera fase, es cuando ya se integran completamente los criterios de comodidad al cocinar, cocinas sin humo, conveniencia, seguridad y ahorro de combustible. (10)

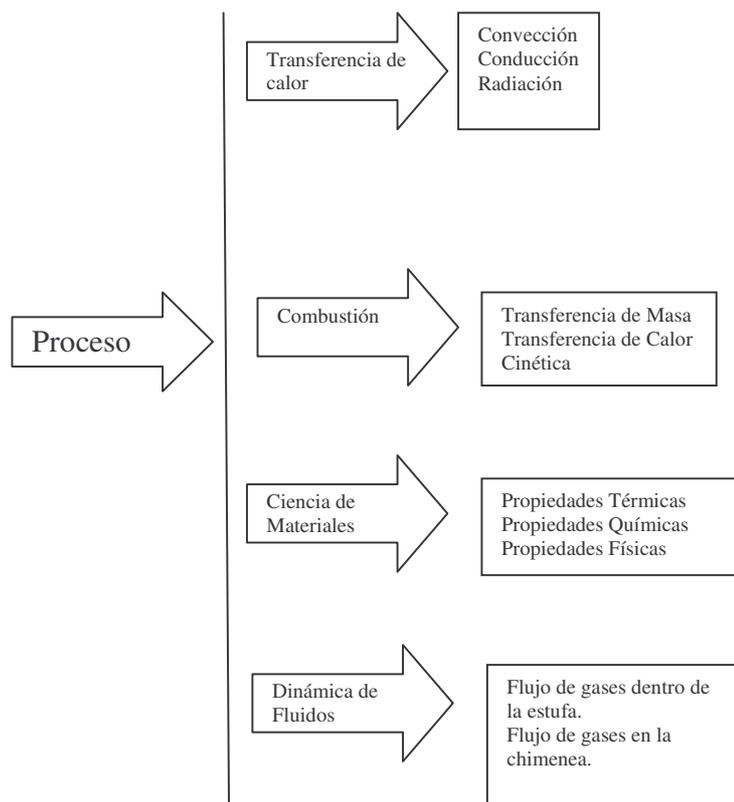
Para Guatemala, el aparato en donde se realiza la combustión con fines de cocina se le llama Estufa. El ambiente o parte de la vivienda donde se ubica la estufa y se llevan a cabo actividades de preparación de alimentos es la cocina.

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

## 2.1 Perspectivas del Desarrollo de una Estufa Mejorada

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

**Figura 1.** Procesos involucrados en el desarrollo de una estufa mejorada



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

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

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

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

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

El proceso de combustión depende de las propiedades fisicoquímicas del combustible a utilizar, cantidad y modo en que se le proporcione aire y las condiciones ambientales. Más adelante se hablará con más precisión de estos factores.

Los aspectos que se deben de tomar en cuenta al momento de elegir de los materiales a construir una estufa son la durabilidad, costo, factores de operación y cualidades aislantes (calor específico y conductividad térmica).

## **2.1 Implicaciones Medioambientales y de Salud**

Son dos las implicaciones medio ambientales que representan las estufas mejoradas en relación con la conservación de biomasa:

- Mantener un crecimiento estable de la población de bosques.
- Uso como recursos sostenible, especialmente como combustible.

Ventajas económicas y sociales se derivan del uso sostenible de bosques, por eso es importante establecer una perspectiva a largo plazo del buen uso de recursos naturales en los cuales se vean involucrados sectores tanto gubernamentales como poblaciones.

Al tener el humo fuera de las cocinas se evitan los siguientes problemas de salud:

**Tabla II.** Efectos de salud por inhalación de gases de combustión

Compuesto	Efectos sobre la salud
Monóxido de Carbono (CO)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Absorción a la sangre por los pulmones.</li> <li>• Elevación de niveles de Carboxihemoglobina.</li> <li>• Reducción de oxígeno a tejidos del organismo.</li> </ul>
Partículas dispersas	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Irrigación en el organismo a través de absorción en los pulmones.</li> </ul>
Benzo (a) Pirena	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Deposición en pulmones</li> <li>• Agente cancerígeno</li> </ul>
Formaldehído	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Irritación en mucosa</li> <li>• Reducción en actividad pulmonar</li> <li>• Agente cancerígeno</li> </ul>

## 2.2 La Estufa Doña Justa

La estufa Doña Justa, nombrada así como reconocimiento a Doña Justa Núñez, oriunda de Suyapa, Honduras, que propuso el modelo, es una de las muchas variedades de estufas que utilizan la tecnología llamada el "codo de misil", promovida en esa área por el Dr. Larry Winiarski de la Fundación Aprovecho con base en Oregon, Estados Unidos de América. (Ref. 11)

La categoría de estas estufas a menudo se conoce como "estufas de misil". Son estufas que queman leña y alguna otra materia orgánica seleccionada. Se construyen con una cámara de combustión en forma de codo, con las paredes de la estufa aisladas de la cámara de combustión y el paso de los gases por medio de ceniza. El cuerpo de la estufa es construido de ladrillos.

La estufa Justa tiene una plancha de hierro que se pone encima de una caja de ladrillos, y una chimenea que lleva el humo hacia el exterior. Sobre la plancha de hierro es donde se colocan los recipientes con los alimentos. Es toda esta área de la plancha la que se tiene disponible para cocinar.

En la sección de Anexos están los diagramas a escala de la Estufa Doña Justa.

### **2.3 Tecnología de Codo de Misil ó “Rocky”**

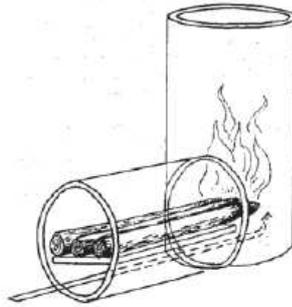
La tecnología de codo de misil se describe a continuación:

- Una cámara de combustión fabricada con materiales refractarios y aislada del cuerpo por medio de ceniza, para mantener el fuego lo más caliente posible, evitando que se pierda calor al cuerpo de la estufa.

- Sobre la cámara de combustión, se deberá colocar otra cámara del mismo diámetro que la de combustión que también deberá estar aislada de la misma manera.

- Hacer la abertura de la cámara de combustión de una manera que se tenga controlada la conducción del calor y no se pierda calor por radiación, siempre manteniendo la relación aire/combustible estable.

**Figura 2.** Diagrama de un codo de misil



El sistema “Codo de Misil” aprovecha el tiro inducido que genera el cambio de temperatura de los gases en una cámara reducida de combustión, produciendo un movimiento acelerado en el codo. La innovación más importante del modelo es el ensamble de dos chimeneas. Una que produce, mantiene y propicia la combustión y la otra elimina los gases usados.

## 2.4 Ruta de Calor y Geometría Interna

En la Estufa Doña Justa un factor que se debe de tomar en cuenta es la ruta de calor. La ruta de calor está íntimamente ligada con la geometría interna de la estufa, que es la forma que tiene el interior de la estufa. Dependiendo de cómo sea el interior de la estufa y como deje el paso del flujo de los gases, será la transferencia de calor entre los gases y las paredes en qué entren en contacto.

La pérdida de presión debido a la fricción encontrada a lo largo del paso de los gases de combustión en el interior de la chimenea es conocida como pérdida de presión por fricción. Desde el punto de vista de la dinámica de fluidos, se pueden describir estas formas internas como: canales de sección constante, cruces, canales con expansión o canales con contracción. Las pérdidas de presión por fricción se expresan de la siguiente manera:

$$\Delta P_{fr} = \frac{f * h_{ch} * \rho_g * v^2}{2g * d_h}$$

En donde:  $P_{fr}$ = pérdida de presión por fricción (Pa)

$f$ = factor de fricción

$h_{ch}$ = altura de la chimenea (m)

$\rho_g$ = densidad del gas ( $g/cm^3$ )

$v$ = velocidad lineal del gas (m/s)

$g$ = constante gravitacional ( $9.8 \text{ m/s}^2$ )

$d_h$ = diámetro hidráulico (m)

El factor de fricción estará en función del número de Reynolds.

Para ver la geometría interna de la estufa Doña Justa ver los diagramas incluidos en la sección de Anexos.

