

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

Facultad de Ingeniería



Efecto sobre la eficiencia energética al implementar una rejilla en
estufas de leña

Trabajo de graduación en modalidad de tesis presentado por

Emilio José Mata Mata

para optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería Química
Industrial

Guatemala

2021

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

Facultad de Ingeniería



Efecto sobre la eficiencia energética al implementar una rejilla en
estufas de leña

Trabajo de graduación en modalidad de tesis presentado por

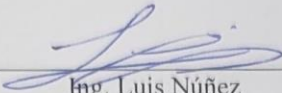
Emilio José Mata Mata

para optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería Química
Industrial

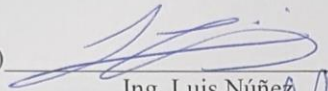
Guatemala

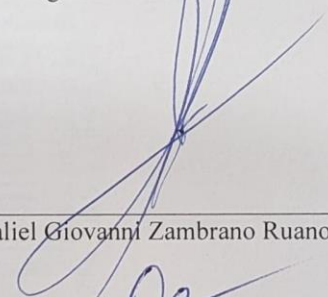
2021

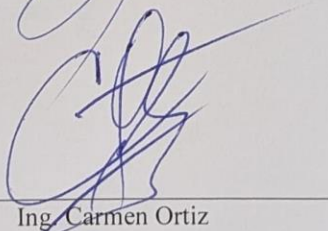
Vo Vo. Bo.

(f) 
Ing. Luis Núñez

Terna examinadora

(f) 
Ing. Luis Núñez

(f) 
Ing. Gamaliel Giovanni Zambrano Ruano

(f) 
Ing. Carmen Ortiz

Fecha de aprobación: Guatemala, 17 de diciembre de 2021

Índice

Lista de cuadros	vii
Lista de figuras.....	ix
Resumen.....	xiii
I. Introducción	1
II. Antecedentes	3
A. Transferencia de calor en estufas	3
B. Diseños de estufas eficientes.....	3
C. Poder calorífico de maderas de Guatemala	4
D. Control de humedad y combustión de leña	4
E. Uso de estufas en Guatemala.....	5
III. Justificación	7
IV. Objetivos	9
A. Objetivo general	9
B. Objetivos específicos.....	9
V. Marco teórico	11
A. Energía.....	11
B. Combustión	11
C. Mecanismos de transferencia de calor	15
D. Clasificación de sistemas	19
E. Termocuplas	20
F. Leña.....	21
G. Estufa de leña	23
VI. Metodología propuesta.....	25
A. Construcción de estufas domésticas para encino.....	27
B. Pesaje y análisis de humedad	26
C. Registro de perfiles de temperatura.....	27
D. Análisis de gases	27

E.	Análisis de datos.....	27
VII.	Resultados.....	29
VIII.	Discusión.....	43
IX.	Conclusiones.....	51
X.	Recomendaciones.....	53
XI.	Bibliografía.....	55
XII.	Anexos.....	59
A.	Rejilla prototipo.....	63
B.	Datos originales.....	61
C.	Cálculos de muestra.....	67
D.	Análisis de error.....	68
E.	Datos calculados.....	69
F.	Estufas rústicas utilizadas en el residencias y negocios.....	72

Lista de cuadros

Cuadro No.1: Poder calorífico de diferentes especies	4
Cuadro No. 2: Requerimientos utilizados para construcción de estufas	29
Cuadro No. 3: Modelos predictivos de temperatura en base a posición	39
Cuadro No. 4: Variación de modelos predictivos con punto experimental	39
Cuadro No. 5: Calor utilizable y temperatura máxima asociada por escenario	40
Cuadro No. 6: Incremento en eficiencia energética en estufas	41
Cuadro No. 7: Temperaturas en termocuplas	61
Cuadro No. 8: Coordenadas de cada punto de termocuplas	62
Cuadro No. 9: Masa inicial y contenido de humedad de encino.....	63
Cuadro No. 10: Condiciones de combustión	65
Cuadro No. 11: Masa promedio y contenido de humedad promedio de encino.....	69
Cuadro No. 12: Temperaturas promedio en termocuplas	70
Cuadro No. 13: Condiciones de combustión promedio	71
Cuadro No. 14: Poder calorífico promedio.....	71

Lista de figuras

Figura No.1: Estufas ahorradoras de leña	3
Figura No.2: Cambios en eficiencia de combustión con aire en exceso.....	12
Figura No.3: Cambios en físicos en llama	14
Figura No.4: Variación de temperatura de llama	14
Figura No. 5: Transferencia de calor por conducción.....	16
Figura No. 6: Transferencia de calor por convección	17
Figura No. 7: Transferencia de calor por medio de radiación	18
Figura No. 8: Mecanismos de radiación y convección simultáneos	18
Figura No. 9: Efecto Seebeck en termocuplas	20
Figura No. 10: Zonas de combustión	22
Figura No. 11: Dimensiones de estufa cúbica vista frontal-derecha	30
Figura No. 12: Dimensiones de estufa cúbica vista posterior-derecha	31
Figura No. 13: Dimensiones de estufa cúbica vista posterior.....	31
Figura No. 14: Diseño de estufa cúbica vista frontal-izquierda.....	32
Figura No. 15: Fotografía de posición y funcionamiento de estufa cúbica	33
Figura No. 16: Dimensiones de estufa cilíndrica vista posterior-derecha	34
Figura No. 17: Dimensiones de estufa cilíndrica vista frontal-izquierda	35
Figura No. 18: Posición y funcionamiento de estufa cilíndrica con rejilla.....	36
Figura No. 19: Temperaturas promedio en termocuplas de estufa cúbica	37
Figura No. 20: Temperaturas promedio en termocuplas de estufa cilíndrica	38
Figura No. 21: Balance de masa y energía en estufas.....	40
Figura No. 22: Dimensiones de rejilla vista planta.....	59
Figura No. 23: Diseño de rejilla vista frontal-izquierda	60
Figura No. 24: Diagrama de caja y bigotes del contenido de humedad en encino	69
Figura No. 25: Diagrama de caja y bigotes sobre masa de encino	70
Figura No. 26: Diseño de estufas comunes.....	72

Resumen

El objetivo del presente trabajo fue determinar el impacto que la utilización de una rejilla tiene sobre la eficiencia energética y la transferencia de calor en combustiones de leña en estufas domésticas con base a la eficiencia de combustión que presenta el sistema. Los análisis se realizaron en 2 estufas domésticas, con configuración cilíndrica y cúbica, diseñadas y construidas en base a estufas de bajo costo utilizadas en Guatemala. Se registraron las temperaturas con un sistema de termocuplas tipo K, y los gases de combustión con un analizador de gases Bacharach ECA 450, al combustionar encino dentro de ellas. Se determinaron modelos de regresión lineal múltiples para la predicción de la temperatura de un punto dentro de los equipos en base a su coordenada dimensional. La implementación de la rejilla en ambas estufas disminuyó la masa no sobrante, aumentó la eficiencia de combustión y el calor utilizable, culminando en un incremento en la eficiencia energética de $7.24\% \pm 1.48\%$ en la cúbica y $9.35\% \pm 2.43\%$ en la cilíndrica. El uso de la rejilla incrementó el aprovechamiento de la energía almacenada en el encino, disminuyendo la cantidad de leña requerida, o aumentando el calor utilizado. Se recomienda realizar un análisis técnico y financiero sobre la posibilidad de la comercialización de la rejilla para beneficios tanto para usuarios como para el sector privado.

I. Introducción

La combustión de leña en equipos de combustión caseros, como estufas y hornos, es una práctica muy común en Guatemala debido a la disponibilidad forestal del país. Los equipos utilizados son diversos, pero se tiende a utilizar estructuras de bajo costo hechas con ladrillos o a partir de hojalata reciclada. Debido a los recursos disponibles y el conocimiento de la población, las estufas artesanales utilizadas son mal diseñadas debido a un flujo inapropiado de aire, causando combustiones ineficientes.

La transferencia de calor es la ciencia que estudia las razones de transferencia de energía entre sistemas debido a una diferencia en la temperatura. En el caso de las estufas, sin importar su estructura, la transferencia de calor se da por un conjunto de modelos de conducción a través de la estructura misma, y por convección de aire y gases de combustión. La combustión, que genera dichos gases, es una reacción oxidación-reducción que requiere de oxígeno proveniente del aire para ocurrir. Una carencia de flujo de aire al combustionar la leña crea combustiones incompletas, reduciendo la cantidad de calor útil aprovechado en base a al entregado por la leña, a dicha razón se le conoce como eficiencia energética (Çengel y Ghajar, 2011).

El presente estudio determinó el efecto que una rejilla posee sobre la eficiencia energética de estufas domésticas que utilizan leña como combustible, por medio del estudio de los perfiles de temperatura dentro de las estufas y los gases de combustión liberados.

La función de la rejilla de acero inoxidable fue posicionar la leña por encima del nivel del suelo, aumentando el flujo de aire por debajo de la leña en combustión. El aumento de aire buscó propiciar combustiones más completas y eficientes y aumentar el flujo convectivo de los gases de combustión.

Un modelo de distribución de temperaturas es una herramienta matemática que permite describir la transferencia de calor en base a las temperaturas en diferentes puntos de un modelo definido. El modelo se trabaja a partir de una recopilación de las temperaturas en cada punto, y la distancia de ese punto hacia un origen arbitrario. El conjunto de resultados permite calcular el cambio de la temperatura en base a la distancia tridimensional punto hacia el origen, y así predecir temperaturas en puntos no analizados. Se puede describir el modelo considerando los supuestos de régimen del sistema y modelos de transferencia de calor aplicables al estudio (Wikło, Motyl, Olejarczyk, Kołodziejczyk, Kalbarczyk, Piechnik, Bukalska, 2020).

En la obtención de las temperaturas, se recopiló la distribución de temperaturas utilizando termocuplas tipo K a lo largo de la superficie interior de 2 estufas domésticas, con configuración cubica y cilíndrica. La distribución se describió con un modelo

matemático que predice la temperatura en función de la posición en una estufa doméstica, tomando en cuenta una transferencia de calor en régimen estacionario y en 3 dimensiones.

Por otro lado, se utilizó un analizador de gases de combustión para determinar la composición de los gases de combustión, el aire en exceso y la eficiencia de combustión. La composición de los gases permite inferir el estado de la combustión, y en caso de ser principalmente incompleta, comprender que factor no permite la combustión adecuada. Los estudios se realizaron con y sin la rejilla para comparación de resultados, y análisis del efecto que provee la rejilla.

II. Antecedentes

A. Transferencia de calor en estufas

Los estudios realizados por Tillman en su estudio “Combustión de leña: Principios, procesos y ciencias económicas” demostraron que a pesar de las diferentes zonas de combustión que se da al quemar madera, el sistema tiende a ser estable. Determinaron que la temperatura de la llama, que representa la generación de calor del sistema, se mantiene estable siguiendo la siguiente ecuación:

$$[\text{Ec.1}] T_a = 1920 - \left(1.51 * \frac{MCg}{1-MCg}\right) * 100 - 5.15 Xcs$$

Donde, T_a es la temperatura de la flama en Kelvin, MCg es el contenido de humedad de la madera y Xcs es el porcentaje de aire en exceso.

Las temperaturas dentro del sistema de combustión utilizado siguen la misma estabilidad que la llama, con un desfase debido al tiempo requerido para que se dé la transferencia de calor. Únicamente al inicio de la combustión, donde la llama no se ha dispersado, y al final, donde se está acabando el combustible, el sistema tiene cambios de temperatura significativos. Se infirió que el sistema se puede tratar como un sistema estacionario una vez las temperaturas se mantienen estables, pero sigue siendo dependiente de la posición (Tillman, 2012).

B. Diseños de estufas eficientes

Figura No.1: Estufas ahorradoras de leña



(Ross, 2010)

Según información adquirida por informes del Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales (MARN), las estufas observadas en la Figura No.1, fueron desarrolladas por el sector privado en Guatemala. Son diseños más eficientes que permiten una mejor combustión de la leña. Entre las más utilizadas, se encuentran las estufas desarrolladas por la empresa “Buenos Vecinos”. La empresa desarrollo 3 diseños eficientitas entre los años 2014-2016. Los equipos demostraron aumentar la eficiencia térmica, reducir el humo generado en un 91% y principalmente, ahorrar leña entre el 50%-64% en comparación a las estufas de fuego abierto utilizadas en el país. Existen otras empresas y otros diseños similares con resultados similares, pero esta empresa es la líder en la distribución de estufas. El precio de las estufas puede llegar a ser un problema en cuanto a su adquisición por o que se ha trabajado con el Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales (MARN) para la donación e implementación de estos diseños en comunidades de escasos recursos.

C. Poder calorífico de maderas de Guatemala

La Organización Latinoamericana de Energía, OLADE, analizó el poder calorífico de la seca para diferentes especies de árboles que son utilizados como combustible en la región. Entre los estudios se analizó el encino blanco de la región de Guatemala.

Cuadro No.1: Poder calorífico de diferentes especies

Poder calorífico inferior de leña seca	
Especie	(kJ/kg)
Eucalipto	19,228
Pino	20,482
Cedro	18,066
Ciprés	21,443
Encino	19,1744

(OLADE, 1982)

D. Control de humedad y combustión de leña

En el manual de madera como material ingenieril, Ross describe los cambios de humedad que se dan al almacenar y manejar la madera en distintas condiciones. La humedad promedio en la leña varia según su procedencia y manejo. Leña recién cortada tiende a retener una humedad entre el 30% y 50% dependiendo de la especie y clima. Al almacenarse en ambientes en contacto con la intemperie la humedad oscila en los mismos rangos, aumentando en caso de lluvias. Su almacenamiento debe de ser en un lugar fresco y cerrado, sin contacto con el ambiente. En dichas condiciones, la mayor parte de las especies mantienen una humedad entre el 8% - 16% debido a las propiedades higroscópicas de las fibras del material. La humedad es un problema debido a que disminuye el poder calorífico de la especie, por lo que en procesos eficientes se considera el secado de la madera antes de su combustión.

También se describe una de las formas en la cual iniciar un fuego residencial o en estufas a la intemperie temporal. Debido a tratarse de estufas con diseños pobres, se necesita posicionar la madera de maneras específicas para asegurar la quema de todo el material. Se

recomienda la colocación de los leños principales de manera vertical y paralela, separados por una distancia equivalente a su largo. Encima de ellos debe apilarse nuevamente de manera paralela, pero esta vez de manera horizontal para unir ambas filas. Se debe de repetir el proceso hasta apilar una torre de más de 15 cm. En el espacio rectangular creado en el medio de la torre se debe insertar leños de manera vertical, apoyándolos contra las 4 caras del interior de la torre. Por último, se deben de agregar láminas o pellets de leña seca en los espacios creados en el centro. Al encender el fuego con la leña seca, el fuego se esparce por los leños verticales, y a su vez a la torre. La posición de la madera permite un flujo de aire hacia todos los leños para mantener la llama y permitir que la mayor parte de la madera se quemé (Ross, 2010).

E. Uso de estufas en Guatemala

Las estufas que utilizan leña como combustible son altamente utilizadas en Guatemala, especialmente en las áreas rurales. Uno de los estudios más grandes respecto al uso de estas estufas, es el estudio de exposición aleatoria de la contaminación en interiores y sus efectos respiratorios, o RESPIRE por sus siglas en ingles. El estudio realizado por la universidad de Berkeley y apoyado por el ministerio de salud de Guatemala, es un referente respecto a los hábitos de uso de las estufas por parte de comunidades rurales. El estudio abarcó un total de 266 mujeres embarazadas, donde el grupo control utilizó estufas a fuego abierto. Las estufas a fuego abierto en el estudio variaron entre los hogares debido a que en la mayoría de los casos se trabajó con las estufas que las familias ya tenían en uso. A pesar de tratarse un estudio a nivel nacional, las estufas utilizadas tenían muchas similitudes y mostraban algunos comportamientos y costumbres arraigados en la cultura Guatemalteca. Las principales características encontradas son las siguientes: estructura base hecha de hojalata o materiales de construcción, principalmente el material que tengan a mano debido a que en promedio no existe un ingreso que permita la compra de una estufa; configuraciones cúbicas o cilíndricas a fuego abierto, es decir, con la cámara de combustión expuesta al ambiente con poca o ninguna insulación térmica; uso de comal en la parte superior de la estufa, con contacto directo al fuego, para el cocimiento de alimentos, en especial la elaboración de tortilla; en algunos casos, uso de chimeneas o espacios en la estructura, con poca funcionalidad, para la expulsión de gases de combustión al mismo espacio donde se está cocinando (Kirk et al., 2010) (Lisa et al., 2011).

III. Justificación

La leña es la fuente de energía principal en los hogares de Guatemala debido su poder calorífico y su bajo costo. La combustión de esta se da principalmente en hornos cuyo diseño no permite una combustión adecuada debido a su estructura. Los problemas que surgen de la utilización de dichos hornos son baja eficiencia energética y grandes cantidades de gases de combustión liberados al ambiente, los cuales son dañinos para la salud de los usuarios. Para el 2008, en Guatemala existía una incidencia de cáncer de pulmón de 581 personas por cada 100,000 habitantes (OPS, 2009) y estudios han comprobado que el riesgo de cáncer pulmonar en población no fumadora de ambos sexos es mayor en personas expuestas al humo de leña que entre las no expuestas (Figuroa et al., 2012).

A pesar de su bajo costo, su extensivo uso representa una porción significativa en el presupuesto de residencias y negocios informales que la utilizan. Al necesitar grandes cantidades de leña, es necesario explorar opciones que permitan mejorar el proceso de su combustión con la finalidad de reducir la cantidad de leña utilizada. La reducción representaría un ahorro económico, pero también permitiría reducir la deforestación de los bosques de Guatemala. Se estima que en el año 1950 la disponibilidad de hectáreas por habitante era de 2.50 hectáreas, pero se redujo alrededor de 0.26 hectáreas por persona para el año 2010. La principal razón de deforestación en el país se debe a la ganadería y siembra de granos básicos, pero el consumo de leña en hogares y comercios informales representa la mayor causa de degradación de bosques (MARN, 2018).

El presente trabajo determinó el impacto que la utilización de una rejilla tiene sobre la eficiencia energética y la transferencia de calor en combustiones de leña en estufas domésticas. Se enfocó en los cambios de perfiles de temperatura, gases de combustión liberados y la eficiencia de combustión al utilizarla. El aumento de estos factores significaría un aumento en la energía utilizable de la biomasa, por lo tanto, una reducción en la cantidad de requerida. En este caso, la posible comercialización de rejillas podría mitigar, hasta cierto alcance, los efectos económicos, sociales y ambientales descritos que implica el uso de leña.

IV. Objetivos

A. Objetivo general

Evaluar el efecto sobre la eficiencia energética en estufas domésticas de leña al emplear una rejilla.

B. Objetivos específicos

1. Construir dos estufas domésticas para leña, con configuración cúbica y cilíndrica, para la implementación de una rejilla, en base a un diseño existente de una empresa privada.
2. Definir modelos de distribución de temperaturas registrando perfiles de temperatura en las estufas domésticas, con y sin una rejilla, para estudiar su efecto en el comportamiento de la transferencia de calor dentro de los equipos.
3. Analizar los gases de combustión liberados utilizando un analizador de gases para comparar la eficiencia energética en base a la eficiencia de combustión en los equipos construidos al aplicar una rejilla.

V. Marco teórico

A. Energía

1. Definición

La energía es la capacidad de un material para producir trabajo, esta puede tener diversas manifestaciones como calor, movimiento, luz, crecimiento, etc. La reacción de generación de energía puede tomar diversas formas y transformarse según el proceso que se le aplique (Secretaría de Energía, 2003).

El término energía, difiere entre autores, fechas y enfoques, sin embargo, la definición general dice que la energía es la capacidad de un cuerpo de realizar un trabajo (González, 2006).

2. Eficiencia energética

La eficiencia energética se refiere a la relación entre la energía perdida y la aprovechada en un sistema cuando se realiza su transferencia y generalmente depende de la complejidad de dicho sistema (Laterra y otros, 2011). En la eficiencia energética se busca disminuir la energía que no se emplea para realizar el trabajo o transferencia, aportando amplios beneficios, dentro de los cuales se incluyen reducción de emisiones de gases de efectos invernaderos, disminución de costos energéticos, entre otros (Cleary and Palmer, 2020).

