



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE CIENCIAS

ESTUDIO COMPARATIVO DE EFICIENCIA
ENERGÉTICA PARA ESTUFAS MEJORADAS
DE LEÑA Y SUS IMPLICACIONES
AMBIENTALES

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

FÍSICA

PRESENTA:

ALEJANDRA STRAFFON DÍAZ



DIRECTOR DE TESIS:

DR. OMAR RAÚL MASERA CERUTTI

2009



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

1. Datos del alumno

Straffon

Díaz

Alejandra Elodia

55733848

Universidad Nacional Autónoma de México

Facultad de Ciencias

Física

301265889

2. Datos del tutor

Dr

Omar Raúl

Masera

Cerutti

3. Datos del sinodal 1

Dr

Marco Antonio

Martínez

Negrete

4. Datos del sinodal 2

Dra

Claudia

Sheinbaum

Pardo

5. Datos del sinodal 3

Dr

Víctor Manuel

Berrueta

Soriano

6. Datos del sinodal 4

Dr

Fabio Luigi

Manzini

Poli

7. Datos del trabajo escrito

Estudio comparativo de eficiencia energética para estufas mejoradas de leña y sus implicaciones ambientales

137 p

2009

Resumen

En México la leña es usada por más de 27 millones de habitantes tanto en el sector rural como el urbano; principalmente en las zonas rurales, la leña tiene como principal función ser el combustible para la cocción de los alimentos.

El uso de la leña mediante los fogones tradicionales tiene asociados diversos problemas de índole social y ambiental, tales como contaminación en el interior de los hogares, accidentes, excesivo tiempo de recolección, impactos en el ambiente local y global como la deforestación y la contaminación atmosférica, entre otros. La baja eficiencia energética de los dispositivos tradicionales de cocción es uno de los mayores problemas que enfrentan los usuarios. Desde hace muchos años la comunidad nacional e internacional, ha realizado esfuerzos por desarrollar diseños de estufas mejoradas que combatan estos problemas, sin embargo, los beneficios asociados a estos nuevos diseños necesitan ser evaluados en nuestro país.

El presente estudio contribuye con el análisis del desempeño energético de 4 modelos de estufa mejorada: *Citlalli*, *Mexalit M-20*, *Onil* y *Patsari*, que se están difundiendo en México y el fogón tradicional. Fueron realizadas 2 pruebas de laboratorio, la Prueba de Ebullición de Agua y la Prueba de Cocinado Controlado, las metodologías empleadas han sido analizadas y enriquecidas en este trabajo, bajo la premisa central de que el funcionamiento de las estufas de leña es un proceso dependiente del tiempo y por tanto, los parámetros de medición deben reflejar la naturaleza del objeto de estudio además de la transferencia efectiva de calor hacia

los alimentos.

Dos de los modelos de estufa evaluados, el Mexalit M-20 y el Citlalli, presentan graves deficiencias de diseño que limitan la transferencia de calor a los alimentos.

Los resultados muestran que todos los modelos de estufa mejorada ahorran entre un 30 y 44 % de leña respecto al fogón, para el cocinado de tortillas, hecho que se encuentra relacionado con los ahorros que estos modelos podrían tener en condiciones de funcionamiento real. El tamaño de la cámara de combustión determina la velocidad de quemado y potencia máximas de un dispositivo y por consiguiente la duración de las tareas de cocinado. La transferencia de energía a los alimentos es mayor en los modelos que cuentan con diseño en la cámara de combustión hecha de materiales aislantes así como relleno interior. En general, la temperatura de la cámara de combustión está estrechamente relacionada con la completez de la combustión y la calidad de las emisiones ambientales.

Las pruebas de laboratorio analizadas en este estudio, muestran las deficiencias y virtudes de cada uno de los modelos. Se incorporan recomendaciones de diseño, ya que todos los diseños son perfectibles. Sin embargo, es necesario realizar también pruebas de desempeño energético en campo para validar los resultados aquí presentados, como los perfiles de temperatura y la velocidad de transferencia de energía al agua, para conocer con mayor certeza el desempeño de los dispositivos en condiciones reales de uso.

Índice general

1. Introducción	9
2. Marco teórico	14
2.1. Descripción del sistema termodinámico	14
2.2. Dinámica de los gases en una estufa de leña	16
2.2.1. El efecto de tiro de la chimenea	16
2.2.2. Convección natural	17
2.3. El proceso de combustión de la leña	19
2.3.1. La leña como combustible	21
2.3.2. La combustión de leña como proceso térmico	23
2.3.3. Emisiones debidas a la combustión de la leña	26
2.4. Transferencia de calor	30
2.4.1. Conducción	31
2.4.2. Convección	35
2.4.3. Radiación	39
2.4.4. Análisis de transferencia de calor del sistema de estudio	40
2.4.5. Eficiencia energética	41

3. Metodología	46
3.1. Pruebas experimentales	47
3.1.1. Desarrollo experimental	49
3.1.2. Prueba de Ebullición de Agua	51
3.1.3. Prueba de Cocinado Controlado	56
3.1.4. Análisis de temperaturas	58
3.1.5. Análisis de emisiones ambientales	60
3.2. Descripción de los dispositivos de cocción	63
3.2.1. Fogón tradicional de 3 piedras	63
3.2.2. Estufa Citlalli	65
3.2.3. Estufa Mexalit M-20	67
3.2.4. Estufa Onil	68
3.2.5. Estufa Patsari	69
4. Resultados	73
4.1. Prueba de Ebullición de Agua	73
4.1.1. Fase de alta potencia con inicio frío	73
4.1.2. Fase de alta potencia con inicio caliente	76
4.1.3. Fase de baja potencia o fuego lento	79
4.1.4. Análisis de temperaturas	82
4.2. Prueba de Cocinado Controlado	93
4.2.1. Análisis de temperaturas	95
4.2.2. Análisis de emisiones ambientales	98
5. Discusión	101
5.1. Prueba de Ebullición de Agua	101

5.2. Prueba de Cocinado Controlado	113
6. Conclusiones y perspectivas	119
A. Datos	124
Nomenclatura	127
Bibliografía	130

Capítulo 1

Introducción

Actualmente la biomasa representa el 10 % de la energía consumida en el mundo, de ese consumo, aproximadamente el 90 % es usado de forma tradicional en el cocinado y calentamiento de los hogares en los países en desarrollo. Las necesidades domésticas conforman la principal demanda de combustible en estos países, particularmente en zonas rurales, donde vive la mitad de la población mundial, lo que significa que la biomasa es la fuente principal de energía para la mayor parte de la humanidad [1].

Tradicionalmente estos combustibles han sido quemados con una eficiencia energética y de combustión muy pobre, aunado a condiciones de poca ventilación y con dispositivos inadecuados. Esto ha resultado en problemas de salud humana debidos a la contaminación intramuros, presión sobre los ecosistemas naturales y un tiempo excesivo destinado a la recolección del combustible [2, 3].

La Organización Mundial de la Salud (OMS) indica que la contaminación intradomiliar debida al uso de combustibles sólidos, es la décima mayor causa de riesgo a la salud en el mundo, en términos de años de vida perdidos, y es la responsable de 0.8 a 2.4 millones de muertes prematuras cada año en el mundo. Sin embargo, para países en desarrollo se estima

que el humo intramuros es la cuarta causa de riesgo mortal [4].

Las mujeres junto con los niños pequeños, suelen pasar desde 3 hasta 7 horas al día junto al dispositivo de cocción [4, 5]. Por esta razón, son los principales afectados por los efectos nocivos del humo, desarrollando principalmente infecciones respiratorias agudas, que en niños menores de 5 años ocasionan cerca de 1.2 millones de muertes prematuras al año [6, 7, 8]. Diversos estudios muestran que los niveles de contaminación intradomiciliaria debidos al uso de combustibles sólidos, como la leña, son mayores que los niveles ambientales (extradomiciliarios), incluso de las ciudades más grandes y contaminadas del mundo [1, 9, 8].

En términos ambientales la quema de biomasa contribuye al calentamiento global, incluso cuando ésta sea considerada como un recurso renovable, y las emisiones de bióxido de carbono, debidas al proceso de combustión, se compensen con la absorción de bióxido de carbono durante el crecimiento de ésta. Una razón para esta contribución, es que algunos de los productos de la combustión incompleta, como el metano y las partículas de carbono negro, son contaminantes de efecto invernadero de mayor potencial de calentamiento que el bióxido de carbono [10, 11, 12, 13].

Aunque la biomasa utilizada tradicionalmente por los dispositivos de cocción pueda ser neutral en carbono, en términos de Gases de Efecto Invernadero (GEI) no es neutral, a menos que la biomasa sea quemada de manera eficiente en un proceso de combustión completa. La quema eficiente de la biomasa es por sí misma, una disminución de GEI, incluso en lugares donde el consumo de leña no parta de un cultivo renovable, debido a que reduce las emisiones de metano y partículas que se producirían por una combustión incompleta [4, 10, 11]. Se estima que en México las emisiones de CO_2 equivalente, debidas a la quema de leña no renovable, representan menos del 1% de las emisiones totales anuales para el año 2002 [14].

Aunque en términos absolutos la contribución al cambio climático debida al uso de biomasa residencial es minoritaria (Smith estima que 4% de las emisiones totales), es importante

sin embargo optimizar el desempeño energético de los dispositivos de cocción basados en la quema de biomasa, no sólo por su contribución en emisiones de GEI, sino por la mejora en la calidad de vida de los usuarios. La situación de cambio climático actual es el resultado del uso mundial de combustibles fósiles, y esa tendencia es la que debe ser revertida, no el consumo rural de biomasa.

El Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) reconoce que si la demanda de energía mundial se mantiene en la tasa de aumento actual, los riesgos de efectos adversos sobre los ecosistemas y la salud humana se profundizarán [4].

Las razones antes expuestas plantean el reto de incrementar la eficiencia energética y satisfacer la demanda del recurso energético promoviendo formas de energía sustentable que reduzcan o eliminen las emisiones dañinas [4]. La introducción de nuevas tecnologías para la cocción rural avanza en esta dirección, múltiples estudios muestran que es posible tener un triple beneficio: reducir el consumo de combustible, disminuir las emisiones de GEI y aminorar los efectos dañinos de la combustión en la salud humana [10, 15, 16, 17].

Sin embargo, el diseño de una estufa mejorada de leña no es sencillo, los procesos de combustión y de transferencia de calor, aunados a las geometrías específicas y las condiciones de frontera, son muy complejos. En una estufa de leña ocurre la superposición de fenómenos de transporte de masa y energía; transferencia de calor por convección, conducción y radiación, así como reacciones químicas; todos estos procesos son irreversibles y fuera de equilibrio [18].

Las estufas de leña plantean retos teóricos importantes en el campo de las ciencias físicas, la termodinámica de procesos irreversibles como en el caso del proceso de combustión, la ciencia de materiales y la mecánica de fluidos; tienen mucho que estudiar en vista a aportar recomendaciones relevantes para el desarrollo tecnológico de estos dispositivos.

En México se estima que para el año 2000 habrían 27.5 millones de personas usuarias de leña, de las cuales el 89 % es población rural que usa la leña como principal combustible para

la cocción de sus alimentos, mientras que los usuarios de leña en zonas urbanas representan el 11 % [19]. El Balance Nacional de Energía 2007 reconoce que 2.3 % de la producción de energía primaria nacional proviene de la leña [20].

En las zonas rurales de nuestro país más del 80 % de los hogares utilizan el fogón tradicional de 3 piedras [21], es por ello que deben impulsarse mayores esfuerzos por parte de la comunidad científica nacional para aportar propuestas de diseño acordes con las necesidades locales, que se traduzcan en beneficios sociales y ambientales.

Dentro de los esfuerzos nacionales encaminados a desarrollar estufas de leña mejoradas se encuentra el *Proyecto Patsari*, que inició en el año 2003 y continúa hasta la fecha. Este proyecto contó con la colaboración de diversas instituciones y centros de investigaciones nacionales e internacionales, y tuvo dentro de sus resultados el perfeccionamiento de la estufa *Patsari* [3], la cual junto con las estufas mejoradas *Citlalli*, *Mexalit M-20* y *Onil*, forma parte de los 4 modelos de estufa mejorada evaluados en el presente trabajo.

Dentro de la coyuntura nacional actual, el Programa Estratégico de Cambio Climático (PECC) establece la meta para el 2012 de construir 500 mil estufas ahorradoras de leña. La necesidad total estimada es de cuatro millones en el país. Este año en un esfuerzo integral la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR), la Secretaría de Desarrollo Social (SEDESOL) y la Comisión Nacional para el Desarrollo de los Pueblos Indígenas (CDI), invirtieron 185 millones de pesos para el establecimiento de 120 mil estufas ahorradoras de leña en todo el país [22].

Los compromisos gubernamentales de impulsar la masificación de estufas mejoradas en nuestro país, no tendrán los resultados esperados si no se basan en una evaluación comparativa entre los diferentes modelos que se diseminan, con lo cual se corre el riesgo de implementar estufas no validadas ni reconocidas por la comunidad científica y social. Este trabajo contribuye a la evaluación energética de las estufas mejoradas, como un elemento fundamental

de una evaluación más integral en la que se incluyan las percepciones y necesidades de los usuarios.

La organización del contenido del presente trabajo empieza con la exposición de los fenómenos físicos básicos que ocurren en una estufa de leña, entendida ésta como sistema termodinámico, expuestos en el Capítulo 2. En el Capítulo 3, se describen los protocolos experimentales empleados así como los parámetros de desempeño energético que conforman el cuerpo de este estudio, mientras que en el Capítulo 4 se muestran los resultados de las pruebas experimentales y se enuncian algunas de las relaciones entre dichos parámetros. El Capítulo 5 retoma los resultados del capítulo previo e intenta sintetizar el desempeño energético de los dispositivos de cocción a través de un análisis multicriterio, además hace una delimitación del horizonte de los mismos con base a resultados previos reportados en la literatura nacional e internacional. Finalmente, el Capítulo 6 pretende hacer un balance general de los resultados obtenidos, en vista a la mejora de los diferentes diseños y abre hacia el futuro la posibilidad de realizar pruebas que sean enriquecidas con los resultados presentados en este estudio.

Capítulo 2

Marco teórico

2.1. Descripción del sistema termodinámico

Una estufa de leña es un dispositivo termodinámico que tiene como objetivo convertir en calor útil la mayor parte del calor que se libera por la combustión de la leña, entendiendo por calor útil el que es usado directamente para la cocción de algún alimento.

Los 4 modelos de estufa de leña que se estudian presentan diferencias en sus materiales, dimensiones y diseño, sin embargo a todos ellos es posible caracterizarlos de manera general. Podemos decir que una estufa de leña consta de una cámara de combustión, un comal principal o plancha (que está sobre la cámara de combustión), un comal o comales secundarios (que se encuentran más alejados de la cámara de combustión), un túnel y una chimenea. Algunas estufas de leña sustituyen el uso de comales por una plancha rectangular, ver figura 2.1.

La cámara de combustión cuenta con una entrada para leña, mediante la cual pasa el aire permitiendo que ocurra el proceso de combustión; en esta cámara es donde se quema la leña y se producen los gases de la combustión. Los gases producidos se elevan debido a un

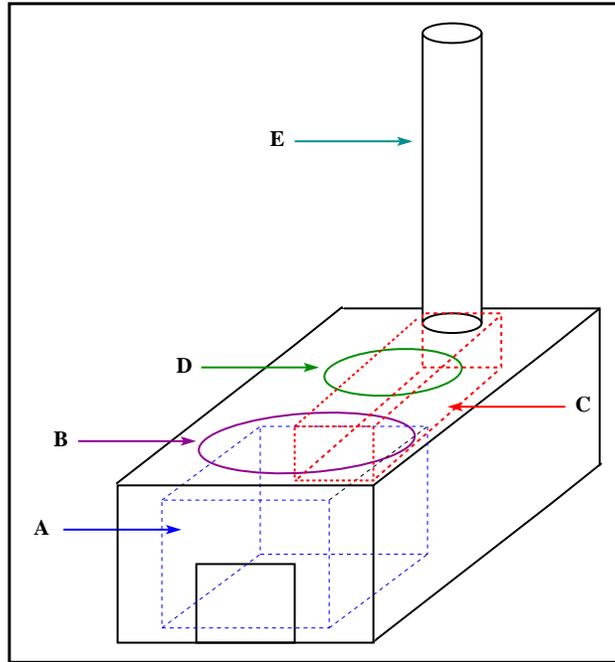


Figura 2.1: Estufa de leña. Cámara de combustión (A), comal principal (B), túnel interior (C), comal secundario (D), chimenea (E).

gradiente de densidad hasta entrar en contacto con el comal principal y luego viajan por el interior de la estufa (túnel) calentando también los comales secundarios o la superficie de la plancha para finalmente escapar por la chimenea.

Dentro de una estufa de leña ocurren, muchas veces de manera simultánea, fenómenos diversos como transporte de masa, momento y energía, mediante la transferencia de calor por conducción, convección y radiación, además de cambios de fase y reacciones químicas. Todos estos procesos ocurren fuera de equilibrio térmico y son irreversibles [5].

Este sistema termodinámico trabaja entre dos fuentes de calor, una caliente y una fría. La fuente caliente de calor es debida a la combustión de la leña y está localizada en la cámara

de combustión de la estufa, mientras que la fuente fría es el medio ambiente o baño térmico en el que está sumergida la estufa.

El calor de combustión proviene de la energía solar almacenada como energía química en los constituyentes de la leña, resultado de reacciones fotosintéticas. Los compuestos orgánicos principales de la leña son la celulosa y la lignina que a su vez son largas cadenas de oxígeno, hidrógeno y carbono [23, 24].

Para describir los fenómenos termodinámicos básicos que ocurren en una estufa de leña, se analizarán primero los mecanismos físicos que provocan la dinámica de los gases dentro de la estufa, posteriormente se discutirá el proceso de combustión de la leña y finalmente se analizarán los mecanismos de transferencia de calor.

2.2. Dinámica de los gases en una estufa de leña

El movimiento que los gases de la combustión realizan dentro de la estufa se explica a través de 2 fenómenos físicos básicos: el efecto de tiro de la chimenea, que ocurre por un gradiente de presión y ocurre incluso con la estufa sin encender provocando un flujo ascendente y, la convección natural debida a las fuerzas boyantes dentro del fluido, este segundo fenómeno requiere de un gradiente de temperatura que en este caso es provocado por la combustión de la leña y también tiene como resultado un flujo ascendente. En los siguientes apartados se describen a detalle estos fenómenos.

2.2.1. El efecto de tiro de la chimenea

El efecto de tiro de la chimenea se explica con el Principio de Bernoulli, que describe el comportamiento de un fluido ideal (sin viscosidad) e incompresible moviéndose a lo largo de una línea de corriente [25]. El aire puede aproximarse mucho a un fluido ideal debido a su

baja viscosidad cinemática ($\nu = 1.51 \times 10^{-5} \frac{m^2}{s}$ a $20^\circ C$) además de que el flujo dentro de la chimenea es incompresible.

El Principio de Bernoulli es una consecuencia de la conservación de la energía y se expresa en la siguiente ecuación:

$$p + \frac{1}{2}\rho v^2 + \rho g z = \text{constante}, \quad (2.1)$$

donde p es la presión a lo largo de la línea de corriente, ρ es la densidad del fluido, v es la velocidad del fluido a lo largo de la línea de corriente, g es la gravedad y z es la altura en la dirección vertical desde un punto de referencia arbitrario. La ecuación anterior muestra la relación entre la presión y la velocidad para el fluido a lo largo de una línea de corriente. Las chimeneas utilizan el hecho de que la velocidad del viento es elevada a mayores alturas, así cuanto más rápidamente sopla el viento en la boca de ellas, más baja será la presión en ese punto y mayor el gradiente de presiones entre la boca y la base de la chimenea. Este gradiente de presión ocasiona un movimiento de los gases de combustión hacia la zona de menor presión provocando que éstos fluyan hacia el exterior del hogar donde se encuentra la estufa, independientemente de que ésta se encuentre encendida o no.

2.2.2. Convección natural

El segundo fenómeno que produce el movimiento de los gases dentro de la estufa se debe a la convección natural. En la convección natural el movimiento del fluido se debe a las fuerzas boyantes dentro de él, que son ocasionadas por la presencia combinada de un gradiente de densidad en el fluido y una fuerza de cuerpo que es proporcional a la densidad [26].

Para el caso de la estufa, el gradiente de densidad en el fluido se debe a la diferencia de temperaturas que ocasiona la combustión de la leña pues en dicho proceso el aire cercano a la flama se calienta y expande ocasionando una disminución relativa de su densidad respecto

al aire menos cercano a la flama. Esta disminución en la densidad del elemento de fluido caliente provoca que éste flote debido al Principio de Arquímedes, sin embargo el elemento de fluido caliente al subir se enfría, debido a que transfiere parte de su energía térmica a sus alrededores, provocando un aumento relativo en su densidad y por lo tanto un posterior descenso, ocasionando así un patrón de circulación también conocido como celda convectiva. La circulación se debe a que la fuerza gravitacional actúa sobre todos los elementos de fluido y es proporcional a la densidad de éstos [26, 27].

El proceso de combustión de la leña, en el que se profundizará más adelante (sección 2.3), es una reacción química violenta, por lo que es un fenómeno no estacionario y fuera de equilibrio que provoca un flujo turbulento. Como el gradiente de temperatura entre la flama y el fluido que la rodea es muy alto, la convección natural es turbulenta también [28].

El efecto total del movimiento de los gases dentro de la estufa cuando ésta se encuentra encendida, es la combinación de los dos fenómenos antes descritos: el efecto de tiro de la chimenea y la convección natural turbulenta. Tenemos que el patrón de circulación debido a la convección natural se modifica cuando consideramos también el flujo ascendente que provoca el tiro de la chimenea, por lo que no todos los elementos de fluido caliente alcanzan a descender, sino que se mueven a lo largo del túnel interior de la estufa llegando a los comales para después llegar a la chimenea, al mismo tiempo que se enfrían y transfieren su calor a los alrededores. El diseño de las estufas debe considerar este efecto combinado a fin de obtener la máxima transferencia de calor por los gases en movimiento hacia los comales o plancha.

Cuando el flujo es originado por una condición de forzamiento externa se dice que la transferencia de calor ocurre por convección forzada [26], en este caso debido al tiro de la chimenea.

2.3. El proceso de combustión de la leña

El proceso de combustión de la leña es importante para este estudio desde 2 puntos de vista, primero porque es la fuente de energía del sistema y segundo porque en la combustión hay una relación intrínseca entre la temperatura del proceso y las reacciones químicas que producen los diferentes productos de la combustión (gases, carbón y ceniza), por lo que la calidad de las emisiones está relacionada con la temperatura de la flama y la calidad de la combustión.

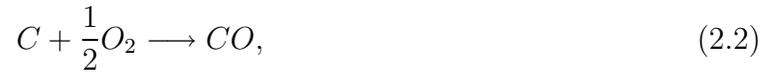
La combustión es una reacción química exotérmica y por tanto irreversible en la que un elemento combustible, en este caso la leña, se combina con otro comburente (generalmente oxígeno en forma de O_2 gaseoso), desprendiendo calor y produciendo un óxido (ceniza) [29].

La calidad de la combustión se refiere a los productos que ésta genera. Se dice que la combustión es completa cuando los únicos productos son: agua (H_2O) y bióxido de carbono (CO_2), por lo que hay un máximo aprovechamiento de la energía química contenida en la leña. Sin embargo, todas las reacciones químicas son en cierta medida incompletas [29], es decir, los reactantes no son íntegramente convertidos en productos de la combustión completa. Las siguientes condiciones son necesarias para que se produzca combustión completa [2]:

1. Una temperatura lo suficientemente alta como para que las reacciones de combustión ocurran.
2. Una cantidad suficiente de oxígeno mezclado con los gases producto de la combustión.
3. Suficiente tiempo de permanencia de los componentes del combustible bajo las 2 condiciones antes mencionadas.

La combustión incompleta ocurre cuando alguna de estas 3 condiciones no es satisfecha, lo cual ocurre regularmente en los sistemas reales, sin embargo, la combustión completa es un

proceso ideal que sirve de referencia y objetivo para los fuegos de las estufas de leña. En la combustión incompleta de la leña, el carbono (C) reacciona de la siguiente forma:



en vez de,



por lo que la generación de monóxido de carbono (CO) es la primer evidencia de una combustión incompleta, asociada a una deficiencia en la cantidad de oxígeno (O) y/o a la mala mezcla de los gases.

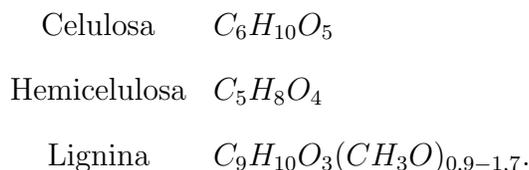
Las condiciones adecuadas para que ocurra la combustión completa de las diferentes especies químicas varían con la temperatura, por ejemplo, el monóxido de carbono (CO) requiere $607\text{ }^\circ\text{C}$ para arder y lograr una oxidación completa mientras que el metano (CH_4) necesita $538\text{ }^\circ\text{C}$ [2].

Desde el punto de vista energético, los diseños de las estufas deben buscar satisfacer los requerimientos para la combustión completa a fin de evitar pérdidas energéticas debidas a la generación de productos de la combustión incompleta (PCI's), que se traducen en :

1. Contaminación intramuros, la cual incluye una amplia gama de hidrocarburos dentro de los que se encuentran los poliaromáticos, conocidos por su toxicidad y potencial carcinogénico.
2. Contaminación ambiental, relacionada con la producción de Gases de Efecto Invernadero (GEI) entre los que destacan el monóxido de carbono (CO), el bióxido de carbono (CO_2) y el metano (CH_4), además de otros compuestos como hidrocarburos no metálicos (HCM) y partículas de materia (PM), los cuales tienen también asociado un potencial de calentamiento global.

2.3.1. La leña como combustible

La leña es un combustible de origen vegetal, seguramente el que por más tiempo ha acompañado a la humanidad. Sus principales constituyentes son la celulosa, la hemicelulosa y la lignina, el resto es resina y minerales. La forma química de estos constituyentes es [23]:



Estos constituyentes son complejos compuestos orgánicos formados básicamente de 3 elementos: carbono, hidrógeno y oxígeno. La composición de la mayoría de especies de leña seca muestra que ésta se compone de 50 % de carbono, 43 % de oxígeno y 6 % de hidrógeno [30].

La energía química contenida en la leña es el resultado de los enlaces de carbono que conforman el tejido vegetal [24]. Sin embargo, esta energía contenida en la leña también conocida como valor calorífico, no varía demasiado entre las diferentes especies de árboles [31], para leña seca resinosa es de 20.1 MJ/kg y 18.2 MJ/kg para leña seca menos resinosa [30]. En comparación con otros combustibles, el valor calorífico de la leña es casi la mitad del Gas Licuado de Petróleo (gas LP) con 45.8 MJ/kg y de la gasolina 46 MJ/kg [32].

El valor calorífico superior (q_s), también llamado valor calorífico total, es la cantidad máxima de energía que teóricamente podría ser extraída de la combustión de la leña totalmente seca, si la combustión fuera completa y los productos de la combustión fueran enfriados a temperatura ambiente, tal que el agua producida por la reacción de combustión es considerada en fase líquida. Mientras que el valor calorífico inferior (q_i), también llamado valor calorífico neto, es la cantidad máxima de energía que teóricamente podría ser extraída de la combustión de la leña totalmente seca, si la combustión fuera completa y los productos de la combustión fueran enfriados a temperatura ambiente, considerando que el agua

producida por la reacción de combustión permanece en la fase gaseosa [32, 29].

Para la leña el q_i difiere del q_s por 1.32 MJ/kg, esta cantidad se obtiene considerando que la diferencia en entalpía, durante un proceso isobárico, es igual al calor transferido entre las fases líquida y gaseosa de 540 g de agua a temperatura ambiente [33]. Típicamente la leña seca contiene un 6% de hidrógeno, es decir, por cada kilogramo de leña seca hay 60 g de hidrógeno, el cual reacciona con el oxígeno para formar 540 g de agua (H_2O) [32].

El contenido de humedad de la leña en base húmeda (h), es el porcentaje de agua contenida en la leña respecto a la masa húmeda del combustible. Puede ser determinado gravimétricamente, pesando la masa de leña húmeda (m_i^h) y compararlo con el peso obtenido después de dejarla secar (m_i^s). El contenido de humedad en base húmeda (h) se expresa de la siguiente manera:

$$h = \frac{m_i^h - m_i^s}{m_i^h} \times 100. \quad (2.4)$$

También existen medidores de humedad que realizan esta medición a través de medir diferencias de potencial eléctrico entre 2 puntas metálicas incrustadas en la leña húmeda [32].