La manera de poder empezar a describir la ruta de calor es por medio del siguiente balance de energía:

$$m \cdot C_p (T_o - T_{amb}) = P (1 - f_{fo} - f_{fp})$$

en donde:  $m$ = flujo de los gases de combustión a través de la estufa. (g/s)

$C_p$ = calor específico de los gases de combustión. (kJ/Kg)

$T_o$ = temperatura promedio de los gases de combustión a través de su trayecto dentro de la estufa. (K)

$T_{amb}$ = temperatura ambiental. (K)

$P$ = potencia de la llama (Watts)

$f_{fo}$ = fracción del calor que se pierde hacia el cuerpo de la estufa (J)

$F_{fp}$ = fracción del calor que es absorbida por la plancha metálica (J)

Al ya contar con una idea de cómo se utiliza la energía por medio del balance, el siguiente paso es representar sobre un diagrama de la Estufa Doña Justa como van a ser aprovechados los flujos de energía que pasarán a través de ella. A esto se le llama esquema de las rutas del calor, ver ANEXO 2.

## 2.5 Combustión

Se entiende por combustión, a la combinación violenta, con desprendimiento de luz y calor, del Oxígeno ( $O_2$ ) del aire con el Carbono (C), Hidrógeno (H), Azufre (S) y Nitrógeno (N). (11)

La combustión del Oxígeno con el Carbono, Hidrógeno, Azufre, se efectúa en proporciones de peso bien determinadas, así pues por cada átomo de Carbono se necesitan 2 átomos de Oxígeno para llegar a la combustión perfecta formando  $CO_2$  (dióxido de Carbono), el Carbono que se quema con deficiencia de aire forma el gas CO (monóxido de Carbono), que representa solo el 30% de una combustión perfecta, por lo tanto la combustión al formarse CO es incompleta .

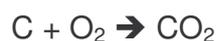
El Hidrógeno se combina siempre en proporción de 2 átomos de Hidrógeno con uno de Oxígeno formando vapor de agua H<sub>2</sub>O, y el azufre es de proporción 1:2 es decir un átomo de Azufre por 2 de Oxígeno, este gas es perjudicial por que al enfriarse los productos de la combustión, el agua que se forma en la combustión y la que esta presente en la humedad del combustible se condensan y reaccionan con el gas anhídrido H<sub>2</sub> formando ácido sulfúrico SO<sub>4</sub>H<sub>2</sub>, sumamente corrosivo y ataca los conductos metálicos de escape.

### 2.5.1 Proceso de la Combustión

La mayoría de los procesos de combustión se realizan con aire (Oxígeno + Nitrógeno + Argón) y no con Oxígeno puro.

Este proceso se traduce a la oxidación de los componentes de un combustible, en cuya ecuación química representativa la masa permanece inalterable. Para los cálculos se desprecia el Argón y se toma 21% de oxígeno y 79% de nitrógeno.

Pero los dispositivos de combustión no queman necesariamente todo el combustible que se les suministra, teniendo las siguientes reacciones:



El CO<sub>2</sub> se forma a menor temperatura y sin duda es el producto deseado; el CO se forma a mayores temperaturas, y no es tan deseado debido a que su formación va acompañada por una menor liberación de calor.

La característica especial del carbono como combustible es que su presión de vapor es despreciablemente pequeña. Es por eso que se puede describir la velocidad de combustión por medio de la relación de Nusselt:

$$\frac{G_o r_o}{\tau_{ox}} = \frac{m_{ox}}{s}$$

En donde:  $G_o$  = velocidad de combustión

$m_{ox}$  = masa que se oxida

$\tau_{ox}$  = temperatura

$s$  = constante de Nusselt

$r_o$  = radio de la partícula de carbono

### 2.5.2 Aire Teórico

Es la cantidad mínima de aire capaz de proporcionar el Oxígeno suficiente para la combustión completa del carbono.

Cuando se obtiene combustión completa no puede haber oxígeno en los productos de la combustión . En la practica no es posible tener una combustión completa ni con las proporciones "ideales" químicamente correctas a menos que se administre una cantidad mayor de aire teórico. Esto se debe a que probabilísticamente no es posible que cada una de las extraordinariamente numerosas moléculas del combustible encuentre una molécula de oxígeno para combinarse con ella. Por lo tanto la oxidación total del combustible se logra utilizando en la mezcla exceso de aire. (12)

### 2.5.3 Relación Aire - Combustible

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

$$n_{a.st} = \frac{1}{0.21} \left[ \left( 1 - \frac{1}{2} \times f \right) \times \frac{[C]}{12} - \frac{Y}{32} \right] \text{ [mol]}$$

en donde: f= % de madera que se convierte en CO

c= % de carbono en la madera.

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

Si la cantidad de aire suministrado en una combustión es inferior a el aire teórico necesario la combustión será incompleta y habrá presencia de CO.

La combustión incompleta se debe a tres causas:

- a) Insuficiencia de Oxígeno.
- b) Mezcla imperfecta entre el Oxígeno y el combustible.
- c) Temperatura demasiado baja para mantener la combustión.

Debido a la naturaleza heterogénea del proceso de combustión de biomasa sólida, solo parte del aire que entra a la cámara de combustión será utilizado, el resto no será utilizado. Entonces es necesario agregar más aire que lo que teóricamente se definió. Y la relación aire/combustible que se recomienda es un factor de 1.2 a 1.5. (13)

#### **2.5.4 Tiro de Chimenea**

Para tener una combustión completa, se necesita tener aire ingresando según lo calculado. Es aquí donde el diseño de la chimenea entra a jugar un papel crucial. La chimenea crea una presión de succión que está en función a parámetros de altura de la misma y las densidades de los gases. Es esta presión de succión lo que hace que la estufa mantenga una alimentación de aire a través de la cámara de combustión.

Para calcular esta presión también se tiene que tomar en cuenta la geometría interna de la estufa, ya que por ahí deberán pasar los gases de combustión y una geometría compleja solo obstruye su paso haciendo que decrezca la succión que da la chimenea. Otro factor que influye es la pérdida de presión por la misma dinámica de los gases.

La ecuación que describe la presión de succión de la chimenea es la siguiente:

$$\Delta P_o = h_{ch} * (\rho_a - \rho_g)$$

En donde:  $\Delta P_o$  = presión de succión (Pa)

$h_{ch}$  = altura de la chimenea (m)

$\rho_a$  = densidad del aire ( $\text{kg/m}^3$ )

$\rho_g$  = densidad del gas de combustión ( $\text{kg/m}^3$ )

Es a este valor de presión de succión al que se le deben de restar los otros factores mencionados anteriormente y se tiene el verdadero valor de presión de succión ó tiro de la chimenea.

Un factor que alterará el tiro de la chimenea es la colocación de deflectores que servirán como reguladores al paso de los gases entre la estufa. Se colocan deflectores a lo largo del paso de los gases para: mejorar la transferencia de calor por convección e incrementar el tiempo de residencia. Otro elemento que se puede incorporar para aumentar la eficiencia de la chimenea es un *damp*er en la base de la misma, con esto se disminuye la corriente de gases que le ingresan, con lo que al igual que los deflectores, se obtendrá mayor tiempo de residencia de los gases en la estufa.

## **2.6 Combustión de Biomasa**

La biomasa se forma por un proceso llamado fotosíntesis, una reacción química que combina agua, CO<sub>2</sub> y energía solar. La reacción opuesta de la anterior es la combustión, que es la descomposición de la biomasa y liberando energía que se puede utilizar para cocinar, secar, calentar, etc. A continuación se expondrán las características químicas y físicas de la biomasa.

### **2.6.1 Características Químicas**

La biomasa consiste en tres elementos químicos: hemicelulosa, celulosa e ignita. También contiene agua, pequeñas cantidades de resinas y minerales. Según los análisis proximales de madera, la composición de esta es de aproximadamente 50% de C y 45% de O. La composición de la biomasa es considerada en términos de carbono, materia volátil y cenizas producidas cuando se calienta en ausencia de aire. (14)

## 2.6.2 Características Físicas

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

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

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

La mayoría de combustibles biomásicos son higroscópicos (atraen moléculas de agua por lo tanto mantienen un nivel constante de humedad). De todos los combustibles biomásicos el menos higroscópico es el carbón, pero por sus grandes poros puede retener grandes cantidades de agua si se le moja.

Biomasa recientemente cortada posee niveles de humedad entre 80-90%, en un período de tiempo, dependiendo de la clase de biomasa que sea y factores climáticos, gran parte de esa humedad se evaporará, pero se llega a un punto en que ya no se puede perder mas humedad. El contenido de humedad en la biomasa que se ha secado al aire está entre 10 al 26%.