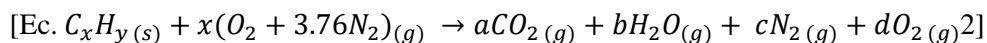
Según la ISO 50001:2011 la eficiencia energética es la relación cuantitativa entre el resultado de energía y la entrada de esta a un sistema. Se puede determinar como energía requerida/energía utilizada.

Para Carretero y García (2012), la eficiencia energética es la opción principal para reducir los gases de efecto invernadero, ya que, al ser exitosa, optimiza la demanda de energía y ahorra costos energéticos.

B. Combustión

1. Definición

La combustión es una reacción oxidación-reducción, donde se quema un combustible, como hidrocarburos, con un oxidante, el oxígeno. La reacción es altamente exotérmica, por lo cual es la reacción más utilizada para fines de calentamiento. La oxidación se da a elevadas temperaturas y necesita de una chispa para iniciar la cadena de combustión. Una combustión completa se da cuando existe suficiente aire para la quema del combustible. En caso de combustibles sólidos, como la madera, la relación estequiométrica de una combustión completa es (Wade, 2017):



El aire utilizado para las reacciones contiene oxígeno y nitrógeno, y aunque este último no participa en la reacción químicamente, se debe de considerar su calentamiento durante la combustión. En productos, ocasionalmente se encontrará también oxígeno, ya que se prefiere trabajar las combustiones con oxígeno en exceso para asegurar la combustión completa (Vallero, 2019).

Las combustiones incompletas ocurren debido a una insuficiencia de oxígeno y no son deseadas debido a la liberación de menor energía, y producción de gases invernadero. El principal gas de invernadero creado durante estas combustiones es el monóxido de carbono (Vallero, 2019).

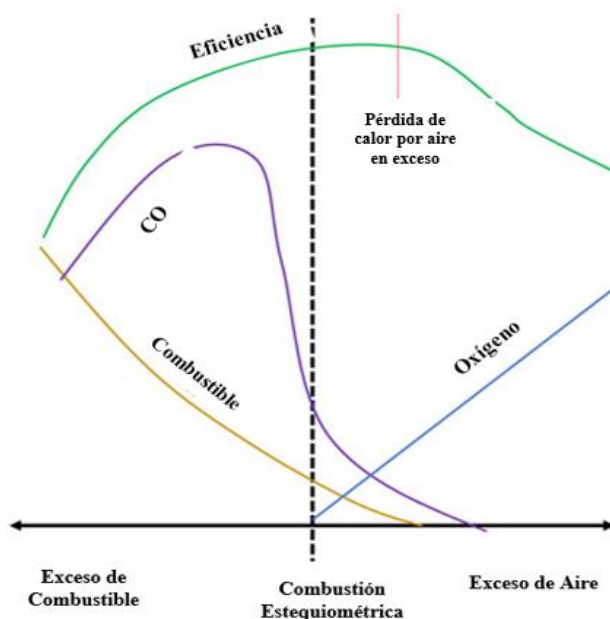
2. Eficiencia de combustión

La eficiencia de combustión es un parámetro que comprara el calor utilizable liberado contra la energía teórica contenida en el combustible. El valor se puede determinar en base a la concentración de CO_2 y CO en los gases de combustión (Suslick, 2001):

$$[\text{Ec.3}] \%EC = \frac{\%CO_2}{\%CO_2 + \%CO}$$

El $\%CO_2$ se asocia a combustiones completas, mientras que el $\%CO$ a combustiones incompletas. El calor obtenido de las combustiones completas es mayor al de las incompletas, por lo que la eficiencia de combustión se basa en cuanto del combustible se quema en reacciones completas (Suslick, 2001).

Figura No.2: Cambios en eficiencia de combustión con aire en exceso



(Vallero, 2019)

Una combustión del 100% no es realista, pero siempre se desea obtener la mejor posible para aprovechar la energía disponible. La Figura No.2 describe como el aire en

exceso asegura una mayor eficiencia, hasta llegar a un punto de inflexión donde el aire en exceso enfría tanto el entorno que la eficiencia se pierde (Vallero, 2019).

3. Relación entre eficiencia energética y eficiencia de combustión

Según Jiménez (2016), la eficiencia de combustión se relaciona directamente con la energía que se libera por efecto de la combustión y que puede ser aprovechada, dando lugar, a una mayor eficiencia energética. Esta es calculada a partir de mediciones de CO₂, el cual, al aumentar su salida, simula una mayor eficiencia de combustión lo que se representa una mayor eficiencia de energía en este caso calórica.

En el caso de las cocinas, la eficiencia energética puede ser interpretada como la eficiencia del quemador, que se obtiene por la medición de gases expulsados por la combustión lo que determina que finalmente en ser la eficiencia de combustión del sistema (Jiménez, 2016).

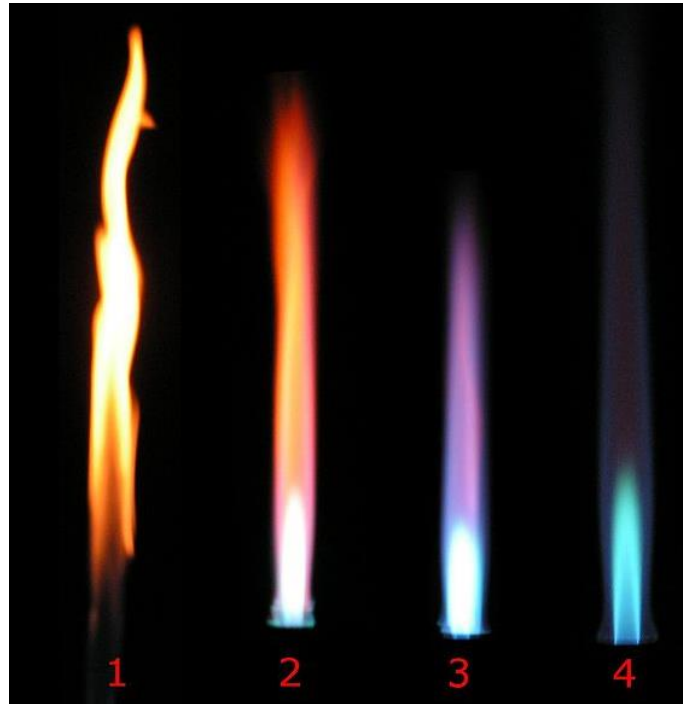
4. Analizador de gases de combustión

Los analizadores de gases de combustión poseen varios sensores para la determinación de la composición de combustiones. Son los instrumentos más utilizados para la determinación de eficiencias de combustión, debido a que pueden calcularlo directamente al determinar la composición de los gases. La mayoría de los analizadores en el mercado muestran no solo la eficiencia de combustión, sino el aire en exceso, temperatura y composición, por lo que operarios o analistas pueden inferir rápidamente posibles problemas y soluciones (De Andrade et al., 2013).

5. Temperatura de flama

La temperatura y flujo de la flama en una combustión varía principalmente al tipo de combustible utilizado y la forma con la que se añade el oxidante. Los combustibles utilizados pueden ser sólidos, líquidos y gaseosos. Una vez se escoge la fase el combustible también se puede mezclarse o mezclarse con aire antes de entrar a alguna cámara de combustión. Los combustibles gaseosos tienen la ventaja de poder mezclarse fácilmente con aire, mientras que los sólidos poseen mayor dificultad y requieren pulverización o procesos de reducción de diámetro (Warnatz, Maas y Dibble, 2003).

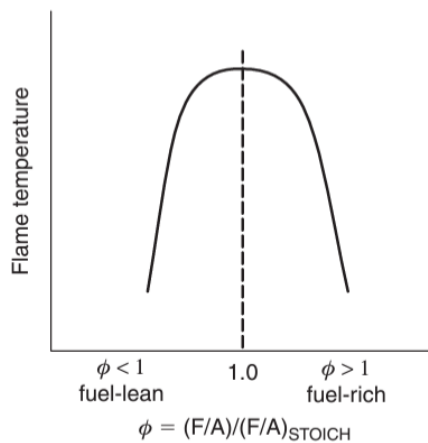
Figura No.3: Cambios en físicos en llama



(Warnatz, Maas y Dibble, 2003)

La Figura No.3 muestra un mechero Bunsen con misma cantidad de combustible en las 4 flamas. La válvula reguladora de oxígeno está completamente cerrada en la llama 1. Se abre un cuarto de la válvula hasta abrirla completamente en la flama 4. Se observa una gran variación de las flamas debido a que los combustibles mezclados, o aquellos con fácil acceso a un flujo de oxígeno en exceso homogéneo, producen flamas estables con un régimen de flujo laminar (Warnatz, Maas y Dibble, 2003).

Figura No.4: Variación de temperatura de llama



(Glassman, Yeter y Glumac, 2014)

La Figura No.4 demuestra que la temperatura de la llama sigue la misma tendencia que la eficiencia de combustión. El parámetro ϕ representa la razón de combustible sobre oxidante utilizado sobre el estequiométrico. Teóricamente la razón estequiométrica permite alcanzar la temperatura máxima, y usar más o menos oxidante produce un decremento cuadrático en ella. A pesar de ello, en la práctica se complica lograr exactamente una relación estequiométrica al utilizar aire, y debido a su efecto en la eficiencia de combustión de la Figura No.1, se prefiere utilizar un exceso de aire que un déficit de este (Glassman, Yeter y Glumac, 2014).

6. Principio de Le Châtelier

El principio de Le Châtelier propone que *“la modificación de alguna de las condiciones que puede influir sobre el estado de equilibrio químico de un sistema, provoca una reacción en un sentido tal que tiende a producir una variación de sentido contrario de la condición exterior modificada”* (Pardo y López, 1996, pp 382). En este sentido, el autor propone que toda acción que se realice en un sistema tendrá una reacción que permita volver a colocar el sistema en equilibrio.

En los sistemas de combustión, según el principio de Le Châtelier, cuando se genera una reacción que altera el equilibrio, debe ser contrarrestada con otra diferente. Según Çengel y Ghajar (2011), en los sistemas de combustión la reacción que se origina para mantener el equilibrio es la producción de gases y radiación. En el caso de los gases, estos pueden ser empleados para verificar la eficiencia de la combustión (Jiménez, 2016).

C. Mecanismos de transferencia de calor

1. Calor y sus mecanismos de transferencia

Calor es la energía en transición debido a una diferencia de temperaturas entre dos puntos o espacios físicos. Se necesita de un gradiente de temperatura para un flujo de calor neto. La transferencia de calor es la ciencia que analiza las razones de energía que se transfieren de un sistema a otro en forma de calor en una cantidad de tiempo. Los tres mecanismos de transferencia de calor son: conducción, convección y radiación (Modest, 2003).

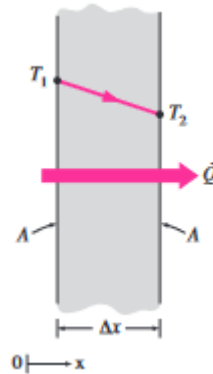
La conducción se define como la transferencia de calor por medio de contacto directo entre ambos puntos con gradiente de temperatura. No existe transporte de materia, únicamente de energía. La convección se da al poner en contacto una superficie sólida con un fluido en movimiento a diferente temperatura, como en el caso de la interacción de la combustión de leña y aire dentro de un horno. La transferencia en este caso se ve acompañada por un movimiento de masa y se clasifica entre natural y forzada. Por último, la radiación es la transferencia de energía por medio de ondas electromagnéticas a la velocidad de la luz (McCabe, Smith y Harriot, 2005).

La razón de transferencia de calor, \dot{Q} , representa la energía neta transferida de un sistema delimitado en un tiempo determinado. El calor por tratarse de energía es descrito en el sistema internacional de unidades en Joules, mientras que la razón de transferencia en watts (McCabe, Smith y Harriot, 2005).

2. Conducción

La transferencia de calor por medio de la conducción se basa en la transferencia de energía a nivel microscópico, desde partículas más energéticas a partículas adyacentes menos energéticas. En sólidos, la transferencia se da por vibraciones y electrones libres, mientras que en gases y líquidos se da por colisiones y difusión de las moléculas en movimiento aleatorio (Çengel y Ghajar, 2011).

Figura No. 5: Transferencia de calor por conducción



(Çengel y Ghajar, 2011)

La razón de conducción de calor se basa en el espesor, material, configuración geométrica y diferencia de temperatura en el medio. La Figura No.5 explica el comportamiento de la conducción en un objeto de espesor Δx . La transferencia de calor se da desde la temperatura superior, T_1 , a la inferior T_2 a través del espesor y el área de la placa, formando un gradiente de temperatura entre ellos. La razón de la transferencia por conducción, \dot{Q}_{cond} , se describe con la ley de Fourier de la conducción (Çengel y Ghajar, 2011):

$$[Ec. 4] \dot{Q}_{cond} = kA \frac{T_1 - T_2}{\Delta x}$$

La razón es proporcional al gradiente de temperatura y al área de la placa, e inversa al espesor de esta. La constante de proporcionalidad se reconoce como la conductividad térmica del material, que representa la capacidad de un material para conducir calor (Çengel y Ghajar, 2011).

3. Convección

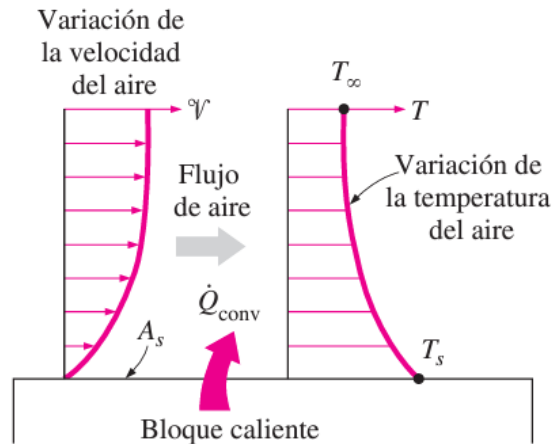
El mecanismo de convección se puede clasificar en base al comportamiento del movimiento del fluido. Al ser impulsada por medios externos se considera forzada, y en los casos donde el aire se mueve debido a causas naturales, se considera una convección natural. La transferencia de calor en es estos casos se ve afectada de gran manera por la velocidad del fluido teniendo una relación proporcional donde a mayor velocidad mayor es la transferencia. Los coeficientes de convección natural suelen ser más bajos que los de comportamiento forzado debido a su menor velocidad (Çengel y Ghajar, 2011).

El flujo de calor por convección se describe por la ley de enfriamiento de Newton:

$$[Ec. 5] \dot{Q}_{conv} = hA_s(T_s - T_{\infty})$$

Donde \dot{Q}_{conv} es la razón de transferencia de calor, A_s es el área superficial donde se da la transferencia, T_s la temperatura superficial del objeto y T_{∞} la temperatura del fluido alejado del sólido. El coeficiente “h” representa los efectos de transferencia de calor por convección (Modest, 2013).

Figura No. 6: Transferencia de calor por convección



(Çengel y Ghajar, 2011)

El comportamiento de la convección se observa en la Figura No.6. El calor en objetos es transferido hacia la capa de aire cercana por medio de conducción. La capa de aire, ahora más caliente que las demás, es reemplazada por capas adyacentes más frías, creando un movimiento macroscópico. El movimiento del aire acarrea la energía adyacente al objeto a capas más alejadas, cambiando el mecanismo de conducción a convección (Çengel y Ghajar, 2011).

La transferencia por convección depende de diferentes factores del fluido de trabajo, como los son: viscosidad, velocidad, densidad y sus propiedades termodinámicas. Otro enfoque que puede describir los análisis de transferencia por este método es el enfoque de resistencia térmica.

$$[Ec. 6] R_c = \frac{1}{h_c A}$$

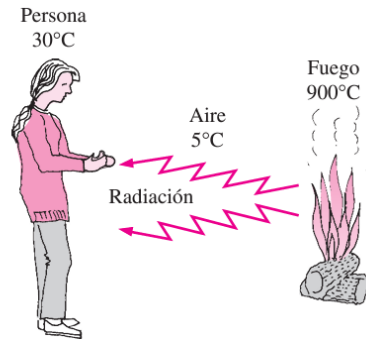
La resistencia térmica, R_c , describe la oposición al movimiento del calor, y es indirectamente proporcional al producto del coeficiente de transferencia de convección y el área de contacto (McCabe, Smith y Harriot, 2005).

4. Radiación térmica

La radiación es el único de los mecanismos de transferencia de calor que no necesita de un medio físico para llevarse a efecto. El mecanismo se basa en la emisión de ondas electromagnéticas por parte del objeto emisor, creada a partir de cambios en las configuraciones electrónicas de átomos. Las ondas se mueven a la velocidad de la luz. Un

cuerpo ideal se le conoce como cuerpo negro, donde es capaz de absorber y emitir la máxima cantidad de energía en una temperatura dada. Los demás cuerpos son afectados por los fenómenos de reflectividad, absorptividad, transmisividad y emisividad (Çengel y Ghajar, 2011).

Figura No. 7: Transferencia de calor por medio de radiación



(Çengel y Ghajar, 2011)

La Figura No. 7 representa la transferencia de calor desde un punto de calor como una fogata hacia un objeto de menor temperatura, en este caso una persona. La transferencia de calor se realiza sin necesidad de un medio. La transferencia de calor del mecanismo se puede describir por la ecuación Stefan-Boltzmann (Çengel y Ghajar, 2011):

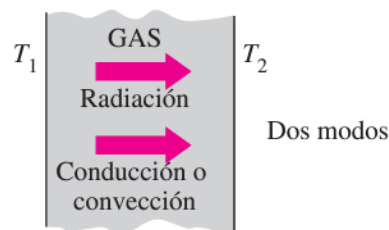
$$[\text{Ec.7}] \dot{Q}_{rad} = \sigma * A_1 * F_{12} * (T_1^4 - T_2^4)$$

La constante de Boltzmann (σ) es la constante física que relaciona la temperatura absoluta y la energía. El factor F_{12} representa una corrección entre transferencia con cuerpos no negro, basado en la geometría, posición y emisividad de los dos objetos (Çengel y Ghajar, 2011).

5. Mecanismos simultáneos

En la práctica son comunes los sistemas donde la transferencia de calor se realiza de manera simultánea a través de más de uno de los mecanismos. Los sistemas con mecanismos simultáneos pueden ser analizados de diferentes maneras con base en los mecanismos involucrados.

Figura No. 8: Mecanismos de radiación y convección simultáneos



(Çengel y Ghajar, 2011)

Una estufa de leña puede considerarse como el sistema en la Figura No.8, donde el fuego creado a partir de la combustión de la leña se considera un foco de radiación y los gases de combustión como fluidos que transferían a través de la convección. La razón de transferencia de calor del sistema se describe con el modelo:

$$[Ec.8] \dot{Q}_{tot} = h_{combinado} A_s (T_s - T_{\infty})$$
$$[Ec.9] h_{combinado} = h_{conv} + \sigma * F_{12} * (T_s + T_{\infty}) (T_s^2 + T_{\infty}^2)$$

D. Clasificación de sistemas

1. Dependencia al tiempo

Los sistemas estacionarios son aquellos que no poseen cambios de estados durante el proceso. En otras palabras, el estado de una ubicación específica no tiene ninguna relación con el tiempo. En estos sistemas el cambio en la energía del sistema es 0 (Smith, Van Ness y Abbott, 2007).

Los sistemas transitorios son sistemas contrarios a los estacionarios. En dichos sistemas, el estado del sistema está en continuo cambio debido a diferentes factores internos y externos del sistema. El estado de una ubicación específica cambia con el tiempo (Smith, Van Ness y Abbott, 2007).

2. Dependencia a la posición

Los sistemas pueden ser clasificados en base a su dependencia a una ubicación específica en un sistema. Los sistemas uniformes son sistemas donde el estado de un punto es independiente de la posición. Por otro lado, en los sistemas no uniformes los estados del sistema dependen de la posición del punto analizado (Smith, Van Ness y Abbott, 2007).

3. Intercambio con alrededores

Los sistemas también se pueden clasificar en base al intercambio de masa y energía con los alrededores. Los sistemas abiertos son aquellos que transfieren tanto energía como materia con el alrededor. En los sistemas cerrados no se permite la entrada o salida de materia hacia o desde el sistema, por lo que existe únicamente transferencia de energía con. Por último, los sistemas aislados poseen barreras que no permiten ningún intercambio, no se transfiere energía ni materia (Smith, Van Ness y Abbott, 2007).

