

DOI: <https://doi.org/10.46296/ig.v8i16.0307>

DESEMPEÑO DE ESTUFA DE LEÑA TIPO ROCKET

ROCKET WOOD STOVE PERFORMANCE

Muñoz-Hernández Guillermo¹; Cruz-Perez Walter Victorico ²; Quijada-Escamilla Farid ³

¹ CIATEQ A. C. Querétaro, México. Correo: guillermo.munoz@ciateq.mx.

² CIATEQ A. C. Querétaro, México. Correo: walter.cruz@ciateq.mx.

³ CIATEQ A. C. Querétaro, México. Correo: fquijada@ciateq.mx.

Resumen

En el presente documento se describe la evaluación del desempeño de una estufa de leña tipo rocket, diseñada para la región sureste de México. El propósito fue determinar el consumo de leña, tiempo de cocción y la eficiencia térmica. El estudio del desempeño fue realizado en dos etapas secuenciales, las cuales permitieron comprender el funcionamiento de la estufa rocket en función de cuatro variables respuesta que identifican el desempeño y tres factores en evaluación. Bajo la modalidad de estufa dúplex o del tipo plancha, el desempeño fue comparado con estufas implementadas y constituye una interesante opción para reducir consumo de leña, el tiempo de cocción y en definitiva mejorar la eficiencia térmica.

Palabras clave: Eficiencia, Consumo, Cocción, Prueba.

Abstract

This document describes the performance evaluation of a rocket-type firewood stove designed for the southeastern region of Mexico. The purpose was to determine the firewood consumption, cooking time and thermal efficiency. The performance study was carried out in two sequential stages. Such stages allowed us to understand the operation of the rocket stove based on four response variables and three factors. Under the griddle-type stove, the performance was compared with implemented stoves and constitutes an interesting option to reduce firewood consumption, cooking time and ultimately improve thermal efficiency.

Keywords: Efficiency, Consumption, Cooking, Testing.

Información del manuscrito:

Fecha de recepción: 26 de mayo de 2025.

Fecha de aceptación: 09 de septiembre de 2025.

Fecha de publicación: 04 de diciembre de 2025.



1. Introducción

A nivel mundial se estima que la quema de leña aporta hasta el 3% de las emisiones de bióxido de carbono, el 2 % de hollín, el 30 % de monóxido de carbono (InfraRural, 2023). Se atribuyen 4.3 millones de muertes al año a causa de enfermedades asociadas a la inhalación de gases contaminantes en interiores, siendo las mujeres, las niñas y los niños de comunidades rurales los más afectados (Figura 1). En México fallecieron alrededor de 4,000 mujeres al año por EPOC (Enfermedades Respiratorias Obstructivas Crónicas), debido a la exposición a estos gases (InfraRural, 2023).

Figura 1. Fogón abierto de leña (SEMARNAT, 2010)



Jaime, Moreno, Grunstein, Patiño, Illingworth, O'Neill y Lynen (2020) con datos del INEGI determinaron

que a nivel nacional alrededor de 12 millones de personas aún están en este riesgo de intoxicación. Esto porque las personas utilizan leña o carbón para cocinar y no utilizan chimenea o ducto para sacar el humo producto de la combustión. Tal población es de 3,663,867 viviendas que usan leña o carbón y no tienen chimenea o ducto de salida de humo y representa el 75% de viviendas que usan leña o carbón para cocinar. Chiapas tiene el 80%, Oaxaca el 89% y Guerrero 81% de viviendas que están en riesgo de intoxicación.

Para atender la problemática, desde hace más de 30 años se han propuesto estufas de leña mejoradas que incluyen un ducto de salida de humo. Las estufas de leña constituyeron alternativas mejoradas respecto a los fogones abiertos, porque mostraron beneficios tanto para la salud como para la economía familiar y el ambiente (Díaz-Jiménez, Berrueta-Soriano y Masera-Cerutti, 2011). En México existieron dos programas ampliamente difundidos de estufas de leña fueron los del Proyecto PATSARI implementado por GIRA, A.C. y la estufa ONIL promovida por HELPS International, A.C. En este trabajo se desarrolló un

diseño de la estufa tipo rocket tomando en cuenta las áreas de oportunidad derivadas de la revisión del estado de la técnica de las estufas ahorradoras de leña.