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

El efecto que tiene la humedad sobre el valor calorífico de la biomasa se describe de esta manera:

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

Donde se tiene que: m= contenido de humedad (%)

L= calor latente de evaporación

B= calor de combustión de biomasa

Bo= calor de combustión de biomasa seca

## **2.7 Valor Calorífico**

El valor calorífico de un combustible es una de las propiedades que afecta significativamente el diseño de una estufa. Este valor dependerá de la composición química y el contenido de humedad. El valor calorífico será la máxima cantidad de energía que se puede liberar cuando el combustible reacciona con el aire, se mide en KJ/Kg.

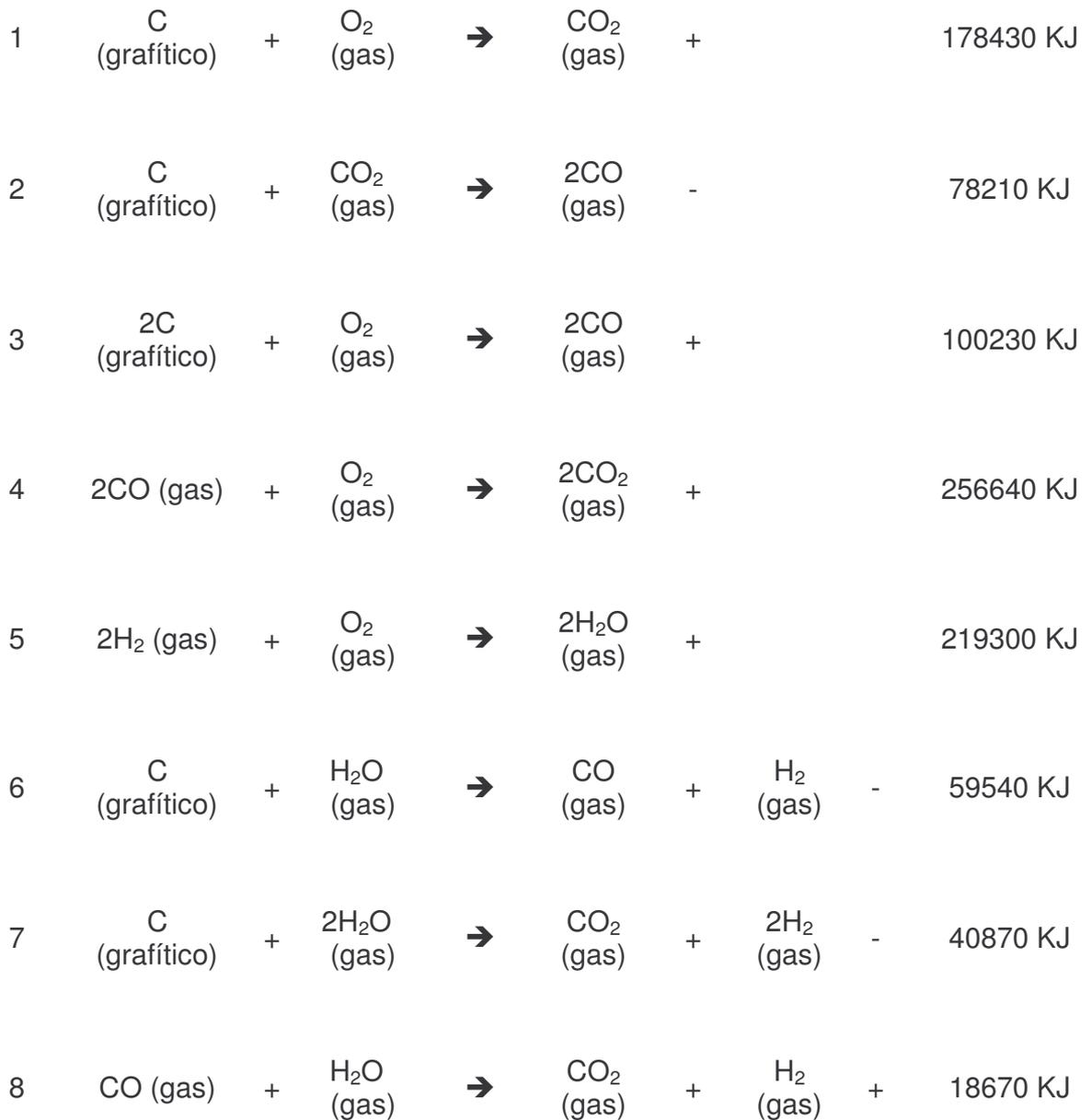
## **2.8 Proceso de Combustión de Leña**

Cuando un pedazo de leña es agregado al fuego, cambios químicos empiezan a ocurrir debido a la presencia de calor. Primeramente se desprende  $\text{CO}_2$  y agua sin presencia de llamas, a medida que la temperatura aumenta, gases de combustión de resinas se involucran en la reacción. A este primer proceso de degradación de madera se llamado pirólisis. Cuando la temperatura supera los  $280^\circ\text{C}$  la porción de gases inflamables que emite es lo suficientemente caliente para empezar a arder. La combustión únicamente ocurrirá en presencia de oxígeno y a temperaturas sobre la de ignición del combustible, la temperatura promedio de ignición de la madera es de  $600^\circ\text{C}$ . Es aquí cuando los gases arden por efecto de calor radiante de las otras piezas de madera ya ardiendo.

Una vez ardiendo, los gases pirolizados se quemarán a temperaturas de 1100°C; estas llamas luego proveerán de calor radiante que mantiene y acelera la pirólisis. Las llamas que se miran en un fuego son estos gases quemándose.

Es probable en muchos casos que las llamas no toquen la superficie de la leña. El flujo de gases, que se incrementa con el aumento de temperatura de las llamas, previene que el oxígeno llegue a la superficie de la leña. Es solamente después cuando la actividad de estos gases decrece, que la madera ya convertida en carbón, empieza a arder con una tenue llama azul; y los productos de esto será CO<sub>2</sub> y carbono. Todos estos procesos ocurren simultáneamente en una hoguera. (15)

Las reacciones para la combustión de leña son las siguientes:



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

$$\frac{dr_0}{dt} = \frac{-G_0}{\rho_c}$$

Donde:  $\rho_c$ = densidad del carbono.

$r_0$ = diámetro inicial de la partícula de carbono

$G_0$ = velocidad de combustión

$t$ = tiempo de combustión de la partícula

## 2.9 Aparato Orsat

El Aparato de Orsat es un analizador de [gases](#) usado para determinar la composición de una [muestra](#) de [gases](#). Durante un análisis, una [muestra](#) es pasada a través de líquidos absorbentes que remueven componentes específicos.

El [volumen](#) del gas es medido antes y después de la absorción. La disminución en el [volumen](#) del gas representa la cantidad del componente que estuvo presente. Los volúmenes del gas son medidos a [temperatura](#) y a presión constante.

Dicho aparato consiste en una bureta graduada de cincuenta mililitros o cien ml, con [escala](#) de cero a cien, conectada por su parte inferior por medio de un tubo de goma a un frasco nivelador, y en su parte superior a tres (3) recipientes dobles que contienen sustancias apropiadas para absorber los tres [gases](#) objeto de la medición. Cada uno de los tres recipientes consisten en dos tubos anchos unidos por un tubo pequeño en forma de U, todos con una válvula que permite el paso y la salida del gas que es objeto del análisis; la bureta está rodeada por un cilindro lleno de [agua](#) con el objeto de mantener la [temperatura](#) del gas.

En el primer recipiente se coloca una solución de hidróxido de potasio (100 gramos en 200 centímetros cúbicos de [agua](#)), esta absorbe el dióxido de carbono, en el segundo recipiente se coloca una mezcla de dos [soluciones](#), (10 gramos de ácido pirogálico en 25 centímetros cúbicos de [agua](#) hidróxido de sodio en la misma proporción que en el envase numero uno), esta mezcla absorbe el O<sub>2</sub> (oxígeno); en el tercer recipiente se coloca cloruro cuproso (250 gramos de cloruro amónico en 750 centímetros cúbicos de agua y se agregan 250 gramos de cloruro cuproso); conviene colocar dentro del frasco que contiene los reactivos algunos [tejidos](#) de [cobre](#) para que haya mayor absorción.

Los componentes son removidos por absorción directa en el siguiente orden: dióxido de carbono, oxígeno y monóxido de carbono. Lo que resta en la muestra es [hidrogeno](#) e [hidrocarburos](#) saturados, por lo tanto el cálculo del porcentaje absorbido se determina en la siguiente ecuación:

$$\% \text{ componente} = \frac{(\text{decremento en volumen})}{(\text{muestra de } \text{volumen})} * 100$$



### **3. METODOLOGÍA**

Para el estudio propuesto se utilizó una muestra de 5 Estufas Doña Justa, debido a que el método de construcción de estufas utilizado no es un método estandarizado, por lo tanto cada una de ellas tiene variaciones en su coeficiente de transferencia de calor. A cada una se le hizo las pruebas de eficiencia 2 veces a manera de obtener 10 datos de cada tipo de eficiencia. Dichos datos se trataron estadísticamente para obtener un dato final de eficiencia por medio de análisis de medias. La madera seleccionada como combustible fue el Rithofora Mangle o comúnmente llamado Mangle Rojo.