4. Dirección de transferencia

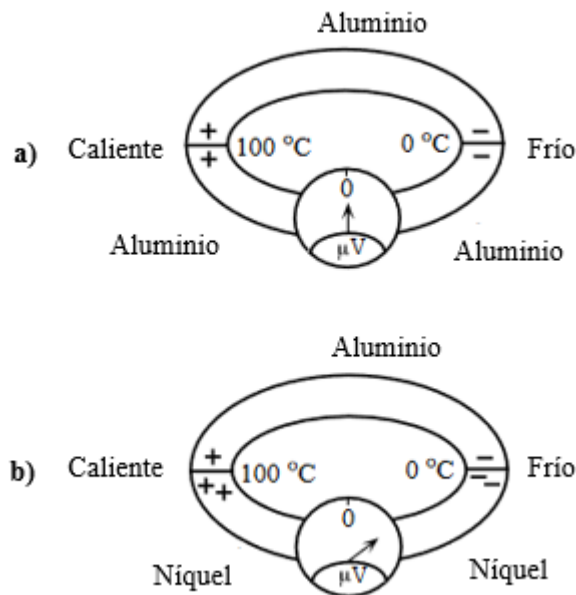
La transferencia masa y energía en sistemas puede analizarse en base a las dimensiones en las cuales se dirige dicha transferencia. Las aplicaciones teóricas más comunes asumen una única dirección significativa de transferencia, analizando un sistema unidimensional. En la práctica, los estudios no tienden a comportarse de dicha manera, y la transferencia se da significativamente en dos o tres dimensiones, convirtiéndose con transferencia bidimensional y tridimensional, respectivamente (Smith, Van Ness y Abbott, 2007).

E. Termocuplas

1. Efecto Seebeck

Las termocuplas son instrumentos de medición de temperaturas fluctuantes basadas en el efecto Seebeck. El efecto Seebeck es un fenómeno termoeléctrico donde un gradiente de temperatura entre dos puntos de un material conductor o semiconductor produce una diferencia de voltaje entre esos mismos puntos. Al calentar un extremo del material, los electrones en la región caliente se encuentran en un estado de mayor energía y velocidad. La diferencia con el lado frío obliga a los electrones a fluir desde el lado caliente hacia el lado frío, dejando en su paso iones metálicos positivos en la región caliente y una acumulación de electrones en el lado frío. El movimiento crea un campo eléctrico entre los iones positivos de la región caliente y los negativos de la fría, desarrollando un voltaje entre ellos (Kasap, 2001).

Figura No. 9: Efecto Seebeck en termocuplas



(Kasap, 2001)

La Figura No.9.a muestra la medición de la diferencia de voltaje en una vara de un metal, con cables conectores del mismo material. Los cables conectores conectan a un voltímetro. Si el material de los conectores es el mismo que la vara, ocurre una misma diferencia de temperatura, que ocasiona un mismo voltaje, pero contrario al de la vara, por lo que no se puede medir un voltaje neto entre ambos. En caso de la Figura No.9.b, el material de la vara y de los cables es diferente, lo permite que el voltaje termoeléctrico sea diferente, y se pueda medir un voltaje neto. Las termocuplas utilizan dos metales diferentes con una unión a una temperatura de referencia, y otra unión expuesta a cambios de temperatura. El voltaje neto entre ambos metales se asocia a un cambio de temperatura específico en base a los metales utilizados (Kasap, 2001).

2. Tipo K

Las termocuplas tipo K utilizan como metales conductores cables de cromel y alumel. Se trata de termocuplas con gran aplicabilidad debido a que las aleaciones permiten un gran rango de medición, desde -200 °C a 1280 °C. El rango específico de cada termocupla varía dependiendo del calibre de los cables conductores y se utilizan principalmente en aplicaciones de medición en tiempo real para temperaturas fluctuantes (Kasap, 2001).

F. Leña

1. Propiedades

La leña es un recurso natural renovable biodegradable utilizado como combustible. Se compone principalmente de celulosa, y otros de sus componentes son: hemicelulosa, lignina, resinas y grasas. La leña es un material con propiedades aislantes, tanto térmica como eléctricas. Posee poros que ocasionan una propiedad higroscópica, absorbiendo humedad de su entorno (Hellwig, 1986).

2. Leña como combustible en Guatemala

Según el censo de Población y Vivienda de Guatemala de 2018, el 54.4% de los hogares utilizan la leña como fuente principal de energía para la preparación de alimentos. Es decir, más de 1.7 millones de hogares utilizan como energía principal el calor que se produce a partir de la combustión de la madera. El uso de la leña en zonas urbanas es tan solo de 29.1%, mientras que en el área rural es del 88%. La leña es utilizada en su mayoría en las áreas rurales debido a su disponibilidad, bajo costo, conveniencia y factores socioculturales hacia la cocina (DIGEBOS, 2008).

A pesar del gran uso de la leña, los modelos de estufas energéticamente eficientes son escasos en el país, y la mayor parte de la población utiliza estufas de baja calidad o fabricadas a mano, sin ningún tipo de cuidado para la salud. Es por ello por lo que el ministerio de Energía y Minas aprobó la política energética 2013-2027, donde los objetivos relacionados al uso de madera son (DIGEBOS, 2008):

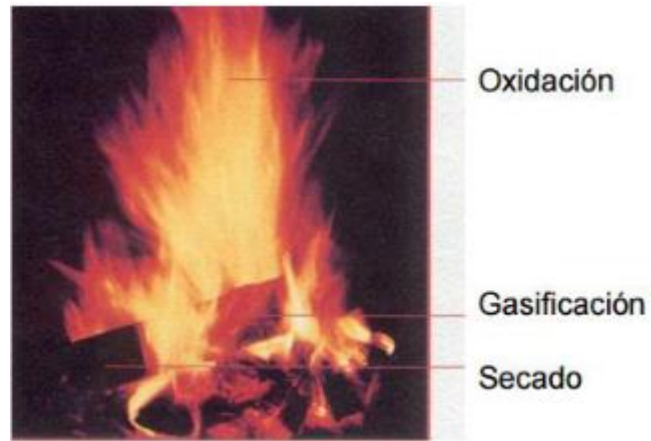
- Instalar 100,000 cocinas eficientes
- Capacitación de leña autosostenible
- Aumentar plantaciones forestales en un 10%.

3. Encino

El encino blanco, *Quercus Conspersa Benth*, pertenece a la clasificación de los robles. Se encuentran en varias zonas de Guatemala en bosques de encino. No se encuentra en peligro y sus principales usos son: uso energético, fabricación de alambrado y en producción de papel.

4. Combustión

Figura No. 10: Zonas de combustión



(Hellwig, 1986)

La combustión de este material no es homogénea debido a que se producen 3 zonas con propiedades diferentes de combustión. En la Figura No.10, se observa la distribución de las zonas. En la zona de secado, la superficie de la leña recibe calor por radiación proveniente de la llama y evapora el agua contenida en dicha área. Luego en la gasificación, la leña se calienta por encima del punto de ebullición del agua e inicia una pirolisis. Durante la pirolisis la descomposición provoca una liberación de materia volátil, mientras más humo se forme, se disminuye la eficiencia debido a combustiones incompletas. Por último, en la etapa de la oxidación, los gases liberados de la etapa anterior se oxidan a altas temperaturas y concentraciones de oxígeno (Hellwig, 1986).

5. Poder calorífico

El poder calorífico de un material es la energía almacenada en dicho material por unidad de masa, que puede ser liberada por una oxidación, principalmente por combustión. El poder calorífico representa la energía posible a liberar si todo el combustible pasa por una combustión completa (Francescato, Antonini y Zuccoli, 2008).

6. Humedad

La humedad es un problema durante la combustión debido a que parte de la energía de la leña es utilizado para el calentamiento y evaporación del agua atrapada en su estructura. El vapor de agua tiende a condensarse por lo que no se logra utilizar la energía proveniente de ella, sin tomar en cuenta que el agua reduce el contenido de energía por unidad de masa debido a su propio calor calorífico. El poder calorífico inferior (NCV_m), afectado por el contenido de humedad, se puede calcular en función del poder calorífico de la leña totalmente seca (NCV_o) y su contenido de humedad en base húmeda (H). El poder calorífico en MJ/kg se describe con la ecuación 10 (Francescato, Antonini y Zuccoli, 2008).

$$[Ec. 10] NCV_m = \frac{NCV_o * (100 - H) - 2.44 * H}{100}$$

G. Estufa de leña

Según Díaz y otros (2011) desde los inicios de la civilización se ha empleado la biomasa, principalmente leña, como combustible para cocción de alimentos en fogones abiertos. Desde 1950 se han implementado estrategias y alternativas para el mejoramiento de las estufas de leña con el fin de reducir el impacto que generaba la deforestación por su uso.

Existen diversas formas de construcción de estufas de leña, dentro de ellas se encuentra el fogón tradicional, estufa justa, estufa Onil, estufa Incawasi, estufa Ecofogón, estufa Malena, estufa Patsari, entre otras (Díaz y otros, 2011). El diseño de la estufa depende de diversos factores, sin embargo, hay componentes generales que se mantienen:

1. Estructura base

Es la estructura donde se instalan los componentes y accesorios, esta puede ser construida con diversos materiales (Bernilla y otros, 2014). Uno de los materiales más comunes empleados para la construcción de la estructura base son los ladrillos refractarios. Los ladrillos refractarios se usan comúnmente en chimeneas debido a su diseño, en el cual buscan soportar altas temperaturas y baja conductividad térmica para lograr una mayor eficiencia energética (Vitcas,2023).

2. Cámara de combustión

Es el espacio que se emplea para generar el fuego o la combustión, puede ser construida con materiales refractarios (Bernilla y otros, 2014).

3. Otros

Loza de ferrocemento: Es la parte donde por medio de hornillas se colocan las ollas para cocinar (Bernilla y otros, 2014).

Chimenea: Generalmente es un tubo de plancha galvanizada que permite la circulación dentro de la cámara de combustión (Bernilla y otros, 2014).

Rejilla: Esta puede ser una rejilla o plataforma metálica, se utiliza para el soporte de la leña y cumple la necesidad de oxigenación para la mejora de la combustión (Bernilla y otros, 2014). Cabe mencionar que, dentro de la construcción artesanal de estufas de leña dentro del país de Guatemala, no se encuentran comúnmente las rejillas.

VI. Metodología propuesta

A. Construcción de estufas domésticas para encino

Para el diseño de la estufa de leña, se tomaron en cuenta diversos factores, el principal y más influyente fue la construcción tradicional que se lleva a cabo en las zonas rurales del país, donde predomina el empleo de materiales económicos, y fáciles de encontrar para los habitantes. En este sentido, el objeto de la construcción fue realizar la implementación de la rejilla a las construcciones ya existentes, para aumentar la eficiencia de la combustión y por tanto mejorar la eficiencia energética del sistema. Se tomó como referencia el estudio RESPIRE, descrito en el inciso E del apartado de antecedentes, para el diseño y construcción de estufas apegadas a la aplicación real en la vida cotidiana del pueblo rural Guatemalteco. Para abarcar todos los requerimientos de una estufa real según el estudio, a continuación, se describen dos estufas, de configuración cubica y cilíndrica, hechas a partir de hojalata y ladrillos de construcción, con poca insulación, cámara de combustión abierta y chimeneas poco funcionales. En general, ambas estructuras carecen de sistemas energéticamente eficientes, donde no se aprovecha de la mejor manera el calor y donde se liberan contaminantes respiratorios a los usuarios. Dos de los principales problemas abordados por el estudio.

1. Configuración cilíndrica

- Cortar hojalata de tanque de GLP, de hierro negro de espesor de 5mm para formar figura cilíndrica de 36.1 cm de diámetro interno y 36,6 cm de diámetro exterior, con 57 cm de alto. Corte con soldadura de acetileno.
- Utilizar pulidora con disco de corte para fabricar entrada de aire de 28.5 cm de largo y 12 cm de altura en la parte inferior del barril.
- Perforar 5 agujeros con diámetro de 1/16 de pulgada en comal de aluminio para inserción de termocuplas tipo K. La primera perforación se ubicó en el centro del comal, y los 4 restantes, equidistantes desde el punto central en forma de cruz, a una distancia equivalente al radio del cilindro.
- Perforar 7 agujeros con diámetro 1/16 de pulgada para inserción de termocuplas. Las ubicaciones de las termocuplas fueron las siguiente las siguientes: 1) entrada de aire a nivel del suelo; 3) opuesta a la entrada de aire a nivel del suelo; 2) distancia media en el perímetro del círculo entre termocuplas 1) y 3), a nivel del suelo; 4) alineada verticalmente con termocupla 1) a la mitad de la altura del cilindro; 5) y 6) alineadas verticalmente con 2) y 3), respectivamente, a la altura de termocupla 4); 12) distancia media en el perímetro del círculo entre termocuplas 5) y 6) a altura media entre mitad del barril y comal. La configuración final utilizada se observa en las figuras No. 16-17. Perforar agujero de 1 $\frac{3}{4}$ pulgadas para tubo de escape de gases de combustión.

- Soldar tubo de escape con técnica de punteo eléctrico. Longitud de 10 cm horizontal y 30 cm vertical. Este cumple la función de chimenea para el escape de gases del sistema.
- Colocar comal de aluminio, con espesor de 3 mm y diámetro de 37 cm, encima de la estructura, cubriendo en su totalidad la cámara de combustión.
- Colocar rejilla de acero inoxidable en el fondo del barril. Ver prototipo de diseño de empresa privada en Figura No. 22 y No. 23 de anexos.
- Colocar configuración anterior en lámina de hierro negro 1/16 de pulgada.

2. Configuración cúbica

- Colocar ladrillos refractarios TCG-25 para formación cúbica con dimensiones exteriores de 45.72 x 52.07 x 29.21cm.
- Remover ladrillo superior trasero para formar salida de gases de combustión. En esta configuración no se presenta tubo de escape o chimenea, debido a la necesidad de construir acorde con las características que se pueden observar en las chimeneas artesanales.
- Regular aire de entrada añadiendo y removiendo ladrillos opuestos a salida de aire.
- Perforar agujeros en comal siguiendo la misma metodología que el inciso A.1. Observar figuras No. 11-14.
- Perforar de 7 agujeros de 1/16 de pulgada para inserción de termocuplas, siguiendo las instrucciones descritas en inciso A.1, tomando en cuenta la figura cúbica y perímetro de un cuadrado.
- Colocar comal de aluminio, con espesor de 3 mm y diámetro de 46 cm, encima de la estructura, cubriendo en su totalidad la cámara de combustión.
- Colocar rejilla de acero inoxidable en el fondo de la estructura. Ver prototipo de diseño de empresa privada en Figura No. 22 y No. 23 de anexos.
- Colocación de configuración cúbica en lámina de hierro negro de 1/16 de pulgada.

En ambas configuraciones se debe colocar la leña de la manera descrita en el inciso D del apartado de antecedentes. Una torre de 15 centímetros de alto, de leños apilados de manera vertical y paralela separados por una distancia equivalente a su largo, seguido de una fila, pero de manera horizontal, repitiendo la formación hasta completar la torre. En el espacio rectangular creado en el medio de la torre se debe insertar leños de manera vertical, apoyándolos contra las 4 caras del interior de la torre.

B. Pesaje y análisis de humedad

- Pesar 6 troncos de leña de encino con un peso total de 1.54 kg.
- Cortar madera de encino en troncos menores a 20 cm de largo.
- Recolectar muestras de todos los troncos, cortando láminas finas de manera transversal y longitudinal a través de todo el tronco.
- Colocación de 0.5g muestras en balanza de humedad OHAUS MB120 y activar análisis a 110 °C. Recopilar datos humedad.

C. Registro de perfiles de temperatura

- Colocar leños dentro de estufa doméstica, siguiendo estructura fogata estilo cabaña, la cual consiste en formar un cuadrado con leños apilados de forma horizontal y en medio del cuadrado un tronco vertical o diagonal esto con el objetivo de mejorar el flujo de aire, optimizar la combustión y permitir que el flujo de fuego llegue la totalidad de la biomasa.
- Colocación de termocuplas tipo K con rango de -50 a 538 C en lugares seleccionados, conectarlas a controlador EXTECH EA15.
- Iniciar el fuego y observar temperatura hasta estabilización de lecturas después de 8 minutos.
- Registrar temperaturas de los 12 puntos de termocuplas.
- Repetir procedimiento con rejilla y en segunda estufa.

D. Análisis de gases

- Limpieza de equipo Bacharach ECA 450
- Calibración para gases de combustión de madera según instructivo 0024-9400ES.
- Seguir pasos de iniciación de fuego y estabilización de combustión de inciso C.
- Colocación de sonda en salida de gases de combustión. Tubo de escape en configuración cilíndrica y en salida posterior (sin ladrillo) en configuración cúbica.
- Tomar e imprimir las lecturas de eficiencia de combustión y composición de gases para determinar la eficiencia energética del proceso.

E. Análisis de datos

- El modelo de distribución de temperaturas se analizó utilizando regresiones lineales múltiples con el paquete de análisis de datos de Excel 2021
- El calor utilizable, que describe el calor liberado al quemar la leña, se calculó utilizando la ecuación:

$$[\text{Ec.11}] CU = [M * NCVm - (M * \%MS * NCVo)] * \%EC$$

Donde, M representa la masa inicial, %MS la masa sobrante no quemada, %ECF la eficiencia de combustión, NCVo el poder calorífico seco del encino, y NCVm el poder calorífico a cierta humedad promedio.

- La eficiencia energética final fue calculada al relacionar la energía liberada, calculada como calor utilizable, sobre la energía total acumulada en la madera.

$$[\text{Ec.12}] \%EE = \frac{CU}{M * NCVm}$$

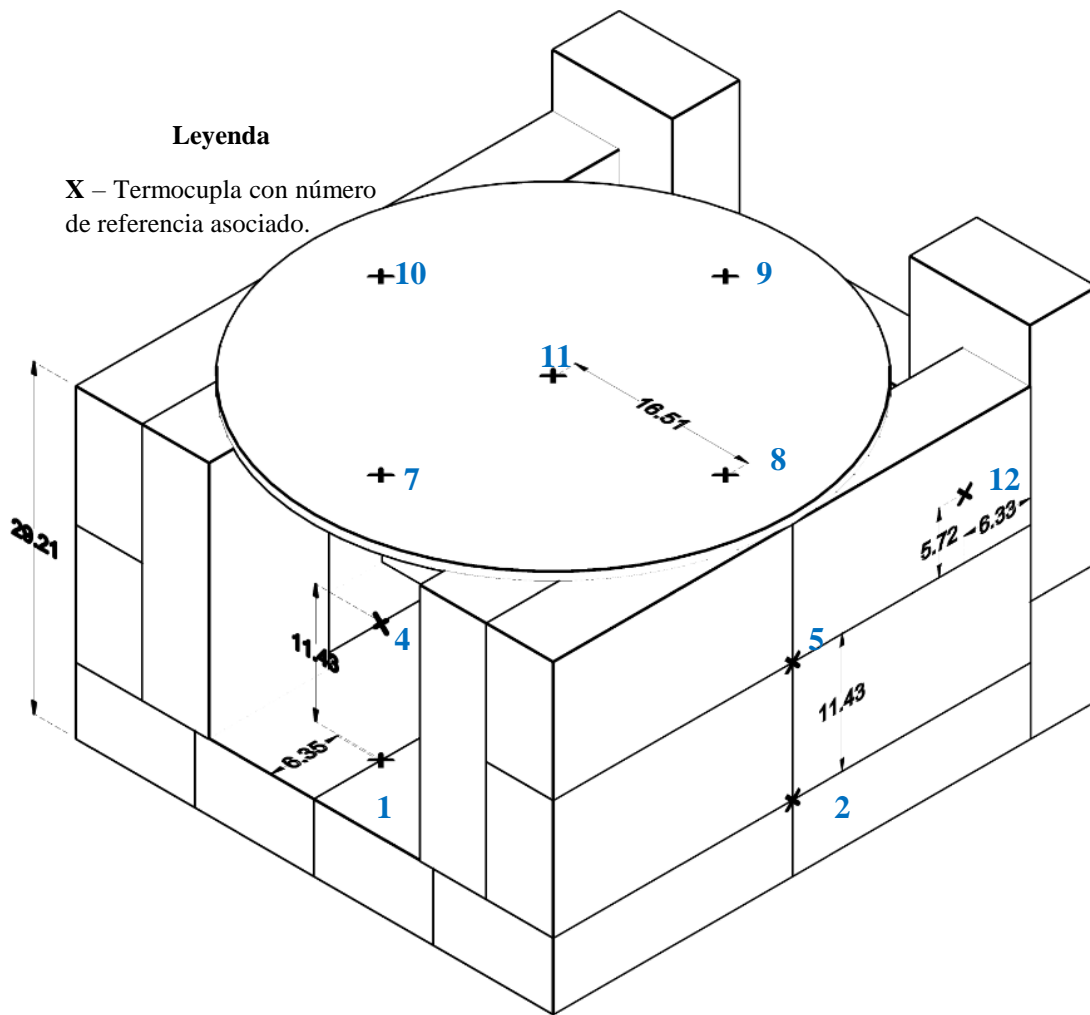
VII. Resultados

Cuadro No. 2: Requerimientos utilizados para construcción de estufas

Requerimientos	Descripción
Ancho y largo	Ancho y largo superior a 20 cm. Área transversal no debe sobrepasar 5 m ² debido a costo y disponibilidad de espacio.
Altura	Altura entre 25 y 80 cm, sin tomar en cuenta altura de chimenea.
Cámara de combustión	Cámara de combustión aislada del exterior para evitar fuego abierto.
Espacio de entre combustible y superficie objetivo	La distancia entre la madera y superficie a calentar, como un comal, no debe exceder 35cm.
Entrada y salida de aire	Entrada de aire inferior, de lado opuesto a salida de gases de combustión. La salida de aire debe de estar en sección superior.
Costo	Menor a Q900, rango promedio entre Q300-Q500.
Resistencia	Los materiales de construcción deben resistir temperaturas máximas de 2000 °C antes de afectar integridad de estructura de manera permanente.
Pérdidas de aire	Estructura parcialmente cerrada que disminuya la pérdida de calor y gases de combustión, bajo los límites económicos.