Un alto contenido de humedad en la leña retarda el proceso de combustión, lo que resulta en una disminución en la temperatura de la cámara de combustión, hecho que dificulta la combustión completa de la materia volátil (presente en forma de gas), lo que produce hollín y otros productos de combustión incompleta.

El valor calorífico efectivo (q_{ef}) es la cantidad máxima de energía que de manera efectiva puede ser transferida a la estufa, pues considera que una parte de la energía química contenida en el combustible se destina a calentar y evaporar la humedad presente en él. Se calcula de la siguiente forma [32]:

$$q_{ef} = \frac{q_i m_i^s - m_a^l [(\Delta T c_p) + c_e]}{m_i^h}, \quad (2.5)$$

donde m_a^l es la masa de agua contenida en la leña, ΔT representa el cambio entre la temperatura ambiente y la temperatura de ebullición local ($\Delta T = T_e - T_i$), c_p es el calor específico

del agua (4.186 kJ/kg°C) y c_e es el calor necesario para evaporar un kilogramo de agua (2260 kJ/kg).

El equivalente de leña seca consumida (m_{ls}), es la cantidad de leña seca que fue consumida durante el proceso de combustión, este parámetro permite comparar consumos de combustible para leña de diferentes especies y contenidos de humedad. Para calcular este equivalente se consideran dos factores:

1. La energía necesaria para evaporar el agua contenida en la leña.
2. La cantidad de carbón remanente.

El equivalente de leña seca consumida (m_{ls}) se obtiene:

$$m_{ls} = m_i^h(1 - (1.12h)) - 1.5m_c, \quad (2.6)$$

el factor $1 - (1.12h)$ considera la cantidad de energía necesaria para evaporar $m_i^h h$ masa de agua, considerando que son necesarios 2260 kJ para evaporar un kilogramo de agua, es decir, el 12 % del valor calorífico de la leña seca; el factor $1.5m_c$ se refiere a la cantidad de leña que se convierte en carbón remanente. El carbón tiene aproximadamente el 150 % del contenido calorífico de la leña, por lo que el carbón es equivalente a una cantidad mayor de leña [32].

2.3.2. La combustión de leña como proceso térmico

El proceso de combustión puede dividirse en 4 etapas, que en la mayoría de los casos ocurren simultáneamente en las diferentes partes del combustible que está siendo consumido y están caracterizadas por la temperatura en que ocurren [2]:

1. Evaporación del agua:

El rango de temperaturas es de 0 a 100°C. Usualmente la biomasa tiene un contenido significativo de humedad cuando es quemada. Mientras el combustible es calentado, el

agua contenida en él aumenta su temperatura hasta evaporarse. Dependiendo de las características del combustible es el tiempo que tarda la humedad presente en las capas más profundas del material en calentarse y finalmente escapar en la forma de vapor. En el caso de maderas muy densas como el encino, este proceso es más prolongado que en maderas menos densas como el pino.

Cuando el oxígeno y el hidrógeno presentes en las moléculas del material son liberados por la combustión, reaccionan formando agua. Entonces, además de la humedad natural presente en la leña, hay agua resultado del proceso de combustión. Alrededor de un 6 % (1.32 MJ/kg) de la energía química de la leña (20 MJ/kg) es necesaria para evaporar el agua formada en la combustión.

2. Pirólisis:

La pirólisis es el proceso químico en el cual los constituyentes originales de la leña, bajo la influencia del calor, forman la materia volátil y el carbón. A continuación se mencionan los dos tipos de pirólisis que se presentan:

- Pirólisis endotérmica o de baja temperatura.

El rango de temperaturas es de 100 a 280°C. En esta fase ocurre que las moléculas de la leña empiezan a descomponerse, lo que conduce a la producción de diferentes gases como hidrógeno diatómico (H_2), vapor de agua (H_2O), metano (CH_4), bióxido de carbono (CO_2), monóxido de carbono (CO), ácido acético (CH_3COOH) y ácido fórmico ($HCOOH$).

- Pirólisis exotérmica.

El rango de temperaturas es de 280 a 600°C. En esta fase el calor es liberado inclusive en la ausencia de oxígeno. Grandes cantidades de gas son liberadas, las cuales al combinarse producen una amplia variedad de materiales orgánicos, de

este modo se producen los primeros compuestos volátiles que escapan como humo o se recondensan en zonas más frías de la leña. Entre los compuestos volátiles se han encontrado 213 diferentes [5].

3. Quema de volátiles:

El rango de temperaturas es de 600 a 800°C. En esta fase los volátiles al mezclarse con el oxígeno arden produciendo flama. Si el oxígeno no es suficiente para lograr una mezcla adecuada o la temperatura es baja debido al poco tiempo que los gases tienen antes de desplazarse, los gases escapan provocando combustión incompleta. El calor radiante de la flama provoca que se encienda más leña y se liberen más compuestos volátiles que arden con la flama y continúan con el ciclo.

4. Quema de carbón:

El rango de temperaturas es de 800 a 1000°C. Una vez que la leña ha sido completamente pirolizada se produce carbón que continúa ardiendo aunque la flama no es visible, en este momento la temperatura del sólido es de aproximadamente 800°C. El carbón es el único compuesto sólido producido por la combustión, además de que éste es relativamente un mal conductor de calor, su formación durante la pirólisis retrasa la transferencia de calor a partes interiores de la leña. Un incremento en el flujo de aire durante esta fase incrementa la velocidad de reacción, es decir, incrementa el oxígeno disponible en la superficie sólida del material. La ceniza, único residuo sólido producido después de la combustión del carbón, contiene los compuestos inorgánicos de la leña y generalmente representa menos del 5 % de la masa de la leña seca [34].

El contenido relativo de energía de los productos de la pirólisis comparado con la energía en el carbón restante depende sobre todo de dos factores: el porcentaje de volátiles contenidos

en el combustible original y la velocidad con que se lleve a cabo la pirólisis. Bajas velocidades en la pirólisis aumentan la formación de carbón.

Para obtener una mejora en la calidad de la combustión es necesaria una alta temperatura, fuegos calientes son más limpios y energéticamente eficientes [35], y una cantidad suficiente de oxígeno que permita un buen mezclado para una buena flama. Los diseños de estufas deben tener en cuenta estos 2 factores, primero garantizando un buen diseño en la cámara de combustión que permita temperaturas altas dentro de ella, y por otro lado un adecuado flujo de aire (oxígeno) que está relacionado con el efecto de tiro de la chimenea, el tiro interno de la estufa y el tamaño de la entrada de la cámara de combustión.

2.3.3. Emisiones debidas a la combustión de la leña

La habilidad para controlar el fuego es frecuentemente considerada un rasgo característico de la evolución humana, es verdad que la exposición al humo de leña es tan vieja como la humanidad misma. Sin embargo, está bien establecido que el humo de la leña emite cantidades significativas de contaminantes conocidos por su daño a la salud, incluyendo varios compuestos carcinogénicos [1, 2, 9, 8, 6, 7], además de contaminantes ambientales como los Gases de Efecto Invernadero (GEI) y otros compuestos, asociados al cambio climático global¹ [9, 8, 11, 10].

La combustión de la biomasa es típicamente ineficiente, lo que significa que una parte del carbono contenido en la leña se convierte en productos de la combustión incompleta

¹Con *Cambio Climático* entendemos el concepto que el Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC, 2007) propone: cualquier cambio en el clima en el transcurso del tiempo, sea debido a variaciones naturales o sea resultado de actividades humana. Este uso difiere del que la Convención Marco para el Cambio Climático refiere a los cambios atribuibles directa o indirectamente a las actividades humanas que alteran la composición global de la atmósfera y que se suman a la variación natural del clima observada en períodos de tiempo comparables [36].

(PCI's). La generación de PCI's implica una amplia gama de compuestos orgánicos oxidados parcialmente, Rogge et al. [12] midió en 1998 cerca de 200 compuestos orgánicos diferentes, dentro de todos estos compuestos hay algunos que están relacionados con daños a la salud humana y el ambiente.

Las condiciones en las que se lleva a cabo la combustión, así como el tipo de combustible, determinan las características del humo emitido. Sin embargo, es un hecho que eficiencias de combustión bajas crean altos factores de emisión para un amplio rango de contaminantes dañinos a la salud y al ambiente [10].

El humo de la leña se refiere a la mezcla total de gases, partículas sólidas y gotas líquidas emitidas por el proceso de combustión [1]. Durante el transporte muchos de los gases de la combustión se convierten en otros gases o en partículas, las reacciones químicas que ocurren son diversas y sensibles a las condiciones en las que ocurra el transporte.

Dentro de la complejidad de constituyentes del humo de la leña se encuentran: Gases de Efecto Invernadero (bióxido de carbono, monóxido de carbono, metano, óxidos de nitrógeno y vapor de agua), hidrocarburos no metálicos (*HCNM*) entre los que se encuentran diversos alcanos, alquenos y alquinos, compuestos policíclicos aromáticos, ácidos carboxílicos, ésteres, aldehídos, cetonas, fenoles metoxilados, derivados del azúcar, flavonoides, terpenoides y otros. En términos de masa los constituyentes principales en el humo de la leña son el bióxido de carbono (CO_2) y el monóxido de carbono (CO), aunque las partículas son probablemente los constituyentes más importantes asociados a las enfermedades relacionadas con el humo de leña [1].

Para fines del presente estudio, se consideran las emisiones desde el punto de vista ambiental, en especial las implicaciones para el cambio climático resultantes del aumento en concentración de los GEI. Sin embargo, este enfoque está estrechamente relacionado con los impactos en la salud al tener el mismo origen: los productos de la combustión incompleta

(PCI's).

Si bien los GEI están estrechamente relacionados con el cambio climático, no son los únicos productos de la combustión a los que se les asocia una fuerza radiativa² y por consiguiente un potencial de calentamiento global (PCG)³, los hidrocarburos no metánicos (*HCNM*), las partículas de materia (*PM*) y los óxidos de nitrógeno (*NO_x*), contribuyen también al cambio climático. Las características de cada uno de estos compuestos, presentes en las emisiones de los dispositivos de cocción con leña, se describen a continuación [10, 37]:

- *Bióxido de carbono (CO₂)*: Es el GEI producido en mayor cantidad por la combustión de la leña, es un producto de la combustión completa. Produce alteración en el balance de la energía que entra y sale en el sistema atmosférico terrestre.
- *Monóxido de carbono (CO)*: Es uno de los productos primarios de la combustión incompleta. Se le asocia un PCG de 1.9⁴. Su efecto indirecto ocurre al reducir los niveles del radical hidroxilo (*OH*), aumentando las concentraciones de metano (*CH₄*) y ozono (*O₃*). Las emisiones de *CO* para dispositivos de cocción tradicionales de leña son del 10 al 15 % del *CO₂* emitido, estas emisiones son mayores durante la quema de carbón.
- *Metano (CH₄)*: Es relativamente un potente GEI con un tiempo de vida de aproximadamente 12 años y un PCG de 25, aumenta los niveles de vapor de agua estratosférico

²La *fuerza radiativa* es una medida de la influencia que tiene algún factor como alteración del balance de la energía que entra y sale en el sistema atmosférico terrestre y constituye un indicador de la importancia del factor como mecanismo potencial de cambio climático. Una fuerza radiativa positiva tiende a calentar la superficie de la tierra, mientras que una negativa tiende a enfriarla [36].

³Los *potenciales de calentamiento global* (PCG) son una manera de evaluar las emisiones al comparar la fuerza radiativa en determinado periodo por unidad de masa respecto al *CO₂*, que por definición tiene un PCG = 1 [37].

⁴Los potenciales de calentamiento global (PCG) presentados en este texto corresponden a un horizonte temporal de 100 años, conforme a los reportado por el IPCC [37].

y ozono, además produce CO_2 entre otros fenómenos.

- *Hidrocarburos no metánicos (HCNM)*: Su PCG es de 12 [38], éstos compuestos contribuyen a la formación de ozono (O_3) atmosférico.
- *Óxido nitroso (N_2O)*: Potente GEI, tiene un tiempo de vida de 120 años en la atmósfera y un PCG de 298.
- *Óxidos de nitrógeno (NO_x)*: Término usado para varios óxidos de nitrógeno (excepto N_2O), son producidos durante la combustión cuando la temperatura es suficientemente alta como para quemar el nitrógeno presente en el aire. Son precursores de ozono y junto con la humedad atmosférica pueden producir lluvia ácida. Éstos afectan la química atmosférica de diferentes maneras, por lo que el IPCC no ha determinado su PCG.
- *Partículas de materia (PM)*: Compuestas por pequeñas partículas sólidas o líquidas, dependiendo de su peso y tamaño, las partículas pueden tener un fuerte efecto sobre la atmósfera absorbiendo y/o dispersando la radiación solar. Dentro de la amplia gama de partículas se considera al *carbono negro* o *carbono elemental (CE)*, también conocido como *hollín*, como uno de los más importantes aerosoles absorbedores de la atmósfera, al cual se le asocia un PCG de 680 [39], entre el 5 y el 20 % de las partículas en el humo de leña consisten en *CE* [1]. El *carbono orgánico* ó *materia orgánica (MO)*, resultado de una quema lenta de la leña, cumple la función de dispersar la radiación solar, por lo que contribuye con un PCG negativo de -50 [40]

Eventualmente los compuestos anteriores se oxidarán en CO_2 , pero mientras eso ocurre hay que considerar que durante determinado tiempo éstos tienen impactos mayores en el clima que el CO_2 .

Finalmente, y para no dejar de lado las implicaciones en salud humana relacionadas al humo de leña, existe plena evidencia de que el humo provoca infecciones respiratorias agudas en niños, como la neumonía, además de la enfermedad crónica obstructiva pulmonar en adultos. Adicionalmente, hay evidencia moderada de predisposición a padecer cataratas y tuberculosis en mujeres adultas [1]. Sin embargo, altas emisiones no necesariamente llevan a altos niveles de exposición, a menos que los contaminantes permanezcan a la altura de la zona de respiración humana [2]. Un dispositivo de cocción que permanezca en condiciones sin ventilación, sin chimenea o campana como el fogón tradicional, favorece altos niveles de exposición. Por esta razón, es importante que las tecnologías para el cocinado con leña cuiden las condiciones para llevar a cabo una combustión eficiente junto con una ventilación adecuada.

2.4. Transferencia de calor

El equilibrio de un sistema termodinámico jamás es estático, es el resultado de un balance energético a lo largo del tiempo y por su naturaleza microscópica tiene asociadas fluctuaciones inherentes [41]. La termodinámica describe cómo la energía se transfiere a través de interacciones entre un sistema y sus alrededores, estas interacciones son llamadas trabajo y calor. Sin embargo, la termodinámica considera sólo estados finales o de equilibrio sin brindar información respecto a la naturaleza de la interacción o sobre la velocidad a la que ésta se lleva a cabo.

El calor se define como la energía en tránsito debida a una diferencia de temperatura, y su estudio tiene como objetivo extender el análisis termodinámico a través del estudio de los diferentes modos en los cuales el calor se transfiere, considerando el desarrollo temporal de los procesos para así calcular las tasas de transferencia de calor [26].

Los diferentes modos en que puede transferirse el calor son 3: conducción, convección y radiación, todos ellos están presentes en el sistema termodinámico de la estufa de leña. A continuación trataremos cada uno de ellos y el modo particular en que ocurren en el sistema de estudio.

2.4.1. Conducción

Cuando existe un gradiente de temperatura dentro de un medio estacionario, es decir, sin movimiento macroscópico, que puede ser sólido o fluido, la transferencia de calor a través del medio se llama conducción [26].

El mecanismo físico de la conducción tiene su origen en la actividad electrónica, atómica y molecular del material donde, mediante colisiones, las partículas más energéticas (con mayor temperatura) transfieren su energía a las menos energéticas (con menor temperatura). La temperatura es la energía relacionada al movimiento traslacional aleatorio de las partículas, así como los movimientos rotacionales y vibracionales interiores de éstas [26]. En los materiales conductores los electrones a través de su movimiento traslacional transfieren mayor cantidad de energía en comparación con los materiales aislantes donde no ocurre movimiento electrónico.

Para determinar la ecuación que describe la transferencia de calor por conducción se utiliza el Principio de Conservación de la Energía. Conforme aumenta la temperatura dentro del material ocurren cambios en la cantidad de energía interna almacenada en él, el término de energía almacenada se puede expresar como [26]:

$$\frac{dE_a}{dt} \equiv \dot{E}_a = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} dx dy dz, \quad (2.7)$$

donde ρ [$\frac{kg}{m}$] es la densidad del medio y c_p [$\frac{J}{kg \cdot K}$] es la capacidad calorífica específica.

Utilizando la conservación de la energía para el elemento de volumen, es decir, el balance

entre la energía que entra \dot{E}_e , la energía que sale \dot{E}_s y la energía almacenada \dot{E}_a tenemos:

$$\dot{E}_e - \dot{E}_s = \dot{E}_a, \quad (2.8)$$

considerando que la energía que entra es debida al calor transferido por conducción,

$$\dot{E}_e = q_x, \quad (2.9)$$

y la energía que sale es un calor por conducción desplazado un dx en la dirección del flujo,

$$\dot{E}_s = q_{x+dx}, \quad (2.10)$$

considerando las tres ecuaciones anteriores y sustituyendo en la ecuación (2.7) tenemos,

$$q_x - q_{x+dx} = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} dx dy dz. \quad (2.11)$$

La ecuación que describe la transferencia de calor por conducción es la Ley de Fourier que es una relación constitutiva. Para un material unidimensional, con una distribución de temperatura $T(x)$ la ecuación es:

$$q_x'' = -k \frac{dT}{dx}, \quad (2.12)$$

el flujo de calor q_x'' [$\frac{W}{m^2}$] es la tasa de transferencia de calor en la dirección x por unidad de área perpendicular a la dirección de transferencia y por unidad de tiempo, y es proporcional al gradiente de temperatura. La constante de proporcionalidad k [$\frac{W}{m \cdot K}$] es una propiedad de transporte llamada conductividad térmica y depende de las características del material. El signo menos es una consecuencia del hecho de que el calor se transfiere de caliente a frío [26].

El calor transferido por conducción q_x se relaciona con el flujo de calor q_x'' por la siguiente ecuación:

$$q_x = A q_x'', \quad (2.13)$$

donde A es el área de la sección transversal que es perpendicular al flujo de calor.

El calor transferido por conducción puede expresarse como un desarrollo en serie de Taylor a primer orden,

$$q_{x+dx} = Aq_x'' + \frac{\partial q_x}{\partial x} dx, \quad (2.14)$$

en la ecuación anterior la tasa de transferencia de calor en $x + dx$ es igual a la de la posición x más la cantidad en que ésta cambia en la misma dirección por el intervalo infinitesimal dx .

Por lo que, sustituyendo las expresiones anteriores en la ecuación (2.11) tenemos:

$$-\frac{\partial q_x}{\partial x} dx = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} dx dy dz, \quad (2.15)$$

finalmente, considerando la Ley de Fourier (ec. (2.12)) y dividiendo entre el elemento de volumen obtenemos:

$$k \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t}, \quad (2.16)$$

que es la ecuación de difusión del calor ó ecuación del calor [26, 27], la cual relaciona el cambio de la temperatura en el tiempo con el laplaciano (en una dimensión) de la misma función en el espacio. De manera más simplificada,

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t}, \quad (2.17)$$

donde $\alpha = \frac{k}{\rho c_p}$ [$\frac{m^2}{s}$] es la difusividad térmica. En el caso tridimensional un análisis similar al anterior nos lleva a la siguiente ecuación:

$$\nabla^2 T = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t}. \quad (2.18)$$

Bajo condiciones de estado estacionario, no hay cambio en la energía interna del material y por tanto la energía almacenada es nula, la ecuación anterior queda:

$$\nabla^2 T = 0, \quad (2.19)$$

también conocida como la Ecuación de Laplace [42]. Este resultado, volviendo al caso unidimensional, implica que el flujo de calor q_x'' es constante en la dirección de transferencia pues $\frac{dq_x''}{dx} = 0$ [27].

En el análisis de transferencia de calor es necesario considerar muchas propiedades de la materia, llamadas también propiedades termofísicas, que pueden ser clasificadas en dos grupos: las de transporte, que están relacionadas con la dinámica o movimiento macroscópico del medio tales como la conductividad térmica k y la viscosidad cinemática ν , y las termodinámicas que se definen en estados de equilibrio del sistema tales como la densidad ρ y la capacidad calorífica c_p .

El producto ρc_p llamado capacidad calorífica volumétrica mide la capacidad de un material de almacenar energía térmica. La difusividad térmica α es especialmente importante en el análisis de transferencia de calor pues mide la capacidad del material para conducir energía térmica relativo a su capacidad para almacenarla. Materiales con un valor alto de α responden rápidamente a los cambios térmicos de su entorno, mientras que materiales con valores pequeños de α tardan mucho tiempo en alcanzar un nuevo estado de equilibrio [26].

El fenómeno de conducción se presenta en la estufa de leña en muchos lugares, en las paredes, en los comales y en la chimenea. Sin embargo, es de especial interés el estudio de este fenómeno en los comales, pues ellos son las superficies a través de las cuales se transfiere el calor útil que es absorbido por los alimentos. Los comales están hechos de materiales conductores, generalmente de acero; los grosores de éstos, aunque varían para cada modelo

de estufa, son pequeños comparados con la sección transversal de los comales. Bajo ciertas condiciones se observan estados estacionarios en la superficie de los comales y también estados transitorios (dependientes del tiempo).

En la tabla 2.1 se muestran los valores típicos para las conductividades térmicas de diferentes materiales presentes en las estufas de leña.

Material	$k \left(\frac{W}{m \cdot K} \right)$	Presente en:
Acero	50	Comales
Aire	0.065	Cámara de combustión, interior de túnel y chimenea
Aluminio	250	Chimenea y ollas
Concreto	1	Paredes
Ladrillo	0.69-1.31	Paredes
Leña (encino)	0.17	Cámara de combustión (como combustible)

Tabla 2.1: Conductividades térmicas de materiales presentes en las estufas.

2.4.2. Convección

La transferencia de calor entre una superficie y un fluido adyacente a ella en la cual hay movimiento macroscópico del fluido, se llama convección [27]. Como resultado de este intercambio de energía ocurre circulación en el fluido, debida a un gradiente de densidad que es ocasionado por variaciones en su temperatura.

Aunque el mecanismo de la difusión (movimiento aleatorio de las partículas del fluido) contribuye a la transferencia de calor por convección, la contribución dominante se debe al movimiento del bulto (macroscópico) del fluido. En el apartado anterior fue deducida la ecuación de difusión de calor por conducción (ec. (2.18)) como resultado de la conservación

de la energía y de la Ley de Fourier. Puesto que en un proceso convectivo además de difusión los elementos de volumen del medio se mueven, es posible obtener la ecuación de calor por convección considerando que la posición es también una función del tiempo, es decir, $\vec{x} = \vec{x}(t)$. Por lo que la derivada temporal en 3 dimensiones queda:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{\partial T}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla T, \quad (2.20)$$

la derivada parcial de la temperatura refleja el cambio temporal de la función en puntos fijos del espacio, mientras el término de la derecha $\vec{v} \cdot \nabla T$ refleja el hecho de que los elementos de volumen se mueven y la temperatura cambia en el tiempo también debido a este movimiento [25].

Sustituyendo la ecuación anterior en la ecuación de difusión de calor (ec. (2.18)) se obtiene la ecuación de transferencia de calor por convección:

$$\nabla^2 T = \frac{1}{\alpha} \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla T \right). \quad (2.21)$$

Para resolver la ecuación (2.21) es necesario conocer el campo de velocidades \vec{v} , lo que implica resolver las ecuaciones de movimiento del fluido también llamadas ecuaciones de Navier-Stokes [25]. Este problema corresponde a un conjunto de ecuaciones no lineales acopladas, con condiciones iniciales y de frontera, en donde hay que incluir reacciones químicas debidas a la combustión.

Desde el punto de vista teórico este problema es difícil de resolver para la mayoría de los casos, el presente estudio no se plantea abordar la dinámica convectiva de los gases de combustión desde este marco teórico, en parte por las dificultades teóricas ya mencionadas y en parte por las dificultades práctico-experimentales que trae consigo. Es a través de un rodeo, que se determina la transferencia de calor convectivo en los dispositivos de cocción, sin embargo, no puede dejar de ser mencionado que para entender a cabalidad el sistema de

estudio sería necesario resolver las ecuaciones de Navier-Stokes.

Para caracterizar la transferencia de calor por convección también es posible utilizar flujos convectivos de calor q''_{conv} , esta forma de caracterizar la transferencia es, desde el punto de vista teórico y práctico, más sencilla de resolver pues en principio depende de la medición de temperaturas y la determinación de un coeficiente. El flujo de calor convectivo entre una superficie y un fluido en contacto con ella, es descrita por la Ley de enfriamiento de Newton,

$$q''_{conv} = h_c(T_s - T_f), \quad (2.22)$$

donde q''_{conv} [$\frac{W}{m^2}$] es el flujo de calor convectivo por unidad de tiempo y es proporcional a la diferencia de temperaturas de la superficie T_s y la del fluido T_f , respectivamente. La constante h_c [$\frac{W}{m^2 \cdot K}$] se conoce como el coeficiente de transferencia de calor por convección, la conductancia de película ó el coeficiente de película, este parámetro contiene la información sobre la capa de frontera, la cual depende de la geometría de la superficie y de la variedad de propiedades termofísicas del fluido.

Los flujos de calor convectivos están presentes en la estufa de leña en lugares diferentes: la cámara de combustión, la superficie de los comales, las paredes y la chimenea. En la cámara de combustión, el flujo convectivo que se produce es turbulento como se muestra en la sección 2.2.2 y 4.1.4 de este texto, además la fuente caliente que lo genera (flama) no es una superficie ni se encuentra a temperatura constante durante el proceso, por lo que la Ley de enfriamiento de Newton no considera la complejidad del fenómeno presente en las estufas.

Por otra parte, la convección que se genera en el aire sobre los comales, las paredes y la chimenea calientes también genera un flujo que puede ser turbulento o no, que está fuera de la estufa. La transferencia de calor hacia los alrededores (aire) es considerada parte de las pérdidas de calor, pues de esta transferencia no hay contribución al calor útil.

Ebullición

Algunos procesos convectivos están asociados al cambio de fase del fluido [26], tal es el caso de la ebullición. Aunque la ebullición no es uno de los modos de transferencia de calor, en este fenómeno ocurre simultáneamente transporte de energía, momento y masa [43]. Para fines del presente estudio, sobretodo porque una de las pruebas experimentales realizada está ligada a la ebullición del agua, es importante señalar las bases físicas de este fenómeno.

La ebullición es el proceso físico mediante el cual una sustancia pasa de estado líquido a gaseoso, es decir, la ebullición es una transición de fase [44]. Para que se pueda llevar a cabo esta transición es necesaria energía, el calor necesario para evaporar 1 g de agua (cuando esta se encuentra a temperatura de ebullición) es 540 veces mayor que el calor requerido para elevar 1°C su temperatura a 14.5 °C.

Esta diferencia entre calor específico (c_p) y calor latente o de evaporación (c_e) [26], explica el comportamiento del agua cuando ésta es calentada por los dispositivos de cocción, pues cuando la temperatura es cercana a la de ebullición, gran parte del calor transferido se destina a evaporar agua viéndose disminuida la tasa de aumento de temperatura dentro del agua.

El punto de ebullición de una sustancia se define como la temperatura a la cual la presión de vapor del líquido iguala la presión de sus alrededores [27]. Mientras que la temperatura de ebullición local (T_e) del agua depende de la presión atmosférica la cual es a su vez función de la altitud sobre el nivel del mar. A una altitud z [m] la temperatura de ebullición puede ser calculada por [32]:

$$T_e = \left(100 - \frac{z}{300}\right) ^\circ C. \quad (2.23)$$

Los líquidos pueden convertirse en vapor a temperaturas por debajo de su punto de ebullición a través de un proceso que se llama evaporación. La evaporación es un fenómeno superficial en el cual las moléculas localizadas cerca de la superficie vapor/líquido escapan en fase gaseosa. Por otra parte, la ebullición es un proceso en el cual las moléculas de todas

partes del líquido escapan como resultado de la formación de burbujas de vapor dentro de éste debido a una transición de fase [26]. La transferencia de calor durante la ebullición depende fuertemente de la producción de vapor en la superficie caliente, debido a que las burbujas de vapor incrementan la velocidad de circulación dentro del fluido incrementando la transferencia de calor [43].