#### **3.1 Medición de Eficiencias**

La primera eficiencia que se midió es la eficiencia termodinámica máxima, que se hizo hirviendo agua y de este modo se midió la cantidad de energía en forma de calor que está transformando el sistema. Dicho estudio constó de cuatro mediciones de la siguiente manera: con un recipiente sobre la estufa, con dos recipientes sobre la estufa, con tres recipientes sobre la estufa y utilizando toda el área que presenta la plancha de la estufa.

Se le hizo una modificación a la plancha de la estufa, se le soldó una cinta de hierro a todo su alrededor de 2 pulgadas de altura, esto con el propósito de convertir a la plancha en un recipiente para poder utilizar toda el área que presenta. Es por esta razón que se le llama eficiencia termodinámica máxima, porque se estará midiendo eficiencias usando diferentes áreas hasta llegar a usar el área máxima disponible.

A continuación se describe el método paso a paso:

- Como preparación antes de empezar el estudio, se encendió el fuego en la cámara de combustión con 2 horas antes de empezar el experimento, de esta manera al momento de iniciar el mismo, se tuvo el sistema en régimen estable.

- Pasadas las 2 horas, se colocó en la plancha de metal modificada tres litros de agua a temperatura ambiente, cubriendo la superficie de agua se colocó una plancha de duropor la cual tiene como objetivo evitar las pérdidas por convección y por evaporación antes de llegar a la temperatura de ebullición. Se mantuvo control de la temperatura sobre la plancha por medio de tres termómetros en lugares diferentes.

- Cuando el agua empezó a hervir, se inició cuenta de tiempo por 10 minutos.

- Cuando pasó el tiempo indicado, se removió de la estufa la plancha con agua y se tomó el dato de su peso final. También se tomó dato de la cantidad de leña que se consumió, esto pesando la leña que no se quemó (removiendo el carbón que pudiera tener) y sustrayéndole del peso original de leña que se introdujo en la cámara de combustión a partir que se empezó el estudio.

- Se introdujo un peso determinado de leña en la cámara de combustión y se colocó sobre la plancha un recipiente con 2 litros de agua.

- Al llegar al punto de ebullición, se tomó tiempo de 15 minutos.

- Se tomó el dato de peso de leña consumida y agua consumida.

- Se repitió el mismo procedimiento pero esta vez con 2 recipientes sobre la plancha y luego con 3.

Con los datos que se obtuvieron anteriormente, se procedió a calcular la eficiencia en cada situación de la siguiente manera:

$$\eta = [m_i \cdot C_p (T_b - T_i) + (m_e \cdot l)] / m_f \cdot B_w$$

Donde:

$\eta$  = eficiencia

$m_i$  = masa inicial de agua (Kg)

$C_p$  = calor específico del agua (4186.8 J/ Kg\*K)

$T_b$  = temperatura de ebullición del agua (K)

$T_i$  = temperatura inicial del agua (K)

$m_e$  = cantidad de agua evaporada (Kg)

$l$  = calor latente de evaporación del agua (2260 J/Kg)

$m_f$  = masa de combustible quemado (Kg)

$B_w$  = contenido calórico de la madera seleccionada (16030000 J/Kg)

Con los datos de eficiencias se procedió a construir gráficas de eficiencia vs. área utilizada sobre la plancha, y es esta curva lo que nos dio la eficiencia termodinámica máxima de la estufa Doña Justa.

La segunda medición de eficiencia que se llevó a cabo es la eficiencia de combustión. Para esto se realizó un análisis Orsat de los gases de chimenea. Como se mencionó anteriormente, se entiende por combustión a la combinación violenta, con desprendimiento de luz y calor, del oxígeno del aire con el carbono, hidrógeno, azufre y nitrógeno. Pero hay que tomar en cuenta para este análisis que en la composición proximal de la madera, ya existe un porcentaje de oxígeno en ella. Por lo tanto el oxígeno que se consumirá primero en la combustión es el mismo de la madera y luego para que la combustión se siga llevando a cabo se utiliza el oxígeno del aire. Debido a limitaciones de reactivos, solo se pudo trabajar con una muestra de 2 estufas.

Al tener ya los datos obtenidos por medio del análisis Orsat, se sabe que para que una combustión sea llevada al 100% de eficiencia, no debería de haber formarse CO. De este modo se determinará que porcentaje del carbono en la madera se está transformando a CO<sub>2</sub>. En base a las ecuaciones de combustión de leña presentadas anteriormente, se determinó la cantidad de energía que se generó y se comparó con la cantidad de energía consumida.

Para conocer el porcentaje de carbono en la madera se aplicó la siguiente ecuación:

$$[c]= (Bw + 230.2)/394.1$$

En donde: [c]= porcentaje de carbono

Bw= contenido calórico de la madera (KJ/Kg)

Por lo tanto, el porcentaje de carbono en el Rithofora Mangle o comúnmente llamado Mangle Rojo, madera seleccionada como combustible, es de 41.26%.

### **3.2 Modelo Experimental**

Para poder utilizar los datos de eficiencias que se han determinado, primeramente se debe de asumir ciertas condiciones al modelo.

a) Presión, temperatura y humedad relativa del ambiente serán siempre valores constantes.

b) La ruta de calor siempre será la misma en todas las estufas que se estudiaron.

c) La composición química y forma física de la leña a utilizar siempre será la misma.

d) El flujo de aire ingresando a la estufa será constante.

e) El tiro de la chimenea siempre será el mismo en todas las estufas, siguiendo el siguiente balance:

$$P_s = D_{est} - P_{din} - P_{res}$$

En donde:  $P_s$  = succión neta ó tiro de la chimenea. (Pa)

$D_{est}$  = succión de la chimenea. (Pa)

$P_{din}$  = pérdida de presión por la dinámica de los gases (Pa)

$P_{res}$  = pérdida de presión por resistencia del factor geométrico de la estufa. (Pa)

f) Las propiedades físicas (densidad, calor específico y conductividad térmica) de los materiales utilizados para la construcción de las estufas serán iguales para todas. Pero se hace notar que no se conocen dichas propiedades.

### 3.3 Análisis de los Datos

Con los datos obtenidos en cada una de las corridas hechas sobre las estufas de cada uno de los tipos de eficiencias, se procedió a calcular la media aritmética de los 10 datos que se van a tener por medio de la siguiente fórmula:

$$X = \frac{\sum x}{n}$$

Donde

X= media aritmética

x= cada dato

n= número de datos

La media de una serie de datos describe el lugar donde se centra la distribución de probabilidad. Pero la media no da una descripción de la forma de la distribución, es por eso que también se calculará la media de variabilidad o varianza. Este dato caracteriza la forma de la distribución, es un parámetro importante que indica la uniformidad de los datos obtenidos. La fórmula para calcular la varianza es la siguiente:

$$\sigma^2 = \sum (x-X)^2$$

Donde

$\sigma^2$ = varianza

X= media aritmética

x= cada dato



## 4. RESULTADOS

A continuación se presentan los resultados que se obtuvieron al aplicar la metodología planteada en el capítulo anterior.