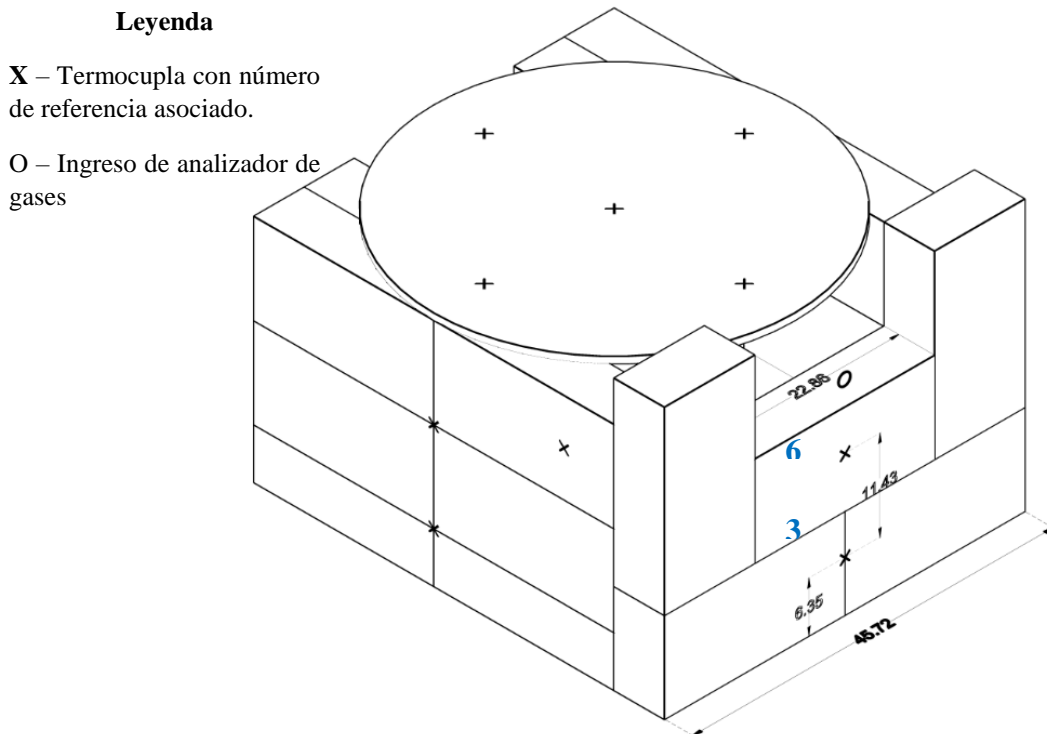
El Cuadro No.2 describe los requerimientos con los que ambas estufas debían cumplir según la aplicación en áreas rurales y los hallazgos descritos en los estudios REPSIRE y la Alianza Global para Estufas Limpias en “Análisis del Mercado de Estufas y Combustibles de Guatemala”. También se consideró las características de las estufas comúnmente utilizadas en áreas rurales descritas en la Figura No. 26. El diseño de ambas estufas se describe a continuación.

Figura No. 11: Dimensiones de estufa cúbica vista frontal-derecha



Vista frontal con escala en centímetros de estufa cúbica de diseño propio, en base a características descritas en apartado de metodología propuesta inciso A.2 y apartado de antecedentes inciso E. Estufa cúbica construida con ladrillos refractarios TCG-25 de baja conductividad térmica y comal de aluminio siguiendo requerimientos de Cuadro No. 2. Las termocuplas insertadas en los símbolos “X”, fueron termocuplas tipo K Extech TP875 con un rango de medición de -50 a 538 °C, y sus coordenadas se describe en el Cuadro No. 8.

Figura No. 12: Dimensiones de estufa cúbica vista posterior-derecha



Vista posterior con escala en centímetros. La salida de gases de combustión, donde se introdujo el analizador de gases, se ubicó en la parte superior de la sección trasera.

Figura No. 13: Dimensiones de estufa cúbica vista posterior

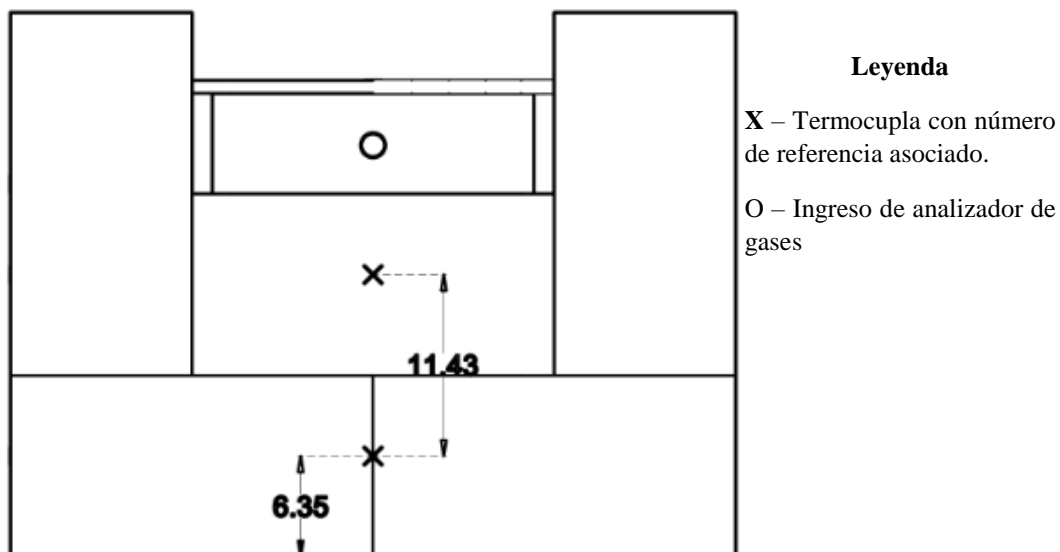
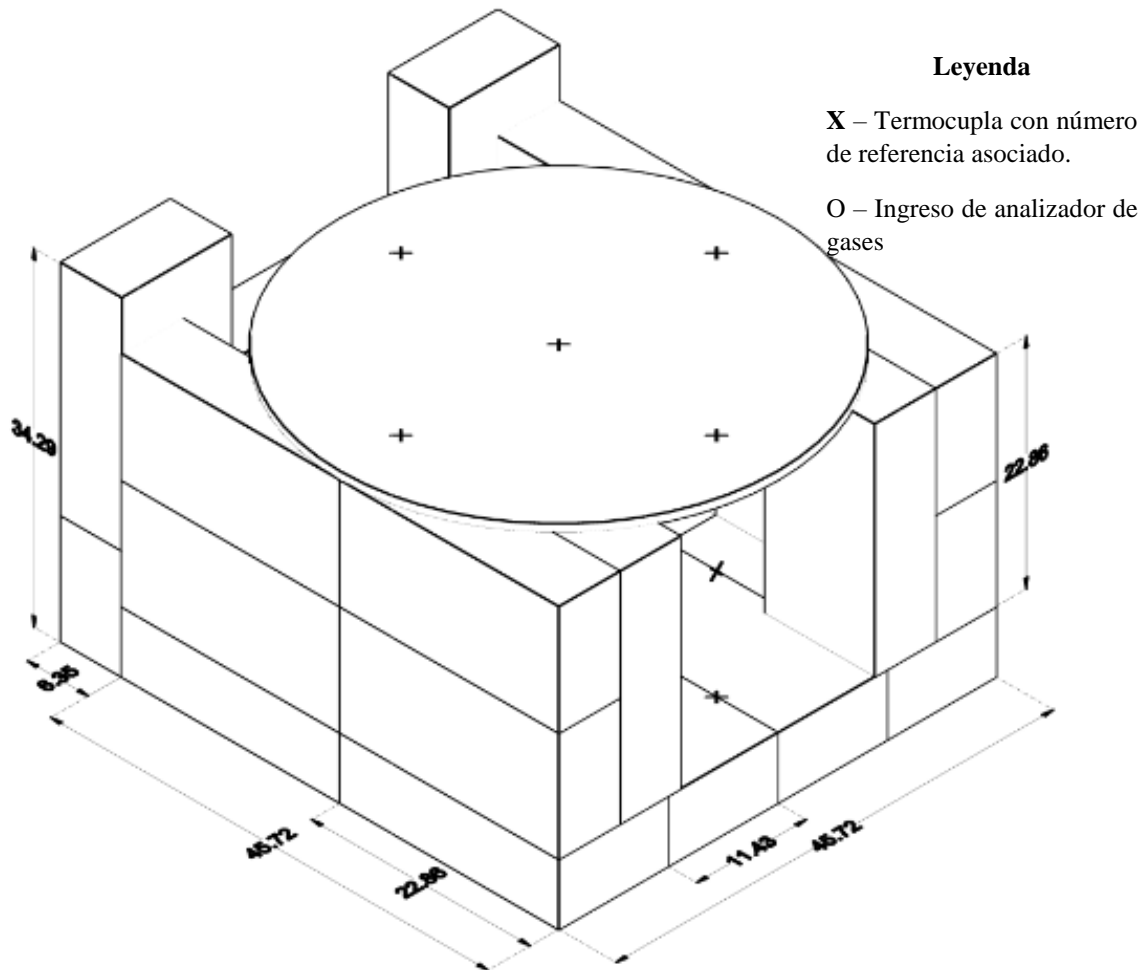
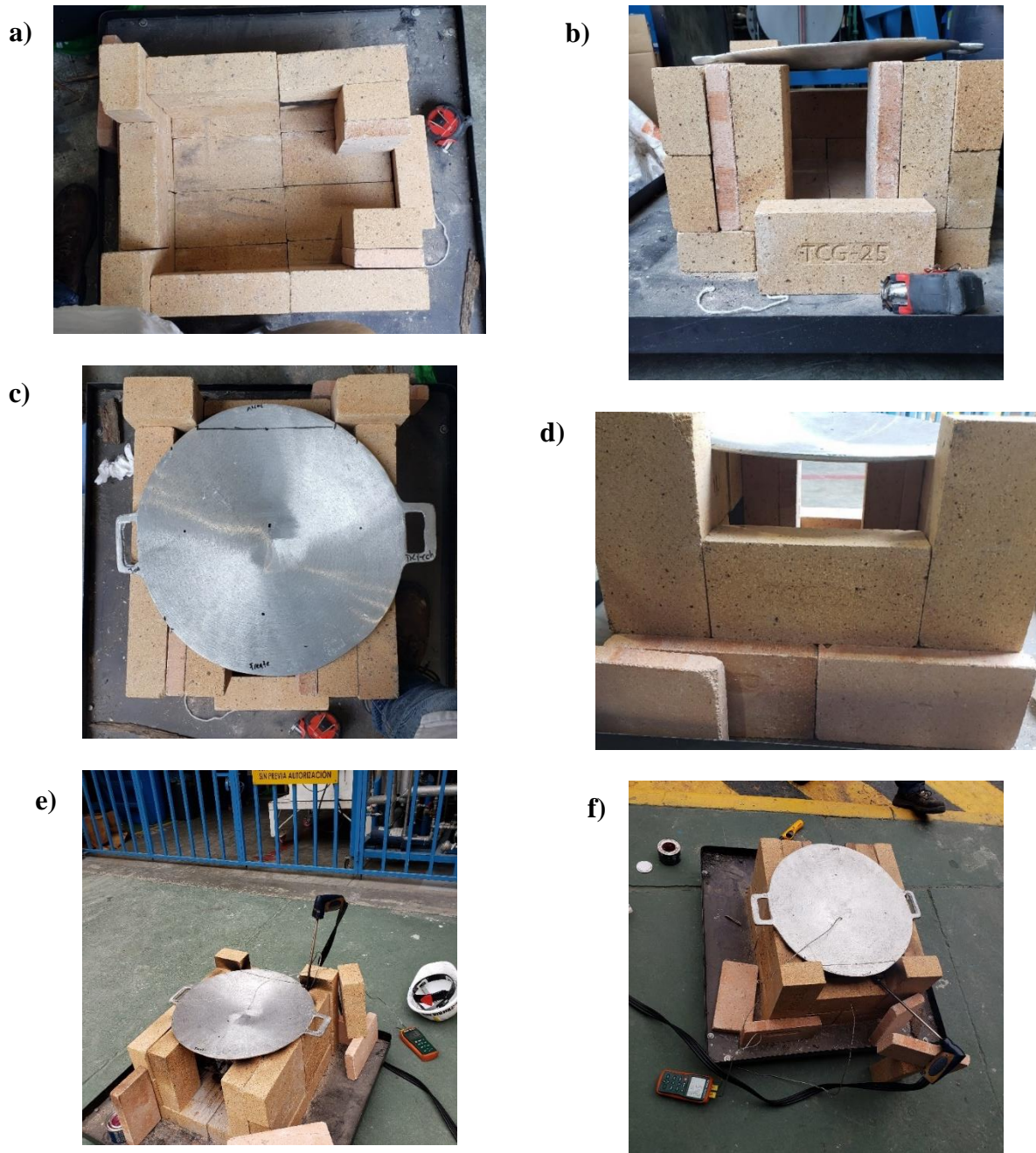


Figura No. 14: Diseño de estufa cúbica vista frontal-izquierda



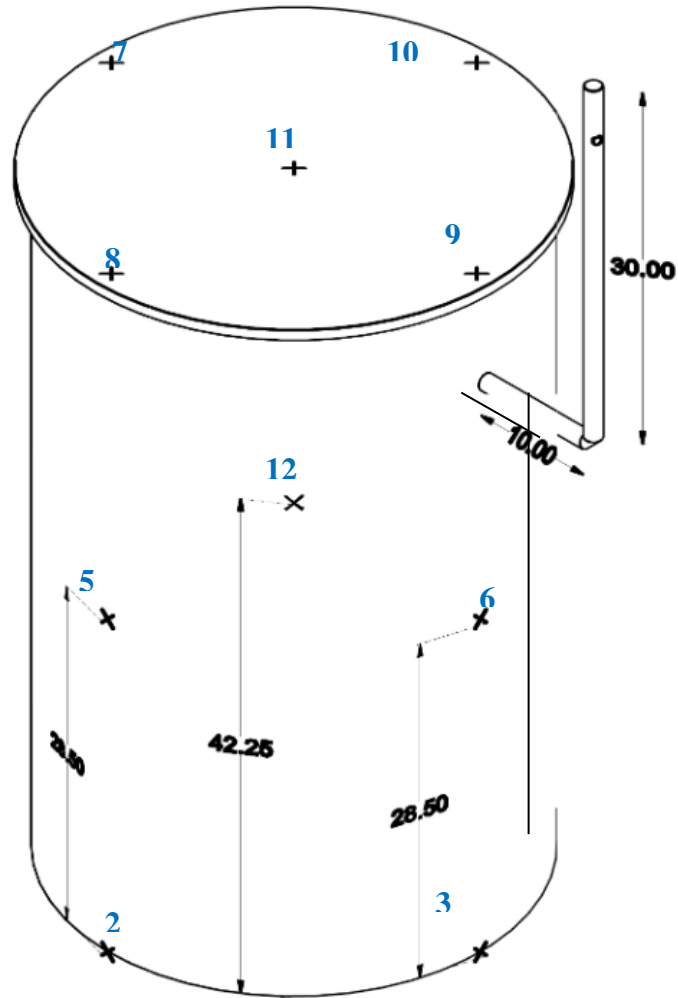
En corridas con la rejilla, el centro de esta se alinee con el centro de la estufa, a nivel de la cama de ladrillos. Se colocaron los leños de la manera descrita en el apartado de metodología propuesta inciso A y apartado de antecedentes inciso D.

Figura No. 15: Fotografía de posición y funcionamiento de estufa cúbica.



Fotografías tomadas en Laboratorio de operaciones unitarias Ingeniería Química UVG, sobre: a) Cámara de combustión interior de estufa. b) Posicionamiento de comal de aluminio por encima de estufa y posicionamiento de ladrillos. c) Vista superior con comal de aluminio d) Salida de gases de combustión en sección posterior. e) y f) Funcionamiento de estufa con equipos de termocuplas y analizador de gases en funcionamiento.

Figura No. 16: Dimensiones de estufa cilíndrica vista posterior-derecha



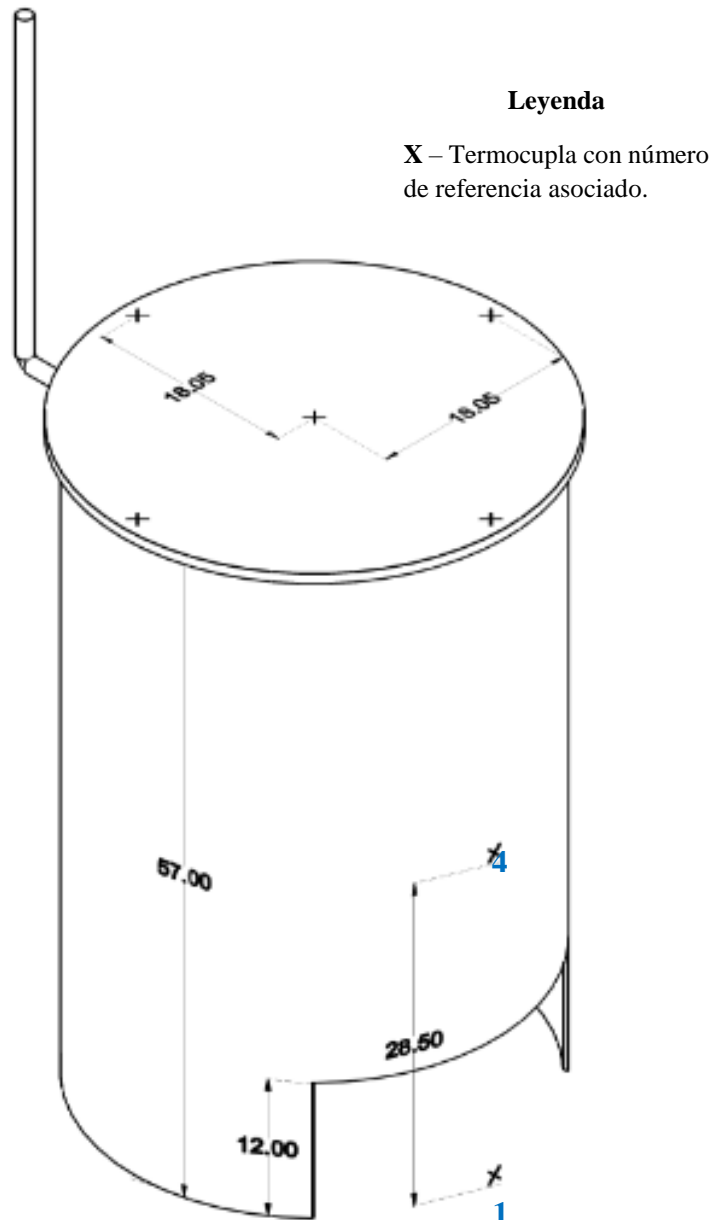
Leyenda

X – Termocupla con número de referencia asociado.