2. Antecedentes

2.1. Tecnologías de estufas de leña

Una revisión internacional del desempeño de estufas de leña fue realizado por Muñoz-Hernández, Cruz-Pérez, Quijada-Escamilla y Colín-Martínez (2024), donde se encontró que las estufas con procesos de gasificación presentaron el mejor desempeño, tanto en eficiencia térmica como en emisiones de monóxido de carbono y partículas contaminantes. También fue evidente que la estufa rocket permite la separación de las

entradas de aire y combustible, que favorece el control de la razón aire/combustible para una combustión completa. Esta implementación constituye una característica distintiva para alcanzar un máximo desempeño de la estufa aunado al uso de materiales aislantes eficientes y de costo competitivo. También se encontró que existen estufas de leña dúplex y de un único propósito, estas últimas pueden ser más eficientes por la reducción de área expuesta al ambiente.

Para una mejor identificación de la tecnología, la norma NMX-Q-001-NORMEX-2018 clasifica las estufas de leña en 4 tipos (Tabla 1). Aunque esta clasificación no incluye el criterio de costos, sí refleja un nivel tecnológico que puede estar asociado a los precios de adquisición de cada estufa.

Tabla 1. Tipos de estufas según la norma NMX-Q-001-NORMEX-2018

Tipo 1	Estufa de construcción in situ.	Es aquella que se construye en el lugar donde será utilizada y que normalmente está construida con algunos materiales propios de la región como lo es barro, arena, ladrillo, cemento, etc. Como ejemplo la estufa Lorena, Chefina, Patsari fija, etc.
Tipo 2	Estufa de ensamble con piezas prefabricadas.	Es aquella cuya estructura principal está hecha a base de piezas prefabricadas que se ensamblan en sitio, con materiales que pueden ser resistentes a altas temperaturas. Se puede mencionar la estufa Onil, Mexalit, Tezulutlán, Enerchia, Xalpaneca etc.
Tipo 3	Estufa ensamblada de	Es aquella que se instala en sitio para su uso

	fábrica.	inmediato, con materiales resistentes a altas temperaturas. Ejemplo la Ecostufa, Patsari metálica, Tuya, coreana Liagga, etc.
Tipo 4	Estufa fabricada con cualquier tecnología innovación.	Estufa que funciona con leña fabricada con cualquier innovación tecnológica, distinta a las descritas en el tipo 1, 2 y 3. Quizás este tipo sea de mayor costo como la Turbococina y la estufa con generación eléctrica de African Clean Energy.

2.2. Necesidades de los usuarios

Conforme los datos del INEGI Jaime et al., (2020) determinó que el uso de leña como combustible en México, se concentra hacia el sureste de México, principalmente en los estados de Chiapas, Oaxaca, Veracruz y Guerrero. Adicionalmente, Chiapas, Oaxaca y Guerrero son los estados con mayor índice de pobreza energética

(García-Ochoa y Graizbord, 2016).

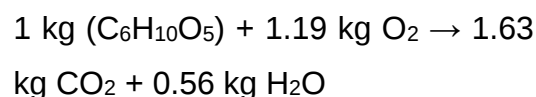
En base a esto, se definieron las especificaciones de un prototipo de estufa de leña tipo rocket para usuarios de la región Sureste de México (Tabla 2). Estas especificaciones fueron el resultado de la revisión del estado de la técnica para identificar las áreas de oportunidad en estufas ahorradoras de leña, y la información de profesionales en el sector.

Tabla 2. Listado de especificaciones de estufa de leña

1.	La estufa debe ser doble propósito (Dúplex o tipo plancha) para la elaboración de tortillas y cocción de alimentos en ollas en tamaños estandarizados.
2.	La estufa debe incluir chimenea para la salida de los gases de combustión hacia el exterior de la cocina.
3.	El tamaño de la entrada a la hornilla debe ser no menor que la sección rectangular de 15.24 x 20.32 cm o capacidad de ingreso de al menos 3 leños de un diámetro aproximado de 10 cm de sección y una longitud máxima de 56 cm.
4.	La estufa se pueda desarmar y armar por los usuarios, para cambios de lugar y evitar abandono.
5.	El mantenimiento de la estufa deberá realizarse por los mismos usuarios
6.	La estufa debe incluir materiales preferentemente de la región del usuario.
-	Separación de las entradas de aire y combustible para favorecer el control de la razón aire/combustible para combustión completa. Control de la razón de exceso de aire entre 1.5 a 2.
-	Precalentamiento de aire y combustible.
-	Uso de caja de secado de leña desde calor residual y parrilla secundaria para favorecer encendido inicial de la estufa.
-	Diseño de parrilla para facilitar entrada de aire para combustión completa.
-	Diseño modular de los componentes de la estufa para adaptaciones hacia horno de pan, lámpara y para confort o calefacción.