### 4.1 Eficiencia Termodinámica Máxima de la Estufa Doña Justa

A continuación se da una muestra del cálculo de cómo se halló la eficiencia al utilizar 15% del área de la plancha en la estufa 1, corrida 1:

Área utilizada: como se utilizó una olla de 0.13m de diámetro, por lo tanto,

$$A = \pi(0.13\text{m})^2 = 0.054\text{m}^2$$

Área utilizada= Área de ollas/Área total

$$0.054\text{m}^2/0.36\text{m}^2 = 0.15 \cdot 100 = 15\%$$

Masa inicial de H<sub>2</sub>O= 2 Kg

Masa final de H<sub>2</sub>O= 1.94 Kg

Masa evaporada de H<sub>2</sub>O= 2 Kg – 1.94 Kg = 0.06 Kg

Combustible Inicial= 1.2 Kg

Combustible Final= 0.3 Kg

Combustible Consumido= 1.2 Kg – 0.3 Kg= 0.9 Kg

Cambio de Temperatura de Agua= 100 °C – 25 °C = 75 °C

Eficiencia:

$$\eta = [2\text{Kg} \cdot 4186.8\text{J/Kg} \cdot \text{K} (100\text{K} - 25\text{K}) + (0.06\text{Kg} \cdot 2260\text{J/Kg})] / (0.9\text{Kg} \cdot 16030000\text{J/Kg})$$

$$\eta = 0.059 \cdot 100 = 5.9\%$$

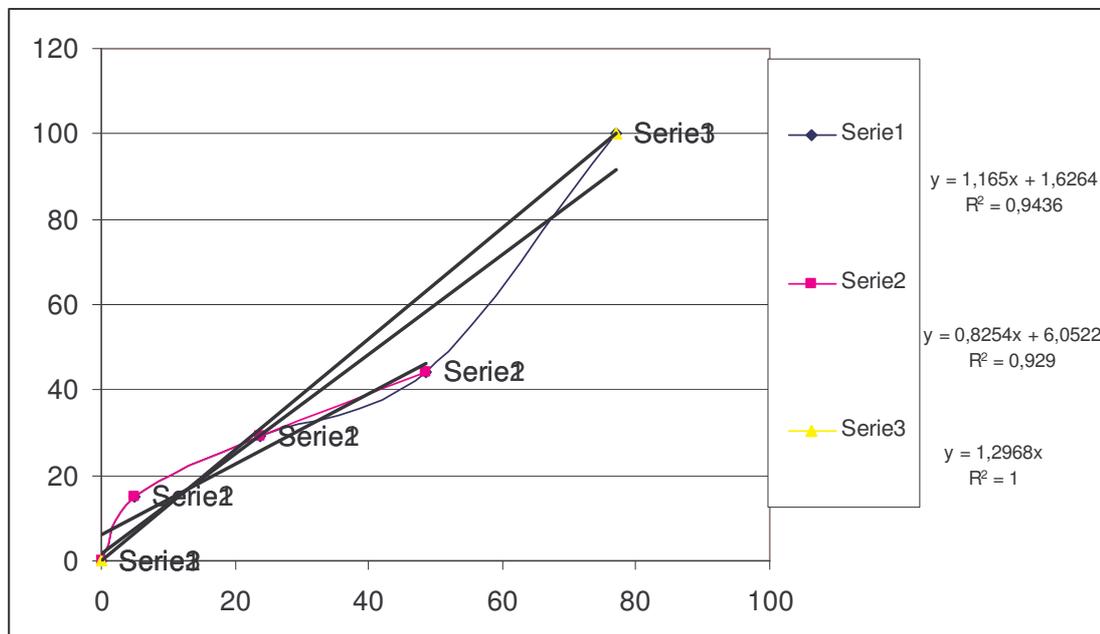
Varianza de los datos utilizando 15% de la plancha=

$$(4.9-5.9)^2 + (4.9-2.95)^2 + (4.9-5.53)^2 + (4.9-5.75)^2 + (4.9-5.2)^2 = 1.17\%$$

**Tabla III.** Datos de eficiencia termodinámica máxima de combustión

Área Utilizada (%)	Masa Inicial de H <sub>2</sub> O (Kg)	Masa Evaporada de H <sub>2</sub> O (Kg)	Combustible Utilizado (Kg)	Eficiencia (%)	Varianza (%)
15	2	0,05	0,95	4,94	1.47
30	4	0,11	0,82	23,81	7.85
45	6	0,15	0,81	48,53	22.35
100	3	0,78	1,34	77,11	47.62

**Figura 2.** Gráfica de eficiencia termodinámica máxima



**Tabla IV.** Temperatura de los gases de combustión a la salida de la estufa

Área Utilizada (%)	Temperatura (°C)
15	172°C
20	170°C
45	181°C
100	159°C

## 4.2 Eficiencia de Combustión de la Estufa Doña Justa

**Tabla V.** Composición de los gases a la salida de la estufa

% de CO <sub>2</sub>	% de O <sub>2</sub>	% de CO	% de H <sub>2</sub> y HCs
32	2	10	56

Reacciones llevadas a cabo durante la combustión:



Sumando los valores de 1 y 3, nos da la energía generada en la combustión: 162818.81 KJ/mol combustible

Cálculo de la eficiencia de combustión: 32% CO<sub>2</sub>/ 41.26% C

Eficiencia de Combustión: 77.55% de conversión de C en CO<sub>2</sub>

## 5. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

En la tabla III se presentan los datos intermedios y finales utilizados para calcular las eficiencias termodinámicas. Se empieza a calcular la eficiencia con 15% de utilización de la plancha, en este caso solamente se tenía una olla sobre la plancha a la cual se le aplicó la metodología anteriormente presentada. Seguidamente se hizo con 2 y con 3, hasta llegar a usar la plancha modificada.

En la columna de porcentaje de eficiencia, siempre en la tabla II, los valores aumentan al aumentar el área utilizada. Se puede apreciar de mejor manera en la figura 1, serie 1, donde la tendencia que presenta esta gráfica es lineal, con un coeficiente de correlación de 0.94, significando que los datos tienen un adecuado ajuste al modelo que explica el fenómeno.

La serie 2 y 3 son ajustes de los datos obtenidos utilizando recipientes y sin utilizar recipientes respectivamente. En la determinación del valor máximo, serie 3, se eliminó el recipiente que impide la transferencia. Esto demuestra la importancia que significa agregar una pared adicional. Al sustraer los valores dados en serie 2 y 3, se demuestra una pérdida de 12.83% de eficiencia al agregar la pared adicional.

Lo anterior muestra que la eficiencia de la estufa Doña Justa es directamente proporcional al área utilizada, y si también se observa la columna de combustible utilizado, se notará que los valores mostrados no tiene una variación notable. Por lo tanto que al suministrar una cantidad de energía dada, la estufa Doña Justa tendrá una eficiencia que estará en función del modo en que se esté utilizando, por lo tanto no cuenta con una eficiencia propia.

La eficiencia termodinámica máxima en este caso es el valor que se obtiene al utilizar el 100% del área superficial de la plancha, nótese que este valor de 77.11% dista mucho del que dio cuando se utilizó el 15% del área superficial de la plancha, 4.94%.

No habiendo modificación alguna en el combustible utilizado, tampoco se nota que haya habido una diferencia considerable en el consumo de energía entre ambos casos, por lo tanto se corrobora nuevamente que la eficiencia de la estufa es una función de su operación en el uso del área disponible de la plancha. Como tal, la estufa no tiene una eficiencia termodinámica única, si no que depende del operador y la forma de operar el equipo, dependiendo del factor de aprovechamiento en función del área disponible que se utilice para cocinar.

Considerando los puntos anteriores, se busca solucionar el hecho de que la estufa Doña Justa no cuenta con una eficiencia única. El problema es que en operación real el utilizar el 100% de la plancha nunca se dará. Entonces se podría considerar un modelo de estufa en la cual la plancha tuviese la figura de las ollas que se utilicen para cocinar los alimentos, ya que de este modo se estaría utilizando el 100% disponible del área para cocinar.

Otro dato que se tomó durante el estudio de campo, fue la temperatura de salida de los gases de combustión en cada una de las corridas, ver tabla IV. La media aritmética de la temperatura de dichos gases fue de 170.5°C. Esta es una temperatura muy alta la cual se podría aprovechar. Una manera de poder aprovechar todo este calor que se pierde en la chimenea es por medio de colocar deflectores a lo largo del paso de los gases de combustión por el interior de la estufa. También se podría colocar un *damp*er en la entrada de la chimenea. Como tercera alternativa podría utilizarse un serpentín alrededor de la chimenea como precalentador de agua para usos domésticos. Aplicando cualquiera de los métodos anteriormente enunciados, se estaría aumentando el tiempo de residencia de los gases entre la estufa, por lo tanto todo ese calor que por el momento se pierde se estaría aprovechando.

La varianza que se muestra en la tabla III nos dice en que porcentaje fueron variando los datos recabados durante la aplicación de la metodología propuesta, nótese que a medida que se va aumentando el área utilizada en la plancha, los datos muestran mayor variabilidad, por lo tanto se asume que esto es debido a las diferencias que hay en la construcción de cada una de las estufas, que a medida que se utiliza más área de plancha la geometría interna de la estufa tendrá variaciones en cada caso y por lo tanto un factor determinante en la distribución de los flujos de calor que se transmiten a la plancha.