O – Ingreso de analizador de gases

Vista posterior con escala en centímetros de estufa cilíndrica de diseño propio, en base a características descritas en apartado de metodología propuesta inciso A.1 y apartado de antecedentes inciso E. Estufa cilíndrica construida a partir de reciclaje de hojalata de tanque de GLP de hierro negro, con comal de aluminio, siguiendo requerimientos de Cuadro No. 2. Las termocuplas insertadas en los símbolos “X”, fueron termocuplas tipo K Extech TP875 con un rango de medición de -50 a 538 °C. Sus coordenadas se describen en el Cuadro No.8.

Figura No. 17: Dimensiones de estufa cilíndrica vista frontal-izquierda



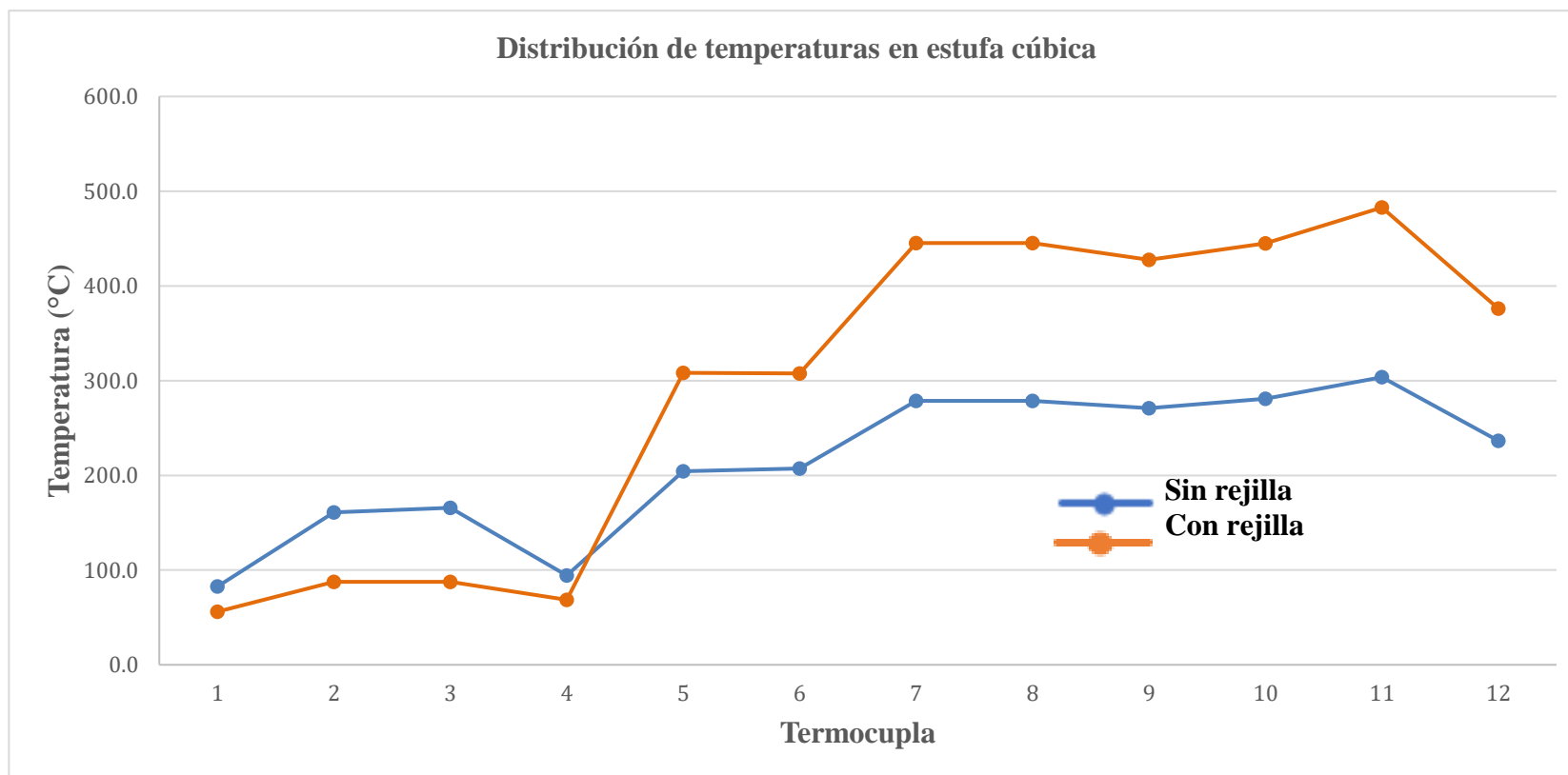
En corridas con la rejilla, el centro de esta se alinee con el centro de la estufa, a nivel del suelo. En este caso, se acopló una chimenea para escape de gases de combustión por medio de soldadura de punteo. Se colocaron los leños de la manera descrita en el apartado de metodología propuesta inciso A y apartado de antecedentes inciso D.

Figura No. 18: Posición y funcionamiento de estufa cilíndrica con rejilla



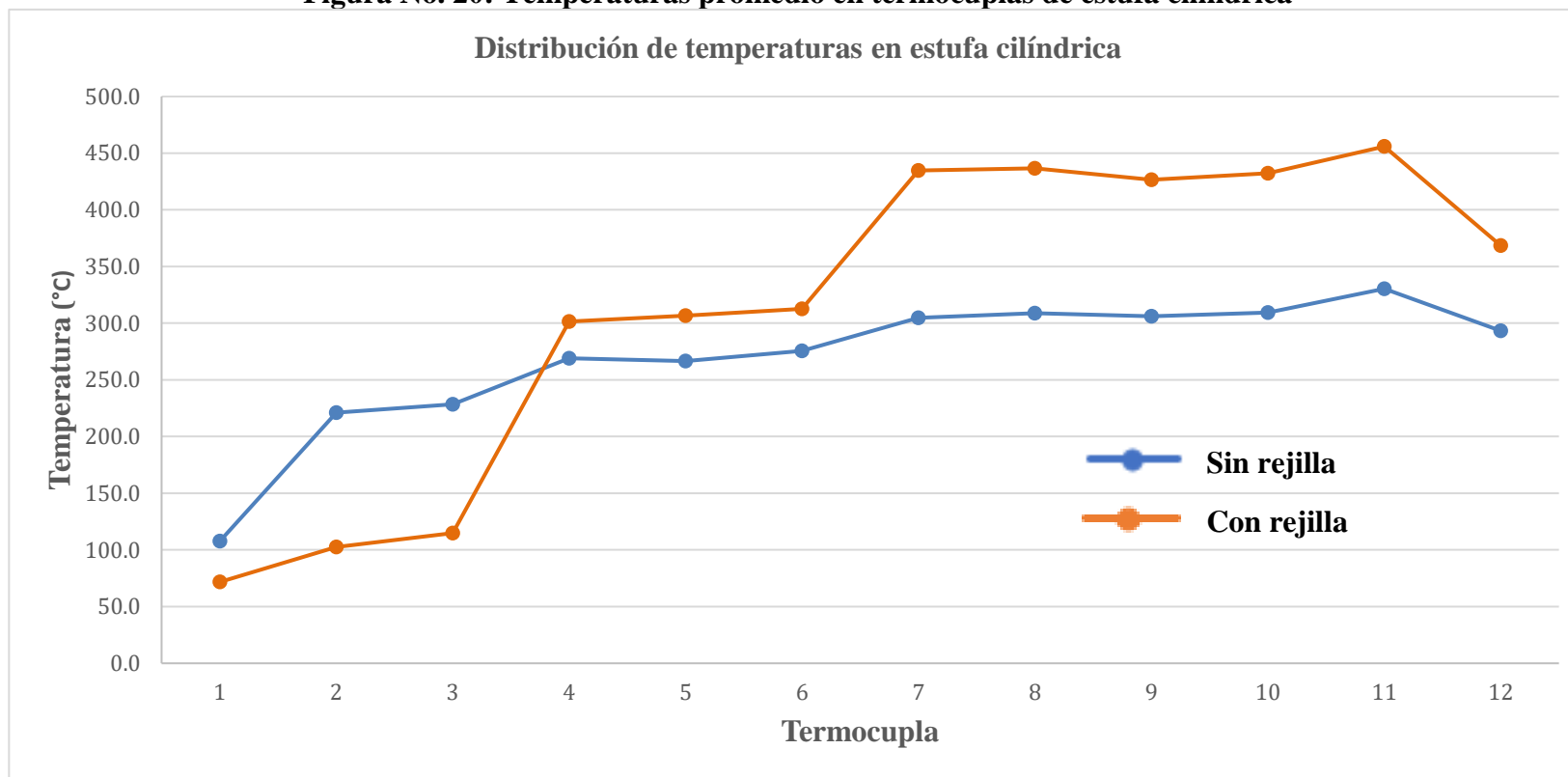
Fotografías tomadas en Laboratorio de operaciones unitarias Ingeniería Química UVG, sobre: a) Vista de planta con rejilla introducida. b) Posicionamiento de comal en sección superior. c) y d) Estufa en funcionamiento con y sin alimento a calentar.

Figura No. 19: Temperaturas promedio en termocuplas de estufa cúbica



Las temperaturas promedio alcanzadas para la estufa cúbica sin rejilla se describió con la línea azul, mientras que la que utiliza rejilla, con la naranja. Las temperaturas fueron registradas al estabilizarse en dichos valores por más de 2 minutos con las termocuplas tipo K. Las coordenadas de cada termocupla se observan en el Cuadro No.8, y de manera visual en las figuras No. 11-14. Las condiciones de operación promedio de las corridas se encuentran en los cuadros No. 11-13.

Figura No. 20: Temperaturas promedio en termocuplas de estufa cilíndrica



Las temperaturas promedio alcanzadas para la estufa cilíndrica sin rejilla se describió con la línea azul, mientras que la con rejilla, con la naranja. Al igual que en la cúbica, las temperaturas fueron registradas al estabilizarse en dichos valores por más de 2 minutos con las termocuplas tipo K. Sus coordenadas y condiciones de operación promedio también se observan en los cuadros No.8 y No. 11-13, respectivamente. Las posiciones de cada termocupla se visualizan en las figuras No. 16-17.

Cuadro No. 3: Modelos predictivos de temperatura en base a posición

Escenario	Modelo de regresión múltiple	R2 múltiple
Estufa cúbica sin rejilla	$T(x,y,z) = 0.774395103 (x) + 1.898849182 (y) + 6.848705315 (z) + 116.7891228$	0.830119393
Estufa cúbica con rejilla	$T(x,y,z) = 1.400937231 (x) + 2.554007672 (y) + 16.85668677 (z) + 55.55508772$	0.902662271
Estufa cilíndrica sin rejilla	$T(x,y,z) = 0.630470914 (x) + 1.186518929 (y) + 2.231578947 (z) + 188.9400000$	0.811907652
Estufa cilíndrica con rejilla	$T(x,y,z) = 0.401866161 (x) + 0.423822715 (y) + 5.925023084 (z) + 107.8610526$	0.979627933

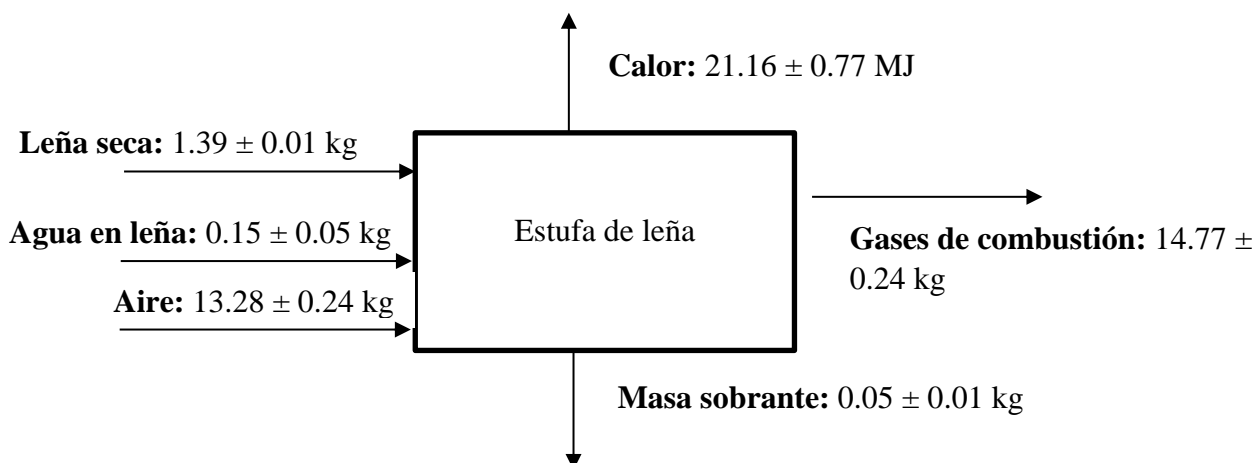
Modelos obtenidos por a través de regresión múltiple lineal con análisis de datos análisis de datos de Excel 2021, utilizando como variables dependientes las coordenadas de las termocuplas del Cuadro No. 8 del punto 1-11, y como variable dependiente las temperaturas promedio del Cuadro No. 12. Los resultados obtenidos fueron bajo las condiciones de los cuadros 11 y 13, y las estufas con dimensiones de las figuras No. 11-14 y 16-17.

Cuadro No. 4: Variación de modelos predictivos con punto experimental

Escenario	Temperatura en punto 12 predecido con modelo (± 13.2 C)	Temperatura en punto 12 real (C)	Variación (%)
Estufa cúbica sin rejilla	278.4	236.5 ± 1.4	$17.7 \pm 2.2\%$
Estufa cúbica con rejilla	410.0	376.2 ± 2.0	$9.0 \pm 2.73\%$
Estufa cilíndrica sin rejilla	307.5	293.4 ± 1.6	$4.8 \pm 2.1\%$
Estufa cilíndrica con rejilla	371.7	368.4 ± 5.2	$0.9 \pm 0.2\%$

El punto 12 no fue utilizado para la realización del modelo del Cuadro No. 4, sino únicamente para para su interpolación y comparación con el mismo. Su coordenada toma en cuenta variaciones en las tres dimensiones, con respecto a los puntos utilizados en el modelo.

Figura No. 21: Balance de masa y energía en estufas



El balance describió las entradas y salidas de masa y energía tomando en cuenta a la estufa como sistema. Los datos describen el escenario de estufa cúbica con rejilla del Cuadro No.5. La leña húmeda se utilizó como combustible y el aire como oxidante, liberando calor y gases combustión, que contienen el agua de la madera. La masa sobrante describe a la madera no combustionada al final del proceso. El aire se determinó a partir de 1.5 veces el factor de Desrosiers estequiométrico para la combustión de leña. Los gases de combustión toman en cuenta tanto los gases de efecto invernadero liberados en la combustión, como el aire en exceso no reaccionado. El diagrama aplica a todos los escenarios del Cuadro No.5, bajos las condiciones de los cuadros No. 11-13.

Cuadro No. 5: Calor utilizable y temperatura máxima asociada por escenario

Escenario		Masa sobrante promedio (%)	Eficiencia de combustión promedio (%)	Calor utilizable (MJ)	Temperatura máxima (°C)
Estufa cúbica	Sin rejilla	4.95 ± 0.73	77.9 ± 0.7	19.72 ± 1.28	303.6 ± 3.3
	Con rejilla	3.47 ± 0.30	82.1 ± 0.3	21.16 ± 0.77	482.8 ± 3.0
Estufa cilíndrica	Sin rejilla	3.69 ± 0.43	74.2 ± 0.4	19.07 ± 0.94	330.4 ± 3.4
	Con rejilla	2.15 ± 1.12	79.7 ± 1.1	20.85 ± 2.02	455.9 ± 5.3

El calor liberado por el encino quemado se describió con el calor utilizable, tomando en poder calorífico promedio como el calculado en el Cuadro No.14, y la masa sobrante y eficiencia de combustión promedio de este mismo cuadro. El cálculo de las variables se describe con los cálculos No. 1-3, en la sección de cálculo de muestra. Las temperaturas máximas descritas todas fueron las del punto 11, el centro del comal.

Cuadro No. 6: Incremento en eficiencia energética en estufas

Estufa	Eficiencia energética sin rejilla (%)	Eficiencia energética con rejilla (%)	Incremento en eficiencia energética (%)
Estufa cúbica	73.58 ± 1.17	78.91 ± 0.92	7.24 ± 1.48
Estufa cilíndrica	71.13 ± 1.09	77.78 ± 2.14	9.35 ± 2.43

La eficiencia energética se describe con el cálculo 4, utilizando los datos de los cuadros No.5 y No.14. En este, se representa la energía liberada o utilizable con base en la energía potencial del encino ingresado, tomando en cuenta pérdidas por masa no quemada y eficiencia en combustión que se presenta en el sistema debido al calor utilizable originado por la combustión de la masa. Las condiciones descritas en los cuadros anteriores, con las estufas construidas, produjeron un incremento calculado en el cálculo 5.

VIII. Discusión

El presente trabajo de investigación evaluó el efecto que una rejilla, elaborada según el diseño de una empresa privada, tiene sobre la eficiencia energética, la transferencia de calor en combustiones de leña y la eficiencia de combustión en estufas domésticas. Se diseñaron y construyeron dos estufas, una con geométrica rectangular y cilíndrica, pensando en estufas rurales sencillas comunes en Guatemala. Sus dimensiones también fueron previstas al tamaño de una rejilla prototipo de una empresa comercial y a los procedimientos de análisis del estudio. Una vez construidas, se analizó la humedad de la leña de encino, especie *Quercus Conspersa Benth*, y se realizó su combustión en las estufas. Se compararon las temperaturas alcanzadas, gases de combustión producidos, y masa de leña no quemada, al utilizar y al no utilizar la rejilla.

El análisis de las variables culminó en la determinación del impacto que la rejilla posee sobre la eficiencia de combustión y la eficiencia energética en combustión de encino en estufas domésticas. Los valores de eficiencia energética y eficiencia de combustión permitieron relacionar las variables de forma coherente y acorde con la teoría propuesta, siendo directamente proporcionales entre ellas y variables con la implementación de la rejilla y su posición en el sistema.

La rejilla prototipo comercial adquirida se observa en la Figura No. 18 colocada dentro de la estufa cilíndrica. Sus dimensiones, observadas en las figuras No. 23, de 26 x 24 x 4.5 cm se adaptan al tamaño de las estufas de leña y carbón comunes. En caso de estufas de poca capacidad, una rejilla es suficiente para el sistema. Por otro lado, estufas más grandes requieren más de una rejilla, colocándolas horizontalmente, lado a lado. El patrón de ranuras de la Figura No. 22 es el factor más importante de la rejilla. Los agujeros distribuyen el flujo de aire, pero lo suficientemente angostos para evitar que leña no quemada se deslice al espacio por debajo de la rejilla, donde no se combustionará. Por último, la rejilla utilizada fue de acero inoxidable debido a que era necesario que soportara las temperaturas de la flama creada en la combustión. El material evita corrosión y deterioro avanzado, prolongando la vida de la rejilla

El diseño y construcción de las estufas se basó en estufas rudimentarias que comúnmente se utilizan en el país. Dichas estufas tienden a tener un pobre diseño, donde se pierde mucho calor generado hacia el ambiente. Esto se debe principalmente al escaso conocimiento sobre el funcionamiento de todas las partes, como es el caso de la chimenea. Esta no se presenta comúnmente en las construcciones hechas con ladrillos, debido a la falta de conocimiento sobre el papel fundamental que cumplen para mejorar la funcionalidad del sistema. A pesar de estos problemas, las estufas de leña son populares debido a que su construcción es de bajo costo, un factor muy importante en las familias y negocios con escasos recursos. Los materiales necesarios para estas estufas son muy básicos, por lo que pueden reciclarse materiales de construcción no utilizado y hojalatería

sin uso. Un segundo factor que inclina a los usuarios a este tipo de estufas es que son tan sencillas que no requieren conocimientos de diseño ni de construcción, por lo que no requiere la contratación de ninguna clase de ayuda técnica. La Figura No. 26 muestra esta clase de equipos instalados en negocios de Guatemala.