Existen dos tipos básicos de ebullición, la ebullición de alberca y la ebullición por convección forzada. La ebullición de alberca ocurre cuando una superficie caliente está en contacto (ó sumergida) en una alberca de líquido sin agitar, el flujo se debe principalmente a la fuerza boyante que actúa sobre las burbujas de vapor originadas en la superficie caliente. Mientras que en la ebullición por convección forzada, el flujo es debido al movimiento de bulto del fluido además de efectos boyantes, se caracteriza por cambios de fase rápidos de líquido en vapor en la dirección del flujo [26].

2.4.3. Radiación

La radiación térmica es energía emitida por materia a temperatura finita. A diferencia de la conducción y la convección, en la radiación no es necesario un medio para la propagación de la energía. De hecho, la radiación ocurre más efectivamente en el vacío aunque también se presenta en el aire [26, 27].

El mecanismo físico de la radiación se atribuye a los cambios en las configuraciones electrónicas de los átomos y moléculas que constituyen el cuerpo emisor, esta energía es transportada por ondas electromagnéticas.

El flujo máximo q''_{rad} [$\frac{W}{m^2}$] que puede ser emitido por una superficie está dado por la Ley de Stefan-Boltzmann [26, 27]:

$$q''_{rad} = \sigma T_s^4, \quad (2.24)$$

donde T_s [K] es la temperatura absoluta de la superficie y σ es la constante de Stefan-Boltzmann ($\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \frac{W}{m^2 \cdot K}$). En la ecuación anterior se supone que la superficie es un radiador ideal o cuerpo negro [26, 27]. El flujo de calor emitido por una superficie real es menor que el de una ideal y está dado por:

$$q''_{rad} = \varepsilon \sigma T_s^4, \quad (2.25)$$

donde ε es una propiedad radiativa de la superficie llamada emisividad, este parámetro toma valores entre $0 \leq \varepsilon \leq 1$ e indica que tan eficientemente la superficie emite comparada con un cuerpo negro [26, 27].

El fenómeno de radiación también está presente dentro de la estufa de leña, considerando a ésta en su conjunto como cuerpo emisor a temperatura finita, le es inherente transferir calor radiativo. Es posible también considerar partes específicas de la estufa como la cámara de combustión, las paredes, los comales y la chimenea, y analizar los flujos de calor radiativo emitidos por cada parte, la magnitud de éstos flujos está relacionada con la temperatura y las características radiativas de dichas partes. Sin embargo, es importante notar que de toda la energía que se trasmite por radiación, la que es generada en la cámara de combustión y comales contribuye al calor útil (transferido a los alimentos), mientras que la energía radiativa de paredes y chimenea es más bien considerada como pérdida.

2.4.4. Análisis de transferencia de calor del sistema de estudio

En una estufa de leña los comales tienen el papel de superficies de interfase, ya que por una parte están en contacto con los gases de combustión que les transfieren calor por convección y radiación, y por otra parte, el calor que es absorbido por ellos se transfiere dentro del medio del comal por conducción para luego ser transferido nuevamente hacia

el ambiente y los alimentos a través de alguno, o una combinación de los tres modos de transferencia de calor.

En algunos casos los alimentos se cocinan poniéndolos en contacto directo con los comales, como es el caso de las tortillas, sin embargo en la mayoría de los casos las ollas funcionan como intermediario entre el calor de los comales y el alimento; en las ollas ocurre nuevamente el fenómeno de conducción. Además, en las superficies de comales, chimenea y paredes que quedan en contacto con el aire, se produce transferencia de calor por convección y radiación.

Como puede observarse, en una estufa de leña ocurren simultáneamente mecanismos complejos de transferencia de calor, su complejidad radica en que el proceso de combustión discutido en la sección 2.3 junto con la geometría de los dispositivos, hace problemática la determinación de los coeficientes de transferencia. Además, el funcionamiento de una estufa involucra estados transitorios, donde la temperatura de las diferentes partes que la componen es función del tiempo y del espacio, y estados estacionarios aunque con fluctuaciones en temperatura que son inherentes en nuestro sistema de estudio (para ver la definición de estado estacionario usada en el presente estudio ver sección 4.1.4). Con el objetivo de caracterizar el desempeño de los diferentes modelos de estufa, se obtienen los perfiles de temperatura en partes características de los dispositivos, dichos perfiles contienen información tanto de los estados transitorios como de los estacionarios, del análisis de los estados estacionarios se obtienen las temperaturas típicas de los dispositivos.

2.4.5. Eficiencia energética

El concepto de eficiencia energética es ampliamente usado para caracterizar a los dispositivos termodinámicos, la manera más general de definirla es [33, 45]:

$$\eta_1 = \frac{\text{Energía usada en el efecto útil (calor o trabajo) por un dispositivo}}{\text{Energía de entrada al dispositivo}}, \quad (2.26)$$

la definición anterior, conocida como eficiencia de primera ley de la termodinámica, está basada en el Principio de Conservación de la Energía, y es un balance entre la energía obtenida (útilmente) y la energía suministrada.

Existe también una definición diferente de la eficiencia energética, relacionada con la segunda ley de la termodinámica, que pone de manifiesto la irreversibilidad de los procesos al considerar la capacidad de los sistemas para realizar trabajo, también conocida como *exergía* [46], se expresa como:

$$\eta_2 = \frac{\text{Energía usada en el efecto útil (calor o trabajo) por un dispositivo}}{\text{Máxima energía útil que podría transferirse por el dispositivo}}, \quad (2.27)$$

la definición anterior [45], es conocida como eficiencia de segunda ley y es de especial interés cuando se comparan tecnologías diferentes, como lo serían una estufa de gas LP y una estufa mejorada de leña cuando éstas realizan la misma tarea de cocinado. En esta definición se pone de manifiesto la potencialidad de las tecnologías.

Las dos definiciones de eficiencia energética presentadas previamente, permiten comparar diferentes diseños que puedan cumplir la misma tarea energética, en ambos casos maximizar η conduce a optimizar los diseños de los dispositivos o sistemas.

Con base en lo anterior, podemos decir que para una estufa de leña la entrada es la energía de la leña utilizada y la salida es el alimento cocinado, como reconoce la Organización de la Alimentación y la Agricultura (FAO) [23], ambas cantidades no son fáciles de medir en una estufa de leña.

Es conveniente hacer ciertas consideraciones en lo que respecta a la energía de entrada y salida del dispositivo. Primero, la leña no es un combustible de alimentación automática,

es decir, es necesario suministrar continuamente combustible a la estufa, además de que los usuarios deben supervisar la calidad del fuego regulando la cantidad de leña que entra de acuerdo a las necesidades del alimento a cocinar. Segundo, el tipo de combustible leñoso que se utiliza puede ser muy heterogéneo, en tamaño, parte del árbol, especie y humedad, todos estos factores modifican el valor calorífico de la leña dificultando el cálculo total de la energía de entrada. Tercero, la energía utilizada para cocinar el alimento puede ser estimada, sin embargo varía según las prácticas de cocinado.

Debido a la complejidad de los procesos de transferencia de calor que se llevan a cabo en una estufa de leña (ver subsecciones del apartado 2.4), se desprenden diferentes conceptos de eficiencia o eficiencias parciales que pueden ser consideradas para este dispositivo [47]:

$$\text{eficiencia de combustión } (\eta_c) = \frac{\text{Calor generado por la combustión}}{\text{Energía potencial de la leña}}, \quad (2.28)$$

$$\text{eficiencia de transferencia de calor } (\eta_t) = \frac{\text{Calor total que entró en el recipiente}}{\text{Calor generado por la combustión}}, \quad (2.29)$$

$$\text{eficiencia del recipiente } (\eta_r) = \frac{\text{Calor neto que entró al recipiente}}{\text{Calor total que entró en el recipiente}},^5 \quad (2.30)$$

$$\text{eficiencia de control } (\eta_{cc}) = \frac{\text{Calor absorbido por el alimento}}{\text{Calor neto que entró en el recipiente}}, \quad (2.31)$$

$$\text{eficiencia de cocinado } (\eta_{co}) = \frac{\text{Calor absorbido por el alimento}}{\text{Energía potencial de la leña}}, \quad (2.32)$$

⁵Considerando que, Calor neto que entró al recipiente = Calor total que entró al recipiente - Pérdidas superficiales.

$$\text{eficiencia total } (\eta_T) = \eta_c \times \eta_t \times \eta_r. \quad (2.33)$$

Ninguna de las eficiencias anteriores es fácil de determinar, en parte porque cada uno de los “calores” que las determinan son el resultado de la combinación de múltiples procesos simultáneos entre los cuales se encuentra, entre otros, la disipación del calor fenómeno difícil de cuantificar. Esta dificultad ha generado indicadores del desempeño energético de los dispositivos que sean más sencillos de medir e interpretar, dichos indicadores se discuten a detalle en la sección 3.1.2.

Muchos estudios previos han sugerido diversas metodologías para evaluar el funcionamiento energético de una estufa de leña y se ha intentado expresar ésta en un sólo número, llamado eficiencia (η), el desempeño energético de un proceso que, desde nuestro punto de vista, es demasiado complejo para poder expresarse tan reducidamente. Debe considerarse que la eficiencia no es una cantidad física absoluta, sino un cociente que uno mismo define y depende de las condiciones bajo las cuales ocurre el proceso y sobre todo, es sensible, a cómo se mide la entrada y la salida de la energía [23].

La eficiencia energética de una estufa de leña depende de un gran número de factores como el diseño de la estufa y el recipiente de cocinado, la composición de la leña, las prácticas culinarias, las condiciones meteorológicas, el acomodo de los leños dentro de la cámara de combustión, la tasa de abastecimiento de combustible, etc., todos estos factores son variables por lo que la eficiencia no caracteriza de manera única a una estufa de leña. Entonces, este indicador del desempeño energético tiene una utilidad limitada y no puede predecir el consumo real de combustible, es más bien útil, sólo como una herramienta complementaria en el diseño de tecnologías.

Desarrollando la idea de eficiencia energética protocolos internacionales [47, 23, 48] han sugerido la utilización de un indicador llamado *Consumo Específico de Combustible (CEC)*,

que es una medida de la cantidad de combustible requerido por cantidad de alimento cocinado, de esta manera se enfatiza el producto final del proceso, el alimento. Sin embargo, este indicador de la eficiencia energética de una estufa, es difícil de definir cuando depende de la percepción del usuario respecto a cuando un alimento se encuentra listo. Se puede expresar como [32]:

$$CEC = \frac{\text{Masa de leña consumida}}{\text{Masa de alimento cocinado}}, \quad (2.34)$$

este indicador es mejor para expresar el desempeño energético de una estufa y para describir el patrón de consumo de leña.

Es importante señalar que el tiempo no es una variable que esté considerada dentro de la eficiencia energética del dispositivo, por lo que gran parte de la información sobre el desempeño termodinámico es omitida al considerar a ésta por sí sola. Por ello, es indispensable construir parámetros de desempeño que consideren al tiempo, como la potencia, entre otros.

Tampoco está reflejada en el indicador de eficiencia energética la calidad de la combustión, causante de enfermedades respiratorias y de contaminación ambiental, y mucho menos las percepciones de los usuarios sobre el manejo de la tecnología.

Nuestra propuesta para caracterizar a los diferentes dispositivos de cocción va más allá de un sólo indicador, sea este la eficiencia energética o cualquier otro. Más bien, se propone un análisis multicriterio que considere un conjunto amplio de indicadores. Sobre esta idea se profundizará en el capítulo 5.

Capítulo 3

Metodología

Por muchos años el principal objetivo de la implementación de estufas mejoradas de leña ha sido el ahorro en el consumo de combustible y la disminución de los efectos negativos en el medio ambiente y la salud humana asociados al uso de leña. Las metodologías desarrolladas se han enfocado en comparar la estufa tradicional localmente utilizada *versus* la estufa mejorada [3].

En el capítulo anterior se han descrito los fenómenos físicos básicos para la comprensión del funcionamiento de una estufa de leña en general. En la primera parte de este capítulo, se abundará en la metodología aplicada que consiste en los protocolos experimentales o pruebas que se realizaron para estudiar el desempeño de los dispositivos de cocción. Para la parte final del capítulo, se describen los diferentes diseños y características de los 4 modelos de estufa mejorada de leña, así como del fogón tradicional de 3 piedras.

3.1. Pruebas experimentales

El objetivo de estas pruebas es caracterizar el desempeño termodinámico de los diferentes modelos de estufa, a fin de poder compararlos entre sí y también respecto a la tecnología tradicional.

Se ha demostrado en muchos lugares del mundo, que las intervenciones con mejores tecnologías para la combustión de biomasa, como las estufas de leña, reducen la cantidad de leña utilizada en el sector domiciliario rural, tienen eficiencias de combustión nominal más altas y reducen la cantidad de Gases de Efecto Invernadero (GEI) debidos a la combustión de la leña [4, 13, 6, 7] en comparación con las tecnologías tradicionales.

En México, sin embargo, no se ha documentado todavía con detalle el funcionamiento termodinámico de los distintos modelos de estufas mejoradas de leña que existen, por lo que ha sido necesario llevar a cabo esta investigación en base a los modelos de estufa que actualmente se difunden en nuestro país.

Específicamente para la evaluación del desempeño energético de las estufas se emplea una metodología internacional desarrollada por Volunteers In Technical Assistance (VITA, 1985) [47] y Baldwin (1986) [18], que ha sido recientemente actualizada como parte de un programa internacional promovido por el *Household Energy and Health Programme* (2004) de la Fundación Shell en el que colaboraron además la Universidad de California, Berkeley, el Aprovecho Research Center (E.U.A.), el Centro de Investigaciones en Ecosistemas, UNAM y el Grupo Interdisciplinario de Tecnología Rural Apropriada, A.C (México), Helps International Inc. (Guatemala) y Appropriate Rural Technology Institute (India) [48, 32, 15]. El resultado de este trabajo conjunto fue un nuevo protocolo del desempeño de estufas, llamado *Stove Performance Testing Protocol* (SPTP), en este texto nos referiremos constantemente a la metodología SPTP, aludiendo a este protocolo internacional.

El objetivo de esta metodología es evaluar el desempeño de dispositivos de cocción con

biomasa mediante la aplicación de tres pruebas estándar en condiciones de laboratorio y de campo:

1. Prueba de ebullición de agua (PEA)

Consiste en una aproximación al proceso de cocinado real, en ella el agua toma el lugar de los alimentos y tiene como objetivo mostrar qué tan bien se transfiere la energía del combustible a la olla de cocinado. La prueba consta de 3 fases en las que las condiciones térmicas iniciales y la potencia del fuego son diferentes. Se mide el combustible utilizado así como la duración de la prueba.

2. Prueba de cocinado controlado (PCC)

Consiste en la preparación de la misma cantidad de alimento tradicional y estandarizado, es decir, con un procedimiento establecido, en este estudio se escogieron las tortillas de maíz, principal alimento de las poblaciones rurales en México [49]. Se mide el combustible utilizado así como la duración de la prueba.

3. Prueba de Funcionamiento en Cocina (PFC)

Compara el consumo de combustible en condiciones reales de funcionamiento entre las estufas y la tecnología tradicional durante una semana.

Con estas pruebas es posible determinar parámetros importantes de funcionamiento termodinámico de las estufas como la eficiencia térmica (η), la velocidad de quemado (v_q) y el consumo específico de combustible (CEC), entre otros.

Las pruebas realizadas en este estudio enriquecen la metodología anterior al incluir la medición de 2 fenómenos más:

1. Los perfiles de temperatura en tiempo real en puntos significativos de las estufas (cámara de combustión, comal principal, comal secundario y chimenea), que permiten deter-

minar la temperatura durante las pruebas, así como los estados estacionarios en dichos puntos y son la base para el cálculo de nuevos parámetros de desempeño energético.

2. La calidad de las emisiones ambientales a través de la eficiencia de combustión nominal (ECN) y los factores de emisión (f_e) de algunos GEI (monóxido de carbono (CO), bióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4) e hidrocarburos no derivados del metano ($HCNM$)) y partículas de materia (PM). Sólo para la Prueba de Cocinado Controlado.

Estas nuevas mediciones permiten estudiar el comportamiento dinámico de los dispositivos y correlacionar las temperaturas obtenidas con:

1. Los parámetros resultantes de la metodología SPTP.
2. Las deficiencias en los diseños que no sacan máximo provecho del calor generado por la combustión.
3. La calidad de la combustión y sus implicaciones ambientales.

La comparación de los parámetros de los diferentes modelos de estufa ayudará a determinar las deficiencias y virtudes de cada modelo para que en un futuro produzcan diseños más eficientes.

En las siguientes secciones, se describen con detalle las pruebas que fueron realizadas así como los parámetros que caracterizan el desempeño de los diferentes dispositivos de cocción.

3.1.1. Desarrollo experimental

Para el presente estudio se realizaron los dos primeros tipos de prueba recomendados por la metodología SPTP, la Prueba de Ebullición de Agua y la Prueba de Cocinado Controlado,

en 5 réplicas por prueba y por dispositivo (estufa Citlalli, Mexalit M-20, Onil, Patsari y fogón tradicional de 3 piedras). En todas las pruebas realizadas se midieron las temperaturas en tiempo real, y sólo para la Prueba de Cocinado Controlado se midieron las emisiones para un total de 3 réplicas por cada dispositivo.

Dichas pruebas fueron realizadas en 2 laboratorios que simulan las dimensiones reales de una cocina típica de la Meseta Purépecha, el laboratorio del Grupo Interdisciplinario de Tecnología Rural Apropiada, A.C. (GIRA), ubicado en la comunidad de Tzetzenguaró, Pátzcuaro, Michoacán, y el laboratorio de la Unidad de Ecotecnologías, CIEco, UNAM, ubicado en Morelia, Michoacán.

Se procuró mantener constantes la mayoría de los factores que intervienen en el desempeño energético de las estufas. El contenido de humedad en base húmeda de la leña (ec. 2.4) fue de $10 \pm 1\%$ en todos los casos, la especie de leña utilizada fue exclusivamente encino (*Quercus castanea*, *Quercus obtusata*) [50], caracterizada por un valor calorífico superior de $q_s = 18,916$ kJ/kg [32]. El tamaño de los leños fue en promedio de $45 \text{ cm} \times 3 \text{ cm} \times 2 \text{ cm}$ y las condiciones de ventilación fueron iguales en todas las pruebas realizadas. Para el caso de la PEA, se utilizó el mismo conjunto de ollas de aluminio, de 5 l de capacidad, similares en tamaño a las utilizadas en la región Purépecha. La masa de agua inicial fue de 3.5 kg (considerando el peso del agua y la olla) también en el caso en que las estufas permiten más de una olla. En el caso de la PCC, se cocinó la misma cantidad de alimento inicial (1.3 kg de masa para tortillas) cuya receta fue la misma y es la utilizada en esa región del país.

Los resultados a los que conduce esta investigación deben ser corroborados en campo, es decir, en estufas instaladas en condiciones de funcionamiento real. Sin embargo, el análisis de las pruebas realizadas avanza en la comprensión del desempeño energético de los diferentes modelos de estufa y de la tecnología tradicional.

3.1.2. Prueba de Ebullición de Agua

La Prueba de Ebullición de Agua (PEA) también conocida como *Water Boiling Test*, WTB por sus siglas en inglés, es una prueba de simulación de cocinado donde el agua toma el lugar de los alimentos. Es una prueba para realizar en condiciones de laboratorio, además de ser una prueba estándar realizada desde hace más de 20 años por diseñadores de estufas en todo el mundo [51].

Esta prueba puede ser de gran ayuda en el proceso de diseño de estufas eficientes, pues tiene como objetivo mostrar qué tan bien se transfiere la energía del combustible a la olla de cocinado. Puede realizarse en cualquier tipo de estufa. Se realiza bajo condiciones controladas por personal previamente capacitado por lo que no provee mucha información sobre el desempeño de la estufa en condiciones reales de funcionamiento. Para conocer más sobre el desempeño de las estufas en condiciones reales donde la gente local cocina alimentos locales, es recomendable hacer otras pruebas como la Prueba de Cocinado Controlado (PCC), que se describirá más adelante, y la Prueba de Funcionamiento en Cocina (PFC) que se realiza en condiciones de funcionamiento real.

La metodología de la PEA consiste en las siguientes tres fases [32]:

1. Fase de alta potencia con inicio frío: Esta fase se inicia con la estufa a temperatura ambiente y consiste en llevar a ebullición una cantidad determinada de agua (que inicia también a temperatura ambiente) lo más rápido posible utilizando todo el combustible necesario pero sin desperdiciarlo. Se determina la cantidad de leña utilizada, el porcentaje de humedad, el carbón remanente, la cantidad de agua evaporada y el tiempo que tarda la estufa en realizar esta tarea.
2. Fase de alta potencia con inicio caliente: Esta fase inicia inmediatamente después de la primera, reemplazando el agua caliente por agua a temperatura ambiente, nuevamente

el objetivo es llevar a ebullición una cantidad conocida de agua lo más rápido posible, determinando la cantidad de leña consumida, el porcentaje de humedad, la cantidad de agua evaporada y el tiempo que tarda en realizarse esta tarea.

Estas dos fases de alta potencia ayudan a identificar las diferencias en desempeño de la estufa, cuando ésta tiene condiciones térmicas iniciales diferentes.

3. Fase de baja potencia o fuego lento: Esta fase se realiza inmediatamente después de la segunda y consiste en determinar la cantidad de combustible necesario para hervir a fuego lento (es decir, a una temperatura promedio 3°C por debajo del punto de ebullición local) determinada cantidad de agua durante 45 minutos. Esta fase intenta simular tareas prolongadas de cocinado. Se mide también el carbón remanente, el porcentaje de humedad de la leña y la cantidad de agua evaporada.

Se entiende por alta potencia mantener a la estufa encendida con la cantidad necesaria de combustible procurando que el fuego sea lo más intenso posible, lo que produce que la temperatura del alimento cocinado se incremente a la máxima rapidez que la estufa permite. A diferencia de lo anterior, la baja potencia se refiere a mantener la temperatura del alimento constante con el menor combustible posible, muchas veces esto puede lograrse sólo con las brasas.

La combinación de las tres fases de la prueba permite determinar aspectos del desempeño de la estufa, tanto a alta como a baja potencia y en diferentes condiciones térmicas iniciales, lo que se asocia con la capacidad de la estufa a conservar y a transferir el calor del combustible. El fogón no puede ser comparado en las fases de alta potencia, pues al no poseer ninguna estructura no hay diferencia entre la fase 1 y 2.

La metodología SPTP recomienda el cálculo de diferentes parámetros de desempeño de las estufas durante cada una de las fases de la PEA, los cuales son [32]:

1. **El tiempo de duración de la prueba (Δt)**, definido en base a la olla principal, durante las fases de alta potencia (fases 1 y 2) es deseable minimizarlo. Durante la fase de baja potencia (fase 3), este indicador carece de sentido al tener duración constante.
2. **El equivalente de leña seca consumida (m_{ls})**, definido por la ec. (2.6), mide el consumo de leña considerando la humedad y el carbón remanente. Valores bajos de este parámetro son deseables por sus consecuencias en ahorros de combustible.
3. **La masa de agua evaporada (m_a^e)**, se determina pesando cada olla con agua, después de terminada cada fase menos el peso inicial. Se busca minimizar este indicador al considera que la evaporación resulta en disminución en la cantidad de alimento final. En el caso de una estufa multi-olla, se suman las cantidades de agua evaporada de todas las ollas.
4. **La eficiencia térmica (η)**, es la razón de la energía utilizada en calentar y evaporar el agua respecto a la energía química contenida en el combustible. Se calcula del siguiente modo,

$$\eta = \frac{c_p(m_a^i)\Delta T + c_e m_a^e}{q_i m_{ls}}, \quad (3.1)$$

donde el trabajo realizado o trabajo útil aparece en el numerador de la expresión anterior y tiene dos contribuciones:

- a) La cantidad de calor que fue necesaria para aumentar un ΔT la masa inicial de agua (m_a^i), donde c_p es el calor específico del agua.
- b) La cantidad de energía necesaria para evaporar una cantidad de agua (m_a^e), donde c_e es el calor de evaporación o calor latente necesario para evaporar un gramo de agua.

Mientras que el denominador representa la energía total contenida en la leña, a partir del equivalente de leña seco (m_{ls}) y el valor calorífico inferior de la leña (q_i) discutidos en la sección 2.3.1.

Para el caso de una estufa multi-olla, la ec.(3.1) se modifica, considerando la contribución a la energía útil de las ollas secundarias,

$$\eta = \frac{\sum_j [c_p(m_a^i)_j \Delta T_j + c_e(m_a^e)_j]}{q_i m_{ls}}, \quad (3.2)$$

donde j es el contador del número de ollas. Esta ampliación al concepto de eficiencia térmica se recomienda sólo para las fases de alta potencia, pues para la fase de baja potencia no se consideran ollas secundarias.

La eficiencia térmica (η) se modifica para la fase 3, o de fuego lento, pues la temperatura del agua permanece básicamente constante y se considera como calor útil sólo el que es utilizado en evaporar el agua, entonces,

$$\eta_3 = \frac{c_e m_a^e}{q_i m_{ls}}. \quad (3.3)$$

La eficiencia aquí definida, es una adaptación *ad hoc* del concepto de eficiencia de primera ley desarrollado en la sección 2.4.5, por lo que, un desempeño energético óptimo resulta en valores altos de este parámetro. Es de notarse que esta adecuación está conformada de factores fácilmente medibles como son: la masa de combustible, la masa de agua evaporada, el gradiente de temperatura en el agua y el carbón remanente. Éstos factores se simplifican al considerar al agua como alimento cocinado ya que existe amplio conocimiento de su capacidad calorífica (c_p) y calor de evaporación (c_e), calcular este indicador para algún otro alimento implicaría la labor previa de determinar estas cantidades.

5. **El Consumo Específico de Combustible (CEC)**, es un parámetro adimensional que relaciona la cantidad de combustible con la cantidad de agua que la estufa fue capaz de hacer ebullición, subrayando la importancia del resultado de la tarea de cocción: el alimento. Por lo que, mientras menor sea el valor de este parámetro, se maximiza la cantidad de alimento por unidad de combustible. En este caso, el alimento considerado es agua, sin embargo, el CEC puede utilizarse para medir diferentes tareas como hacer tortillas o cualquier otro tipo de alimento, ver sección 2.4.5 para profundizar en este indicador. Se calcula de la siguiente manera:

$$CEC = \frac{m_{ls}}{m_a^f}. \quad (3.4)$$

Dado que las estufas cuentan con comales secundarios a diferencia del fogón, es posible contabilizar la cantidad de agua calentada por los éstos dentro del *CEC* modificando la ecuación anterior para un dispositivo multi-olla,

$$CEC = \frac{m_{ls}}{\sum_j \left[(m_a^f)_j \frac{\Delta T_j}{T_e - T_j^i} \right]}, \quad (3.5)$$

el factor $\frac{\Delta T_j}{T_e - T_j^i}$ compensa el calor absorbido por las ollas secundarias, aunque el agua en éstas no haya llegado a ebullición. Este factor varía entre cero y uno y es la cantidad de calor absorbido respecto a la necesaria para ebullición el agua contenida en todas las ollas.

6. **La velocidad de quemado (v_q)** es una medida de la rapidez con la que fue consumido el combustible durante el tiempo en que el agua llegó a ebullición (Δt), se define como:

$$v_q = \frac{m_{ls}}{\Delta t}. \quad (3.6)$$

En las fases de alta potencia se busca maximizar este indicador, mientras que en la fase de baja potencia, lo deseable es minimizarlo.

7. **La potencia** (P) es la razón entre la energía de la leña consumida por el dispositivo por unidad de tiempo, se mide en Watts y se define de la siguiente forma:

$$P = \frac{q_1 m_{ls}}{60 \Delta t}. \quad (3.7)$$

Del mismo modo que con la v_q , en las fases de alta potencia se busca maximizar y, en la fase de baja potencia, minimizar.

Muchos de los parámetros anteriores pueden modificarse para cuando la estufa es multi-olla, es decir, que permite la colocación de ollas secundarias (iguales en capacidad a la olla principal) sobre la superficie del comal (o comales) secundarios, la metodología SPTS considera a las ollas secundarias sólo en las fases de alta potencia. Esta ampliación de las definiciones anteriores avanza en la evaluación integral de las estufas de leña.

3.1.3. Prueba de Cocinado Controlado

La Prueba de Cocinado Controlado (PCC) también conocida como *Control Cooking Test*, CCT por sus siglas en inglés, tiene como objetivo evaluar el desempeño de estufas mejoradas respecto a la tecnología tradicional que pretenden reemplazar mediante la elaboración de un alimento típico que la gente local cocine cotidianamente. Las tortillas fueron el alimento seleccionado para realizar esta prueba pues son alimento básico en las diferentes regiones del campo mexicano, estudios anteriores muestran que una parte considerable del consumo de leña se destina a la elaboración de tortillas [49, 45, 5].