En la tabla IV, se dan los valores de la composición de los gases de chimenea encontrados por medio del análisis Orsat descrito anteriormente. A partir de estos porcentajes, se pudo determinar la energía generada a la combustión de un mol de combustible y la eficiencia de combustión que presenta la estufa Doña Justa.

El porcentaje de carbono que tiene el Rithofora Mangle o comúnmente llamado Mangle Rojo, es de 41.26%. Por ley de conservación de la materia, la adición de los porcentajes de dióxido de carbono y monóxido de carbono en los gases de chimenea no puede ser mayor que el porcentaje de carbono en el Mangle Rojo. Como se explicó en capítulos anteriores, para obtener una reacción completa no se desea como producto monóxido de carbono, y para no obtener este producto la cámara de combustión debe permitir el ingreso de suficiente aire como para tener una reacción de combustión completa.

Tras efectuar el análisis de gases de chimenea, se observa un valor de monóxido de carbono, lo que nos indica que la cámara de combustión no está dejando ingresar aire en la proporción deseada. Por lo tanto no se está llevando a su cabalidad la reacción de combustión de madera, pero debido a que fue un porcentaje bajo de monóxido de carbono el que se halló, se considera que la estufa Doña Justa sí tiene una combustión adecuada de la leña que se le suministra.

En tal sentido, se propone una readecuación de la cámara de combustión, de manera que permita un mayor flujo de aire y que también pueda retenerlo por más tiempo, cuidando de que no se tenga entonces, un flujo de aire mayor al requerido, ya que esto solo perjudicaría el proceso de combustión al enfriar las llamas. Esta readecuación a la cámara de combustión, haría que se llevara a cabo en su totalidad la reacción de combustión.

El valor que se obtuvo de eficiencia de combustión es de 77.55%, es un valor lo suficientemente elevado no permitiendo que se oxide parte del dióxido de carbono por la vía de la reacción 2 (ver Cap. 2). Por lo tanto se considera que la estufa Doña Justa tiene un buen rendimiento en la combustión de la leña que se le suministra.

Se muestra también el valor del calor que genera la estufa Doña Justa a la combustión de un mol de Mangle Rojo. Este dato se obtuvo por medio de la comparación con las reacciones dadas en el capítulo 2 de combustión de leña (reacción 1 y reacción 3, Cap. 2).



## CONCLUSIONES

1. La eficiencia termodinámica en la estufa Doña Justa es una función de su operación. Como tal, la estufa no tiene una eficiencia termodinámica única, depende de los requerimientos del área utilizada.
2. La estufa Doña Justa presenta una combustión de leña con un rendimiento elevado, pero, aún así, la estufa es susceptible de mejoras para evitar, en lo posible, las emisiones de monóxido de carbono, a pesar que estas fueron muy bajas.
3. La falta de un método estandarizado para la construcción de la estufa Doña Justa es un impedimento para poder aplicar una metodología que reporte valores precisos, tal y como lo demuestra la varianza.
4. La geometría de plancha que presenta la estufa Doña Justa no permite el aprovechamiento total de la energía que puede suministrar.
5. Haciendo modificaciones al modelo estructural del equipo se prevé la mejora en el funcionamiento y disminución en las pérdidas energéticas por descarga de gases y pérdidas a los alrededores por convección y radiación.



## RECOMENDACIONES

1. Reacomodar una plancha que tenga la forma del contorno de los recipientes que se utilicen para cocinar sobre la estufa, a manera de aumentar superficies de contacto así adquirir eficiencias termodinámicas máximas.
2. Implementar deflectores a lo largo del trayecto de los gases de combustión por el interior de la estufa sin obstruir el paso libre de los gases.
3. Adecuación de un serpentín con agua alrededor de la chimenea, para aprovechar el calor para calentar el agua para propósitos domésticos.
4. Colocar un *damp*er en la entrada de los gases de combustión a la chimenea.
5. Estandarizar la metodología de construcción de las estufas, esto es los materiales que se usa para la construcción y la mano de obra que se utilice.
6. Readecuar la cámara de combustión a manera de poder dejar entrar un flujo de aire adecuado que permita tener una combustión de leña completa entre la cámara.

7. Realizar pruebas de eficiencia que involucren otras variables entre ellas: temperatura interna de la cámara de combustión, volumen de la cámara de combustión y grosor de la placa metálica.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1

Brian Spalding. **Combustión y Transferencia de Masa**. (1ª Edición; México: Compañía Editorial Continental, 1983) p. 7

2

J. Lienhard. **A Heat Transfer Textbook**. (3a Edición; Estados Unidos de América: Phlogiston Press, 2004) p. 34

3

Ibid., p. 57

4

Spalding, Brian, Op. Cit. p. 135

5

William S Janna. **Engineering Heat Transfer**. (2a Edición; Estados Unidos de América: CRC Press, 1999) p. 578

6

Brian Spalding, Op. Cit. p. 10

7

Yunus A Cengel. **Termodinámica**. (México: McGraw Hill Interamericana, 1996) p. 406.

8

Ibid., p. 673

9

Ibid., p. 743

10

Food and Agriculture Organization of the United Nations, Energy Research Centre of Panjab University. **Improved Solid Biomass Burning Cookstoves: A Development Manual.** (Thailand: 1993) p. 4

11

FOCER. **Manual Sobre Energía Renovable: Biomasa.** (Costa Rica: BUN-CA, 2001) p. 78

12

**Website for Environmentally Sound Biomass Stoves**

<http://cookstove.grensy.info/index.html>

13

Food and Agriculture Organization of the United Nations. Op. Cit. p. 33

14

Charles Wereko-Brobby. **Biomasa Conversion and Technology.** (Ghana: UNESCO1996) p. 223

15

Food and Agriculture Organization of the United Nations. Op. Cit. p. 49

## BIBLIOGRAFÍA

1. Bryden, Mark. **Design Principles For Wood Burning Cook Stoves.** EEUU: Aprovecho Research Center, 2002. 115 pp.
2. Ergeneman, A. **Dissemination of improved cookstoves in rural areas of the developing world: Recommendations for the Eritrea dissemination of Improved stoves program.** Master thesis of Public Policy degree. University of California, Berkeley, 2003. 205 pp.
3. FOCER. **Manual Sobre Energía Renovable: Biomasa.** Costa Rica: BUNCA, 2001. 56 pp.
4. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Energy Research Centre of Panjab University; **Improved Solid Biomass Burning Cookstoves: A Development Manual; Regional Wood Energy Development in Asia, Field Document No. 44;** Thailand: FAO, 1993. 125 pp.
5. Juárez, Felipe. **Informe Annual PRODERQUI.** Guatemala: 2002. 18 pp.
6. J. Lienhard IV, J. Lienhard V, A; **Heat Transfer Textbook.** EEUU: Phlogiston Press, 2004. 334 pp.
7. Masera, O. R., **Sustainable Energy Scenarios for Rural Mexico: An Integrated. Evaluation Framework for cooking Stoves.** Tesis de Maestría, Energy & Resources Group, U.C. Berkeley, 1990. 201 pp.
8. Trossero, M. **Dendorenergía: perspectivas de futuro.** México: Unasyva, 2002. 211 pp.
9. Wereko-Brobby, Charles. **Biomasa Conversion and Technology.** Ghana: UNESCO, 1996. 374 pp.
10. Spalding, Brian. **Combustión y Transferencia de Masa.** Primera Edición en Español. México: Compañía Editorial Continental, 1983. 223 pp.