La Figura No. 1 muestra diseños de estufas con diseños más eficientes que aumentan la eficiencia energética. A pesar de su efectividad, su uso no se extendió debido a al costo y conocimiento que se requiere para construir las y distribuir las. La mayor parte de las que actualmente están en uso fueron instaladas por subsidios de gobierno o donaciones de empresas no lucrativas. El modelo de distribución de estas no es sostenible, y por estos factores las estufas más comunes siguen siendo las creadas por los usuarios, con diseños con menor eficiencia. Las rejillas, por otro lado, son aplicables a estufas ya instaladas y representan un menor costo, accesible a la población.

Las estufas construidas cumplen con los requisitos identificados en el Cuadro No.2 en base a las estufas actualmente comercializadas en el país identificados por Alianza Global para Estufas Limpias y por las estufas comúnmente utilizadas por los pobladores el país en áreas rurales.

Los diseños tridimensionales de la estufa con configuración cuadrada se observan en las figuras No. 11-14. Las dimensiones finales fueron de 45.72 cm x 52.07 cm x 29.21cm. Se realizaron agujeros que se desvían del diseño práctico debido a la necesidad de inserción de termocuplas para la medición de temperatura. El diámetro de los hoyos de 1/8 de pulgada no se consideró como una fuente de error significativa en el estudio. Las termocuplas fueron insertadas en 12 diferentes puntos, indicados por la letra "X", y se encuentran a diferentes alturas para analizar la distribución de temperaturas en toda la geometría, especialmente en el comal. El ingreso de aire se da por el lado frontal, mientras que la expulsión de aire se da principalmente por el lado posterior superior, donde se colocó la sonda de análisis de gases de combustión, en la posición indicada por el símbolo "O". Los ladrillos utilizados son del tipo refractario TCG-25 para resistir el calor generado, aunque en la práctica se utilizan materiales de construcción sobrantes como ladrillos comunes y blocks de construcción. No se utilizó ningún cemento o pasta refractaria para la unión de los ladrillos, aunque aumente las pérdidas de calor hacia el ambiente, debido a que usualmente no son implementados debido al gran costo que representan. En la Figura No. 15, se observan fotos de la estufa en funcionamiento, con el sistema de análisis de temperatura y combustión.

El equipo cilíndrico, observado en las figuras No. 16 y 17, posee un diámetro interior de 36.1 cm y exterior de 36.6 cm. La altura alcanza los 57 cm tomando en cuenta el comal posicionado por encima del mismo. La distribución de las termocuplas en este sistema fue análoga al de la estufa rectangular, con 12 puntos a diferentes niveles de la geometría y del comal. El aire ingresa por la parte frontal inferior y es expulsado principalmente por la tubería de escape implementada en la parte superior posterior. En esta última, se realizó una apertura de ¼ de pulgada para el ingreso de la sonda de análisis de gases de combustión. Se suele reutilizar hojalata para la construcción de estufas de esta geometría debido a lo costoso que es el procedimiento de rolar una lámina en la forma de un cilindro. En este caso, se recortó un tanque de gas propano, hecho de lámina de acero

rolada de 5 mm de espesor, obtenido de una hojalatería. La estufa en funcionamiento, junto con la rejilla dentro de ella, se observan en la Figura No. 18.

En cada sistema construido, se alineó el centro de la rejilla con el centro del área transversal al nivel más bajo posible. En la estufa cilíndrica, dicho nivel fue a nivel del suelo; y en la rectangular, a 6.35cm del mismo debido al ancho de la capa inferior de ladrillos. Las dimensiones de las estufas fueron hechas para que exista poca holgura entre la rejilla y las paredes interiores, aprovechando así de mejor manera la energía. Los comales de aluminio utilizados poseen un diámetro que cubren el área transversal interior de cada configuración. Para la ubicación de la biomasa se tomó en cuenta el centroide de la base de cada configuración, al ubicar la rejilla, la biomasa aumenta de altura. Sin embargo, dada la altura de las configuraciones, superior a 60 cm, la altura ocasionada por la rejilla se consideró despreciable al momento de realizar la medición de temperaturas en la parte superior de las estufas.

Las figuras No. 19 y 20 describen las temperaturas alcanzadas en varios puntos de las estufas, con y sin el uso de una rejilla. Las coordenadas de cada punto y las temperaturas promedio descritas en las gráficas se pueden encontrar en los cuadros 8 y 12 de la sección de anexos, respectivamente. Una mejor visualización de los puntos también se puede lograr al observar las figuras 11-14 y 16-17.

A partir de la Figura No. 19 enfocada en la estufa cúbica, se puede inferir que sin importar si se utilizó o no la rejilla, existe una tendencia de un aumento de temperaturas promedio al desplazarse principalmente en el eje vertical hacia la parte superior de la estufa. Las termocuplas posicionadas a un mismo nivel vertical registraron temperaturas similares exceptuando algunos puntos donde se necesita de más análisis que se discutirán a continuación. Los puntos inferiores marcaron las menores temperaturas en general, pero el punto 1 registró una menor temperatura promedio que los demás debido a que se situó en la entrada donde ingresa el flujo de aire frío. El punto 4, situado a una altura media junto con los puntos 5 y 6, también se posicionó en la entrada de aire, por lo que refleja una temperatura promedio mucho menor a los puntos en su mismo nivel.

Se debe de considerar que los puntos superiores, ubicados en el comal, registraron las temperaturas promedio más altas, debido principalmente al cambio de material. En el tiempo dado, el comal de aluminio alcanzó mayores temperaturas debido a una capacidad calorífica menor que los ladrillos refractarios de la estufa. En el caso del punto 11, ubicado en el centro del comal, registró temperaturas promedio un poco superiores a las de los demás puntos del comal debido a la alineación central del combustible y los patrones de flujo aire creado entorno a dicha leña. Por último, el punto 12 no puede compararse con otro punto que es el único a ese nivel vertical, pero sigue la tendencia debido a que registró una temperatura promedio entre los puntos a media altura y los puntos superiores.

En el sistema se pudo evidenciar, desde la parte práctica, el principio de Le Chatelier donde se identificaron los entrantes y salientes del sistema. La reacción que se presenta ante el proceso de combustión son los productos en forma de CO₂, vapor de agua y calor. Con ello se entiende que el aumento de dichos productos aumenta la reacción en los reactivos y, de igual forma, el aumento de los reactivos produce un aumento en los productos. Sin embargo, dentro de los productos, al aumentar uno de ellos, para mantener el equilibrio del sistema, los otros deben disminuir, como es el caso del vapor. Al

presentarse un alto nivel de humedad en la combustión, el producto saliente vapor aumenta, disminuyendo la salida de calor y CO₂ del sistema. Finalmente, esto se resume en que, al presentarse un alto nivel de humedad en la combustión, la eficiencia energética en forma de calor disminuye, siendo provocado por una ineficiente eficiencia de combustión por presencia de humedad.

Por otro lado, al comparar los escenarios de utilizar y no utilizar una rejilla se observan cambios importantes en la distribución dependiendo del nivel y posición de los puntos analizados. En caso de los puntos inferiores, puntos 1 a 3, el uso de la rejilla provocó una disminución en las temperaturas promedio. Un efecto contrario ocurrió en los puntos medios y en los del comal, donde las temperaturas promedio alcanzadas incrementaron con el uso de la rejilla. El dispositivo causó estos efectos debido a desplazamiento de fuente de calor y a cambios en la distribución del flujo de aire.

La fuente de calor del sistema fue la llama producida al quemar la leña. La posición de la llama fue desplazada debido a que se posicionó la madera en la rejilla en lugar de la base inferior de ladrillos. El efecto de esto es entonces una reducción de la transferencia de calor hacía los puntos inferiores, que anteriormente estaban a mismo nivel que la llama.

Las ranuras modificaron el flujo de aire, permitiendo su ingreso por debajo de la leña. El ingreso por la parte inferior permitió que el aire se distribuyera de una manera más homogénea, creando una combustión más estable a través de toda la configuración. Otro factor importante, en el cual influye las ranuras, es el aumento de la convección natural. Un ingreso uniforme de aire frío por debajo de la llama facilita el movimiento del aire caliente, formado alrededor de la llama, y los gases de combustión hacía la parte superior. Una mayor velocidad de movimiento continua equivale a un incremento en la transferencia de calor por convección.

Al no utilizar la rejilla, la leña se encuentra en la base de ladrillos en una posición más alejada del comal y sin acceso de flujo de aire a los leños inferiores y posteriores de la geometría. La rejilla propició la transferencia de calor hacía la sección superior de la estructura, incrementando las temperaturas promedio de los puntos superiores y disminuyendo las de los puntos inferiores.

La Figura No. 20, que describe a la estufa cilíndrica, permite inferir que el comportamiento de las distribuciones de temperatura y los efectos que ocasionó el uso de la rejilla sobre ellas sigue la misma tendencia en ambas estufas. Las temperaturas promedio alcanzadas en esta estufa, al igual que su incremento debido al uso de la rejilla, es menor que en el caso de la estufa cúbica. Se debe principalmente a que las dimensiones de la cilíndrica son mayores, por lo que la distancia entre puntos y la generación de calor es mayor, reduciendo la velocidad de transferencia de calor. También se debe de considerar que, en este caso, el punto 4 no registró una temperatura menor que los demás puntos a misma posición vertical debido a que no se encuentra en una entrada de aire.

Utilizando los mismos datos de temperatura promedio y coordenadas de las termocuplas, de los cuadros No. 8 y 12, se calcularon modelos predictivos para la estimación de la temperatura en un punto específico en base a sus coordenadas tridimensionales para cada estufa, con y sin rejilla. Se determinaron modelos de regresión lineal múltiples tomando como variables independientes las 3 dimensiones “x”, “y” y “z”,

y como variable dependiente la temperatura. Los modelos, junto con su coeficiente de determinación se observan en el Cuadro No. 3.

Al comparar los coeficientes asociados a cada dimensión en los modelos, se determinó que, sin importar el escenario, todas las variables son directamente proporcionales, es decir, un aumento en la variable resulta en un aumento en la temperatura. Los coeficientes de la variable vertical “z” son mucho mayores a las otras dos en cada modelo, demostrando que dicha dimensión posee un mayor efecto sobre la temperatura. La información concuerda con el análisis descrito anteriormente de las figuras No. 19 y 20, donde los puntos a misma altura registraban temperaturas promedio similares.

La rejilla demostró tener la misma tendencia en ambas estufas. Al comparar los escenarios, se observa que, en los modelos con rejilla, los coeficientes asociados a la variable “z” son más altos, mientras que los interceptos son más bajos. Se puede inferir que, en dichos modelos, la temperatura depende más de la posición debido a un incremento en el impacto de la transferencia de calor por medio de coeficientes mezclados de conducción y convección, que por un valor constante como podría ser la temperatura de la llama o del ambiente. Por otro lado, es importante comparar ambas estufas, donde en caso de la estufa cúbica, los coeficientes de variables son mayores que sus contrapartes en la estufa cilíndrica. Dicha información vuelve a confirmar los hallazgos de las figuras No. 19 y 20, donde la estufa cúbica alcanza mayores temperaturas promedio que en la estufa cilíndrica, debido a la diferencia en dimensiones y capacidad calorífica.

Los coeficientes de determinación más bajos fueron los de los modelos que predicen los escenarios sin rejillas, siendo el más bajo el de la estufa cilíndrica donde el modelo explica un 81.19% de la variable real. Por otro lado, el modelo más preciso es el de la estufa cilíndrica con rejilla donde se explica un 97.96% de la variable real. El modelo se basó en análisis de las termocuplas 1-11, y se utilizó el punto 12 para confirmar la variación de la predicción contra un dato experimental real, descrito en el Cuadro No. 4. La variación más baja fue el escenario de cilíndrico con rejilla con tan solo 0.9% de variación respecto al valor experimental. Por otro lado, la mayor variación fue de 17.7% para la estufa cúbica sin rejilla. Se puede observar que los modelos con rejilla fueron más exactos que aquellos sin rejillas, lo cual es una ventaja debido a que podrían ser aplicados con mayor facilidad en estufas que si implementen el dispositivo. También se determinó que los modelos de la estufa cilíndrica fueron más exactos que los de la estufa cúbica.

A pesar de estas discrepancias los valores obtenidos, tomando en cuenta el campo de aplicación, son aceptables para describir la temperatura en función de una línea recta afectada por dichas variables. Los modelos predictivos podrían utilizarse para la predicción de temperatura en estufas de diseño y dimensiones similares a las estudiadas.

Una comparación del estado general de la combustión se comparó en el cuadro 5, con y sin rejilla. En la primera columna, se describió el porcentaje de masa sobrante de madera después de la combustión. El porcentaje se desea que sea lo más pequeño posible, para asegurar que la mayor parte de la madera se esté quemando por completo para aprovechar su energía. La combustión de toda la masa se considera imposible en la práctica debido a la producción de ceniza a partir de la madera, la cuál es muy difícil de combustionar dentro del equipo. En ambas estufas, el uso de la rejilla produjo un efecto positivo, disminuyendo la masa sobrante promedio. En la estufa cúbica la disminución por

utilizar la rejilla fue desde 4.95 ± 0.73 a 3.47 ± 0.3 , alrededor de un 1.48%. En la cilíndrica, fue alrededor de un 1.54%, bajando desde $3.69\% \pm 0.43\%$ a $2.15\% \pm 1.12\%$. Dicho efecto en ambas estufas muestra que la rejilla permitió un flujo de aire que extendió la flama de la madera quemándose de manera más homogénea, alcanzando más masa.

El efecto positivo de la implementación se debe a que la rejilla mejora el flujo de aire en la totalidad de la biomasa (leña), el aire frío ingresa por la parte inferior y alimenta la combustión. De igual forma, se infirió que el diseño de las ranuras de la rejilla fue apropiado, debido a que no permitió que partes de la madera quemada, de menor tamaño, se deslizarán por debajo de la rejilla, donde ya no hubieran alcanzado llamas para combustionarse. El resultado final de la rejilla en esta variable es que se logró aprovechar mayor porcentaje de la masa ingresada, por ende, aprovechar más de la energía ingresada, disminuyendo las pérdidas energéticas en madera no quemada.

En este sentido, para verificar la eficiencia de la combustión, el análisis de gases fue determinante, a partir de este se pudo evidenciar cuales componentes estaban contenidos en la expulsión de gases con el fin de medir si la biomasa fue combustionada en su totalidad o si, por el contrario, los gases expulsados contenían otros componentes diferentes al CO₂, lo que indicaría una falta de eficiencia en la combustión. De este modo, la siguiente columna permite comparar la eficiencia de combustión promedio, y el efecto que tuvo la rejilla sobre ella. La eficiencia de combustión describió la relación de la producción de CO₂, que se encuentra en el Cuadro No. 10, en comparación a la producción de monóxido de carbono. Se desea que la eficiencia sea lo más alta posible, debido a un valor mayor representa una liberación de calor mayor gracias a combustiones completas que liberan CO₂. Por otro lado, valores menores representan una mayor proporción de combustiones incompletas que liberan menos calor.

La estufa cúbica, al utilizar la rejilla, aumentó su eficiencia de combustión desde un $77.9\% \pm 0.7\%$ a $82.1\% \pm 0.3\%$, es decir un 4.2%. En la cilíndrica el efecto fue el mismo, donde se aumentó 5.5%, desde $74.2\% \pm 0.4\%$ a $79.7\% \pm 1.1\%$. Nuevamente se comprobó que la rejilla, y los cambios de patrones de flujo de aire que ocasiona, tuvo un impacto positivo en ambas estufas. En este caso, el flujo uniforme y homogéneo, proporcionó del aire en exceso necesario para asegurar la producción de más combustiones completas, disminuyendo las incompletas. También se debe considerar que no permitió el ingreso de una cantidad de aire desmesurado, debido a que, en ese caso la cantidad de aire en exceso provocaría una disminución en la eficiencia debido a pérdida de calor por aire en exceso, como indica la Figura No. 2. En este sentido, al tener un aumento de eficiencia de 4.2% o más, se puede evidenciar una disminución de cantidad de leños que deben emplearse para cocinar un mismo elemento, en cada una de las combustiones se tiene un ahorro de 0.126 leños, lo que a su vez representa en un aproximado de 8 combustiones, un ahorro de 1 leño. En este sentido, si se expone en términos de cantidad al realizar las mediciones se emplearon 1.550 kg de biomasa, esto con el fin de alcanzar las temperaturas estimadas de cocción. Por su parte con el uso de la rejilla la cantidad de biomasa disminuye a 1.355 kg alcanzando los mismos niveles de temperatura.

Con estos dos parámetros, masa sobrante y eficiencia de combustión promedio, se relacionó la eficiencia energética y eficiencia de combustión al determinar el calor utilizable en cada escenario. En este sentido, se trata de un valor que describe el calor

liberado o utilizable por el usuario al quemar la leña. Se calculó a partir de la ecuación No. 11 y el cálculo 3, junto con el poder calorífico promedio del encino en las condiciones analizadas del Cuadro No. 14 y cálculo 2. El valor se concentra en las pérdidas energéticas por el combustible no quemado y por la eficiencia con la que dicho combustible es quemado. El uso de la rejilla en esta variable, como era de esperarse debido a su efecto en sus variables base, resultó aumentando el calor utilizable en cada estufa. En caso de la cúbica, aumentó en 1.44 MJ, desde 19.72 MJ a 21.16 MJ. En la cilíndrica se dio un efecto de similar magnitud aumentando 1.78 MJ, desde 19.07 MJ a 20.85 MJ.

Las temperaturas máximas alcanzadas, ubicadas en el mismo cuadro, describen de manera práctica y más tangible el efecto de la rejilla en las variables anteriores. La disminución de masa sobrante promedio, el aumento de eficiencia de combustión y el incremento de calor utilizable culminó en un incremento en la temperatura máxima del sistema, ubicada en el centro del comal. La estufa cúbica incrementó su temperatura en 179.2 °C, desde un promedio de 303.6 °C a 482.8 °C. De igual manera ocurrió en la cilíndrica, donde aumentó 125.5 °C, desde 330.4 °C a 455.9 °C. Se trata de una variable de suma importancia para los usuarios debido a que, gracias a este incremento, el calor proporcionado al alimento que estén cocinando, reducirá el tiempo necesario para la producción o cocción del producto.

La relación entre el calor utilizable del cuadro 5, y la energía total almacenada en el combustible, se describe con la eficiencia energética. La eficiencia energética, con y sin la rejilla se observa en el cuadro 6. Debido a que esta relación se basa en el calor liberado y utilizable por el combustible, el uso de la rejilla incrementó la eficiencia energética con respecto a al escenario sin ella en ambas estufas. El incremento en eficiencia energética al utilizar el dispositivo fue de $7.24\% \pm 1.48\%$ para la estufa cúbica, y $9.35\% \pm 2.43\%$ para la cilíndrica. En otros términos, al utilizar la rejilla, los usuarios aprovechan y utilizan más energía, a pesar de usar la misma cantidad de combustible. También se puede considerar desde un punto de vista más conservativo, donde los usuarios necesitan de menos madera, para lograr las actividades que actualmente realizan.

Los resultados analizados a través de todo el estudio indicaron que el uso de la rejilla resulta en un incremento y homogenización de los patrones de flujo de aire en cada configuración, resultando en mejores modelos de transferencia de calor. Los beneficios de su uso fueron los siguientes: reducción de masa sobrante, es decir, mayor combustión de toda la masa; incremento en eficiencia de combustión, aumentando la energía liberada con mayor proporción de combustiones completas; incremento en el calor utilizable, y a su vez, en la eficiencia energética, resultando en un menor requerimiento de combustible, o bien, mayor obtención de energía por cantidad de combustible utilizado; y finalmente, mayores temperaturas promedio en la superficie del comal, resultando en menor tiempo para el calentamiento o producción de alimentos.