A diferencia de la PEA, la PCC con tortillas no puede ser realizada en cualquier tipo de estufa pues en principio es necesario que las estufas cuenten con un comal, es decir, en esta prueba es necesario que las estufas a evaluar se adecuen a las necesidades tradicionales de cocinado de las personas. El desarrollo de la prueba está a cargo de una señora que cocina las

tortillas, la cual decide sobre el ritmo de preparación del alimento de acuerdo a las prácticas locales.

La prueba comienza con la estufa a temperatura ambiente y en todos los casos se prepara la misma cantidad de alimento, en este caso fue 1.3 kg de masa para tortillas.

La metodología de la prueba es la siguiente:

1. Preparación

- a)* Pesado de la leña y medición de su humedad.
- b)* Pesado de la masa de alimento a preparar.

2. Estufa encendida

- a)* El reloj inicia cuando se enciende el ocote y se lleva la flama al interior de la estufa para iniciar el fuego.
- b)* La cocinera comienza a tortear y ella decide en qué momento poner la primera tortilla sobre el comal. Se prosigue con la elaboración del alimento.
- c)* Cuando la última tortilla está lista, se acaba la cuenta de tiempo.

3. Estufa apagada

- a)* Se sacan los leños ardientes y se pesan.
- b)* Se pesa la cantidad de alimento preparado (tortillas).
- c)* Se saca el carbón remanente con la espátula y se pesa.
- d)* Se le pregunta a la cocinera sobre el funcionamiento de la estufa.

Los parámetros relevantes en esta prueba, algunos de ellos definidos en la sección anterior (3.1.2), son los siguientes [48]:

1. **El tiempo de duración de la prueba Δt** , en este parámetro se relacionan diferentes características de la estufa como la rapidez con la que se calientan los comales y su área. Del mismo modo que en la PEA, se busca minimizar este parámetro.
2. **El equivalente de leña seca consumida (m_{ls})**, definido por la ec. (2.6). Análogamente a la PEA, lo deseable es minimizar este indicador.
3. **La masa de carbón (m_c)**, es la cantidad de carbón remanente durante la PCC, es una medida indirecta de la calidad de la combustión. Se busca minimizar esta cantidad.
4. **La masa de tortillas (m_t)**, es la cantidad final de tortillas cocinadas, este parámetro está relacionado a la resequedad de las tortillas, es decir, a la cantidad de agua que se evapora durante el proceso de cocinado. Lo preferible es maximizar esta cantidad de alimento final, o equivalentemente, minimizar la cantidad de agua evaporada.
5. **El Consumo Específico de Combustible (CEC)** descrito anteriormente (ec. (3.4)), relaciona la cantidad de leña seca necesaria para cocinar determinada cantidad de tortillas, del mismo modo que para la PEA, se busca minimizar este indicador.

3.1.4. Análisis de temperaturas

Con el objetivo de profundizar en el análisis del desempeño termodinámico de las estufas, fue realizada la medición de temperaturas en tiempo real en puntos representativos de la estufa: cámara de combustión, centro de comal principal, centro comal secundario, chimenea (a 15 cm sobre el cuerpo de la estufa) y agua (sólo para la PEA). A continuación se muestra un esquema de los puntos de la medición, ver figura 3.1.

A partir de estas mediciones es posible determinar 2 parámetros más de desempeño de las estufas y el fogón:



Figura 3.1: Ubicación de los termómetros en las estufas. La figura muestra como ejemplo a la estufa Onil.

1. La **temperatura promedio** bajo condiciones de estado estacionario (definidas en sección 4.1.4), para diferentes puntos de los dispositivos de cocción: cámara de combustión, centro del comal principal, centro del comal secundario y chimenea.
2. La **velocidad de transferencia de energía al agua** (v_a), mide el aumento de temperatura en el agua por unidad de tiempo. Este parámetro es una tasa de transferencia efectiva de calor hacia el alimento, que a diferencia de la velocidad de quemado (v_q) o la potencia (P), parámetros de la metodología SPTP dimensionalmente equivalentes a v_a , considera estrictamente el calor útil recibido por el alimento (agua). La velocidad de quemado y la potencia están calculados respecto a la energía de la leña consumida

durante la prueba. Sin embargo, altos consumos de combustible resultan en que los valores de estos parámetros sean grandes, aunque la tasa energía transferida al agua no lo sea, por ello consideramos que este nuevo indicador refleja de manera más precisa el desempeño termodinámico de los dispositivos de cocción.

Además, este indicador pone al tiempo como variable indispensable para caracterizar a los dispositivos, considerando el ahorro en tiempo como uno de los factores más importantes en la adopción de algún modelo de estufa. También en él, se encuentra de manera implícita la transferencia global de calor de la estufa hacia el alimento, así como la inercia térmica de la estufa, es decir, la capacidad de ésta de almacenar calor.

La velocidad de transferencia de energía al agua puede medirse dentro del contexto de la Prueba de Ebullición de Agua colocando uno de los termómetros dentro de la olla con agua (en el centro a 5 cm por arriba de la base de la olla), pero no puede hacerse algo equivalente durante el cocinado de tortillas, alimento elegido para la Prueba de Cocinado Controlado debido a las características de preparación de dicho alimento. Sin embargo, es posible calcular este indicador para cualquier alimento que se cocine dentro de una olla o sea posible perforar para medir su temperatura interna.

La comparación de estos nuevos parámetros, junto con los recomendados por la metodología SPTP, forman el cuerpo de este estudio. Sin embargo, es muy importante relacionar los resultados que arroja la PEA respecto a los obtenidos en la PCC pues en esta prueba se reproducen las técnicas de cocinado real.

3.1.5. Análisis de emisiones ambientales

La combustión en estufas de leña produce una gran cantidad de emisiones ligadas a problemas ambientales y de salud humana [2]. Pese a que existen una gran cantidad de

estudios relacionados a las emisiones, todavía es poca la literatura que relaciona el desempeño energético de los dispositivos de cocción con sus emisiones, el presente trabajo avanza en esa dirección al incluir un análisis de emisiones. Sin embargo, las emisiones debidas a la quema de leña conforman por sí mismas un amplio horizonte dentro del cual el presente estudio sólo analiza algunos de los posibles parámetros relevantes.

La medición de emisiones fue realizada solamente durante la Prueba de Cocinado Controlado, como parte de la evaluación integral de las estufas de leña, un reporte completo sobre la metodología de medición puede consultarse en GIRA-CIEco, 2009 [52]. Para fines del presente estudio, basta con relacionar los resultados de desempeño energético con los de emisiones obtenidos en dicho estudio.

La metodología para la evaluación de emisiones de GEI fue desarrollada por la Universidad de California en Irvine (UCI, por sus siglas en inglés) en colaboración con el Centro de Investigaciones en Ecosistemas (CIEco) de la UNAM y el Grupo Interdisciplinario de Tecnología Rural Apropiada, A.C. y se encuentra descrita en Johnson, et al. [53]. Las mediciones realizadas conducen a la determinación de dos indicadores más que son:

1. **La Eficiencia de Combustión Nominal (ECN)**, mide la cantidad de productos de la combustión que se convierten en bióxido de carbono y se calcula de la siguiente manera:

$$ECN = \frac{CO_2}{CO + CO_2}, \quad (3.8)$$

donde CO es la cantidad de monóxido de carbono medido durante la prueba y CO_2 el bióxido de carbono. Como se vio en la sección 2.3, el monóxido de carbono es indicador de la completez y por lo tanto de la calidad de la combustión. Lo óptimo es minimizar la cantidad de CO generado, lo que conduce a maximizar la ECN .

2. **Los factores de emisión (f_e)**, definidos como el cociente de la emisión promedio de un

Parámetro de desempeño	Abreviatura	Tendencia óptima ¹
Tiempo de duración	Δt	-
Equivalente de leña seca consumida	m_{ls}	-
Masa de agua evaporada	m_a^e	-
Masa de carbón	m_c	-
Masa de tortillas	m_t	+
Eficiencia térmica	η	+
Consumo Específico de Combustible	CEC	-
Velocidad de quemado	v_q	\pm
Potencia	P	\pm
Velocidad de transferencia de energía al agua	v_a	+
Eficiencia de Combustión Nominal	ECN	+
Factores de emisión de GEI	f_e	-

Tabla 3.1: Tendencia óptima de los parámetros de desempeño. El signo (+) significa: maximizar y, el signo (-) minimizar.

contaminante por unidad de actividad específica [54] , en el caso de la combustión de la leña, son expresados como el cociente de la masa de un contaminante (en gramos) entre kilogramo de leña seca consumida. Se obtuvieron los factores de emisión para algunos Gases de Efecto Invernadero (bióxido de carbono (CO_2), monóxido de carbono (CO), metano (CH_4) e hidrocarburos no derivados del metano ($HCNM$)) y partículas de materia ($PM_{2,5}$). Se busca minimizar el valor de estos parámetros.

Como corolario de este aparatado en el que se han descrito los diferentes parámetros de funcionamiento de los dispositivos de cocción, es conveniente resaltar que cada uno de estos

parámetros tiene una tendencia óptima que puede ser hacia su maximización o hacia su minimización, esta tendencia puede variar en las distintas fases de las pruebas. La tabla 3.1 muestra de conjunto los parámetros de funcionamiento medidos en el presente estudio, tanto para la PEA, la PCC, el análisis de temperaturas y de emisiones, así como las tendencias óptimas de los dichos parámetros.

3.2. Descripción de los dispositivos de cocción

En general es posible agrupar a las tecnologías de cocción con leña en 3 grupos diferentes: 1) con fuego abierto, 2) con fuego cerrado y 3) las mejoradas que poseen chimenea [3]. En el presente estudio se comparó el desempeño energético de 4 modelos de estufa mejorada: Citlalli, Mexalit M-20, Onil y Patsari *versus* la tecnología tradicional, el fogón de 3 piedras. Todos los modelos de estufa considerados forman parte de los dispositivos que mantienen al fuego encerrado, mientras que el fogón tradicional forma parte de las tecnologías de cocción con fuego abierto.

3.2.1. Fogón tradicional de 3 piedras

El fogón tradicional de 3 piedras es el método rural tradicional de cocción más utilizado en México y en todo el mundo [2, 17, 3]. En este dispositivo comúnmente se utiliza leña y residuos de cultivos, su valor económico es nulo al requerir sólo 3 piedras de aproximadamente el mismo tamaño para sostener y mantener en balance a la olla de cocinado o el comal sobre el fuego, ver figura 3.2.

Se calcula que en el fogón más del 60 % del calor generado por la leña se transmite al aire circundante [3], a través de pérdidas por disipación en los modos de radiación y convección. Las características térmicas de este dispositivo provocan una temperatura baja en el fuego,



Figura 3.2: Fogón tradicional de 3 piedras, la fotografía de la izquierda fue tomada durante las pruebas experimentales en interiores, mientras que en la de la derecha se muestra en exteriores.

pues al no poseer cámara de combustión, la cantidad de aire circundante es mayor de la necesaria para producir una temperatura alta; además al carecer del efecto de tiro de una chimenea (ver sección 2.2.1), no se garantiza una buena circulación y mezclado de los gases de combustión con el oxígeno. Por estas 2 razones la combustión es incompleta (sección 2.3), lo que genera una gran cantidad de gases volátiles y contaminantes que permanecen dentro de la cocina.

Otra característica importante del fogón, es que sólo una olla puede ser usada a la vez, lo que reduce su versatilidad en condiciones de uso real, ocasionando que muchas veces haya más de un fogón en cada hogar.

Existe un alto riesgo de quemaduras, sobretodo cuando el fogón se localiza en el interior del hogar. El riesgo es mayor para niños y mujeres, que son los que cotidianamente permanecen en casa.

El desempeño del fogón tradicional de 3 piedras depende en gran medida de la habilidad y cuidado del usuario. Si los leños son empujados hacia el centro mientras son consumidos, el fuego producido puede ser caliente y relativamente eficiente, a diferencia de si los leños

arden dispersos entre sí y lejos de la olla de cocinado [55].

El fuego abierto tiene varias ventajas para los usuarios, ya que provee de calefacción en épocas de frío, de luz durante las noches y de un sitio de reunión que en muchos lugares tiene significados inclusive religiosos [3]. Así mismo, puede utilizarse para colocar grandes recipientes como los requeridos para calentar agua para baño y para las frecuentes fiestas de las comunidades.

3.2.2. Estufa Citlalli

La estufa mejorada de leña Citlalli es una estufa de reciente diseño, la cual es prefabricada por la organización mexicana *Mujeres Trabajadoras A.C.* que tiene su centro de operaciones en el sureste mexicano con sede en Mérida, Yucatán.

El modelo de estufa Citlalli analizado consiste en un cajón formado con estructura metálica y paredes laterales hechas de fibrocemento, el cual es una mezcla de cemento y fibras de refuerzo, se caracteriza por su rigidez y su ligereza (tiene un peso de 30 kg cuando no tiene relleno), es resistente a la humedad, es un buen aislante térmico y soporta temperaturas de más de 1200 °C.

Sus dimensiones son: 0.6 m de largo \times 0.3 m de ancho \times 0.31 m de altura, la totalidad de la superficie superior es utilizada como plancha o comal. La plancha es de acero de 4 mm de grosor, ver figura 3.3.

La cámara de combustión está hecha de acero, material caracterizado por su alta conductividad térmica, su diseño es semejante al llamado *codo rocket* [56] y tiene las siguientes características:

1. Tiro interno, debido a un tubo de sección transversal constante, puesto justo encima de la cama de combustible y debajo de la olla de cocinado, este efecto también se logra



Figura 3.3: Estufa Citlalli, la fotografía de la izquierda muestra su exterior y la de la derecha el diseño interno.

con una pieza en forma de codo, que en su parte horizontal realiza la quemada de la leña y la vertical sirve como chimenea para lograr un mayor efecto de succión de aire.

2. Rejilla para la entrada de aire secundario, colocada debajo de la cámara de combustión, permite que una parte del aire que entra se caliente y luego alimente la cama de combustible, manteniendo alta la temperatura de la flama y optimizando la combustión.
3. El tamaño de la cámara de combustión es pequeño, por lo que es recomendable usar leños cortados finamente.

Una vez que los gases salen de la cámara de combustión son conducidos por dos placas o regletas de acero galvanizado hacia el comal secundario, hasta desembocar en la chimenea.

El relleno de la estufa Citlalli es de arena o grava fina, ocupando todo el interior del cuerpo de la estufa, con un desnivel a la salida de la cámara de combustión hacia las regletas para permitir el flujo de los gases.

3.2.3. Estufa Mexalit M-20

La estufa mejorada de leña Mexalit M-20 es de reciente creación, se fabrica a gran escala por la empresa *Compañía Mexicana de Concreto Pretensado (COMECOP), S.A. de C.V.*, filial de la empresa *Mexalit S.A. de C.V.*, en una planta localizada en Tizayuca, Hidalgo.

El cuerpo de la estufa Mexalit M-20 consiste en 2 piezas de concreto, una de ellas es una plancha rectangular sobre la cual se coloca la segunda pieza, sostenida por el centro con medio ladrillo, formando una cavidad hueca. Este modelo carece de relleno aislante, ver figura 3.4.



Figura 3.4: Estufa Mexalit M-20, la fotografía de la izquierda muestra su exterior y la de la derecha el diseño interno.

Sus dimensiones son: 0.8 m de largo \times 0.545 m de ancho \times 0.2 m de altura, cuenta con un comal principal circular y dos comales secundarios circulares, todos ellos de acero de 0.6 mm y 2.4 mm, respectivamente. El diseño de los comales ocasiona que éstos no sellen en la

pieza de concreto, provocando fugas de humo durante la operación de la estufa.

La cámara de combustión consiste en una cavidad llena de aire del tamaño de la pieza superior, donde sólo se encuentra un pedazo de ladrillo, entre el comal principal y los secundarios que ayuda a sostenerla y a redireccionar el flujo de calor; no hay *codo rocket*, túneles, baffles, regletas ni ningún otro tipo de diseño interior. Hacia atrás de los comales secundarios se encuentra el agujero para la chimenea.

3.2.4. Estufa Onil

La estufa mejorada de leña Onil fue diseñada hace más de 20 años por el ingeniero Donald O'neal y es difundida por la organización *Helps International*, que ha centrado su trabajo en Guatemala. Helps comenzó sus operaciones en México en el presente año, al inaugurar su planta industrial en el Valle de Toluca, Estado de México. Actualmente se han implementado más de 9 mil estufas en México en los estados de Chiapas, Oaxaca, Puebla, Hidalgo y Querétaro [57].

El cuerpo de esta estufa consiste de tres piezas de concreto armado (reforzado con hierro) y sus dimensiones son: 1.1 m de largo \times 0.4 m de ancho \times 0.35 m de altura, en la superficie superior es colocada una plancha rectangular o comal de acero, cuyo grosor es de 4.5 mm, ver figura 3.5.

La cámara de combustión de la estufa Onil está formada por 8 piezas de barro cocido, caracterizado por ser un buen aislante térmico, lo que permite conservar el calor de la combustión. El diseño, al igual que la estufa Citlalli, está basado en el principio del *codo Rocket* [57] (ver sección 3.2.2). Adicionalmente, cuenta con otras características de diseño enfocadas a optimizar la transferencia de calor hacia la olla de cocinado [35]:

1. Para aumentar el intercambio térmico por convección y radiación, la estufa Onil cuenta con tapas desmontables en los comales que al ser levantadas permiten que la olla de



Figura 3.5: Estufa Onil, la fotografía de la izquierda muestra su exterior y la de la derecha el diseño interno.

cocinado esté en contacto directo con los gases de combustión.

2. La sección transversal por la que circulan los gases se mantiene constante, desde la entrada a la cámara de combustión, pasando por el túnel interno hasta la chimenea. Este diseño permite que la velocidad del flujo de gases se mantenga constante y se minimicen pérdidas por disipación de calor.

Como relleno utiliza piedra pómez, piedra de origen volcánico caracterizada por su alta porosidad, ligereza y como buen aislante térmico a altas temperaturas.

3.2.5. Estufa Patsari

La estufa mejorada de leña Patsari, que en lengua purépecha significa “la que guarda”, haciendo referencia a que *guarda el calor*, así como la que *conserva la salud y cuida los*

bosques [58], es el resultado de más 15 años de trabajo realizado por el Grupo Interdisciplinario de Tecnología Rural Apropiada (*GIRA A.C.*) en colaboración con el Centro de Investigaciones en Ecosistemas (CIEco) y el Instituto de Ingeniería (II) de la UNAM. La estufa Patsari es el resultado de optimizar la eficiencia de combustión y la transferencia de calor de la estufa *Lorena* [58] difundida en México y Guatemala desde hace más de 30 años. Actualmente este modelo se ha diseminado principalmente en la región Purépecha del estado de Michoacán, sin embargo ha llegado también a más de 15 estados de la República como Oaxaca, Guerrero, Puebla, Chiapas, Veracruz, Yucatán, Jalisco, Nayarit, San Luis Potosí, Sonora, Sinaloa, Chihuahua, Baja California Norte y Coahuila. Se estima que se cuenta con unas 20 mil estufas Patsari difundidas en el país.

A diferencia de los 3 modelos de estufa mejorada anteriores, la estufa Patsari no es prefabricada, es de construcción *in situ* y requiere de moldes para poder construirse. El cuerpo de la estufa esta hecho en base a ladrillos rojos y cemento, como relleno se recomienda el uso de grava fina como primera capa y una mezcla de cemento, barro y arena en la capa superior, tanto la grava como la mezcla con barro se caracterizan por ser materiales aislantes.

Las dimensiones de esta estufa son: 1.05 m de largo \times 0.7 m de ancho \times 0.28 m de altura, en la superficie superior se coloca el comal principal y los dos secundarios, todos de acero y forma circular con 1.6 mm de grosor, ver figura 3.6.

La cámara de combustión está hecha a partir de ladrillo rojo y cemento, materiales aislantes que conservan el calor de la combustión, el diseño permite que lo gases entren el contacto con gran parte de la superficie del comal principal, para luego viajar a través de dos túneles que los conducen a los comales secundarios. Para aumentar la transferencia de calor convectivo, se aumenta la velocidad de los gases al disminuir la sección transversal de los túneles mediante un baffle debajo de los comales secundarios.

Al llegar a la chimenea, los gases de la combustión, son conducidos por una pieza metálica



Figura 3.6: Estufa Patsari, la fotografía de la izquierda muestra su exterior y la de la derecha el diseño interno.

que sella con el cuerpo de la estufa y la chimenea, evitando fugas de humo.

La tabla 3.2 resume las características más relevantes de los distintos dispositivos de cocción.

	Citlalli	Mexalit M-20	Onil	Patsari	Fogón
Altura cámara de combustión	0.27 m	0.2 m	0.28 m	0.22 m	0.2 m
Volumen cámara de combustión	$0.00424 m^3$	$0.03728 m^3$	$0.0049 m^3$	$0.01511 m^3$	NA
Diseño cámara de combustión	rocket	ninguno	rocket	optimizado	NA
Forma comales	rectangular	circular	rectangular	circular	circular
Área comal principal	$0.09 m^2$	$0.189 m^2$	$0.123 m^2$	$0.212 m^2$	$0.212 m^2$
Área comales secundarios	$0.09 m^2$	$0.04 m^2$	$0.123 m^2$	$0.11 m^2$	NA
Material chimenea	lámina galvanizada	lámina galvanizada	lámina galvanizada	lámina galvanizada	NA
Dimensiones chimenea	3 m largo × 0.1 m D ²	3 m largo × 0.1 m D	3 m largo × 0.1 m D	3 m largo × 0.1 m D	NA
Material paredes	fibrocemento	concreto	concreto	ladrillo rojo y cemento	NA
Material relleno	grava	ninguno	piedra pómez	arena y barro	NA

Tabla 3.2: Comparativo de características de diseño de los diferentes dispositivos de cocción.

Capítulo 4

Resultados

En este capítulo se muestran los resultados obtenidos en las Pruebas de Ebullición de Agua y Cocinado Controlado, primero se presentan los resultados para los parámetros que propone la metodología *Stove Performance Testing Protocol* (SPTP) para después proseguir con los que arroja el análisis de temperaturas y emisiones.

Por la naturaleza de las pruebas realizadas existen parámetros fuertemente relacionados entre sí, en este capítulo se señalan estas relaciones.

4.1. Prueba de Ebullición de Agua

En esta sección se muestran y discuten los resultados obtenidos en la Prueba de Ebullición de Agua (PEA).

4.1.1. Fase de alta potencia con inicio frío

Empezaremos presentando los resultados de los diferentes parámetros de la metodología SPTP obtenidos en la fase 1, ver tabla 4.1.

Parámetro	Citlalli	Mexalit M-20	Onil	Patsari	Fogón
Δt	74 ± 11^a	46 ± 6^b	44 ± 9^b	$32 \pm 3^{b,c}$	14 ± 4^c
m_{ls}	1217 ± 211^b	1860 ± 227^a	$978 \pm 229^{b,c}$	$1068 \pm 68^{b,c}$	674 ± 273^c
m_a^e	318 ± 91^a	165 ± 66^b	183 ± 88^b	120 ± 12^b	83 ± 8^b
η	$11 \pm 2\%^a$	$4 \pm 1\%^b$	$11 \pm 1\%^a$	$10 \pm 1\%^a$	$12 \pm 3\%^a$
CEC	0.25 ± 0.04^b	0.62 ± 0.08^a	0.21 ± 0.04^b	0.22 ± 0.01^b	0.23 ± 0.10^b
v_q	16 ± 2^c	41 ± 6^a	$23 \pm 4^{b,c}$	$33 \pm 4^{a,b}$	48 ± 9^a
P	4812 ± 455^c	12012 ± 1761^a	$6686 \pm 1165^{b,c}$	$9790 \pm 1189^{a,b}$	14030 ± 3796^a

Tabla 4.1: Parámetros de desempeño de los diferentes dispositivos para la PEA fase 1.

Los resultados presentan los promedios del conjunto de réplicas para cada parámetro y cada dispositivo, la incertidumbre asociada es la desviación estándar. Adicionalmente, se realizó un análisis estadístico para determinar las diferencias significativas con un intervalo de confianza del 95 % ($p < 0.05$) entre los dispositivos, se asocia a al dispositivo con mayor magnitud del parámetro, b al grupo de dispositivos significativamente diferentes al primer grupo (a) y así sucesivamente. Cuando un dispositivo sea caracterizado como a,b , significa que se encuentra en ambos grupos.

Es de notar que en esta prueba el fogón realiza la tarea de hervir el agua mucho más rápido que cualquiera de los modelos de estufa, tardando 14 min, que es menos de la mitad del tiempo que tarda la estufa más rápida, la Patsari. La estufa Citlalli realiza la prueba en un tiempo significativamente mayor ($p < 0.05$) que las estufas Patsari y Onil.

También el fogón aparece con la eficiencia térmica (η) más alta con 12 %, aunque ésta es una diferencia no significativa con respecto a los 3 modelos de estufas que le siguen (Onil,

Citlalli y Patsari). Esto se debe principalmente a dos razones que favorecen la transferencia de calor en el fogón: (1) el fuego está en contacto directo con la olla de cocinado a diferencia de las estufas que tienen como intermediario al comal, el efecto del comal reduce la transferencia de calor radiativo procedente de la flama que contribuye con alrededor del 10 al 12% [18] del calor total transferido al fogón; y (2) el contacto ocurre no sólo en la base de la olla sino que, la flama envuelve una parte considerable de su superficie.

La estufa Onil es la única de los modelos evaluados que permite que parte de sus comales pueda ser removida para que las ollas de cocinado estén en contacto directo con el fuego, en el caso del comal principal, y en contacto con los gases de combustión, en el caso del comal secundario. Este diseño imita al fogón favoreciendo la capacidad de transferencia de calor radiativo y convectivo, a esto se debe la alta eficiencia de este modelo en comparación con los otros, sobretodo mostrada durante la fase 2. La razón de la alta eficiencia de la estufa Citlalli se discutirá de inmediato.

Parecería que en consumo de combustible (m_{ls}) el dispositivo más ahorrador es el fogón, sin embargo no es significativamente diferente a las estufas Onil y Patsari. Mientras que el modelo de mayor consumo de combustible es el Mexalit M-20 y a continuación el Citlalli.

Podría parecer que la eficiencia térmica (η) es un buen parámetro para caracterizar el comportamiento térmico de los diferentes dispositivos, sin embargo, este parámetro por sí solo es inexacto pues recompensa a las estufas que tardan mucho tiempo en la prueba. La eficiencia térmica aunque está fuertemente relacionada (de manera inversamente proporcional) con el consumo de combustible (m_{ls}), también está asociada a la masa de agua evaporada durante la prueba (m_a^e) ver ec. (3.1). Los dispositivos que tardaron más tiempo en hervir el agua, estufa Citlalli (74 min) y Mexalit M-20 (46 min), evaporaron la mayor cantidad de agua (casi 4 y 2 veces más que el fogón, respectivamente) lo que trae consigo un aumento en la eficiencia térmica de estos modelos, aunque hayan consumido más combustible que los otros.

Por otro lado, en Consumo Específico de Combustible (CEC) los mejores desempeños los tienen la estufa Onil y la Patsari, aunque esta diferencia no es significativa respecto al fogón. Mientras que la estufa Mexalit M-20 aproximadamente triplica estos valores obteniendo así el mayor CEC . Esto se debe en parte a que el agua calentada en las ollas secundarias, contribuye positivamente en este parámetro, la estufa Mexalit M-20, por lo pequeño de sus comales secundarios, no participa de esta contribución.

La velocidad de quemado (v_q) relaciona el consumo de combustible con el tiempo de duración de la prueba para cada dispositivo, en este parámetro se observa que el fogón tiene la velocidad de quemado más grande, seguido por la estufa Mexalit M-20; presentando una diferencia significativa con respecto a los otros modelos de estufa. Mientras que la v_q menor la tiene la estufa Citlalli, por lo que en este caso un alto consumo de combustible no se traduce en una quema rápida de éste, dado que este modelo de estufa tarda demasiado en realizar la tarea de ebullir el agua.

La potencia (P) es un parámetro proporcional a la velocidad de quemado (v_q) pues también es dimensionalmente energía por unidad de tiempo (Watts), el fogón es en esta fase de la PEA el dispositivo más potente con aproximadamente el triple de potencia (14, 300 W) que el modelo menos potente, la estufa Citlalli con 4, 813 W.