11. Website for Environmentally Sound Biomass Stoves  
<http://cookstove.grensy.info/index.html>

## APÉNDICES

### APÉNDICE 1

**Figura 3.** Vista en perspectiva de la estufa Doña Justa

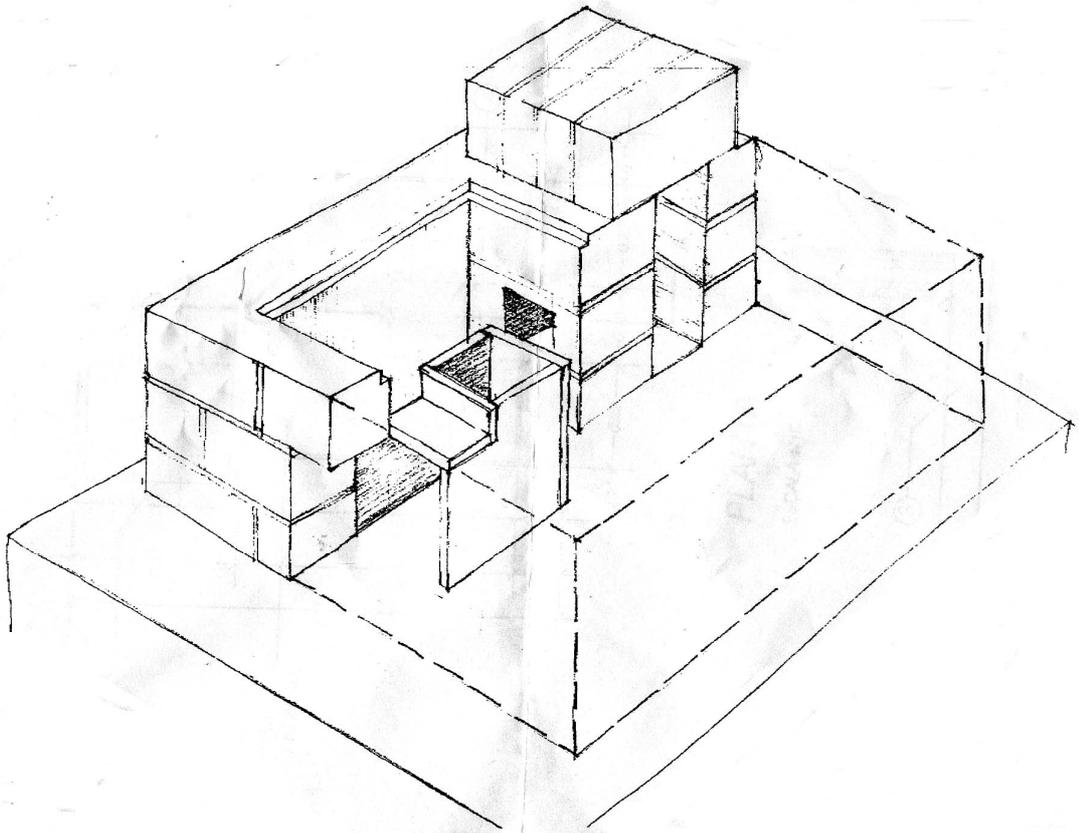
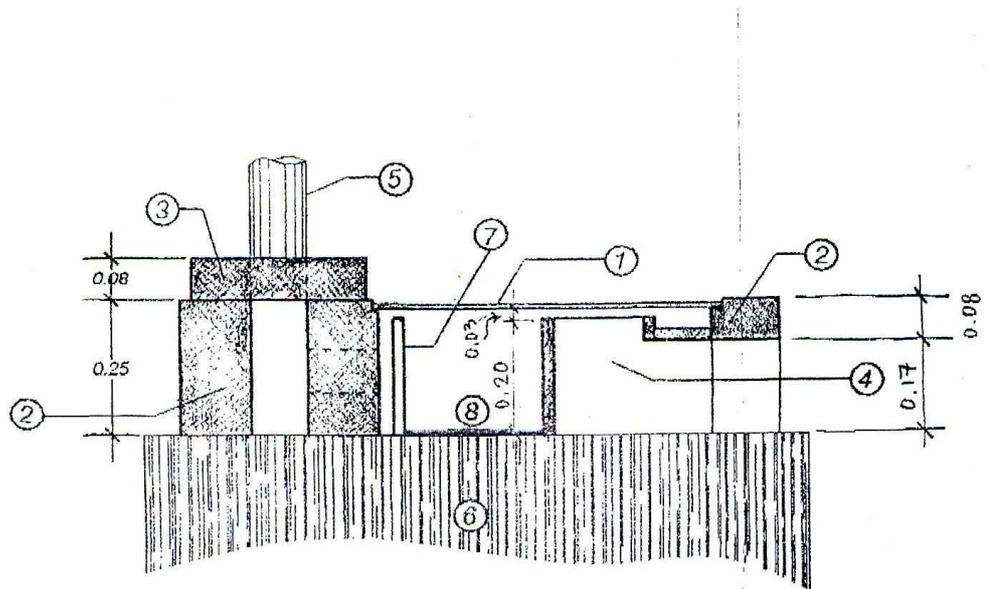


Figura 4. Elevaciones laterales de la estufa Doña Justa



CORTE A-A  
ESCALA 1/10

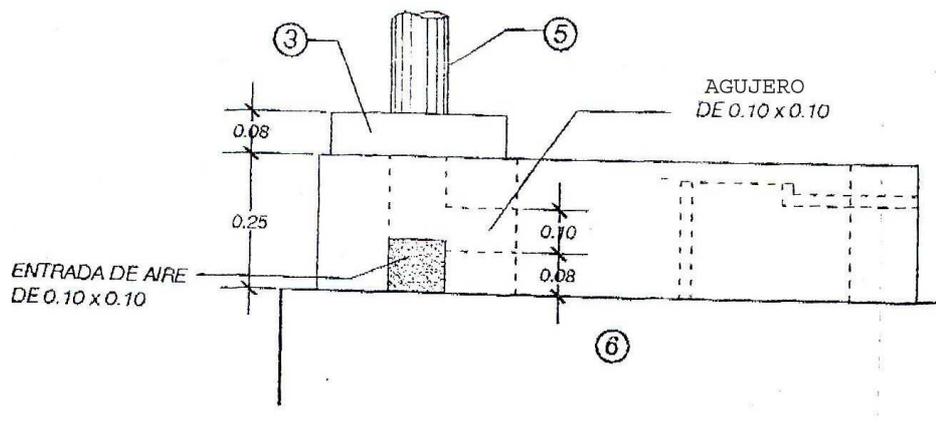


Figura 5. Planta de la Estufa Doña Justa

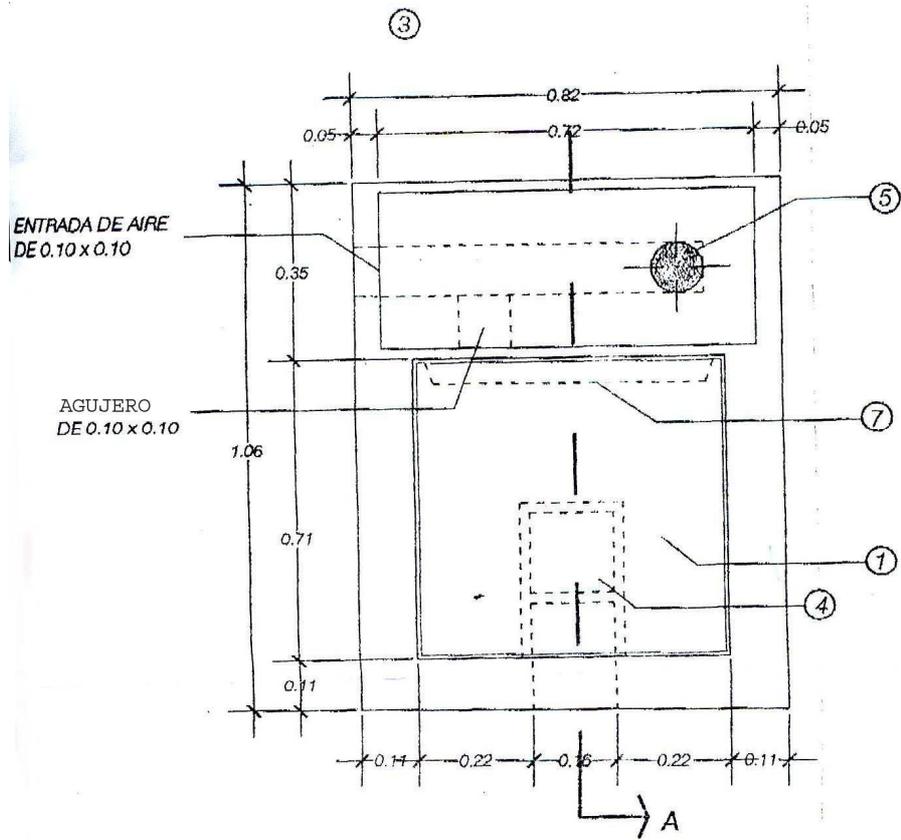
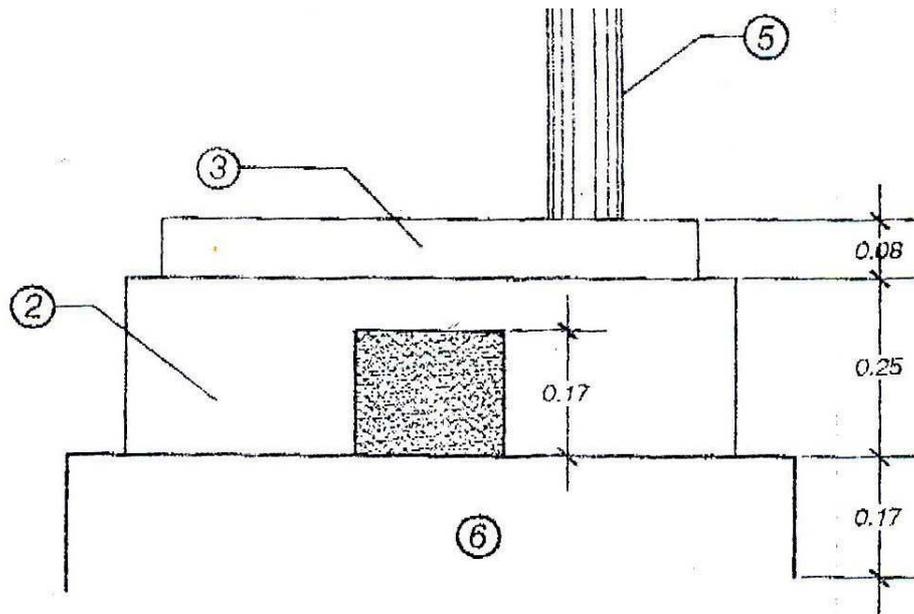
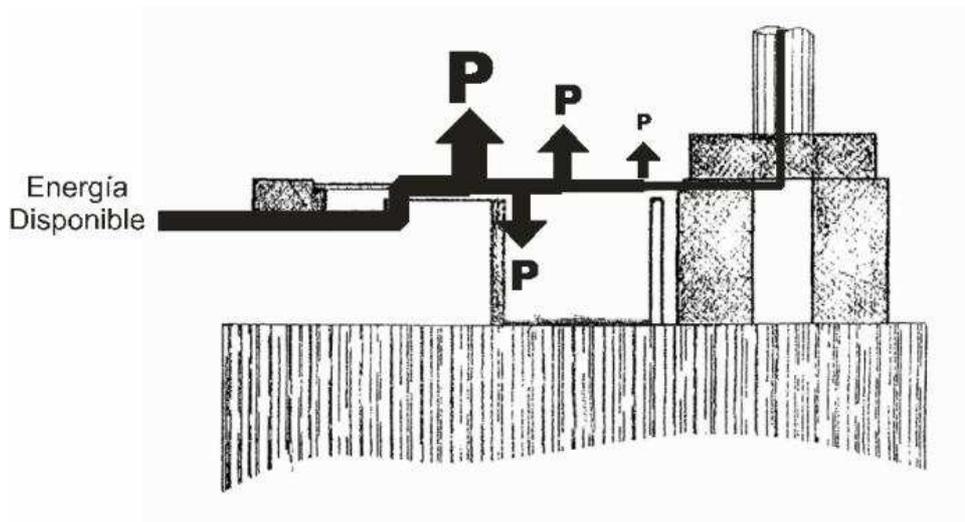