En el estudio se realizaron algunos procedimientos para asegurar que la realización de algunos supuestos no afectase el análisis realizado. El primero de ellos fue respecto al combustible utilizado. La humedad del encino fue analizada antes de cada corrida, realizando cortes a transversales y longitudinales para analizar todas las partes de los leños. Las humedades registradas se observan en el cuadro 8. En el cuadro 11, se determinaron las humedades promedio por cada escenario, y una tomando en cuenta todos los escenarios

como uno solo. La desviación de cada escenario, y el diagrama de caja y bigotes de la Figura No. 24, confirmaron que la variación de humedad entre todas las corridas se puede considerar insignificante, permitiendo utilizar el valor general del cuadro 11 en el cálculo 2, para la determinación del poder calorífico promedio ubicado en el cuadro 14. Dicho poder calorífico fue utilizado en las ecuaciones 11 y 12 para el cálculo del calor utilizable y eficiencia energética.

En dichas ecuaciones y resultados también fue utilizado un valor promedio de masa inicial de encino. Los valores promedio y de desviación del Cuadro No. 11, junto con su propio diagrama de caja y bigotes de la Figura No. 25, también permitieron suponer que la variación del peso entre las corridas no tiene efecto en los resultados.

En la recopilación y análisis de las distribuciones de temperatura también se realizaron supuestos para la determinación de temperaturas y creación de los modelos predictivos. Siguiendo los comportamientos de transferencia de calor en estufas y comportamiento de la llama descritos por Tillman en sección A, se modeló al sistema como una transferencia de calor en 3 dimensiones abierta y estacionaria. Se asumió que la transferencia de calor era independiente del tiempo debido a que la mayor parte de la transferencia de calor seguía un comportamiento estable similar al de la Figura No. 4, con cierto desplazamiento debido al tiempo que se necesita para transferir el calor desde la llama al sistema. Tomando en cuenta la dispersión de la llama en la madera, y la relación de aire/combustible esperada, se asumió que la transferencia se mantenía en la parte superior de la campana la mayor parte del tiempo, exceptuando el inicio y el final de la combustión. Tomando en cuenta estos factores, se apiló siempre de la misma forma la madera utilizada, siguiendo el procedimiento descrito en metodología, descrito por Ross en sección D de antecedentes. Se registraron las temperaturas al observar una estabilidad en las mediciones por más de 2 minutos. Dicho estado se obtuvo en todas las corridas alrededor de 8 minutos después de iniciar la llama.

IX. Conclusiones

1. Se diseñaron y construyeron dos estufas para combustión de encino con diferente geometría, una cúbica y una cilíndrica, cumpliendo los requerimientos con base en las estufas comercializadas en el país, y las comúnmente utilizadas por la población. La estufa cúbica a base de ladrillo refractario TCG-25 se construyó con dimensiones finales de 45.72 x 52.07 x 29.21cm, mientras que la cilíndrica de acero rolado se reciclo de un tanque de propano con dimensiones finales de 57 cm de alto y 36,6 cm de diámetro exterior, con 5 mm de espesor.
2. La implementación de la rejilla en la estufa cúbica modificó el modelo de regresión lineal múltiple de $T(x,y,z) = 0.774395103(x) + 1.898849182(y) + 6.848705315(z) + 116.7891228$ para el escenario sin rejilla, a $T(x,y,z) = 1.400937231(x) + 2.554007672(y) + 16.85668677(z) + 55.55508772$ para el escenario con rejilla. El coeficiente asociado a cada dimensión, que representa el impacto de cada una en la temperatura, aumentó al utilizar la rejilla. Aumentó principalmente el coeficiente de la dimensión de altura representado por la variable “z”.
3. La implementación de la rejilla en la estufa cilíndrica modificó el modelo de regresión lineal múltiple de $T(x,y,z) = 0.630470914 (x) + 1.186518929 (y) + 2.231578947 (z) + 188.9400000$ para el escenario sin rejilla, $T(x,y,z) = 0.401866161 (x) + 0.423822715 (y) + 5.925023084 (z) + 107.8610526$ para el escenario con rejilla. Aumentó el coeficiente de la dimensión de altura representado por la variable “z”, incrementando la dependencia de la temperatura a dicha dimensión.
4. En la determinación de los modelos, el coeficiente de determinación (R_2) máximo determinado fue de 0.8301 para el modelo de estufa cúbica sin rejilla, y el mínimo de 0.9796 para la estufa cilíndrica con rejilla. Los modelos predijeron la temperatura en el punto 12 y al compararlos con el valor experimental, la variación máxima fue nuevamente en la estufa cúbica sin rejilla con un valor de $17.7 \pm 2.2\%$, y mínima en la estufa cilíndrica con rejilla con un valor de $0.9 \pm 0.2\%$.
5. En las estufas construidas y bajo las condiciones descritas, la temperatura máxima alcanzada en la superficie del sistema en todos los escenarios fue en la posición central del comal e incrementó al utilizar la rejilla. La temperatura máxima aumentó desde $303.6 \pm 3.3^\circ\text{C}$ a $482.8 \pm 3.0^\circ\text{C}$ al utilizar la rejilla en la estufa cúbica, y desde $330.4 \pm 3.4^\circ\text{C}$ a $455.9 \pm 5.3^\circ\text{C}$ en la cilíndrica.
6. La implementación de la rejilla en las estufas del estudio, durante las condiciones de corrida, produjo un incremento en la eficiencia energética, basado en los

incrementos de eficiencia de combustión y de calor utilizable, de un $7.24\% \pm 1.48\%$ para la estufa cúbica y $9.35\% \pm 2.43\%$ para la estufa cilíndrica.

7. La presencia de la rejilla aumenta la eficiencia de la combustión al mejorar las condiciones de oxígeno entrante al sistema y distribución de la energía, obteniendo una mejora en la eficiencia energética del sistema en un $7.24\% \pm 1.48\%$ para la estufa cúbica, y $9.35\% \pm 2.43\%$ para la cilíndrica

X. Recomendaciones

1. Según los resultados observados, se aconseja a otros investigadores, y al sector privado, a realizar análisis técnicos y económicos sobre la posible comercialización de la rejilla. La distribución de este producto tiene la posibilidad de brindar beneficios a los usuarios de estufas para leña, permitiéndoles ahorros en el presupuesto para leña, y a su vez, brindar ingresos a al sector privado en forma de ventas del producto. Significaría una situación donde tanto empresarios, como usuarios, lograrían obtener beneficios que actualmente no existen en el mercado. Los análisis deben de contemplar estudios de mercado, clientes, logística, costo, precio de venta y técnicas de producción.
2. En el caso de la presente investigación se tomaron datos con condiciones ambientales normales, por tal motivo la realización de corridas fue secuencial y en un tiempo de tres semanas. De esta forma, se consideró que las condiciones ambientales no representaron una variable influyente en el análisis de los resultados. Sin embargo, dicho factor fue determinante para la limitación de ejecución de número de corridas. Para aumentar el número de corridas y ampliación de datos se recomienda la realizar las mediciones controlando la entrada y salida de flujo másico de aire. Se recomienda específicamente un modelo Computacional Fluid Dynamics (CFD) para la simulación de los efectos de la rejilla en los patrones de aire, lo cual permitirá la determinación de modelos de transferencia de calor más descriptivos.
3. Dadas las mediciones realizadas en los puntos altos de las estufas, si se tiene una disminución de altura en la construcción y diseño de estas, es necesario evaluar la necesidad de aplicar mediciones con una base sólida para la fase de no rejilla. Esto se deberá realizar con el fin de identificar adecuadamente las temperaturas que genera la combustión de la biomasa sin alterar la diferencia de altura en la llama en las diferentes configuraciones con y sin rejilla.

XI. Bibliografía

- Alianza Global para Estufas Limpias. (2013). *Análisis del Mercado de Estufas y Combustibles de Guatemala*. Universidad Politécnica de Madrid
- Bernilla, J., Moreno, A. y Cabezudo, C. (2014). Influencia del estado de la rejilla y la cámara de combustión en el desempeño de las cocinas mejoradas modelos Inkawasi. Proyecto Energía, Desarrollo y Vida - EnDev/GIZ. Lima, Perú.
- Carretero, A. y García, J. (2012). *Gestión de la eficiencia energética: Cálculo del consumo, indicadores y mejora*. AENOR ediciones. España.
- Çengel, Y. A., & Ghajar, A. J. (2011). *Transferencia de calor y masa: fundamentos y aplicaciones, cuarta edición*. McGraw-Hill Interamericana.
- Cleary, K. and Palmer, K. (2020). *Energy Efficiency 101*. Resources for the future.
- De Andrade, M. G., da Cruz Siqueira, J. A., Rosa, H. A., Chaves, L. I., Nogueira, C. E. C., de Souza, S. N. M., y Santos, R. F. (2013). Diesel engine performance and emission analysis using soybean biodiesel. *African Journal of Biotechnology*, 12(19).
- Desrosiers, R. (1979). Thermodynamics of gas-char reactions. *A survey of biomass gasification*.
- Díaz, R., Berrueta, V. y Masera, O. (2011). Estufas de leña. Red Mexicana de Bioenergía, A.C. Primera edición.
- DIGEBOS. (2008) . *Revisión y Actualización del Diagnóstico del Problema de Leña en Guatemala. Proyecto Bosques de Uso Múltiple para el Abastecimiento de Leña y otros Productos*. Convenio08-92 MAGA/CATIE.
- Figuroa, C. G. S., Fernández-Plata, R., Rivera-de la Garza, M. S., de los Ángeles Mora-Pizano, M., Martínez-Briseño, D., Franco-Marina, F., & Pérez-Padilla, J. R. (2012). *Humo de leña como factor de riesgo de cáncer pulmonar en población hospitalizada no fumadora*. NCT Neumología y Cirugía de Tórax, 71(4), 325-332.
- Francescato, V., Antonini, E., y Zuccoli, Luca. (2008). “Wood Fuels Handbook: Production, Quality Requirements and Trading”. Italian Agriforestry Energy Association.
- Glassman, I., Yetter, R. A., & Glumac, N. G. (2014). *Combustion*. Academic press.
- González, A. (2006). *El concepto “energía” en la enseñanza de las ciencias*. Revista iberoamericana de Educación. ISSN: 1681-563.

Hellwig, M. (1986). Participación en el desarrollo del capítulo 6: “*Descripción del Proceso de Combustión de Leña de Uso Residencial*”, p. 6-3 a 6-5.

Jiménez, K. (2016). *Análisis de la eficiencia de la combustión de biogás en un quemador boliviano*. Revista de Investigación e Innovación Agropecuaria y de Recursos Naturales. Vol 3.

Kasap, S. (2001). *Thermoelectric effects in metals: thermocouples*. Canada: Department of Electrical Engineering University of Saskatchewan.

Kirk, R., Smith, John, P., McCracken., Lisa, M., Thompson., Rufus, Edwards., Kyra, Naumoff, Shields., Eduardo, Canuz., Nigel, Bruce. (2010). *Personal child and mother carbon monoxide exposures and kitchen levels: Methods and results from a randomized trial of woodfired chimney cookstoves in Guatemala (RESPIRE)*. Journal of Exposure Science and Environmental Epidemiology, 20(5):406-416. doi: 10.1038/JES.2009.30

Lattera, P., Jobbágy, E. y Paruelo, J. (2011). *Valoración de servicios ecosistémicos. Conceptos, herramientas y aplicaciones para el ordenamiento territorial*. Ediciones Inta. Buenos Aires, Argentina.

Lisa, M., Thompson., Nigel, Bruce., Brenda, Eskenazi., Anaite, Diaz., Daniel, Pope., Kirk, R., Smith. (2011). *Impact of reduced maternal exposures to wood smoke from an introduced chimney stove on newborn birth weight in rural Guatemala*. Environmental Health Perspectives, 119(10):1489-1494. doi: 10.1289/EHP.1002928

McCabe, W., Smith, J., y Harriot, P. (2005). *Operaciones Unitarias en Ingeniería Química* (7ma Ed ed.).

Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales. (2018). *Estrategia Nacional para el Abordaje de la Deforestación y Degradación de los Bosques en Guatemala*, documento preliminar.

Modest, M. F. (2003). *Fundamentals of thermal radiation. Radiative heat transfer*.

Organización Latinoamericana De Energía, OLADE. (1982) Manual de Estadísticas Energéticas. Quito, Ecuador.

Pardo, Q. y López, S. (). *El principio de Le Chatelier a través de la historia y su formulación didáctica en la enseñanza del equilibrio químico*. Enseñanza de las ciencias. Vol 14. Núm 3.

Ross, R. J. (2010). Wood handbook: wood as an engineering material. *USDA Forest Service, Forest Products Laboratory, General Technical Report FPL-GTR-190, 2010: 509 p. 1 v., 190.*

Secretaría de Energía, República Argentina. 2003. *Conceptos sobre ENERGÍA*. Argentina.

Situación Epidemiológica de las Enfermedades Crónicas No Transmisibles en Guatemala. Programa Nacional de Enfermedades Crónicas No Transmisibles,

Ministerio de Salud Pública y Asistencia Social, Organización Panamericana de la Salud, Guatemala Agosto 2009.

Smith, J. M., Van Ness, H. C., y Abbott, M. M (2007). *Introducción a la termodinámica en ingeniería química*. McGraw-Hill.

Suslick, K. S. (2001). Encyclopedia of physical science and technology. *Sonoluminescence and Sonochemistry Massachusetts: Elsevier Science Ltd*, 1-20.

Tillman, D. A. (2012). *Wood Combustion: Principle, processes, and economics*. Elsevier.

Vallero, D. (2019). *Air pollution calculations: Quantifying pollutant formation, transport, transformation, fate and risks*. Elsevier.

Vitcas. (2023). Ladrillos refractarios. <https://www.vitcas.es/ladrillos-refractarios#:~:text=Un%20ladrillo%20refractario%20es%20un,conductividad%20t%C3%A9rmica%20para%20ahorrar%20energ%C3%ADa>.

Wade, L. G. (2017). *Química orgánica. Vol. 1.* Pearson Educación.

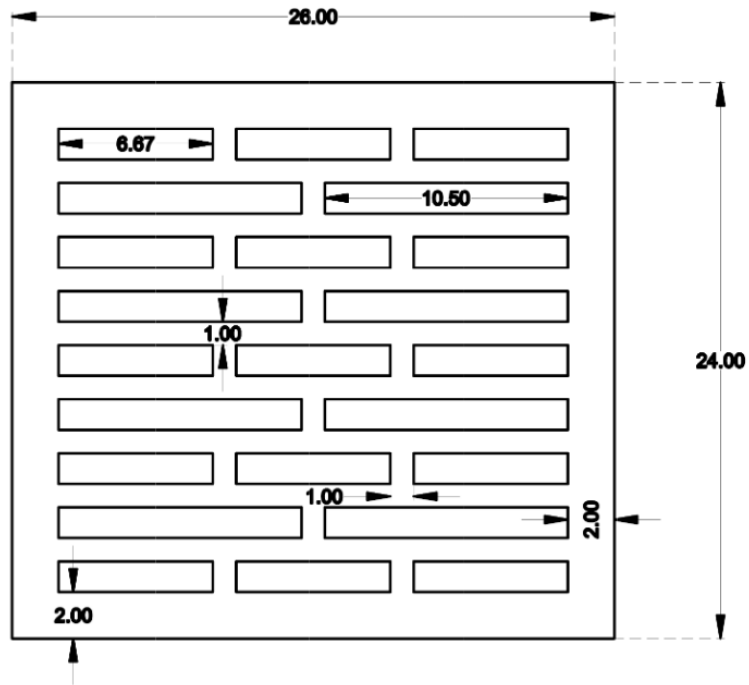
Warnatz, J., Maas, U., y Dibble, R. (2003). *Combustion. Physical and Chemical Fundamentals, Modeling and Simulation, Experiments, Pollutant Formation*.

XII. Anexos

A. Rejilla prototipo

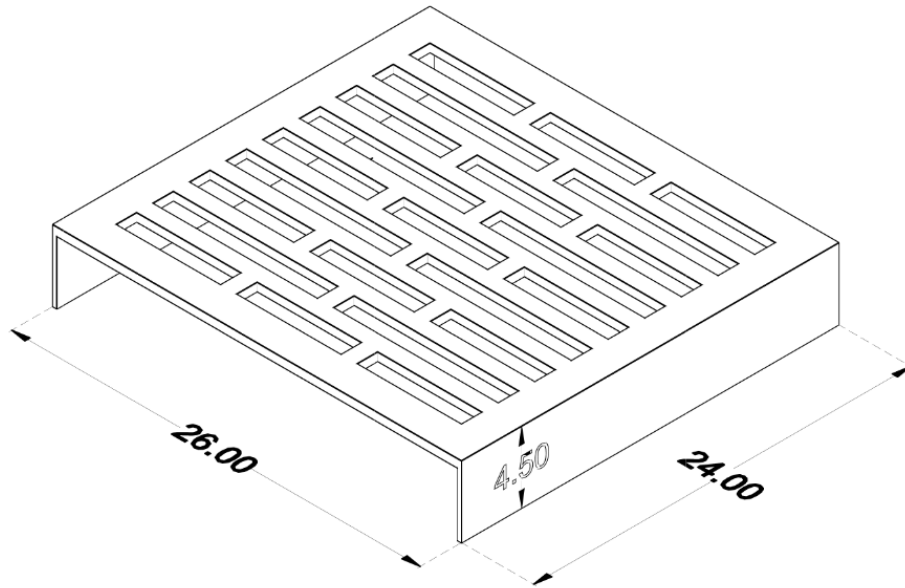
La rejilla prototipo fue diseñada por una empresa privada que desea desarrollar una rejilla comercial de acero inoxidable para su uso en estufas. Con base en su estudio de mercado, el prototipo final de la empresa posee una estructura de acero inoxidable para resistir las altas temperaturas de las estufas, evitar corrosión y cumplir con normativas alimentarias. El largo y ancho total, ilustrado en las figuras No.22 y No.23, es diseñado para poder usarse en las estufas más pequeñas del mercado, y con la capacidad de utilizar más de una en estufas más grandes. La altura proporciona el espacio suficiente para la distribución de aire, y las ranuras fueron diseñadas para permitir dicho flujo, sin dejar caer material que está siendo combustionado.

Figura No. 22: Dimensiones de rejilla vista planta



Dimensiones en centímetros, con vista de planta, de la rejilla prototipo comercial de acero inoxidable utilizada dentro de ambas estufas.

Figura No. 23: Diseño de rejilla vista frontal-izquierda



Altura de 4.5 cm para establecer un patrón flujo de aire iniciando en la parte inferior de la rejilla, subiendo a través de ella hacia el material en combustión.

B. Datos originales

Cuadro No. 7: Temperaturas en termocuplas

Corridas			Temperaturas de termocupla en puntos: (± 0.1 °C)											
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Estufa cilíndrica	Sin rejilla	1	107.4	220.1	225.4	268.5	272.1	273.5	310.1	314.0	308.9	311.4	326.5	291.5
		2	105.7	219.6	227.8	273.1	260.9	274.1	298.8	303.5	304.5	308.8	333.1	294.1
		3	110.2	223.4	232.0	266.2	266.6	279.0	305.4	309.2	305.3	308.2	331.8	294.6
	Con rejilla	4	70.2	98.4	115.3	302.5	303.9	313.2	432.8	437.5	425.8	437.0	456.8	362.4
		5	73.4	106.1	115.0	299.1	309.7	315.4	432.6	436.1	423.1	430.2	450.2	372.1
		6	71.7	103.5	114.2	303.4	306.4	309.5	439.2	436.7	430.6	429.8	460.7	370.9
Estufa cúbica	Sin rejilla	7	80.3	157.2	168.9	92.1	204.9	207.3	280.4	276.4	272.5	278.0	302.6	236.4
		8	85.1	163.8	166.7	94.8	201.7	204.8	277.3	284.3	269.9	278.6	301.0	235.2
		9	82.7	162.2	161.4	96.3	206.1	209.2	277.9	275.8	270.7	286.4	307.4	238.1
	Con rejilla	10	59.3	84.7	87.1	71.2	308.4	307.3	444.0	442.1	427.6	450.3	483.1	375.1
		11	54.9	88.2	92.4	66.4	311.3	309.1	447.2	448.2	429.1	440.9	479.6	378.6
		12	54.1	89.6	83.7	68.6	305.6	306.8	444.9	445.7	426.6	443.5	485.7	374.9

Temperaturas registradas en cada corrida, utilizando termocuplas tipo K. Las coordenadas de cada termocupla para ambas estufas se encuentran en el Cuadro No.8. Se registraron las temperaturas estables con mismo valor por más de 2 minutos. Se utilizaron dichas temperaturas en cálculo 1 para la determinación de condiciones promedio de Cuadro No. 12.