4.1.2. Fase de alta potencia con inicio caliente

Los resultados de los mismos parámetros obtenidos en la fase 2 se muestran en la tabla 4.2. Para esta fase se considera que el fogón tiene el mismo desempeño que en la fase 1.

Es de especial interés comparar los resultados de la tabla 4.2 con los de la tabla 4.1, es decir, comparar los mismos parámetros para las 2 fases de alta potencia que se diferencian sólo por tener condiciones térmicas iniciales distintas. En la tabla 4.3 se muestra el porcentaje de mejoría de la fase 2 respecto a la fase 1.

Parámetro	Citlalli	Mexalit M-20	Onil	Patsari	Fogón
Δt	55 ± 6^a	50 ± 6^a	32 ± 6^b	$26 \pm 2^{b,c}$	14 ± 4^c
m_{ls}	1260 ± 128^b	1710 ± 212^a	705 ± 125^c	$1028 \pm 176^{b,c}$	674 ± 273^c
m_a^e	399 ± 163^a	203 ± 34^b	134 ± 35^b	107 ± 14^b	83 ± 16^b
η	$12 \pm 2\%^{a,b}$	$5 \pm 1\%^c$	$15 \pm 2\%^a$	$11 \pm 1\%^b$	$12 \pm 3\%^{a,b}$
CEC	0.24 ± 0.02^b	0.58 ± 0.05^a	0.15 ± 0.02^b	0.19 ± 0.02^b	0.22 ± 0.1^b
v_q	23 ± 3^b	$34 \pm 2^{a,b}$	23 ± 3^b	40 ± 7^a	48 ± 9^a
P	6754 ± 1021^b	$9984 \pm 651^{a,b}$	6639 ± 1571^b	11829 ± 2128^a	14030 ± 3796^a

Tabla 4.2: Parámetros de desempeño de los diferentes dispositivos para la PEA fase 2.

Podemos observar que para la mayoría de los parámetros la tendencia mostrada, es decir, el orden en el que aparecen las estufas durante la fase 1 se mantiene para la fase 2, tal es el caso del tiempo de ebullición (Δt) donde la estufa Patsari y Onil son significativamente más rápidas en concluir la prueba que las Mexalit M-20 y Citlalli. Como puede verse en la tabla 4.3 todas las estufas disminuyen el tiempo que tardan en hervir la misma cantidad de agua, excepto la Mexalit M-20 que incrementa el tiempo en un 10 %.

En términos de la leña consumida (m_{ls}), todos los modelos de estufa redujeron el consumo de combustible, excepto la Citlalli que lo aumentó en un 4 %. Por otro lado, la estufa Onil tiene un alto ahorro (de 28 %) de combustible en esta fase (ver tabla 4.3) por lo que junto con la estufa Patsari y el fogón, tienen los más bajos consumos.

En la masa de agua evaporada (m_a^e), nuevamente la estufa Patsari es la que produce menos, este modelo junto con el Onil reducen durante esta fase la cantidad de vapor, mientras que la Mexalit M-20 y la Citlalli lo aumentan. Sólo el modelo Citlalli es significativamente

Parámetro	Citlalli	Mexalit M-20	Onil	Patsari
Δt	26 %	-10 %	28 %	20 %
m_{ls}	-4 %	8 %	28 %	4 %
m_a^e	-25 %	-23 %	27 %	11 %
η	7 %	12 %	22 %	8 %
CEC	4 %	6 %	28 %	11 %
v_q	29 %	-20 %	-1 %	17 %
P	29 %	-20 %	-1 %	17 %

Tabla 4.3: Comparación de los parámetros de desempeño de los diferentes dispositivos entre fase 1 y 2 de la PEA.

mayor en este indicador a los demás dispositivos.

En Consumo Específico de Combustible (CEC), todas las estufas disminuyen su valor, lo que indica una mayor cantidad de alimento final por unidad de combustible. Las estufas Onil y Patsari, lo disminuyen por debajo del fogón, sin embargo, sólo la estufa Mexalit tiene un CEC significativamente mayor respecto a los demás.

En la eficiencia térmica (η) también se mantiene la tendencia de la fase 1, la estufa Onil se adelanta a todas aumentando en 4 % este parámetro, mientras que los demás modelos sólo mejoran en 1 %; este resultado implica que 3 de los 4 modelos de estufa están en iguales o mejores condiciones que el fogón, en términos de esta definición de eficiencia térmica. Un incremento en este parámetro puede estar relacionado con los ahorros en combustible, es por ello que la estufa Onil mejoró tanto su eficiencia térmica al ahorrar el 28 % de leña respecto a la fase 1 (ver tabla 4.3). Por otro lado, aunque la estufa Mexalit M-20 aumentó su

consumo de combustible en un 10 %, también incrementó la masa de agua evaporada en un 23 % ocasionando que su eficiencia se incrementara, este resultado muestra que un aumento en η no siempre refleja ahorros en combustible.

Para los parámetros de velocidad de quemado (v_q) y potencia (P), que son proporcionales pero están expresados en distintas unidades, la tendencia mostrada en la fase 1 se modifica en la fase 2. Aunque el fogón, seguido por la estufa Mexalit, se mantiene como el dispositivo de mayor velocidad de quemado y potencia en ambas fases, en la fase 2 la estufa Patsari no es significativamente diferente de los dispositivos anteriores. Las estufas Citlalli y Onil se mantienen como los dispositivos de menos potencia, aunque la estufa Citlalli aumenta su valor en estos parámetros en un 29 % (ver tabla 4.3), mientras que la estufa Onil no muestra una variación considerable, con un decremento de 1 % entre la fase 1 y la 2.

4.1.3. Fase de baja potencia o fuego lento

Hasta ahora se han mostrado los parámetros de desempeño de los distintos dispositivos de cocción sólo para las fases de alta potencia, primero por separado y luego en comparación. A continuación se abordarán los resultados obtenidos en la fase de baja potencia o ebullición a fuego lento (fase 3), esta fase es de gran importancia por ser similar a muchas tareas de cocinado prolongado que se efectúan en los hogares.

Un requisito en esta fase fue mantener el agua de la olla principal con una temperatura lo más cercana a 3 °C por debajo del punto de ebullición local (92 °C en Pátzcuaro, Mich.) durante 45 minutos, para satisfacer esta indicación se manipuló continuamente la cantidad de leña dentro de la cámara de combustión, muchas veces quedando sólo las brasas. Los resultados se muestran en la tabla 4.4.

En términos de consumo de combustible (m_{ls}) es de notorio que durante la fase de baja potencia hay un consumo de leña seca de aproximadamente la mitad con respecto a las

Parámetro	Citlalli	Mexalit M-20	Onil	Patsari	Fogón
m_{l_s}	461 ± 59^b	961 ± 156^a	535 ± 111^b	598 ± 152^b	481 ± 82^b
m_a^e	382 ± 59^a	396 ± 41^a	432 ± 60^a	414 ± 76^a	438 ± 89^a
η	$11 \pm 2\%^a$	$5 \pm 1\%^b$	$11 \pm 2\%^a$	$10 \pm 4\%^{a,b}$	$12 \pm 3\%^a$
CEC	0.18 ± 0.03^b	0.37 ± 0.07^a	0.20 ± 0.05^b	0.22 ± 0.05^b	0.18 ± 0.04^b
v_q	10 ± 1^b	21 ± 3^a	12 ± 2^b	13 ± 3^b	11 ± 2^b
P	3005 ± 385^b	6262 ± 1015^a	3489 ± 721^b	3899 ± 988^b	3135 ± 531^b

Tabla 4.4: Parámetros de desempeño de los diferentes dispositivos para la PEA fase 3.

fases de alta potencia para todos los dispositivos. La tecnología más ahorradora es la estufa Citlalli, seguida por el fogón, las estufas Onil y Patsari, finalmente con el consumo más alto de leña está la estufa Mexalit M-20 con el doble que la estufa Citlalli. Sólo la estufa Mexalit M-20 tiene un valor significativamente mayor a los demás dispositivos, es de resaltar que los rangos de consumo de combustible son mucho más cercanos entre sí, a diferencia de en las fases de alta potencia.

Para la masa de agua evaporada (m_a^e) tenemos que para todos los dispositivos este parámetro se incrementa considerablemente respecto a las fases anteriores, excepto en la estufa Citlalli, que sobresale por una alta generación de vapor en las fases previas. No hay diferencia significativa en este parámetro entre los dispositivos. En esta fase de baja potencia el fogón fue el dispositivo que generó más vapor, mientras que la estufa que menos agua evaporó es la Citlalli, como puede verse este parámetro cambió mucho la tendencia mostrada en las fases de alta potencia donde la estufa Citlalli era el modelo que significativamente más agua evaporaba, mientras que el fogón era de los de menor (ver tabla 4.1), esto se debe en parte a que la duración de la prueba es de exactamente 45 minutos y la estufa Citlalli

sobresalió en las fases anteriores por ser significativamente más lenta, ocasionando una gran cantidad de vapor. Por otra parte, el hecho de que el fogón evapore mayor cantidad de agua se debe a que la potencia efectiva, es decir, la energía transferida al agua por unidad de tiempo, es mayor en el fogón comparado con las estufas.

La eficiencia térmica (η) es idéntica para todos los dispositivos a la obtenida en la fase 1, excepto para la estufa Mexalit M-20 que pasó de 4 a 5% de la fase 1 a la 3, cabe señalar que la definición utilizada para la eficiencia térmica cambia de las fases anteriores a ésta (ver ec.(3.3)), pues ahora sólo hay una contribución a la energía útil entregada por los dispositivos que tiene que ver con la masa de agua evaporada y no con el aumento en temperatura. La estufa Mexalit M-20 es el único modelo con η significativamente menor.

Con respecto al Consumo Específico de Combustible (*CEC*) observamos que para la fase 3 tenemos que hay 4 dispositivos con un valor cercano entre sí, y uno está aproximadamente duplicando estos valores. La estufa Citlalli junto con el fogón, la estufa Onil y Patsari, tienen el CEC significativamente menor que la estufa Mexalit M-20. Es notorio que las estufas Onil y Patsari que durante la fase 2 mostraron bajos valores de este parámetro, inclusive por debajo del fogón, ahora estén por arriba de éste. Esto se debe a que en esta fase no se contabiliza la contribución al agua total calentada por las ollas secundarias, situación que pone en ventaja al fogón.

Una consecuencia de que esta fase tenga duración constante, es que el consumo de combustible (m_{ls}) es proporcional a la velocidad de quemado (v_q) y a la potencia (P). Estos parámetros son, en esta fase, menores que en las fases anteriores tal y como era de esperarse, sin embargo, la proporción en que se reducen estos parámetros es diferente para cada dispositivo, el ejemplo más notable es el fogón que pasó de 48 a 11 g/min equivalentes a aproximadamente 14,000 y 3,000 Watts entre la fase de alta y baja potencia, mientras que la estufa Citlalli paso de 16 a 10 g/min equivalentes a 5,000 y 3,000 W, respectivamente. Sola-

mente la estufa Mexalit M-20 tiene valores en estos parámetros significativamente mayores que los otros dispositivos.

4.1.4. Análisis de temperaturas

El análisis del perfil de temperaturas complementa y profundiza los resultados anteriores al poner de manifiesto el carácter dinámico del proceso. Para la Prueba de Ebullición de Agua, el termómetro que midió la temperatura del agua de la olla principal es de especial interés pues determina la duración de la prueba, dado que dichos tiempos son diferentes para cada dispositivo, las señales graficadas son de diferente duración. Como puede verse en la figura 4.1, las formas típicas de los perfiles de temperatura cambian de una estufa a otra, mientras que el fogón es bastante lineal, la estufa Citlalli tiene una forma similar a la curva logística.

En términos generales, un aumento lineal en la temperatura se explica por una tasa de transferencia de calor hacia la olla de cocinado constante, mientras que una forma logística tiene que ver con tasas de transferencia de calor variables durante la prueba. La temperatura de ebullición local (T_e), es el límite máximo que puede alcanzar la temperatura del agua, sin embargo se observa que no todos los dispositivos de cocción llegan a T_e asintóticamente, más bien este comportamiento se relaciona con la tasa de calor recibida por la olla de cocinado.

Se observa que los 4 modelos de estufa de leña tardan considerablemente más que el fogón en establecer una pendiente estable de transferencia (ver gráficas superiores de la figura 4.1), lo cual, está asociado a que el calor inicial del fuego es sobre todo absorbido por la estructura (cámara de combustión) más próxima a él; además, principalmente en los modelos Citlalli y Onil, hacia el final de la prueba las tasas de transferencia de calor disminuyen, pues las curvas de temperatura disminuyen su pendiente, esto se atribuye a los diseños de su cámara de combustión, que al ser pequeños se saturan de carbón rápidamente impidiendo un flujo

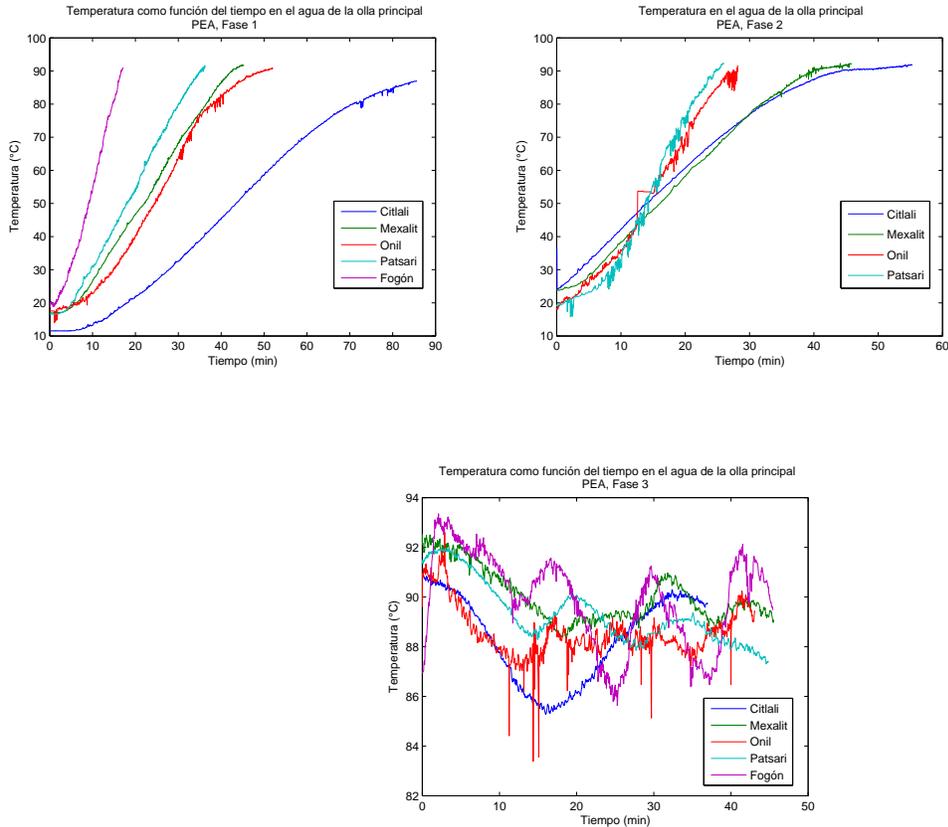


Figura 4.1: Comparación de la temperatura en el agua para los diferentes dispositivos de cocción en las tres fases de la PEA.

de aire adecuado necesario para mantener la velocidad de quema de la leña y la consiguiente transferencia de calor.

Para caracterizar la transferencia de calor a la olla de cocinado, se obtuvo un promedio por estufa de las pendientes de las rectas que mejor aproximan a los perfiles de temperatura para las fases de alta potencia (fases 1 y 2). A este nuevo parámetro se le llama **velocidad de transferencia de energía al agua** (v_a) y es una medida de cuánto aumenta la temperatura del agua por minuto (ver sección 3.1.4). Estas fases son comparables porque el

fuego provocado en la cámara de combustión tiene las mismas características, los resultados pueden verse en la tabla 4.5.

Estufa	v_a [°C/min]		Mejoría
	Fase 1	Fase 2	
Citlalli	1.12 ± 0.08^c	1.42 ± 0.14^c	21 %
Mexalit M-20	$1.90 \pm 0.10^{b,c}$	$1.73 \pm 0.41^{b,c}$	-10 %
Onil	$2.18 \pm 0.53^{b,c}$	$2.98 \pm 0.79^{b,c}$	27 %
Patsari	2.52 ± 0.37^b	3.23 ± 0.46^b	22 %
Fogón	4.62 ± 0.25^a	4.62 ± 0.25^a	NA

Tabla 4.5: Comparación de las pendientes de las temperaturas del agua en fase 1 y 2 para los diferentes dispositivos.

Como puede observarse todos los modelos de estufa, excepto la Mexalit M-20, muestran una mejoría entre la fase 1 y 2, principalmente la estufa Onil aumenta su pendiente, y por tanto la transferencia de calor hacia la olla de cocinado, en un 27 %, seguida por la Patsari y Citlalli con un 22 % y 21 %, respectivamente. Esto significa que en dichos modelos de estufa hay un mejor desempeño cuando éstas se encuentran calientes, es decir, en estos diseños aumenta la transferencia de calor hacia los alimentos. Este resultado concuerda con que los tiempos de duración de la prueba para esos modelos disminuyen con la misma proporción en que aumentan las pendientes entre fase 1 y 2.

El fogón tiene un valor significativamente mayor en la v_a que todos los modelos de estufa, las razones de esta situación se describen en la sección 4.1.1 de las cuales se concluye que este dispositivo es el de mayor transferencia de energía a los alimentos para actividades de alta potencia. Sin embargo, no todos los modelos de estufa se desempeñan igual en alta potencia, las estufas Patsari y Onil presentan un valor significativamente mayor que la estufa Citlalli.

Para la fase 3 también se registró la temperatura del agua, como puede observarse en la gráfica inferior de la figura 4.1, la temperatura del agua oscila en torno a un valor cercano a los 89°C (3°C por debajo del punto de ebullición local), este comportamiento oscilante es característico de la fase de baja potencia y se explica por la manipulación en la velocidad de quemado del combustible dentro de la cámara de combustión.

Durante la fase 3 la temperatura del agua permanece básicamente constante, se determinaron las pendientes de las rectas que mejor aproximan la temperatura durante esta fase para todos los dispositivos, obteniendo que tienen valor cero en promedio con variaciones de hasta ± 0.1 °C/min. Este comportamiento del agua, lo consideramos en este estudio como *estado estacionario*. Por lo tanto, el comportamiento de la temperatura del agua en la fase de baja potencia (fase 3) es nuestra definición de estado térmico estacionario.

En base a las consideraciones anteriores, el concepto de estado estacionario se puede extender a las mediciones de temperatura en el resto del sistema. Los intervalos en los cuales la temperatura sea aproximada por una recta con pendiente entre $[-0.1, 0.1]$ °C/min serán llamados estados estacionarios, nótese que los perfiles de temperatura pueden tener fluctuaciones grandes y sin embargo estar dentro de un estado estacionario.

Además de la temperatura del agua, se obtuvo la temperatura en diferentes puntos de los dispositivos, para cada dispositivo fueron realizadas 5 réplicas de la PEA, en la figura 4.2 se muestran las temperaturas promedio en cada uno de los puntos de medición por dispositivo para los estados estacionarios, durante la fase de alta potencia (fase 2) y la fase de baja potencia (fase 3).

La temperatura promedio asociada a cada réplica se obtuvo de considerar los estados estacionarios de temperatura, es decir, descartar las partes iniciales, en las que la temperatura aumenta rápidamente y considerar sólo los segmentos en los que la temperatura estuviera en promedio constante.

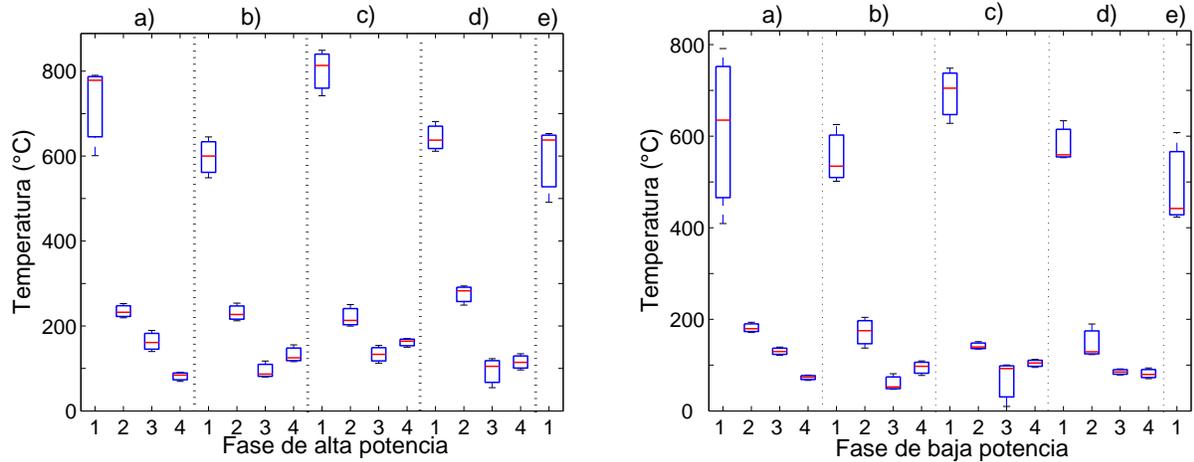


Figura 4.2: Temperatura en diferentes puntos de los dispositivos de cocción para la PEA. *a)* Estufa Citlalli, *b)* Estufa Mexalit M-20, *c)* Estufa Onil, *d)* Estufa Patsari, *e)* Fogón tradicional. *1*: Cámara de combustión, *2*: comal principal, *3*: comal secundario, *4*: chimenea.

La figura 4.2 muestra los resultados de temperatura como *gráficas de caja*, donde la línea horizontal roja muestra la mediana, las líneas inferior y superior de la caja son los percentiles 25 y 75, respectivamente, y las líneas fuera de las cajas muestran los valores extremos de la muestra. Para el caso del fogón tradicional, sólo se grafica la temperatura del fuego (1), y se omiten las demás al no existir. La tabla con los datos de temperatura puede consultarse en el Apéndice A tabla A.1.

En cada una de las gráficas de la figura 4.2 el orden de los puntos *1*: Cámara de combustión, *2*: comal principal, *3*: comal secundario y *4*: chimenea, es considerando a las estufas de leña como dispositivos térmicos con circulación, o movimiento de los gases. Este recorrido de los gases, empieza en la cámara de combustión donde los gases tienen la mayor temperatura, y acaba en la chimenea donde el calor asociado a los gases es un calor de desecho y es deseable que la temperatura en este punto sea la menor posible.

Por ello, las gráficas de la figura 4.2 muestran la distribución térmica en puntos representativos de las estufas, cuando éstos son ordenados de acuerdo a la circulación de los gases. Es de esperarse una distribución de las temperaturas decreciente. En la gráfica de la izquierda (fase de alta potencia) tenemos que todos los modelos de estufa, excepto la Citlalli, muestran una temperatura mayor en la chimenea, respecto al comal secundario, lo que implica que hay calor útil que está saliendo como calor de desecho. Para la fase de baja potencia (gráfica de la derecha) esta situación se modifica, pues ahora también la estufa Patsari tiene una mayor temperatura en el comal secundario que en la chimenea y los modelos Mexalit M-20 y Onil disminuyen la brecha entre la temperatura del comal secundario y la chimenea.

Como es de esperarse, se encuentra que los cambios mayores en temperatura, entre una fase y otra, se dan en la cámara de combustión, mientras que los menores en la chimenea.

Es notorio que las temperaturas en una fase de alta potencia, son mayores, respecto a la fase de baja potencia en todos los puntos de medición y para todos los dispositivos, del mismo modo que son más altas durante la fase 2 respecto a la fase 1. Por lo que, la metodología SPTP de la PEA en efecto produce resultados térmicos diferentes en los dispositivos, cuando se refiere a alta y baja potencia, además de producir una diferencia en temperatura entre las dos fases de alta potencia. Véase el Apéndice A Datos de Temperatura tabla A.1.

Dentro de las 5 réplicas realizadas para cada dispositivo de cocción, donde se realizó la medición de temperaturas en tiempo real, se ha escogido una de estas réplicas para mostrar el desenvolvimiento durante las diferentes fases, procurando que dicha réplica se encuentre en la media del conjunto.

Las siguientes gráficas muestran la evolución temporal de la temperatura en los diferentes puntos de la estufa: cámara de combustión, centro del comal principal, comal secundario y chimenea, para las 3 fases de la PEA. Como puede observarse de la figura 4.3 a la 4.6, la medición de la temperatura en los diferentes puntos arroja señales fluctuantes, sensibles a la

posición, que aunque no reflejen la totalidad del campo de temperatura, dan una idea de la temperatura promedio para cada dispositivo de cocción permitiendo una comparación entre las temperaturas de los distintos modelos.

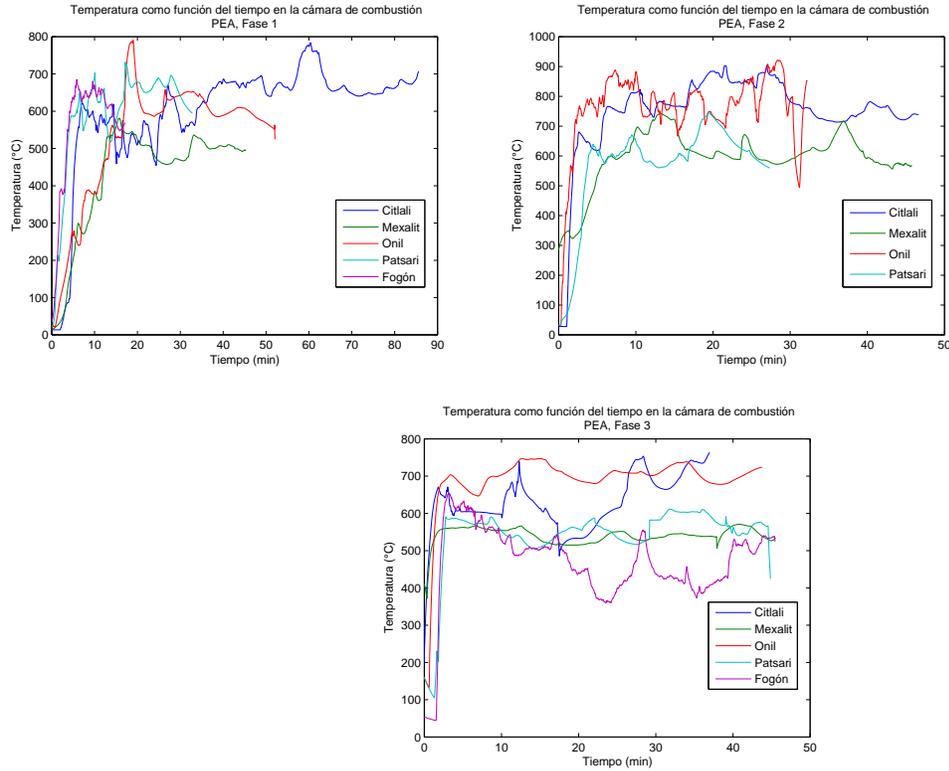


Figura 4.3: Comparación de la temperatura en la cámara de combustión para los diferentes dispositivos de cocción en las tres fases de la PEA.

Las temperaturas como función del tiempo dentro de la cámara de combustión se muestran en la figura 4.3. La temperatura en este punto es una variable extremadamente sensible a la posición del termómetro dentro de ella, pues éste puede encontrarse por momentos encima de la flama o no, dependiendo del modo en que se lleve a cabo la quema de combustible, los gradientes de temperatura correspondientes a estas 2 posibilidades son del orden de 100 °C.

El análisis estadístico realizado muestra que para la fase de alta potencia (fase 2) hay una diferencia significativa entre la temperatura de la estufa Onil, que alcanza la temperatura más alta, con respecto a la estufa Mexalit M-20 y el fogón, con la temperatura más baja. Mientras que las estufas Patsari y Citlalli no son significativamente diferentes de ninguno de los dos grupos. Sin embargo, para la fase de baja potencia, no hay diferencia significativa entre los distintos dispositivos de cocción. Ver tabla A.1 del Apéndice A.

En la figura 4.4 se muestran las temperaturas como función del tiempo en la parte superior del centro del comal principal para las 3 fases de la PEA, junto con ellas se grafica, sólo para la fase 1 y 3, la temperatura en la base de la olla del fogón dado que este dispositivo carece de comal.

Como puede observarse, la temperatura en la base del fogón siempre está por encima de las reportadas en las superficies de los comales de las estufas. Este hecho sustenta las hipótesis de la sección 4.1.1 relativas a las ventajas en transferencia de calor hacia la olla de cocinado del fogón.