Figura 6. Elevación frontal de la estufa Doña Justa



## APÉNDICE 2

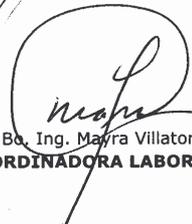
Figura 7. Esquema de las rutas de calor de la estufa Doña Justa



P = Potencia Disponible (Watts)

### APÉNDICE 3

## Resultado del análisis de poder calorífico del Rithofora Mangle ó Mangle Rojo

<b>LABORATORIO TECNICO</b>	<b>MINISTERIO DE ENERGIA Y MINAS REPUBLICA DE GUATEMALA</b>	<div style="text-align: right;"><b>MEM</b></div> PAGINA 1 DE (1) LAB-REP-981-05 ORDEN No. L-452-05 GUATEMALA, 14-09-05	
<b>RESULTADOS DE ANALISIS</b>			
MUESTRA: <b>Madera</b> PRESENTADA POR: Sebastián del Valle RESPONSABLE DEL MUESTREO: Desconocido PROCEDENCIA: Sebastián del Valle LOCALIZACION: 8a. Calle Oriente, Antigua FECHA DE MUESTREO: Desconocida FECHA DE RECEPCION DE MUESTRA Y PAPELERIA: 12-09-05 FECHA DE ANALISIS: del 13 al 14-09-05 PRECIO DE ANALISIS: \$ 12.00 ANALISTA: Hugo Argueta			
<b>DESCRIPCION</b>	<b>METODO DE ANALISIS</b>	<b>ESPECIFICACION</b>	<b>RESULTADO (a)</b>
PODER CALORIFICO, MJ/kg	ASTM D-240	-----	16.03
<b>OBSERVACIONES:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>a) El resultado es válido solo para el volumen de muestra presentada en este laboratorio.</li> <li>b) 16.03 MJ/Kg es igual a 3829 Kcal/Kg y a 6892 Btu/lb.</li> </ul>			
<div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;"> <div style="text-align: center;">                       Ing. Julio Villacinda  <b>SECCION DE HIDROCARBUROS</b> </div> <div style="text-align: center;">  </div> </div> <div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center; margin-top: 20px;"> <div style="text-align: center;">                       Vo. Bn. Ing. Mayra Villatoro  <b>COORDINADORA LABORATORIOS TECNICOS</b> </div> <div style="text-align: center;">  </div> </div>			

## APÉNDICE 4

### Datos de la investigación de campo

**Tabla VI.** Datos termodinámicos de la estufa 1

Área Utilizada (%)	Masa Inicial de H <sub>2</sub> O (Kg)	Masa Evaporada de H <sub>2</sub> O (Kg)	Combustible Utilizado (Kg)	Eficiencia (%)
15	2	0.05	0.95	5.90
		0.051	0.98	
30	4	0.11	0.82	25.60
		0.11	0.85	
45	6	0.15	0.81	53.12
		0.17	0.85	
100	3	0.78	1.34	78.70
		0.8	1.33	

Temperatura de salida de los gases: 172°C

**Tabla VII.** Datos termodinámicos de la estufa 2

Área Utilizada (%)	Masa Inicial de H <sub>2</sub> O (Kg)	Masa Evaporada de H <sub>2</sub> O (Kg)	Combustible Utilizado (Kg)	Eficiencia (%)
15	2	0.04	1.2	2.95
		0.05	1.0	
30	4	0.09	0.78	20.43
		0.11	0.8	
45	6	0.15	0,8	49.80
		0.15	0.8	
100	3	0.83	1,3	84.79
		0.85	1.28	

Temperatura de salida de los gases: 170°C

**Tabla VIII.** Datos termodinámicos de la estufa 3

Área Utilizada (%)	Masa Inicial de H <sub>2</sub> O (Kg)	Masa Evaporada de H <sub>2</sub> O (Kg)	Combustible Utilizado (Kg)	Eficiencia (%)
15	2	0.05	0.8	5.53
		0.05	0.78	
30	4	0.11	0.90	21.64
		0.15	0.88	
45	6	0.13	0,85	40.62
		0.10	0.85	
100	3	0.85	1,40	80.63
		0.85	1.35	

Temperatura de salida de los gases: 181 °C

**Tabla IX.** Datos termodinámicos de la estufa 4

Área Utilizada (%)	Masa Inicial de H <sub>2</sub> O (Kg)	Masa Evaporada de H <sub>2</sub> O (Kg)	Combustible Utilizado (Kg)	Eficiencia (%)
15	2	0.065	1	5.75
		0.06	0.90	
30	4	0.12	0.78	27.24
		0.10	0.80	
45	6	0.15	0,80	49.80
		0.20	0.85	
100	3	0.77	1,35	75.75
		0.80	1.35	

Temperatura de salida de los gases: 172 °C

**Tabla X.** Datos termodinámicos de la estufa 5

Área Utilizada (%)	Masa Inicial de H <sub>2</sub> O (Kg)	Masa Evaporada de H <sub>2</sub> O (Kg)	Combustible Utilizado (Kg)	Eficiencia (%)
15	2	0.05	0.85	5.20
		0.05	0.85	
30	4	0.11	0.80	24.34
		0.10	0.85	
45	6	0.14	0,80	46.48
		0.15	0.80	
100	3	0.65	1,30	66.40
		0.65	1.30	

Temperatura de salida de los gases: 159 °C

**Tabla XI.** Datos de combustión de la estufa 4

% de CO <sub>2</sub>	% de O <sub>2</sub>	% de CO	% de H <sub>2</sub> y HCs
34	2	12	52

**Tabla XII.** Datos de combustión de la estufa 5

% de CO <sub>2</sub>	% de O <sub>2</sub>	% de CO	% de H <sub>2</sub> y HCs
30	2	8	60