Cuadro No. 8: Coordenadas de cada punto de termocuplas

Estufa cúbica sin rejilla			Estufa cúbica con rejilla			Estufa cilíndrica sin rejilla			Estufa cilíndrica con rejilla		
x (cm)	y (cm)	z (cm)	x (cm)	y (cm)	z (cm)	x (cm)	y (cm)	z (cm)	x (cm)	y (cm)	z (cm)
0	-16.51	0	0	-16.51	0	0	-18.05	0	0	-18.05	0
16.51	0	0	16.51	0	0	18.05	0	0	18.05	0	0
0	16.51	0	0	16.51	0	0	18.05	0	0	18.05	0
0	-16.51	11.43	0	-16.51	11.43	0	-18.05	28.5	0	-18.05	28.5
16.51	0	11.43	16.51	0	11.43	18.05	0	28.5	18.05	0	28.5
0	16.51	11.43	0	16.51	11.43	0	18.05	28.5	0	18.05	28.5
0	-16.51	22.86	0	-16.51	22.86	0	-18.05	57	0	-18.05	57
16.51	0	22.86	16.51	0	22.86	18.05	0	57	18.05	0	57
0	16.51	22.86	0	16.51	22.86	0	18.05	57	0	18.05	57
-16.51	0	22.86	- 16.51	0	22.86	- 18.05	0	57	- 18.05	0	57
0	0	22.86	0	0	22.86	0	0	57	0	0	57
16.51	16.53	17.15	16.51	16.53	17.15	12.76	12.76	42.75	12.76	12.76	42.75

Coordenadas físicas de cada termocupla en ambas estufas, tomando en cuenta el centro de cada estufa, a nivel más inferior posible, como origen. En caso de la estufa cilíndrica dicho nivel es a nivel del suelo, en caso de la cúbica, a nivel de la cama de ladrillos. Las termocuplas fueron ingresadas de manera que las coordenadas representan puntos dentro de la cámara de combustión. Se utilizaron los datos para el cálculo de los modelos de Cuadro No.3 y para las figuras No. 19 y 20.

Cuadro No. 9: Masa inicial y contenido de humedad de encino

Corridas		Masa inicial (± 0.01 kg)	Contenido de humedad ($\pm 0.01\%$)	
Estufa cilíndrica	Sin rejilla	1	1.54	9.24
			9.56	
			9.32	
			9.78	
			9.51	
		2	1.54	9.87
			9.45	
			9.81	
			9.67	
			9.65	
		3	1.52	10.1
			9.45	
	9.86			
	9.34			
	Con rejilla	4	1.54	9.61
			9.85	
			9.96	
			9.57	
			9.83	
		5	1.56	9.27
			8.92	
			9.02	
			9.1	
		6	1.54	9.15
9.62				
9.13				
9.61				
9.64				
			9.35	
			9.71	

Continuación de Cuadro No. 9

Corridas			Masa inicial (± 0.01 kg)	Contenido de humedad ($\pm 0.01\%$)
Estufa cúbica	Sin rejilla	7	1.54	8.91
				8.99
				9.62
				9.35
				9.41
		8	1.56	9.22
				9.18
				9.57
				9.31
				9.76
		9	1.54	10.02
				10.03
	9.84			
	9.74			
	9.44			
	Con rejilla	10	1.54	9.37
				9.15
				9.22
				9.68
				9.63
		11	1.52	10.07
				9.42
				9.65
				9.77
9.76				
12		1.54	9.21	
			9.81	
	9.77			
	9.65			
				9.36

Condiciones de masa añadida de encino previo a cada corrida en cada estufa, junto con la humedad en base húmeda de la misma. Se utilizaron dichos datos en el cálculo 1 para la obtención de los datos del Cuadro No. 11 las figuras No. 24 y 25.

Cuadro No. 10: Condiciones de combustión

Corridas		Masa sobrante (±0.01 kg)	Masa sobrante (±0.01%)	Eficiencia de combustión (±0.1%)	%CO2 (±0.1%)	
Estufa cilíndrica	Sin rejilla	1	0.06	3.90	74.7	7.2
		2	0.06	3.90	74.0	6.4
		3	0.05	3.29	73.9	5.4
	Con rejilla	4	0.03	1.95	80.0	17.0
		5	0.04	2.56	78.5	13.3
		6	0.03	1.95	80.7	17.6

Continuación de Cuadro No. 10

Corridas			Masa sobrante (±0.01 kg)	Masa sobrante (±0.01%)	Eficiencia de combustión (±0.1%)	%CO2 (±0.1%)
Estufa cúbica	Sin rejilla	7	0.07	4.55	78.2	13.2
		8	0.08	5.13	77.1	11.4
		9	0.08	5.19	78.5	13.3
	Con rejilla	10	0.06	3.90	82.1	23.0
		11	0.05	3.29	82.5	22.5
		12	0.05	3.25	81.9	19.3

Datos obtenidos sobre la situación de la combustión en cada corrida en ambas estufas, representando la eficiencia de combustión del encino, al igual que el encino que no combustionó, lo que resulta en un análisis referente a eficiencia energética liberada en términos de salidas del sistema. Se utilizó el cálculo 1, y este cuadro, para la obtención del Cuadro No.13.

Los datos fueron obtenidos a partir de 3 corridas por sistema, realizadas en el lapso de 3 semanas para disminuir el efecto que el viento y otros aspectos del clima pudieran tener en el estudio.

C. Cálculos de muestra

Cálculo #1: Promedio de eficiencia de combustión de estufa cilíndrica sin rejilla

$$[\text{Ec.13}] \underline{X} = \frac{\sum_{i=1}^N X_i}{N}$$

$$\underline{X} = \frac{(74.7\% \pm 0.1\%) + (74.0\% \pm 0.1\%) + (73.9\% \pm 0.1\%)}{3}$$

$$\underline{X} = (74.2 \pm 0.4)\%$$

Cálculo utilizado para la determinación de condiciones promedio de los cuadros No. 11-13, utilizando las condiciones obtenidas en los cuadros No. 7-9.

Cálculo #2: Poder calorífico afectado por humedad

$$[\text{Ec.10}] NCV_m = \frac{NCV_o * (100 - H) - 2.44 * H}{100}$$

$$NCV_m = \frac{19.5 \text{ MJ/kg} * (100 - (9.53 \pm 0.29)\%) - 2.44 * (9.53 \pm 0.29)\%}{100}$$

$$NCV_m = (17.41 \pm 0.71) \text{ MJ/kg}$$

Cálculo utilizado para la determinación de poder calorífico de Cuadro No.13, utilizando humedad promedio del Cuadro No.11.

Cálculo #3: Calor utilizable de la combustión en estufa cilíndrica sin rejilla

$$[\text{Ec.11}] CU = [M * NCV_m - (M * \%MS * NCV_o)] * \%EC$$

$$CU = [(1.54 \pm 0.01) \text{ kg} * (17.41 \text{ MJ/kg} \pm 0.71) - (1.54 \pm 0.01) \text{ kg} * (3.69 \pm 0.43)\% * (19.5 \frac{\text{MJ}}{\text{kg}})] * (74.2 \pm 0.4)\%$$

$$CU = (19.07 \pm 0.94) \text{ MJ}$$

Cálculo para la determinación de calor liberado de cada escenario del Cuadro No.5 con base en datos de cuadros 11-13.

Cálculo #4: Eficiencia energética en estufa cilíndrica sin rejilla

$$[\text{Ec.12}] \%EE = \frac{CU}{M * NCV_m}$$

$$\%EE = \frac{(19.07 \pm 0.94) \text{ MJ}}{(1.54 \pm 0.01) \text{ kg} * (17.41 \text{ MJ/kg} \pm 0.71)}$$

$$\%EE = (71.13 \pm 1.09)\%$$

Cálculo de eficiencia energética en base a resultados del Cuadro No.5, para la determinación de los 4 escenarios del Cuadro No.6.

Cálculo #5: Incremento en eficiencia energética en estufa cilíndrica

$$[Ec.14] \% IN = \frac{\%EE_{Rejilla} - \%EE_{Sin Rejilla}}{\%EE_{Sin Rejilla}}$$

$$\% IN = \frac{(77.78 \pm 2.14)\% - (71.13 \pm 1.09)\%}{(71.13 \pm 1.09)\%}$$

$$\% IN = (9.35 \pm 2.43)\%$$

Cálculo de la variación ente eficiencia obtenidas del cálculo anterior, para la determinación del incremento de esta en ambas estufas del Cuadro No. 6.

D. Análisis de error

Cálculo #6: Desviación estándar de eficiencia de combustión en estufa cilíndrica sin rejilla

$$[Ec.15] \sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2}{N-1}}$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{(74.7\% - 74.2\%)^2 + (74.0\% - 74.2\%)^2 + (73.9\% - 74.2\%)^2}{3-1}}$$

$$\sigma = \pm 0.4\%$$

Análisis de error para cada promedio calculado en los cuadros 11-13.

Cálculo #7: Análisis de error de suma y multiplicación en incremento en eficiencia energética en estufa cilíndrica

$$[Ec.16] \sigma_z = z * \sqrt{\left(\frac{\sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2}}{x+y}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_c}{c}\right)^2}$$

$$\sigma_z = 9.35\% * \sqrt{\left(\frac{\sqrt{2.14^2 + 1.09^2}}{77.78 + 71.13}\right)^2 + \left(\frac{1.09}{71.13}\right)^2}$$

$$\sigma_z = \pm 2.43\%$$

Análisis de error para datos obtenidos de cálculos 3-5, descritos en los cuadros No. 5 y 6.

E. Datos calculados

Cuadro No. 11: Masa promedio y contenido de humedad promedio de encino

Corridas		Masa inicial promedio (kg)	Contenido de humedad promedio (%)
Estufa cilíndrica	Sin rejilla	1.53 ± 0.01	9.61 ± 0.23
	Con rejilla	1.54 ± 0.01	9.44 ± 0.33
Estufa cúbica	Sin rejilla	1.54 ± 0.02	9.49 ± 0.34
	Con rejilla	1.53 ± 0.0	9.56 ± 0.26
Escenarios totales		1.54 ± 0.01	9.53 ± 0.29

Datos obtenidos a partir de cálculo 1, para la determinación de resultados de cuadros No. 5 y 14.

Figura No. 24: Diagrama de caja y bigotes del contenido de humedad en encino

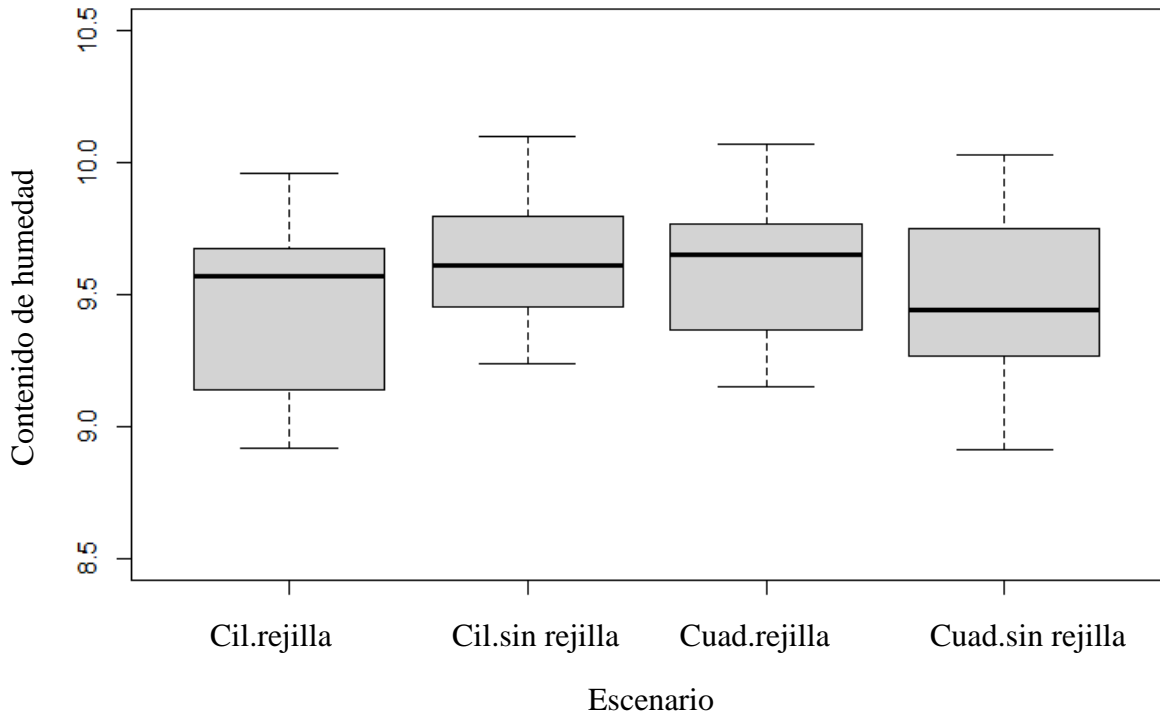


Diagrama de caja y bigotes representando la variación de humedad entre todas las corridas. Escala ajustada para mostrar los promedios y desviaciones cercanas entre las 4 corridas.

Figura No. 25: Diagrama de caja y bigotes sobre masa de encino

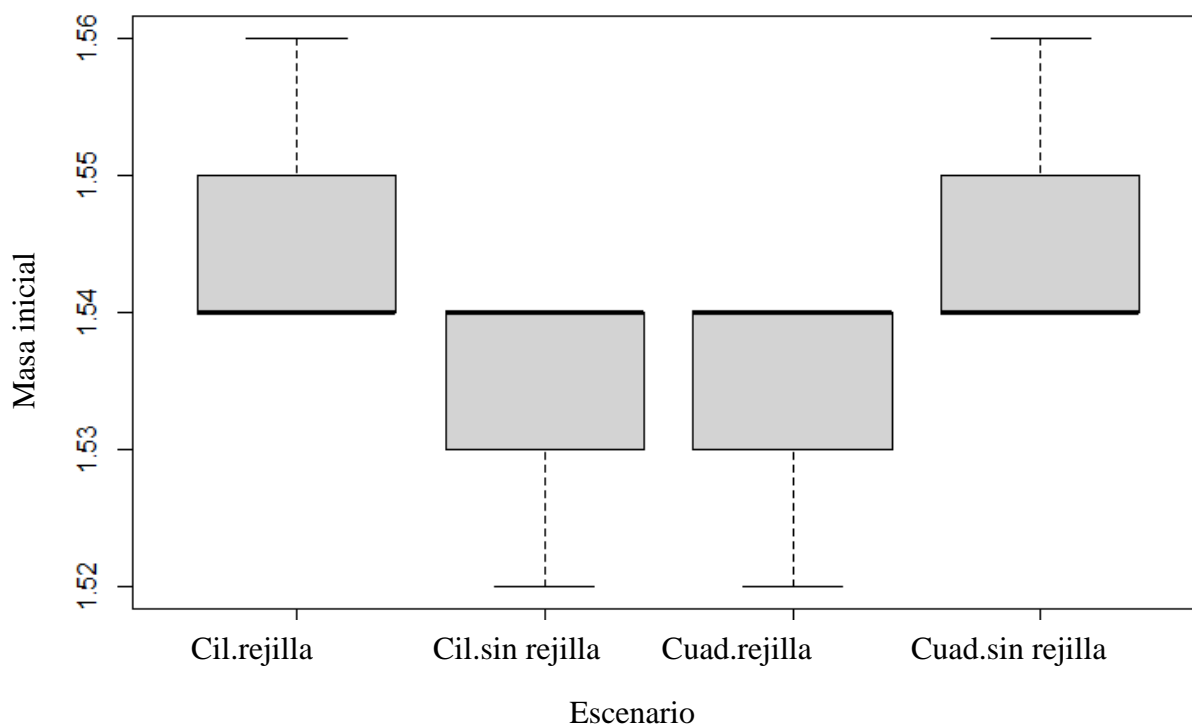


Diagrama de caja y bigotes representando la variación de masa inicial ingresada a las estufas entre todas las corridas. Escala ajustada para mostrar los promedios y desviaciones cercanas entre las 4 corridas.

Cuadro No. 12: Temperaturas promedio en termocuplas

Corridas		Temperaturas promedio de termocuplas en puntos (°C)					
		1	2	3	4	5	6
Estufa cilíndrica	Sin rejilla	107.7 ± 2.2	221 ± 2.0	228.4 ± 3.3	269.2 ± 3.5	266.5 ± 5.6	275.5 ± 3
	Con rejilla	71.7 ± 1.6	102.6 ± 3.9	114.8 ± 0.5	301.6 ± 2.2	306.6 ± 2.9	312.7 ± 2.9
Estufa cúbica	Sin rejilla	82.7 ± 2.4	161 ± 3.4	165.6 ± 3.8	94.4 ± 2.1	204.2 ± 2.2	207.1 ± 2.2
	Con rejilla	56.1 ± 2.8	87.5 ± 2.5	87.7 ± 4.3	68.7 ± 2.4	308.4 ± 2.8	307.7 ± 1.2

Continuación de Cuadro No. 12

Corridas		Temperaturas promedio de termocuplas en puntos (°C)					
		7	8	9	10	11	12
Estufa cilíndrica	Sin rejilla	304.7 ± 5.6	308.9 ± 5.2	306.2 ± 2.3	309.4 ± 1.7	330.4 ± 3.4	293.4 ± 1.6
	Con rejilla	434.8 ± 3.7	436.7 ± 0.7	426.5 ± 3.7	432.3 ± 4	455.9 ± 5.3	368.4 ± 5.2
Estufa cúbica	Sin rejilla	278.5 ± 1.6	278.8 ± 4.7	271 ± 1.3	281 ± 4.6	303.6 ± 3.3	236.5 ± 1.4
	Con rejilla	445.3 ± 1.6	445.3 ± 3	427.7 ± 1.2	444.9 ± 4.8	482.8 ± 3.0	376.2 ± 2.0

Temperaturas calculadas a partir de cálculo 1 y Cuadro No. 7. Las coordenadas de cada termocupla en cada escenario se describen en el Cuadro No.8.

Cuadro No. 13: Condiciones de combustión promedio

Corridas		Masa sobrante promedio (%)	Eficiencia de combustión promedio (%)	CO ₂ promedio (%)
Estufa cilíndrica	Sin rejilla	3.69 ± 0.43	74.2 ± 0.4	6.3 ± 0.9
	Con rejilla	2.15 ± 1.12	79.7 ± 1.1	15.9 ± 2.3
Estufa cúbica	Sin rejilla	4.95 ± 0.73	77.9 ± 0.7	12.6 ± 1.1
	Con rejilla	3.47 ± 0.30	82.1 ± 0.3	21.6 ± 2.0

Condiciones combustión de cada escenario, calculadas a partir de cálculo 1 y Cuadro No. 10.

Cuadro No. 14: Poder calorífico promedio

Poder calorífico seco (MJ/kg)	Contenido de humedad promedio (%)	Poder calorífico inferior promedio (MJ/kg)
19.5	9.53 ± 0.29	17.41 ± 0.71

Poder calorífico seco según OLADE, y afectado por humedad promedio de encino utilizado. Se calcularon a partir de cálculos 1 y 2 utilizando los cuadros No. 9 y 11.

F. Estufas rústicas utilizadas en las residencias y negocios

Figura No. 26: Diseño de estufas comunes

a)



b)



c)



d)



a) Estufa a partir de únicamente 2 blocks de cemento en Teculután, Zacapa. b) Estufa a base de ladrillos y plancha metálica en el Tumbador, San Marcos. c) Reciclaje de hojalata de basurero de hierro negro para fabricación de estufa en Santa Catarina Pinula. d) Estufa a fuego abierto en San Cristóbal el Alto, Sacatepéquez.