Los intervalos de incertidumbre asociados a los promedios de temperatura son amplios, lo cual conduce a que no haya diferencia significativa entre las temperaturas del comal principal entre los dispositivos en ninguna de las fases de la PEA, incluso con respecto a la temperatura en la base de la olla del fogón. Ver tabla A.1 del Apéndice A.

El perfil de temperatura en el comal principal durante en la fase 3 (gráfica inferior de la figura 4.4), se caracteriza en algunas estufas por ser una señal oscilante, esto está relacionado con 2 factores: (1) por ser una fase de baja potencia, se suministra la menor cantidad de combustible necesaria para mantener la temperatura del agua $3\text{ }^{\circ}\text{C}$ por debajo de la temperatura de ebullición local ($92\text{ }^{\circ}\text{C}$), por lo que la manipulación del combustible era constante, y (2) la sensibilidad del comal ante las variaciones de temperatura en la cámara de combustión está relacionada con el grosor de los comales. Las señales de temperatura de la estufa Onil

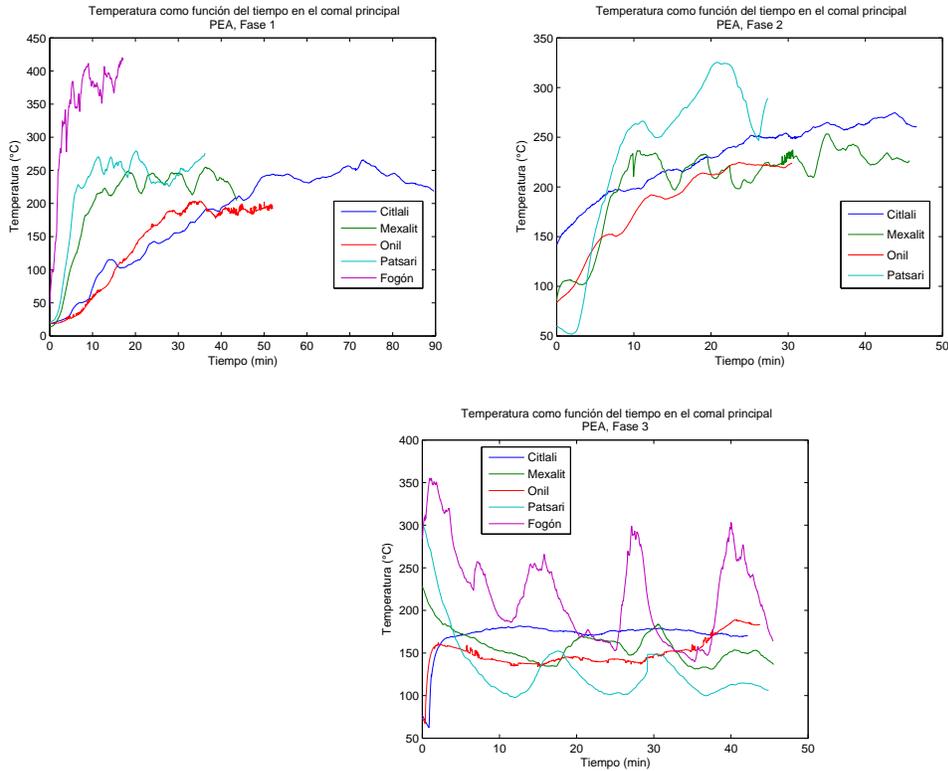


Figura 4.4: Comparación de la temperatura en el comal principal para los diferentes dispositivos de cocción en las tres fases de la PEA.

y la Citlalli son mucho más estables que las de los otros modelos lo que coincide con que los grosores de sus comales son mayores con 6 y 4 milímetros, respectivamente, mientras que los de la estufa Patsari y Mexalit M-20 son de 1.6 y 0.6 mm.

Las temperaturas como función del tiempo en la parte superior del centro del comal secundario para las 3 fases de la PEA se muestran en la figura 4.5.

Las estufas que tienen una plancha continua, que para este estudio hemos dividido en dos partes (comales principal y secundario) tienen una mayor temperatura en el comal secundario que los modelos con comales secundarios separados (Patsari y Mexalit M-20), esto se debe a

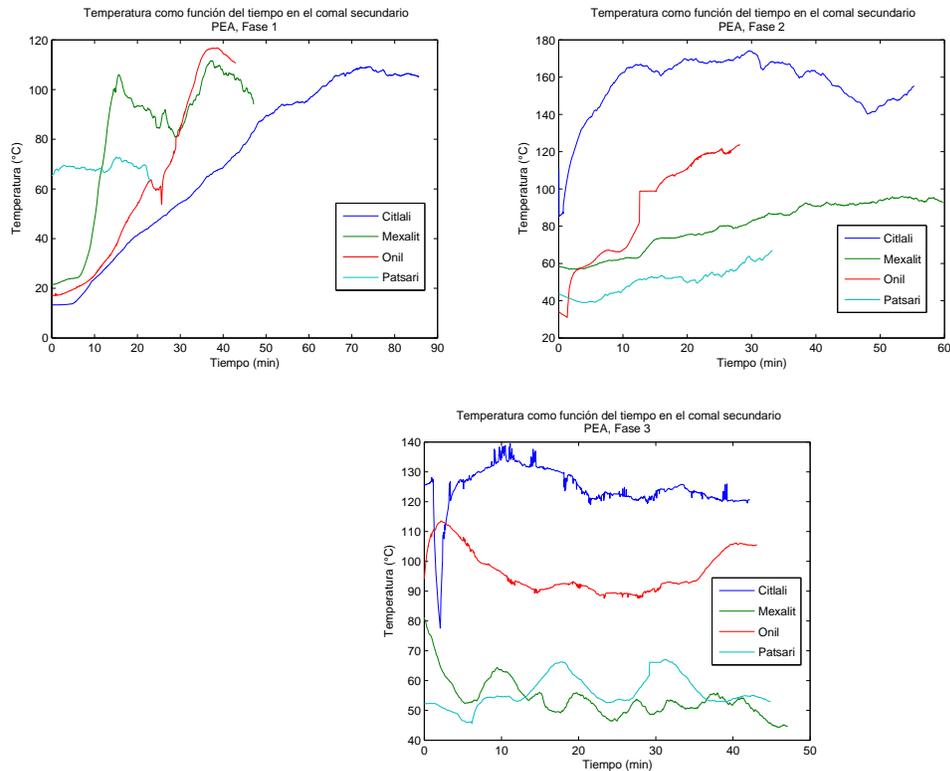


Figura 4.5: Comparación de la temperatura en el comal secundario para los diferentes dispositivos de cocción en las tres fases de la PEA.

que se maximizan la transferencia de calor por conducción. La estufa Mexalit M-20 tiene una temperatura significativamente menor en los comales secundarios con respecto a los modelos Citlalli y Onil, para todas las fases de la PEA.

Nuevamente para la fase 3 (gráfica inferior de la figura 4.5), tenemos señales oscilantes en los comales más delgados (Estufas Mexalit M-20 y Patsari) y señales estables en los comales gruesos (Estufas Onil y Citlalli).

A continuación se muestran (figura 4.6) las temperaturas como función del tiempo en la chimenea para las 3 fases de la PEA, estas mediciones fueron realizadas a 15 cm por arriba

del cuerpo de la estufa para todos los modelos, se escogió esta altura por considerarse que los usuarios podrían estar en contacto con ella y estas mediciones podrían ser valoradas como criterio de seguridad.

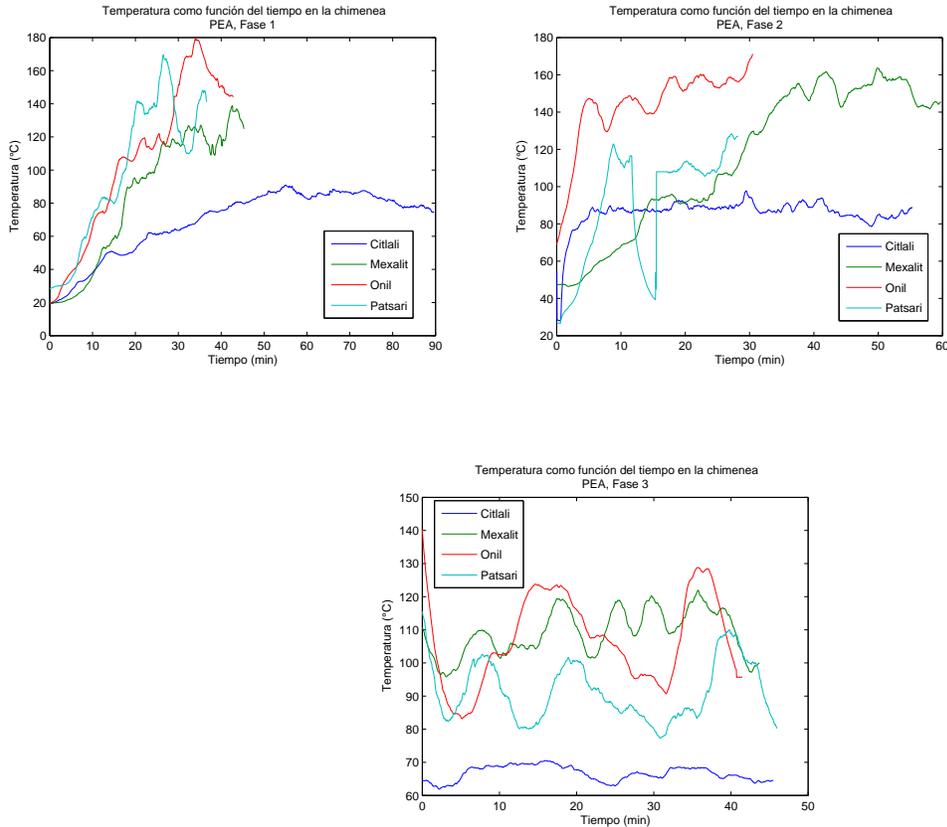


Figura 4.6: Comparación de la temperatura en la chimenea para los diferentes dispositivos de cocción en las tres fases de la PEA.

En la figura 4.6 (gráficas superiores) puede observarse que la duración de la fase 1 no es suficiente para que las temperaturas de todos los modelos se estacionen, mientras que en la fase 2 el tiempo de operación de las estufas permite que las temperaturas sean más estables.

Se observa que para la fase 3 (gráfica inferior de la figura 4.6) está presente el fenómeno

de oscilación en la temperatura, lo que nos habla de que la temperatura de los gases de combustión que escapan por la chimenea es sensible a la velocidad de quema de combustible en la cámara de combustión, y que este efecto se puede reflejar en la temperatura de la chimenea, ya que ésta tiene grosor pequeño (1 mm).

Durante la fase de alta potencia (fase 2), existe una diferencia significativa en temperatura entre las estufas Onil y Mexalit, con la más alta, y las estufas Citlalli y Patsari con la más baja. Mientras que para la fase de baja potencia (fase 3), sólo existe diferencia significativa entre la estufa Onil y Citlalli.

Mientras más alta sea la temperatura en la chimenea, tenemos que mayor cantidad de calor es desperdiciado, mientras que bajas temperaturas en la chimenea están relacionadas con un mejor aprovechamiento del calor por el cuerpo de la estufa, aunque no está garantizado que éste calor pueda ser utilizado en la cocción de alimentos.

4.2. Prueba de Cocinado Controlado

En este apartado se muestran los resultados obtenidos en la Prueba de Cocinado Controlado (PCC) para la elaboración de tortillas de maíz. Los resultados de los parámetros de la metodología SPTP se encuentran en la tabla 4.6 ¹.

La duración de la prueba (Δt) es un parámetro que depende de varios factores que se discuten en la sección 3.1.3, el fogón junto con la estufa Patsari son los dispositivos significativamente más rápidos en realizar la tarea de cocinado. Mientras que la estufa Citlalli y posteriormente la Onil tienen los tiempos mayores (ver tabla 4.6).

En términos de consumo de combustible (m_{ls}), todos los modelos de estufa reducen

¹Del mismo modo que en el apartado anterior son presentadas las incertidumbres y los intervalos de confianza.

Parámetro	Citlalli	Mexalit M-20	Onil	Patsari	Fogón
Δt	38 ± 4^a	$25 \pm 4^{b,c}$	28 ± 2^b	22 ± 3^c	20 ± 2^c
m_{ls}	614 ± 92^b	765 ± 68^b	767 ± 55^b	618 ± 117^b	1097 ± 192^a
m_c	$75 \pm 27^{a,b}$	110 ± 21^a	62 ± 24^b	$96 \pm 22^{a,b}$	$113 \pm 33^{a,b}$
m_t	1013 ± 21^a	1021 ± 16^a	987 ± 37^a	1022 ± 22^a	1027 ± 21^a
CEC	0.61 ± 0.08^b	$0.75 \pm 0.07^{a,b}$	$0.78 \pm 0.09^{a,b}$	0.60 ± 0.12^b	1.06 ± 0.36^a

Tabla 4.6: Parámetros de desempeño de los diferentes dispositivos para la PCC.

significativamente el consumo respecto al fogón tradicional. Es de suma importancia en el presente estudio mostrar si la introducción de nuevas tecnologías puede contribuir a ahorrar combustible, por lo que a diferencia de la PEA, en la PCC se manifiesta claramente este ahorro. En la tabla 4.7 se muestran los ahorros en leña por modelo de estufa con respecto al fogón.

Estufa	Equivalente de leña seca (g)	Ahorro respecto al fogón
Citlalli	614 ± 92^b	$44 \pm 3 \%$
Mexalit M-20	765 ± 68^b	$30 \pm 1 \%$
Onil	767 ± 55^b	$30 \pm 1 \%$
Patsari	618 ± 117^b	$44 \pm 4 \%$
Fogón	1097 ± 192^a	

Tabla 4.7: Ahorro de combustible de los diferentes modelos de estufa respecto al fogón para la PCC.

El carbón remanente (m_c) en la prueba, es un parámetro que indirectamente refleja la

calidad de la combustión en cada dispositivo por las razones discutidas en la sección 2.3, la estufa que generó menor cantidad de carbón fue la estufa Onil, mientras que el fogón y la estufa Mexalit M-20 lo producen en mayor cantidad. La única diferencia significativa en este parámetro es entre las estufas Onil y Mexalit M-20.

La masa final de alimento cocinado (m_t), para el caso de tortillas, está relacionada con cuan secas son las tortillas elaboradas, temperaturas bajas en el comal ocasionan que la tortilla tarde en cocerse mientras que se favorece la evaporación del agua de la masa de maíz, obteniendo como resultado unas tortillas secas. El fogón y la estufa Patsari tienen una mayor masa de alimento final, lo cual nos dice indirectamente que las tortillas tienen una mejor calidad, por otro lado la estufa Onil entrega la menor cantidad de alimento. Sin embargo, los intervalos de las muestras no permiten distinguir ninguna diferencia significativa entre los dispositivos.

Con los parámetros anteriores (m_t y m_{ls}) es posible construir el indicador llamado Consumo Específico de Combustible (CEC), mientras menor sea el CEC menor es la cantidad de leña seca necesaria para producir determinada cantidad de alimento. Las estufas con significativamente menor CEC son la Patsari y la Citlalli respecto al fogón, mientras que las estufas Mexalit M-20 y la Onil se hallan en ambos grupos. Véase tabla 4.7.

4.2.1. Análisis de temperaturas

En el análisis de temperaturas para la Prueba de Cocinado Controlado de tortillas, se realizaron mediciones en 3 puntos significativos de las estufas: la cámara de combustión, el centro del comal principal y la chimenea; en la figura 4.7 se muestran como *gráfica de caja* las temperaturas para los diferentes dispositivos. Nuevamente, la temperatura asociada a cada réplica se obtuvo de considerar los estados estacionarios de temperatura (ver sección 4.1.4).

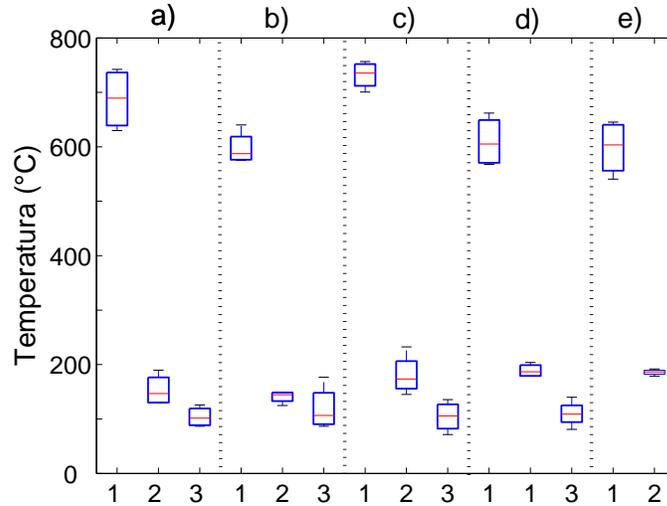


Figura 4.7: Temperatura en diferentes puntos de los dispositivos de cocción para la PCC. *a)* Estufa Citlalli, *b)* Estufa Mexalit M-20, *c)* Estufa Onil, *d)* Estufa Patsari, *e)* Fogón tradicional. *1*: Cámara de combustión, *2*: comal principal, *3*: chimenea.

La figura 4.7 ordena los puntos de la estufa de acuerdo con la circulación de los gases de combustión y permite entender de manera general la distribución de la energía térmica a lo largo del cuerpo de los dispositivos de cocción. Para todas las estufas la distribución de temperaturas forma una curva decreciente, debido en parte a que no se registró la temperatura del comal secundario como en la PEA. Para el fogón no se reporta la temperatura en la chimenea por carecer de ésta.

La tendencia en temperaturas mostrada en la PEA, se mantiene también en la PCC, el dispositivo con significativamente mayor temperatura dentro de la cámara de combustión es la estufa Onil seguida por la Citlalli. No se encuentran diferencias significativas entre las temperaturas de la estufa Patsari, la Mexalit M-20 y el fogón. En el comal principal, la Patsari y el fogón tienen las más altas temperaturas, resultado que está ligado a la buena calidad de

las tortillas. La temperatura en la chimenea es bastante similar en todas las estufas, la estufa Mexalit M-20 se mantiene con la más alta temperatura y la Citlalli con la más baja. Tanto para la temperatura en el comal principal como en la chimenea, no se encuentran diferencias significativas entre los dispositivos. La tabla con los datos de temperatura puede consultarse en el Apéndice A tabla A.2.

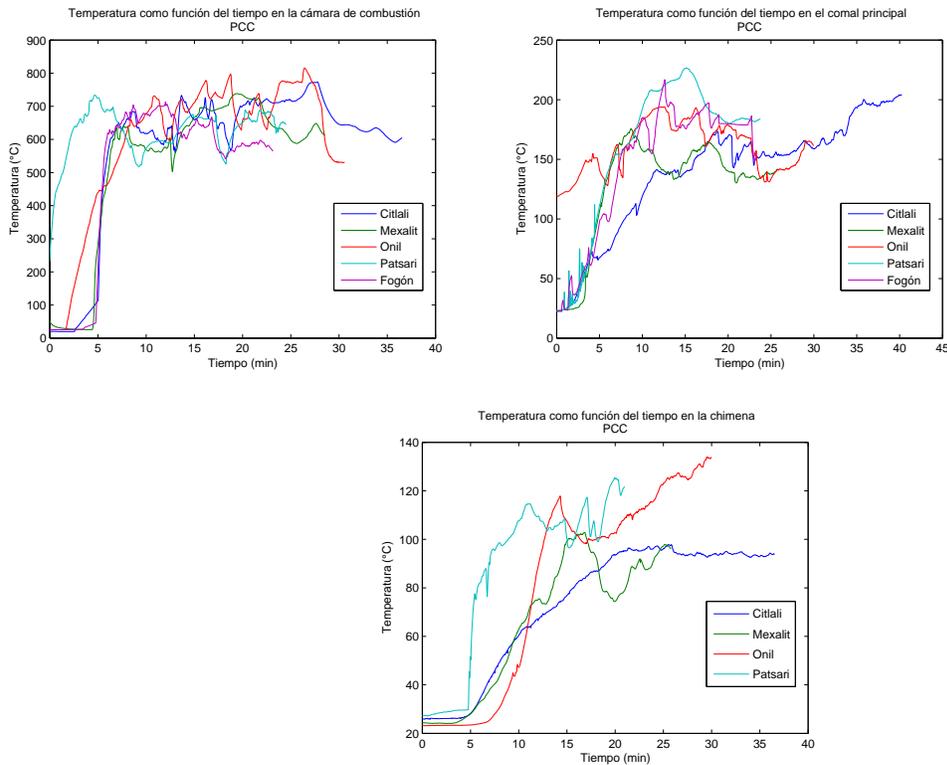


Figura 4.8: Comparación de la temperatura puntos representativos para los diferentes dispositivos de cocción en la PCC.

En la figura 4.8 se presenta la comparación de los perfiles de temperatura típicos para los diferentes dispositivos de cocción durante la PCC, nótese que los procesos graficados son alguna de las 5 réplicas que se hicieron por dispositivo y sirven únicamente para que el lector

se dé una idea de la evolución temporal del proceso.

Como se observa, los perfiles de temperatura muestran que la temperatura en la cámara de combustión se mantiene alrededor de un valor medio durante un intervalo, que aunque con grandes fluctuaciones, podemos considerar como un estado estacionario.

La tendencia mostrada en las temperaturas de la cámara de combustión no se mantiene en las temperaturas del comal principal, es decir, una estufa con alta temperatura en la cámara no garantiza tener alta temperatura en el comal, tal es el caso de las estufas Onil y Citlalli (ver figura 4.7).

4.2.2. Análisis de emisiones ambientales

Empezaremos este apartado mostrando los resultados en la Eficiencia de Combustión Nominal (*ECN*) que fueron medidos simultáneamente a las pruebas de eficiencia energética [52], dichos valores son el promedio de las 3 réplicas que fueron realizadas por dispositivo. En la figura 4.9 se observa que la estufa que tiene la más alta *ECN* fue la Onil (97%), seguida de la Patsari (95%) y la Mexalit M-20 (94%), mientras que la estufa Citlalli (85%) tiene un valor incluso por debajo del fogón (87%). La estufa Citlalli junto con el fogón son los dispositivos de significativamente peor desempeño ($p < 0.05$) en este parámetro en comparación con las otras estufas.

Para realizar una comparación de la emisión de Gases de Efecto Invernadero (GEI) y partículas, todos ellos asociados a una fuerza radiativa, entre los diferentes dispositivos de cocción, se muestran en la tabla 4.8 los factores de emisión para diferentes gases: bióxido de carbono (CO_2), monóxido de carbono (CO), metano (CH_4), hidrocarburos no derivados del metano ($HCNM$) y partículas de materia (PM) [52].

Como se observa en la figura 4.9 y en la tabla 4.8, la Eficiencia de Combustión Nominal (*ECN*) y los factores de emisión (f_e) están estrechamente relacionados, por una parte la

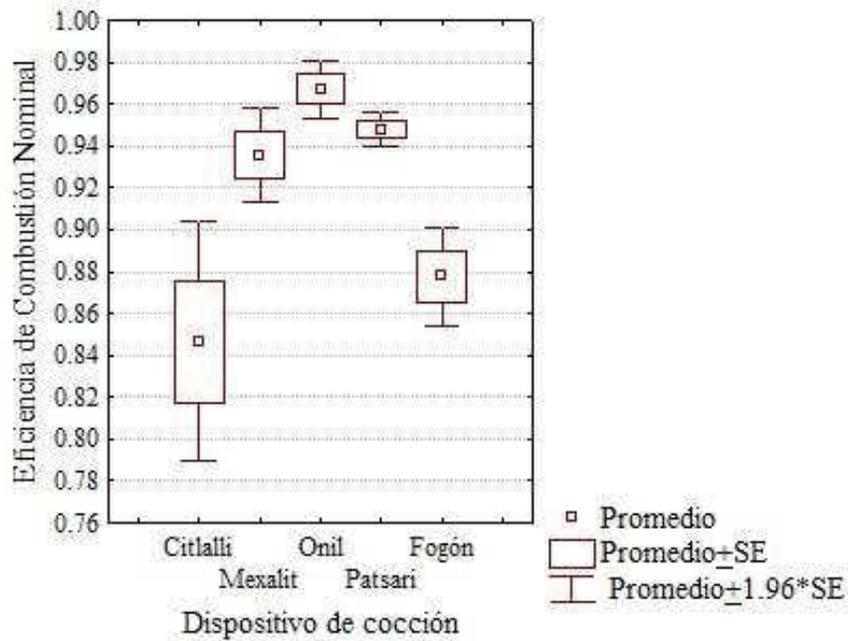


Figura 4.9: Comparación de la ECN para los dispositivos de cocción durante la PCC.

ECN (definida en la ec. (3.8)) es una medida de cuan completo fue el proceso de combustión, y por otra parte, los f_e de los GEI y partículas medidos, a excepción del CO_2 , son productos de la combustión incompleta (PIC's). Es por ello que los resultados son consistentes entre sí, la estufa Onil además de tener la ECN más elevada tiene los menores f_e , seguida de la estufa Patsari y Mexalit M-20, mientras que la estufa Citlalli tiene la más baja ECN y los más altos f_e , excepto en partículas de materia (PM). El fogón está sólo por arriba de la estufa Citlalli en el conjunto de parámetros de emisiones.

Los resultados de emisiones ambientales son sensibles no sólo al tipo de prueba realizada, sino también al tipo de leña, tamaño y humedad, por lo que estas condiciones fueron mantenidas constantes durante la realización de las pruebas (ver sección 3.1.1).

Estufa	Factor de emisión (g[C]/Kg)				
	f_{CO_2}	f_{CO}	f_{CH_4}	f_{HCNM}	f_{PM}
Citlalli	422 ± 25^b	38 ± 11^a	4.9 ± 1^a	29.6 ± 22.4^a	3.4 ± 0.7^a
Mexalit M-20	466 ± 10^a	$19 \pm 4^{b,c}$	$2.9 \pm 2^{a,b,c}$	6.8 ± 3.2^a	2.9 ± 0.5^a
Onil	482 ± 6^a	7 ± 1^c	0.6 ± 0.7^c	3.7 ± 2.6^a	4.6 ± 2.2^a
Patsari	472 ± 4^a	17 ± 3^c	$1.5 \pm 0.3^{b,c}$	3.8 ± 2.4^a	3.3 ± 1.4^a
Fogón	425 ± 9^b	$37 \pm 2^{a,b}$	$4.7 \pm 0.2^{a,b}$	10.8 ± 10.7^a	7.2 ± 2.3^a

Tabla 4.8: Factores de emisión de los diferentes dispositivos de cocción para la PCC.

Capítulo 5

Discusión

5.1. Prueba de Ebullición de Agua

Para evaluar si hay o no una mejoría en la transferencia de calor entre las fases de alta potencia, tendrían que suceder al menos 2 condiciones simultáneamente: (1) que se reduzca el tiempo de realización de la tarea y (2) disminuya el combustible consumido. De la tabla 4.3 puede observarse que los modelos de estufa que satisfacen esto son el Onil y Patsari. Por otro lado, la estufa Citlalli, disminuye el tiempo pero aumenta el consumo de combustible, y la Mexalit M-20 disminuye el combustible pero aumenta el tiempo de realización.

En la PEA el fogón tradicional (junto con las estufas Onil y Patsari) aparece entre los dispositivo más ahorradores de combustible en las fases de alta potencia, sin embargo, se llegaría al resultado contrario si la duración de estas fases fuera constante pues, la velocidad de quemado de la leña (v_q) en el fogón es significativamente mayor que las estufas (tabla 4.2). Las ventajas que tiene el fogón, en términos de transferencia de calor radiativo y convectivo, mencionadas en el capítulo anterior (sección 4.1.1) conducen a una transferencia de calor mayor que en las estufas, resultando en que el tiempo en el que realiza la prueba es menor.

El concepto de eficiencia térmica (η) recomendado por la metodología *Stove Performance Testing Protocol* (SPTP) (ec. (3.1)) también es problemático, pues al ser un cociente entre energía útil y energía suministrada, oculta grandes consumos de combustible cuando hay gran cantidad de agua evaporada. Las estufas que tardan significativamente más tiempo en realizar la prueba (estufas Mexalit M-20 y Citlalli) y tienen los más altos consumos de combustible, se ven favorecidas con esta definición, debido a que evaporan gran cantidad de agua, lo que resulta en amplias contribuciones a la energía útil y finalmente en un aumento de su eficiencia térmica. Así, aunque todas las estufas aumenten su eficiencia (η) cuando inician la prueba calientes (fase 2), esto no se debe en todos los casos, como con la estufa Citlalli, a ahorros en combustible, sino a exceso en la producción de vapor. Por esta razón, este parámetro no es un buen indicador del consumo de combustible.

Para enmendar esta deficiencia del parámetro η , se sugiere mantener constante la cantidad de combustible durante alguna de las fases de alta potencia, aunque no todos los dispositivos lograran hervir el agua, de este modo el cociente sólo tendría como variable independiente la energía útil suministrada por el dispositivo de cocción.

Existe un contrasentido entre el significado que se le da a la masa de agua evaporada (m_a^e) dentro de la metodología SPTP pues por una parte, es alimento que no llega a ser consumido, por lo que desde el punto de vista del usuario, es una cantidad que hay que minimizar, sin embargo, el parámetro de eficiencia térmica (η) considera como energía útil la destinada a evaporar agua, esto se debe a que en efecto cuando se evapora agua, se tiene la certeza de que ese calor fue absorbido por el alimento, y en ese sentido forma parte del calor útil. Sin embargo, existen alimentos como el arroz que pueden necesitar de la evaporación, más no así la ebullición de agua.

El calor destinado a evaporar agua, varía para cada uno de los dispositivos. El modelo Citlalli es el único que evapora significativamente más que los demás dispositivos. Se propone

Velocidad de evaporación del agua v_a^e (g/min)	Citlalli	Mexalit M-20	Onil	Patsari	Fogón
Fase 1	4.3 ± 1.2^a	3.5 ± 0.9^a	4.1 ± 1.5^a	3.7 ± 0.4^a	6.1 ± 1.2^a
Fase 2	6.9 ± 1.9^a	4.0 ± 0.4^b	4.2 ± 0.8^b	4.2 ± 0.6^b	$6.0 \pm 1.2^{a,b}$
Fase 3	8.5 ± 1.3^a	8.8 ± 0.9^a	9.6 ± 1.3^a	9.2 ± 1.7^a	9.7 ± 2.0^a

Tabla 5.1: Velocidad de evaporación de agua para las 3 fases de la PEA.

que al comparar masas de agua evaporada, se consideren éstas por unidad de tiempo, es decir, como una *velocidad de evaporación del agua* (v_a^e) que se define de la siguiente forma,

$$v_a^e = \frac{m_a^e}{\Delta t}. \quad (5.1)$$

De este modo, se tiene un indicador que compara la cantidad de agua evaporada para diferentes duraciones de las fases de la PEA. Durante la fase 3, todos los dispositivos aproximadamente duplican la masa de agua evaporada respecto a la fase 1, esto se explica por que el agua se encuentra muy próxima a la temperatura de ebullición, situación que provoca una mayor tasa de evaporación (ver sección 2.4.2).

Los resultados de la tabla 5.1 muestran que no hay diferencia significativa entre los dispositivos durante la fase 1 y la fase 3, mientras que durante la fase 2 sólo la estufa Citlalli significativamente evapora más agua.

En términos de *CEC*, todas las estufas lo reducen entre las fases de alta potencia, el modelo que lo mejora en mayor medida es el Onil, seguida por la Patsari. Este resultado posiciona a estas dos estufas por arriba del fogón en un 50 y 16 %, respectivamente, por lo que, si se considera el combustible consumido por unidad de alimento cocinado, que es un modo particular de la eficiencia energética, se llega a un resultado bastante más positivo para dichos modelos de estufa que el que arroja el parámetro de eficiencia térmica (η), considerado

Estufa	Factor de potencia	Intervalo de potencia (W)
Citlalli	$2.3 \pm 0.7^{a,b}$	3,000 - 6,800
Mexalit M-20	1.5 ± 0.3^b	6,300 - 10,000
Onil	1.9 ± 0.5^b	3,500 - 6,700
Patsari	$3.5 \pm 1.6^{a,b}$	3,900 - 11,900
Fogón	4.5 ± 1.8^a	3,100 - 14,000

Tabla 5.2: Factor de potencia para los diferentes dispositivos de cocción en la PEA.

también en este estudio.

La potencia (P) a lo largo de la PEA, tiene diferentes tendencias óptimas (ver sección 3.1.2), cuando el intervalo de potencia mostrada por un dispositivo de cocción es amplio, se considera que éste tiene mayor versatilidad, es decir, mayor capacidad de realizar distintas tareas de cocinado. Se define como *factor de potencia* (f_P) a la proporción entre la potencia de un dispositivo en la fase de alta potencia con inicio caliente (fase 2) entre la potencia del mismo en la fase de baja potencia (fase 3) [32],

$$f_P = \frac{P_2}{P_3}, \quad (5.2)$$

el f_P fue calculado y los resultados se muestran en la tabla 5.2 junto con los intervalos de potencia de los dispositivos.

Tenemos que el fogón es el dispositivo de cocción con mayor f_P , lo cual indica su versatilidad en términos de potencia, la estufa que le sigue es la Patsari, mientras que el menor factor de potencia lo tiene la Mexalit M-20. Si se consideran también los rangos de potencia, se observa que la estufa Citlalli y la Onil no alcanzan ni la mitad de la potencia máxima del fogón, lo cual, está muy relacionado con los largos tiempos que necesita la estufa Citlalli para realizar las fases de alta potencia. Algo notorio es que la estufa Onil no sobresalga por

su lentitud pese a que su potencia es poca, lo cual habla del buen diseño interior en términos de transferencia de calor; además esta baja potencia en dichos modelos, se relaciona con que ambos cuentan con una cámara de combustión mucho más pequeña que las otras estufas y el fogón, reduciendo la cantidad de leña que puede ser quemada al mismo tiempo. Contrariamente, a la estufa Mexalit M-20 se le dificultan las tareas a baja potencia, lo que se relaciona con sus altos consumo de combustible y no desemboca en rapidez al realizar las pruebas, lo que indica un diseño interno deficiente.

Respecto a las adecuaciones de los parámetros para las estufas multi-olla propuestas por la metodología SPTP (sección 3.1.2), estas consideraciones son pertinentes pues valoran el diseño de las estufas de contar con más de una superficie de transferencia de calor, aumentando la versatilidad del dispositivo de cocción. Sin embargo, dicha metodología no considera la contribución de las ollas secundarias en la fase de baja potencia, lo cual conlleva a una reducción en la eficiencia térmica (η) y a un mayor (CEC) para todas las estufas en esta fase, hecho que resulta en una comparación desventajosa para las estufas con respecto al fogón. Nuestra recomendación es incluir a las ollas secundarias también en esta fase.

Los resultados obtenidos en la fase de baja potencia (fase 3) relativizan los que se tienen en las fases de alta potencia en parte porque una característica de esta fase es su duración constante. Por ejemplo, en términos de consumo de combustible (m_{ls}), el fogón no es significativamente diferente de las estufas, excepto de la Mexalit M-20 la cual aproximadamente duplica, en consumo de leña, a los otros dispositivos. También en los parámetros de velocidad de quemado (v_q) y potencia (P), el rango en el que se encuentran los dispositivos no es significativamente distinto (ver tabla 4.4), v_q varía en promedio 2 g/min y P varía en promedio 500 W , nuevamente sólo la estufa Mexalit M-20 casi duplica en ambos indicadores a los demás.

La velocidad de quemado (v_q) y la potencia (P), no deben de considerarse como indica-

dores de la transferencia de calor a los alimentos, son solamente una medida de un proceso que ocurre en la cámara de combustión. Ocurre que dispositivos con altos valores en estos dos parámetros, no sean los más rápidos en realizar la tarea de cocinado y, viceversa. Por ejemplo, el fogón durante la fase 3, tiene la segunda potencia más baja entre todos los modelos, y tiene la mayor masa de agua evaporada (m_a^e) y, por lo tanto, la mayor velocidad de evaporación (v_a^e), lo que significa que la potencia "efectiva", entendida como la cantidad de energía que llega a la olla de cocinado por unidad de tiempo, es mayor que para las estufas, aunque éstas aparezcan con valores más altos de potencia.

En este apartado se han mostrado las deficiencias conceptuales de algunos de los parámetros que recomienda la metodología SPTP para la evaluación de los dispositivos de cocción, tal es el caso de la eficiencia térmica (η), la masa de agua evaporada (m_a^e) y la potencia (P); ya sea porque éstos conlleven a premiar altos consumos de combustible o altas cantidades de agua evaporada, no sean indicadores de la transferencia de calor hacia los alimentos, o no sean comparables cuando la duración de las fases es diferente en cada dispositivo. Se han propuesto parámetros que enmienden estas deficiencias, como es el caso de la velocidad de evaporación de agua (v_a^e) y una nueva posibilidad de definir la eficiencia térmica (η) manteniendo constante la cantidad de combustible.

Adicionalmente, se han señalado las ventajas que brinda la metodología SPTP al fogón tradicional respecto a las estufas mejoradas, recomendando que haya fases de alta potencia con duración constante, y que sea considerada la contribución de las ollas secundarias en la fase de baja potencia.

Es de sumo interés en el presente estudio, relacionar los resultados de la metodología SPTP a las mediciones en tiempo real de temperatura, con el objetivo de construir indicadores de transferencia de calor efectiva hacia la olla de cocinado. En este sentido se propuso

un nuevo parámetro llamado *velocidad de transferencia de energía al agua* (v_a), que es una medida del aumento de temperatura en el agua por unidad de tiempo, este parámetro tiene sentido cuando el alimento está cambiando su temperatura (fases de alta potencia), sin embargo, en el caso de que la temperatura del alimento se mantenga constante (fase de baja potencia) sirve como referencia para definir los estados estacionarios.

Se caracterizó el comportamiento térmico del agua durante las fases de alta potencia, por una línea recta cuya pendiente representa la *velocidad de transferencia de energía al agua*. Se observa un aumento en dicho parámetro, casi en la misma proporción en la que se reducen los tiempos entre las fases de alta potencia (ver tablas 4.3 y 4.5), por lo que este indicador contiene información sobre el tiempo en que los dispositivos realizan la prueba y además contiene información sobre la transferencia de calor efectiva a la olla de cocinado. Por ejemplo, la estufa Mexalit M-20 disminuye en un 10 % la pendiente de la recta que caracteriza su temperatura, al mismo tiempo que incrementa en un 10 % la duración de la prueba entre las fases de alta potencia, este resultado lo podemos explicar considerando que este modelo no cuenta con un diseño en la cámara de combustión ni en el túnel interno, que le permita sacar mayor provecho del calor del fuego cuando la estufa se encuentra caliente. Tampoco cuenta con relleno de materiales aislantes como los otros 3 modelos, tenemos solamente unas paredes y un techo que encierran al fuego en una cavidad grande llena de aire.

Se observaron mejoras en la velocidad de transferencia de energía al agua, ante condiciones térmicas iniciales diferentes, sólo en los dispositivos que cuentan con un diseño en su cámara de combustión y relleno aislante, tal es el caso de las estufas Onil, Patsari y Citlalli, las cuales incrementaron su desempeño en 27, 22 y 21 %, respectivamente. Además, las estufas mejoradas con mayor magnitud en este parámetro (estufa Patsari y Onil) son las que cuentan con materiales aislantes, como el barro y el ladrillo, en su cámara de combustión, dichos parámetros tienen conductividades térmicas (k) bajas comparadas con los metales, material

con el que está construida la cámara de combustión de la estufa Citlalli.

Aunque la *velocidad de transferencia de energía al agua* se caracterizó como una recta, cabe mencionar que los perfiles de temperatura del agua en algunos casos son más similares, como en la estufa Citlalli, a una curva logística (ver figura 4.1). Es importante dar cuenta de este fenómeno, desde el punto de vista del diseño y funcionamiento de los dispositivos. Principalmente la estufa Citlalli y en segundo lugar la Onil, poseen un volumen en su cámara de combustión bastante más pequeño que la Patsari, la Mexalit M-20 y el fogón; esta situación provoca que hacia el final de las fases, la cámara de combustión se encuentre saturada por el carbón producido durante la fase, el carbón impide que los leños ardientes sean colocados debajo del comal principal, situación que limita la entrega de calor a la misma tasa que lo haría si la cámara de combustión estuviera vacía, ocasionando una potencia insuficiente. Esta es la razón empírica por la que conforme avanza el tiempo de la prueba, el perfil de temperatura en el agua se "acuesta", mostrando la saturación de la cámara de combustión, además de la razón física que tiene que ver con el fenómeno de ebullición y la diferencia en magnitud entre el calor específico (c_p) y el calor de evaporación (c_e), discutidas en la sección 2.4.2.

Las mediciones en tiempo real de temperatura, permiten entender cómo se distribuye la energía térmica en las diferentes partes de la estufa, como se mencionó en el capítulo 2 de este texto, las estufas son dispositivos con una entrada y una salida de energía, las gráficas de la figura 4.2 muestran que la fase de alta potencia induce a que la temperatura de la cámara de combustión sea mayor, debido a que la tasa de pirólisis aumenta y la velocidad de producción de gases es más alta, esta situación conduce a que la temperatura de la chimenea sea mayor a la del comal secundario para la mayoría de los modelos de estufa que no aprovechan la velocidad y la temperatura de los gases de combustión para potenciar la transferencia hacia los alimentos a través del comal secundario. Mientras que en la fase de baja potencia, las

características del fuego producido, permiten que disminuya la temperatura de la chimenea por debajo de la del comal secundario, por lo que se minimizan pérdidas en energía, esta fase les permite a los modelos de estufa disminuir la cantidad de calor de desecho a través de la chimenea, ver figura 4.2 y tabla A.1 en el Apéndice A.

Este resultado indica que hay que optimizar la transferencia de calor hacia los comales, en especial hacia el comal secundario, con el fin de minimizar el calor de desecho.

Se ha subrayado la importancia de indicadores que reflejen la transferencia efectiva de calor hacia los alimentos como lo es la velocidad de transferencia de energía al agua (v_a) aquí calculada, flujos de calor (q'') a través de los comales y una potencia efectiva (P_{ef}), que no fueron determinados en el presente estudio, pero forman parte de las propuestas para evaluaciones energéticas posteriores.

Con el objetivo de sintetizar los resultados de los diferentes dispositivos de cocción para los indicadores más relevantes del desempeño energético, se propone como herramienta de visualización la siguiente gráfica radial (figura 5.1), en la cual están incorporadas la fase de alta potencia (fase 2) y la de baja potencia (fase 3):

La gráfica radial incorpora parámetros que de por sí son inconmensurables en dimensiones y magnitud, al asociar una escala del 0 al 100 a todos ellos, siendo el valor 0 indicador de mal funcionamiento y 100 de bueno, la tabla A.3 en el Apéndice A muestra la estandarización de los valores de acuerdo al criterio anterior. De acuerdo con la tabla 3.1 del Capítulo 3 del presente texto, hemos asignado una tendencia óptima a los diferentes parámetros, con base a esto y para no imponer criterios subjetivos al fijar la escala, se brinda valor 0 al dispositivo que peor desempeño haya mostrado en dicho parámetro y valor 100 al que lo haya hecho mejor, la interpolación es lineal para los dispositivos con desempeños intermedios.

Esta herramienta visual permite comparar cualitativamente el desempeño integral de los

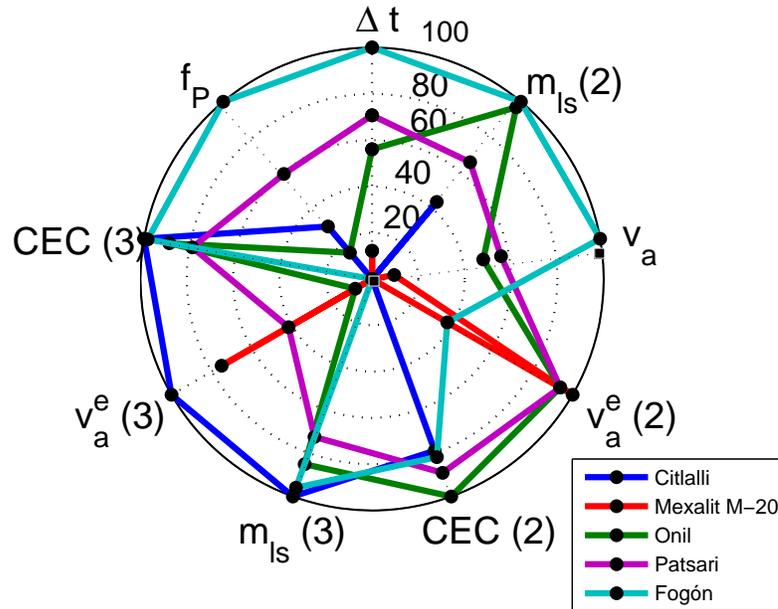


Figura 5.1: Gráfica radial de parámetros representativos de la PEA para los dispositivos de cocción.

dispositivos durante la PEA, al integrar parámetros de desempeño tanto de alta como baja potencia. Los parámetros obtenidos en la fase de alta potencia (marcados con (2)), empiezan en la orientación norte con el tiempo de realización (Δt) siguiendo el sentido de las manecillas del reloj, les siguen los parámetros relativos a la fase de baja potencia (marcados con (3)), para finalizar con el factor de potencia (f_P) que relaciona ambas fases.

Uno de los posibles modos de entender la gráfica radial es considerar el área del polígono de cada dispositivo y su posición dentro del círculo.

La estufa Citlalli sobresale por su buen funcionamiento en los todos los indicadores relativos a la fase de baja potencia (fase 3), siendo muy pobre su desempeño en la fase de alta potencia (fase 2), así como en la rapidez con que realiza la prueba (Δt) y su bajo factor de

potencia (f_P).

La estufa Mexalit M-20 únicamente sobresale en tener una baja velocidad de evaporación de agua (v_a^e) en ambas fases de la PEA, en todos los demás indicadores este modelo está reprobado en comparación con los demás, de ahí que el área de su polígono sea básicamente nula.

La estufa Onil tiene un funcionamiento más integral que los 2 modelos anteriores, al mostrar buen desempeño en parámetros tanto de alta como de baja potencia, sobretodo en un bajo consumo de combustible (m_{ls}) y bajos Consumos Específicos de Combustible (CEC). Sin embargo, la velocidad de evaporación de agua (v_a^e) es alta en la fase de baja potencia y su factor de potencia también es pobre.

La estufa Patsari también muestra un funcionamiento integral al desempeñarse adecuadamente en alta y baja potencia, comparada con las otras 3 estufas, la Patsari no tiene valores de 0 en ninguno de los parámetros, aunque tampoco tiene valores de 100. Las principales fortalezas de este modelos son sus bajos CEC , su baja evaporación de agua (en la fase de alta potencia), su rapidez en concluir la prueba (Δt), su alta velocidad de transferencia de energía al agua (v_a) y, un buen factor de potencia (f_P).

El fogón tradicional tiene el polígono de mayor área de entre todos los dispositivos, como ya se mencionó en este apartado, esto se debe a que la metodología empleada le brinda ventaja al compararlo con estufas mejoradas. Sus deficiencias son tener una alta velocidad de evaporación de agua (v_a^e) tanto en baja como en alta potencia lo que conduce a una disminución en la cantidad de alimento final y, un bajo CEC en la fase 2 siendo mejor sólo en comparación con la estufa Mexalit M-20.

Los resultados obtenidos en el presente estudio para la PEA, deben relacionarse con evaluaciones nacionales e internacionales realizadas en base a la misma metodología empleada

(SPTP).

Diversos estudios realizados en la India y México, han evaluado la tecnología tradicional de cocción *versus* las tecnologías mejoradas durante la PEA, éstos muestran que la tecnología tradicional tiene un mejor desempeño para la mayoría de los parámetros respecto a las estufas mejoradas, sobre todo durante las fases de alta potencia, mientras que se reporta una mejoría en la eficiencia térmica (η) de éstas para la base de baja potencia (fase 3) [15]. En el presente estudio no hay incremento significativo en la η durante la fase 3, se encontró que la metodología SPTP, no considera dentro de su balance de energía la proveniente del carbón remanente de la fase 2 que permanece dentro de la cámara de combustión al iniciar la fase 3, esta modificación ocasiona que los valores de η disminuyan con respecto a los que se reportan en otros estudios. Pese a estos resultados provenientes de la PEA, se ha encontrado que en condiciones reales de uso (Prueba de Funcionamiento de Cocina, PFC), los mismos diseños evaluados conducen a resultados completamente diferentes que los mostrados durante la PEA. Existe una reducción significativa en el consumo diario de leña que va del 19 al 67 % en los hogares con alguna de las estufas mejoradas [15], siendo en el caso de la estufa mejorada Patsari, único modelo mexicano que ha sido evaluado en campo de acuerdo a esta metodología, el ahorro de 66 y 64 % dependiendo de si los usuarios utilizan exclusivamente leña o la usan de manera combinada con el gas LP [17].

La conclusión de dichos estudios es que la PEA brinda poca información sobre el desempeño energético de las estufas mejoradas en condiciones de funcionamiento real. La PEA debe ser utilizada sólo durante la etapa de diseño de una estufa mejorada y para corroborar que las estufas construidas funcionen de acuerdo a lo esperado [16], y no como un indicador del consumo de combustible en condiciones reales.

Es necesario que las evaluaciones se orienten a estudios de campo, pues las condiciones reales de funcionamiento del fogón tradicional distan mucho de las condiciones de laboratorio.

Durante las pruebas realizadas el fogón tradicional se encontraba en una cocina simulada, las cocinas rurales son más abiertas y presentan corrientes de aire, esta situación aumenta la disipación del calor del fuego, lo que repercute en un desempeño energético más deficiente. Aunque el desempeño energético de las estufas mejoradas no varíe entre las pruebas de laboratorio y las de campo, debido a que en estos diseños el fuego se encuentra dentro de una cámara de combustión, la PEA no refleja las prácticas e intensidades de cocinado que se presentan en las comunidades rurales mexicanas, donde la mayoría de los alimentos que se preparan, como las tortillas, son tareas de baja potencia y/o mayor duración que la PEA.

Sin embargo, las pruebas de campo deben rescatar algunos de los parámetros propuestos por la PEA, como la medición de la masa de alimento final, y de ser posible las temperaturas en puntos significativos a fin de calcular parámetros de transferencia efectiva de calor hacia los alimentos, y no sólo el combustible consumido durante cierto tiempo como recomienda la metodología SPTP.

Finalmente, los resultados de la PEA deben ser interpretados a la luz de la PCC, considerando que cerca del 90 % de las tareas de cocinado en las comunidades rurales mexicanas no implican la ebullición de agua [59].

5.2. Prueba de Cocinado Controlado

Para la elaboración de tortillas, el fogón junto con la estufa Patsari y Mexalit M-20 tienen tiempos significativamente menores que las estufas Onil y Citlalli. Es probable que si se iniciara el cocinado de tortillas con las estufas calientes, los modelos de estufa realizarían la tarea más rápido que el fogón; principalmente en los modelos que durante la PEA, mejoraron en la transferencia de calor hacia los alimentos. Otro factor que determina la rapidez de elaboración de las tortillas es el área del comal principal, la estufa Patsari, el fogón y

posteriormente la Mexalit M-20, son los dispositivos de mayor superficie.

En la PCC todas las estufas de leña ahorran significativamente ($p < 0.05$) combustible respecto a la tecnología tradicional, el fogón de 3 piedras. Dichos ahorros en combustible son importantes, van del 30 % para la estufa Mexalit M-20 y Onil, hasta el 44 % para la Patsari y Citlalli.

La cantidad de carbón generado por las estufas está relacionada con la temperatura en la cámara de combustión, siendo la estufa Mexalit M-20 y el fogón los mayores productores de carbón y los dispositivos más fríos, mientras que la estufa Onil tiene la menor producción de carbón y la temperatura más elevada.

La relación anterior entre la generación de carbón y la temperatura de la cámara de combustión, también está fuertemente ligada con la Eficiencia de Combustión Nominal (ECN), vemos una relación entre altos valores de dicho parámetro con altas temperaturas en la cámara de combustión, todos los dispositivos muestran la misma tendencia. La estufa Onil muestra la temperatura y la ECN más altas, seguidas por la Patsari, la Mexalit M-20 y el fogón. Sin embargo, la estufa Citlalli sale de la tendencia, pese a que es la estufa en segundo lugar de temperatura alta en la cámara de combustión, tiene la más baja ECN , para explicar este comportamiento hay que considerar el diseño y las características de funcionamiento de dicha estufa.

Como se mencionó en la sección anterior de este capítulo, se observa empírica y cuantitativamente, a través de la velocidad de transferencia de energía al agua, que hacia el final de las pruebas, la cámara de combustión de la estufa Citlalli se satura de carbón, situación que le dificulta el paso de aire suficiente para que haya una buena mezcla de los gases de combustión con el oxígeno, para que éstos se quemen y finalmente no sean emitidos. Esta situación es causa también de que este dispositivo tenga los factores de emisión (f_e) más altos en monóxido de carbono (CO), metano (CH_4) e hidrocarburos no derivados del metano

(*HCNM*), ver tabla 4.8.

Adicionalmente, tomando en consideración la distribución de la energía térmica en las diferentes partes de los dispositivos de cocción (figura 4.7), se concluye, que no es suficiente tener una alta temperatura en la cámara de combustión; para tener una temperatura alta en el comal principal, es necesario también un buen diseño que permita la entrada de suficiente aire incluso cuando la estufa lleva tiempo encendida y generando carbón, no es realista pensar que los usuarios van a remover frecuentemente el carbón remanente. Además las pruebas realizadas tienen una duración pequeña (1 hora aproximadamente) respecto a la cantidad de tiempo en que una estufa es utilizada en el campo mexicano.

Respecto a los parámetros recomendados por la metodología SPTP para la PCC no se considera que alguno de ellos sea problemático como en el caso de la PEA.

Por las características del cocinado de tortillas se vuelve problemático construir un indicador de la transferencia efectiva de calor, una explicación mayor sobre este punto se da en la sección 3.1.4.

Nuevamente, con el objetivo de comparar los resultados de la PCC en los diferentes parámetros para los distintos dispositivos, se emplea una gráfica radial (figura 5.2).

Como se observa en la figura 5.2, la estufa Citlalli pertenece al grupo con más bajo consumo de combustible (m_{ls}) y Consumo Específico de Combustible (*CEC*), sin embargo, tanto en tiempo de cocinado como en todos los parámetros relativos a la buena calidad de las emisiones ambientales, su desempeño es el significativamente peor comparado con los demás dispositivos.

La estufa Mexalit M-20 no toma para ningún parámetro el valor de 0 aunque tampoco el de 100. Esta dentro del grupo de dispositivos con más alto consumo de combustible y mayor *CEC*, sus factores de emisión pertenecen al grupo de dispositivos con más altos valores, excepto para el *CO*.

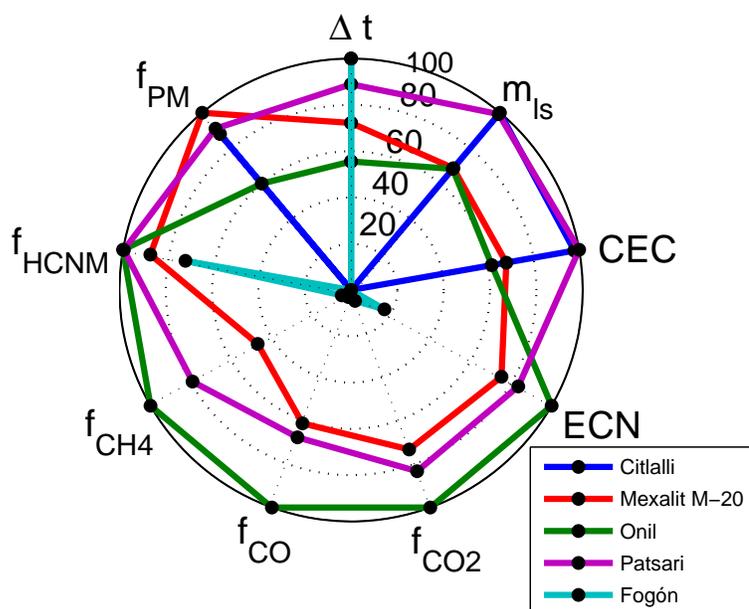


Figura 5.2: Gráfica radial de parámetros representativos de la PCC para los dispositivos de cocción.

La estufa Onil sobresale en su desempeño durante la PCC en todos los parámetros relacionados con las emisiones ambientales, pertenece al grupo de estufas con significativamente mejores resultados. Sin embargo, en el consumo de combustible se encuentra en el grupo de más alto consumo, tiene deficiencias en el tiempo de realización de la prueba, donde tiene un desempeño intermedio, también en el *CEC*.

La estufa Patsari muestra un buen desempeño al estar dentro del grupo de dispositivos de significativamente menor consumo de combustible (m_{1s}), estar dentro del grupo más rápido en realizar la prueba junto con el fogón, y tener el más bajo *CEC*. Además, en los parámetros relativos a las emisiones ambientales, la Patsari es parte del grupo que emite menos *CO* y *CH₄*.

El fogón tradicional muestra un desempeño general en la PCC bastante pobre con respecto a las estufas mejoradas y también respecto al obtenido en la PEA. Únicamente sobresale por ser de los dispositivos más rápidos en realizar la prueba. Se encuentra en el grupo de mayor consumo de combustible (m_{ls}), mayor CEC , y en los parámetros relativos a las emisiones está dentro de los dispositivos con mayor emisión de CO , CH_4 y PM .

La literatura internacional considera que la PCC debe seguir siendo promovida como una evaluación más apropiada y localmente relevante dentro de las pruebas de laboratorio [16, 17].

En Pruebas de Cocinado Controlado llevadas a cabo en nuestro país durante el año 2006 y 2007, para evaluar únicamente a la estufa Patsari, se encontró que durante la PCC de tortillas hubo ahorros en combustible del 44 al 65 % en comparación con el fogón tradicional. Estos ahorros fueron similares en magnitud a los ahorros de combustible observados durante la Prueba de Funcionamiento de Cocina (FPC) después de la introducción de la estufa Patsari con 66 y 64 % de reducción, dependiendo de si el único combustible era leña o una combinación de leña con gas LP [17, 3]. En estos estudios, la estufa Patsari obtuvo un valor 67 % menor para el parámetro CEC durante la PCC de tortillas con respecto al fogón [17]

Los resultados del presente estudio están dentro del intervalo reportado en el estudio anterior para la estufa Patsari, mientras que este es el primer estudio de este tipo en nuestro país para los otros 3 modelos de estufa mejorada. Sin embargo, puede deducirse que el comportamiento en campo de estos modelos tiende a ser similar al encontrado en la PCC de tortillas.

Del mismo modo que el consumo de combustible en condiciones de uso real no puede ser obtenido de la PEA, las estimaciones de emisiones de Gases de Efecto Invernadero y partículas de materia tampoco son adecuadamente estimadas por la PEA, de hecho se ha mostrado que esta prueba subestima las reducciones de GEI generados por las estufas mejoradas[60].

La Eficiencia de Combustión Nominal (ECN), es menor en las estufa mejoradas que en la tecnología tradicional durante la PEA, mientras que en la PFC los resultados son opuestos, este hecho implica que el fogón tradicional emite cerca del doble de productos de combustión incompleta (PCI's) [53]. Realizar las estimaciones de emisiones de GEI durante la PCC, prueba de laboratorio más cercana a las condiciones de funcionamiento real, avanza en una estimación realista de las emisiones, sin embargo, los resultados de este estudio deben de corroborarse en campo.

Por otra parte, un estudio de contaminación intradomiciliaria en zonas rurales de nuestro país, obtuvo que las concentraciones promedio durante 48 horas de monóxido de carbono (CO) y partículas de materia ($PM_{2,5}$) fueron reducidas en 66 y 67 %, respectivamente, después de la instalación de la estufa Patsari en hogares de la región Purépecha de Michoacán [61]. Estos resultados indican indirectamente que no sólo el principal producto de la combustión incompleta (PCI), el CO , fue reducido, sino que todos los demás PCI's también.

Los resultados de este estudio muestran que para la PCC de tortillas, todas las estufas mejoradas, excepto la Citlalli tienen ECN más altas que el fogón tradicional, por lo que estos resultados se asemejan a los que se tienen de la estufa Patsari en condiciones de funcionamiento real.

Los factores de emisión para el CO fueron reducidos con respecto al fogón en un 81 %, 54 %, 49 % en la estufa Onil, Patsari y Mexalit M-20, respectivamente, sólo la estufa Citlalli incrementó este factor de emisión en un 3 %. Para el factor de emisión de $PM_{2,5}$, todas las estufas mejoradas reducen este parámetro (ver tabla 4.8). Nuevamente, los resultados aquí presentados, están dentro de los intervalos reportados previamente en la literatura para la estufa Patsari y el fogón tradicional.

Capítulo 6

Conclusiones y perspectivas

La situación que se vive en las comunidades rurales de nuestro país, plantea la necesidad de mejorar los dispositivos de cocción tradicionales mediante el uso más eficiente de la energía de la leña, lo que tiene asociado ventajas en la calidad de vida de las personas y beneficios ambientales. La evaluación energética de las diferentes tecnologías permite el perfeccionamiento de estas opciones, mediante el desarrollo tecnológico en el cual las ciencias físicas todavía tienen mucho que aportar.

La complejidad del sistema termodinámico estudiado, hace prioritario determinar parámetros básicos de desempeño energético. Por muchos años las evaluaciones de eficiencia energética para estufas de leña se han basado en protocolos internacionales, cuya última versión se encuentra en el *Stove Performance Testing Protocol* (SPTP), que recomienda dos pruebas de laboratorio: la Prueba de Ebullición de Agua (PEA) y la Prueba de Cocinado Controlado (PCC). Este protocolo propone la medición de parámetros como el equivalente de leña seca (m_{ls}), la duración de la prueba (Δt), el Consumo Específico de Combustible (CEC) y otros más que no reflejan a las estufas como sistema termodinámico fuera de equilibrio térmico, ni como sistema dinámico. Por estas razones fueron propuestos nuevos parámetros de de-

sempañero energético, tales como: los perfiles de temperatura en puntos significativos de los dispositivos, la velocidad de transferencia de energía al agua (v_a) y la velocidad de evaporación (v_a^e), los cuales consideran al tiempo y a la transferencia de calor hacia los alimentos como variables relevantes.

Los resultados de desempeño energético muestran que el fogón tradicional es el dispositivo de mayor versatilidad al presentar el más amplio intervalo de potencia, sobretodo destaca la alta potencia que logra. Este hecho junto con las características de su diseño, que aprovechan la transferencia de calor radiativo y convectivo, explican que tenga la mayor tasa de transferencia de energía al agua (v_a) y la consiguiente rapidez en la ebullición en las pruebas de laboratorio. Sin embargo, su desempeño energético en tareas de menor potencia, como la elaboración de tortillas, es deficiente al consumir significativamente más combustible que las estufas mejoradas.

Los diferentes modelos de estufa mejorada muestran grandes diferencias en su desempeño energético, dos de ellos presentan deficiencias graves en cuestiones de diseño, como carecer de cámara de combustión o tener un volumen demasiado pequeño en ésta, no utilizar relleno aislante, entre otros.

La estufa Mexalit M-20 no posee diseño en su cámara de combustión, ni túnel interior, ni relleno aislante, este hecho resulta en que no mejora la transferencia de calor a los alimentos cuando se encuentra caliente, sino inclusive lo empeora. La temperatura en sus comales secundarios es la menor en comparación con las otras estufas, desaprovechando la posibilidad de convertirlo en calor útil.

La estufa Citlalli posee una cámara de combustión pequeña que se satura rápidamente con carbón remanente, lo que implica una disminución en la velocidad de transferencia de calor hacia los alimentos, tiempos significativamente mayores a los demás dispositivos y una combustión incompleta, resultando en la generación de altos factores de emisión para los

productos de combustión incompleta (PIC's).

Los dos modelos de estufa mejorada que muestran un desempeño energético superior son los modelos Onil y Patsari, resultando en que durante la PEA reducen el consumo de combustible y el tiempo de realización de la fase de alta potencia, hecho que implica una mejor transferencia de calor hacia los alimentos cuando los modelos se hayan calientes.

La estufa Onil muestra bajos consumos de combustible en fases de alta y baja potencia, en parte debido al reducido volumen de su cámara de combustión, lo que se traduce en la más alta temperatura dentro de ésta que junto con un adecuado tiro interno que resultan en la combustión más completa y limpia. La implementación de tapas desmontables en los comales aumenta la transferencia de calor en tareas como la ebullición de agua.

La estufa Patsari tiene la más alta temperatura en la superficie del comal principal, por ello tiene la mayor velocidad de transferencia de energía al agua, sólo después del fogón. Es la estufa evaluada con mayor rango de potencia y presenta los ahorros mayores en combustible durante la elaboración de tortillas.

Se tienen ahorros significativos en combustible que van del 30 % para las estufas Onil y Mexalit M-20, hasta 44 % en las estufas Citlalli y Patsari para la elaboración de tortillas de maíz; tarea de cocinado representativa de las prácticas culinarias nacionales. Este resultado está relacionado con el desempeño que éstos modelos tienen en condiciones de funcionamiento real.

El tamaño de la cámara de combustión determina la velocidad de quemado y la potencia máxima que puede alcanzar un dispositivo de cocción, los diseños de estufas con cámara de combustión pequeña tienen duraciones de tiempo mayor en las tareas de alta potencia comparado con los diseños con cámara de combustión amplia. Sin embargo, es posible que todos los dispositivos disminuyan el tiempo de realización de una tarea de cocinado al optimizar los mecanismos de transferencia de calor hacia los alimentos, como tener tapas desmontables

en los comales que permitan transferencia de calor radiativo y convectivo hacia la olla de cocinado.

Se observaron mejoras en la velocidad de transferencia de energía al agua (v_a), ante condiciones térmicas iniciales diferentes, sólo en los dispositivos que cuentan con un diseño en su cámara de combustión y relleno aislante. Las estufas mejoradas con mejor desempeño en este parámetro son las que cuentan con materiales aislantes, como el barro y el ladrillo, en su cámara de combustión.

El análisis de temperaturas muestra que todas las estufas generan mayor cantidad de calor de desecho durante las fases de alta potencia respecto a la de baja potencia, que podría ser aprovechado por el comal secundario, por lo que es necesario mejorar los mecanismos de transferencia de calor hacia los comales. Adicionalmente, se observó que los comales secundarios que alcanzan mayor temperatura son los de plancha continua, debido a que aprovechan la alta conductividad del material.

La temperatura en la cámara de combustión está relacionada con el tamaño de la cámara de combustión y las emisiones ambientales. Ésta temperatura es más alta cuando el tamaño de la cámara es menor, sin embargo, para que la combustión sea completa, hay que garantizar además buena circulación y mezclado de los gases con el oxígeno. La Eficiencia de Combustión Nominal (ECN) es máxima para la estufa de mayor temperatura en la cámara de combustión y esa relación entre los parámetros se mantiene para los demás dispositivos excepto para un modelo de estufa que satura muy rápidamente su cámara con carbón ocasionando una combustión incompleta, de lo anterior se concluye que una cámara de combustión tan pequeña no es conveniente.

La gran cantidad de parámetros asociados al desempeño energético de los dispositivos de cocción vuelve necesaria una evaluación integral o multicriterio, como la que ha sido presentada en este trabajo, que los considere a todos y posibilite mejorar las deficiencias

específicas de cada modelo. Se han hecho recomendaciones para cada modelo, ya que cada uno de éstos presenta problemáticas diferentes.

La evaluación comparativa de este estudio, basada en el análisis multicriterio, junto con estudios paralelos que se realizaron sobre otros aspectos del funcionamiento de las estufas, muestra que la implementación de algunos modelos de estufa mejorada, específicamente las estufas Patsari y Onil, traen consigo un triple beneficio: reducir el consumo de combustible, reducir las emisiones de GEI y reducir los efectos nocivos del humo de la leña.

El desempeño energético de un sistema termodinámico como una estufa de leña, es sensible al tipo de ventilación, condiciones climáticas, tamaño y humedad de la leña, prácticas culinarias, entre otros. Por esta razón, las dos pruebas de laboratorio llevadas a cabo, no pueden ser consideradas como suficientes, es necesario orientar la evaluación del desempeño energético hacia pruebas de campo que sean enriquecidas, en la medida de lo posible, con la medición de algunos de los parámetros principales de las pruebas de laboratorio.

El desarrollo de diseños que optimicen los mecanismos de transferencia de calor para las estufas de leña, requiere de la investigación de fenómenos físicos de frontera, las posibilidades aquí planteadas son amplias.

Finalmente, para que los esfuerzos de disseminación de estufas mejoradas de leña logren sus objetivos, no basta con la evaluación del desempeño energético, es necesario incluir otros parámetros de funcionamiento ligados a las preferencias y necesidades de los usuarios para los cuales son diseñados.

Apéndice A

Datos

Temperatura promedio (°C)	Fase	Citlalli	Mexalit M-20	Onil	Patsari	Fogón
Cámara de combustión	Fase 2	$723 \pm 106^{a,b}$	597 ± 48^b	801 ± 54^a	$643 \pm 35^{a,b}$	594 ± 89^b
	Fase 3	612 ± 192^a	553 ± 67^a	694 ± 61^a	581 ± 45^a	486 ± 101^a
Comal principal	Fase 2	235 ± 17^a	232 ± 21^a	221 ± 26^a	275 ± 23^a	315 ± 87^a
	Fase 3	182 ± 11^a	172 ± 33^a	142 ± 8^a	147 ± 36^a	236 ± 76^a
Comal secundario	Fase 2	164 ± 25^a	95 ± 20^b	$133 \pm 21^{a,b}$	$115 \pm 9^{a,b}$	NA
	Fase 3	130 ± 9^a	60 ± 18^c	98 ± 2^b	$85 \pm 7^{b,c}$	NA
Chimenea	Fase 2	82 ± 11^c	$134 \pm 20^{a,b}$	162 ± 10^a	$118 \pm 18^{b,c}$	NA
	Fase 3	73 ± 6^b	$96 \pm 16^{a,b}$	104 ± 9^a	$82 \pm 11^{a,b}$	NA

Tabla A.1: Temperatura promedio en puntos característicos de los diferentes dispositivos de cocción para la fase 2 y 3 de la PEA.

Temperatura promedio (°C)	Citlalli	Mexalit M-20	Onil	Patsari	Fogón
Cámara de combustión	687 ± 57 ^{a,b}	597 ± 30 ^b	732 ± 25 ^a	610 ± 47 ^b	599 ± 50 ^b
Comal principal	153 ± 23 ^a	141 ± 11 ^a	180 ± 37 ^a	189 ± 12 ^a	186 ± 5 ^a
Chimenea	102 ± 19 ^a	119 ± 41 ^a	104 ± 28 ^a	110 ± 24 ^a	NA

Tabla A.2: Temperatura promedio en puntos característicos de los diferentes dispositivos de cocción para la PCC.

Parámetro:	Citlalli	Mexalit M-20	Onil	Patsari	Fogón
Δt	0	12	56	71	100
m_{ls} (2)	43	0	97	66	100
v_a	0	10	49	57	100
v_a^e (2)	0	100	94	94	38
CEC (2)	79	0	100	89	82
m_{ls} (3)	100	0	85	73	96
v_a^e (3)	100	75	8	42	0
CEC (3)	100	0	89	79	98
f_P	30	0	15	59	100

Tabla A.3: Estandarización de los valores para la gráfica radial en la PEA.

Parámetro:	Citlalli	Mexalit M-20	Onil	Patsari	Fogón
Δt	0	72	56	89	100
m_{ls}	100	69	68	99	0
CEC	98	68	62	100	0
ECN	0	75	100	83	17
f_{CO_2}	0	73	100	83	5
f_{CO}	0	61	100	68	3
f_{CH_4}	0	47	100	79	5
f_{HCNM}	0	88	100	100	73
f_{PM}	88	100	60	91	0

Tabla A.4: Estandarización de los valores para la gráfica radial en la PCC.

Nomenclatura

α	Difusividad térmica [m^2/s]
ΔT	Diferencia de temperatura [$^{\circ}C$]
Δt	Tiempo de duración de la prueba [min]
η	Eficiencia térmica
η_1	Eficiencia energética de primera ley
η_2	Eficiencia energética de segunda ley
η_c	Eficiencia de combustión
η_r	Eficiencia del recipiente
η_t	Eficiencia de transferencia de calor
η_T	Eficiencia total
η_{cc}	Eficiencia de control
η_{co}	Eficiencia de cocinado
ρ	Densidad [kg/m^3]

σ	Constante de Stephan-Boltzmann [$W/m^2 \cdot K$]
c_e	Calor latente de evaporación del agua [kJ/kg]
c_p	Calor específico del agua [$kJ/kg \cdot ^\circ C$]
CEC	Consumo Específico de Combustible
ECN	Eficiencia de combustión nominal
f_e	Factores de emisión [$g[C]/kg$]
f_P	Factor de potencia
g	Gravedad [m/s^2]
h	Humedad (base húmeda)
h_c	Coefficiente de transferencia de calor por convección [$W/m^2 \cdot K$]
k	Conductividad térmica [$W/m \cdot K$]
m_a^e	Masa de agua evaporada [g/min]
m_a^i	Masa inicial de agua [g]
m_a^l	Masa de agua contenida en la leña [g]
m_c	Masa de carbón remanente [g]
m_l^h	Masa de leña húmeda [g]
m_l^s	Masa de leña seca [g]
m_t	Masa de tortillas [g]

m_{ts}	Equivalente de leña seca consumida [g]
P	Potencia [W]
p	Presión [Pa]
q_i	Valor calorífico inferior [kJ/kg]
q_s	Valor calorífico superior [kJ/kg]
q_x	Flujo de calor en la dirección x [W/m^2]
q_{ef}	Valor calorífico efectivo [kJ/kg]
T	Temperatura [$^{\circ}C$]
T_e	Temperatura de ebullición local [$^{\circ}C$]
v	Magnitud de la velocidad [m/s]
v_a	Velocidad de transferencia de energía al agua [$^{\circ}C/min$]
v_a^e	Velocidad de evaporación del agua [g/min]
v_q	Velocidad de quemado [g/min]
z	Altura [m]

Bibliografía

- [1] Naeher L. P., Brauer M., Lipsett M., Zelikoff J. T., Simpson C., Koenig J. y Smith K. Woodsmoke health effects: A review. *Inhalation Toxicology*, 2007.
- [2] Smith Kirk. *Biofuels, Air Pollution, and Health. A Global Review*. Plenum Press, New York, 1987.
- [3] Berrueta S. V. *Evaluación energética del desempeño de dispositivos para cocción con leña*. Tesis de doctorado en Ingeniería (Energía), Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, 2007.
- [4] Paul Harrison, editor. *Geo Year Book 2006. An Overview of Our Changing Environment*. United Nations Environment Programme, 2006.
- [5] Sheinbaum P. C. Estudio termodinámico de una estufa de leña para uso rural. Tesis de licenciatura en Física, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México, 1988.
- [6] Smith K. R. y Mehta S. The burden of disease from indoor air pollution un developing countries: comparison of estimates. *International Journal og Hygiene and Environmental Health*, 206 (4-5):279–289, 2003.

- [7] Smith K. R. Indoor air pollution and acute respiratory infections. *Indian Pediatrics*, 40 (9):815–819, 2003.
- [8] Desai M. A., Metha S., y Smith K. R. Indoor smoke from solid fuels. assessing the environmental burden of disease at national and local levels. *Environmental Burden of Disease Series no. 4*, 2004.
- [9] Smith K. R. Health, energy, and greenhouse-gas impacts of biomass combustion in household stoves. *Energy for Sustainable Development*, I(4):23–29, noviembre 1994.
- [10] MacCarty N., Ogle D., Still D., Bond T. y Roden C. A laboratory comparison of the global warming impact of five mayor types of biomass cooking stoves. *Energy for Sustainable Development*, XII(2):5–14, 2008.
- [11] Smith K. R., Uma R., Kishore V. V. N., Zhang J., Joshi V. y Khalil M. A. K. Greenhouse implications of household stoves: An analysis for india. *Annual Review Energy and Environmental*, 25:741–763, 2000.
- [12] Rogge W. F., Hildemann L. M., Mazurek M., Cass G. R. y Simoneit B. R. Sources of fine organic aerosol. Pine, oak and synthetic log combustion in residential fireplaces. *Environmental Science and Technology*, 32(1): 13-22, 1998.
- [13] Bhattacharya S. C. y Abdul Salam P. Low greenhouse gas biomass options for cooking in the developing countries. *Biomass and Bioenergy*, 22:305–317, 2002.
- [14] Ghilardi A., Guerrero G. y Masera O. Spatial analysis of residential fuelwood supply and demand patterns in Mexico using the wisdom approach. *Biomass and Bioenergy*,31: 475–491, 2007.

- [15] Bailis R., Berrueta V., Chengappa C., Dutta K., Edwards R., Masera O., Still D. y Smith K. R. Performance testing for monitoring improved biomass stove interventions: experiences of the household energy and health project. *Energy for Sustainable Development*, 11: 57–70, 2007.
- [16] Smith K., Dutta K., Chengappa C., Gusain P. P. S., Masera O., Berrueta V., Edwards R., Bailis R. y Naumoff S. K. Monitoring and evaluation of improved biomass cookstove programs for indoor air quality and stove performance: conclusions from the Household Energy and Health Project. *Energy for sustainable Development*, junio 2007.
- [17] Berrueta V. M., Edwards R.D. y Masera O. R. Energy performance of wood-burning cookstoves in Michoacan, Mexico. *Renewable Energy*, 33,(5):859–870, 2008.
- [18] Baldwin S. F. *Biomass stoves: Engineering Design, Development, and Dissemination*. Center for Energy and Environmental Studies, Princeton, NJ., 1986.
- [19] Díaz J. R. Consumo de leña en el sector residencial de México. evolución histórica y emisiones de CO₂. Tesis de maestría en Ingeniería, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, 2000.
- [20] Secretaría de Energía. *Balance Nacional de Energía 2007*. Secretaría de Energía, 2008.
- [21] Masera O. *Sustainable Fuelwood Use in Rural Mexico*, Volume I: Current Patterns of Resource Use. LBL-34634 UC-000, 1993.
- [22] <http://www.conafor.gob.mx/portal/docs/secciones/comunicacion/b-1262008.pdf>
Consultado el 2 de julio del 2009.

- [23] Food and Agriculture Organization. Wood improved solid biomass burning cookstoves: A development manual. Documento de trabajo no. 44, Regional Wood Energy Development Programme in Asia, Bangkok, Tailandia, 1993.
- [24] Raven P. H., Evert R. F. y Eichhorn S. E. *Biology of Plants*. Freeman and Co. Worth Pub. New York, 6ª edición, 2003.
- [25] Landau L.D. y Lifshitz E.M. *Mecánica de fluidos*. Reverté, 1991.
- [26] Incropera F. P. y DeWitt D. P. *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. John Wiley and Sons, 3ª edición, 1990.
- [27] Welty J. R., Wicks C. E. y Wilson R. E. *Fundamentals of Momentum, Heat and Mass Transfer*. John Wiley and Sons, 3ª edición, 1984.
- [28] Kuo Kuan Yun K. *Principles of combustion*. Springer Berlin, 1986.
- [29] Holman J. P. *Thermodynamics*. McGraw-Hill, 4ª edición, 1988.
- [30] De Lepelierre G., Krishna P. K., Verhaart P. y Visser P. A woodstove compendium. Technical panel on fuel wood and charcoal on the U.N. Conference on new and renewable sources of energy, agosto 1981.
- [31] Dutt G. y Navia J. La combustión de la biomasa y la estufa mejorada. Documento de trabajo No. 6. Grupo Interdisciplinario de Tecnología Rural Apropiada, A.C., Pátzcuaro, Michoacán, México, 1987.
- [32] Bailis R., Ogle D., MacCarty N., Still D., Smith K. y Edwards R. The water boiling test, versión 3.0. Technical report, Household Energy and Health Programme, Shell Foundation, 2007.

- [33] Zemansky M. W. y Dittman R. H. *Calor y termodinámica*. McGraw-Hill, 6ª edición, 1984.
- [34] Burnham-Slipper H. Eritrean stove optimisation. University of Nottingham, U.K., marzo 2005.
- [35] Bryden M., Still D., Scott P., Hoffa G. and Ogle D., Bailis R. y Goyer K. Principios de diseño para estufas de cocción de leña. Technical report, Aprovecho Research Center, Shell Foundation, Partnership for Clean Indoor Air, 2006.
- [36] IPCC (Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático). *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Resumen para Responsables de Políticas. Cambridge University Press, 2007.
- [37] Solomon S. IPCC (Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático), Qin D., Manning M., Chen Z., Marquis M., Averyt K.B., Tignor M., and Miller H. L. (editores). *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Chapter: Changes in atmospheric constituents and in radiative forcing. Cambridge University Press, 2007.
- [38] Edwards R. D. y Smith K. R. Carbon balances, global warming commitments, and health implications of avoidable emissions from residential energy use in china: Evidence from an emissions database.
- <http://www.giss.nasa.gov/meetings/pollution2002/d3edwards.html>
- Consultado el 16 de julio del 2009.

- [39] Roden C. A. y Bond T. C. Emission factors and real-time optical properties of particles emitted from traditional wood burning cookstoves. *Environmental Science and Technology*, 40(21):6750–6757, 2006.
- [40] Bond T.C. Private communication. 19 de abril 2008.
- [41] Pippard A. B. *The elements of Classical Thermodynamics*. Cambridge University Press, 1966.
- [42] Arfken G. B. y Weber H. J. *Mathematical methods for physicists*. Academic Press, 4^a edición, 1995.
- [43] Stralen S. V. y Cole R. *Boiling Phenomena: Physicochemical and Engineering Fundamentals and Applications*, Volumen 1. Hemisphere Publishing Corporation, 4^a edición, 1979.
- [44] Callen H.B. *Thermodynamics*. John Wiley & Sons, 1963.
- [45] Masera O. R. Estudio de las necesidades energéticas en comunidades rurales: El método exergético. Tesis de licenciatura en Física, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México, 1986.
- [46] Borgnakke C., Van Wylen G. J. y Sonntag R. E. *Fundamentals of Thermodynamics*. New York, 5^a edición, 1998.
- [47] Volunteers in Technical Assistance. Testing the efficiency of wood burning cookstoves: Provisional international standars. Technical report, Volunteers in Technical Assistance, Arligton, VA, USA, 1985.

- [48] Shell Foundation, Household Energy and Health Projects. Stove performance testing protocol. Technical report, Shell Foundation, University of California, Berkeley and Aprovecho Research Center, 2004.
- [49] Masera O. R. El patrón de consumo energético y su diferenciación social. En *Cuadernos sobre Prospectiva Energética, El Colegio de México*, No. 108, agosto 1987.
- [50] Guevara-Féfer F. Vegetación del valle de Michoacán. En *Revista de la Facultad de Biología de la Universidad Autónoma Michoacana de San Nicolás de Hidalgo*, No. 3. noviembre 1995.
- [51] Volunteers in Technical Assistance. Wood conserving cook stoves: A design guide. Technical report, Al Dir'iyyah Institute, Geneva, Switzerland, 1980.
- [52] GIRA-CIEco, Armendariz C., Berrueta V., Johnson M. y Masera O. Evaluación de gases de efecto invernadero en estufas mejoradas para cocción con leña: Factores de emisión y eficiencia de combustión. Reporte Técnico, Estudio comparativo de estufas mejoradas para sustentar un programa de intervención masiva en México. Informe presentado por el Grupo Interdisciplinario de Tecnología Rural Apropiada, A. C. (GIRA) y Centro de Investigaciones en Ecosistemas (CIEco, UNAM) al Instituto Nacional de Ecología, junio 2009.
- [53] Johnson M., Edwards R., Alatorre F. C. y Masera O. In field greenhouse gas emissions from cookstoves in rural mexican households. *Atmospheric Environment*, 2007.
- [54] IPCC (Panel Integubernamental sobre Cambio Climático). *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Glossary. Cambridge University Press, 2007.

- [55] Still D., MacCarty N., Ogle D., Bond T. y Bryden M. *Comparing Cook Stoves*. Aprovecho Research Center, Shell Foundation y Partnership for Clean Indoor Air, 2007.
- [56] Scott Peter. *Rocket Stove Design Guide*
<http://www.bioenergylists.org/stovesdoc/Still/Rocket20Stove20Design20Guide.pdf>
Consultado el 10 de julio del 2009.
- [57] Helps International. *Estufa Onil*. Documento técnico.
- [58] Díaz R., Masera O. y Berrueta V. *De la Lorena a la Patsari: Proceso de mejoramiento e innovación de tecnología rural*. Memorias de la Semana Nacional de Energía Solar (ANES), 2004.
- [59] Dutt G. y Ravindranath N. H. *Renewable Energy: Sources for Fuels and Electricity*, chapter Alternative bioenergy strategies for cooking. Island Press, Washington D. C., 1993.
- [60] Johnson M., Edwards R., Ghilardi A., Berrueta V. y Masera O. Why current assessment methods may lead to significant underestimation of ghg reductions of improved stoves. *Boiling Point*, No. 54, 2007.
- [61] Masera O., Edwards R., Armendáriz C., Berrueta V., Johnson M., Rojas B. L., Riojas-Rodríguez H. y Smith K. Impact of patsari improved cookstoves on indoor air quality in Michoacan, Mexico. *Energy for Sustainable Development*, junio 2007.