Bajo la definición de las especificaciones de la estufa de leña, se pudo identificar que las primeras seis pueden ser cubiertas con las estufas mejoradas, las cuales corresponden a los tipos 1 a 3 de la clasificación de la norma NMX-Q-001-NORMEX-2018. El resto de las especificaciones corresponden al tipo 4. En los requisitos, la base de un buen desempeño resalta la combustión completa, la cual todo el carbono de un combustible reacciona con el oxígeno del comburente para dar dióxido de carbono. La reacción es similar a la de la combustión perfecta, con la diferencia que, para que ocurra, es necesario agregar una mayor cantidad de oxígeno que la requerida de acuerdo con el cálculo estequiométrico. Dicha cantidad en exceso e , conduce a la oxidación total de todos los elementos que constituyen el combustible. El aire estequiométrico se determina desde la reacción simplificada de la

celulosa y el oxígeno (Ecuación 1) (Marquina-Zabalza, 2019):



El aire no solo lo constituye el oxígeno, por lo que cada kilogramo de oxígeno implica proporcionar 4.32 kg de aire. En consecuencia, considerando la madera como celulosa, desde la Ecuación 1 por cada kilogramo de celulosa, se deberá proporcionar $1.19 * 4.32 = 5.14$ kg de aire en su relación estequiométrica. Para determinar el exceso de aire que se aporta a la combustión se utiliza el coeficiente de exceso de aire n , que se define como la relación entre la cantidad de aire introducida y la cantidad de aire estequiométrico:

$$n = \frac{\text{Aire introducido}}{\text{Aire estequiométrico}}$$

Dependiendo del tipo de combustible, se recomienda un valor para el coeficiente de exceso de aire (n) entre 1.5 y 2, dado por la Tabla 3.

Tabla 3. Coeficiente de exceso de aire (Marquina-Zabalza, 2019)

Tipo de combustible	Coeficiente de exceso de aire (n)
Sólido	de 1.5 a 2.0
Líquido	de 1.1 a 2.0
Gaseoso	de 1.0 a 1.1

3. Materiales y métodos

La separación de las entradas de aire-combustible y su precalentamiento, es una característica disponible en la estufa rocket. En el diseño de la cámara de combustión bajo una combustión completa es necesario determinar el flujo de aire estequiométrico y su coeficiente n . Para estudiar y comprender la operación de la estufa, se identificaron dos caminos. El primero con el cálculo o simulación del sistema de combustión y el segundo con un planteamiento experimental exploratorio. La unidad experimental se basó en dos diseños de patentes CN212057391 y CN218033241. Estas patentes no tuvieron cobertura legal en México y la CN212057391 pasó a dominio público el 24 de junio del 2024. De esta forma, el estudio experimental de la estufa tipo rocket tuvo dos etapas secuenciales: El estudio del desempeño de la unidad experimental, cuyo resultado llevó a un diseño de prototipo apto para cubrir las especificaciones de diseño de la Tabla 2.

3.1. Unidad Experimental

Los objetivos planteados para este experimento fueron:

- Evaluar la propuesta de la cámara de combustión.
- Definir el suministro de entrada de aire de combustión: por aire forzado o por aspiración natural.
- Determinar los mejores valores de desempeño energético de la unidad experimental, a través de un diseño experimental exploratorio.
- Identificar las anomalías que se pudieran generar durante la operación de la unidad experimental.

3.1.1. Variables dependientes e independientes

La eficiencia térmica (E_t) como variable dependiente fue determinada por el calentamiento de 5 l de agua desde la temperatura ambiente hasta la ebullición. Para esta subetapa se siguió el apartado 9.19 de la norma NMX-Q-001-NORMEX-2017 donde se especifica las actividades a seguir. E_t se determinó desde la energía requerida por el agua mediante el calor específico ($4.18 \text{ kJ/(kg } ^\circ\text{C)}$)

entre la energía aportada por la leña. La energía aportada por la leña fue determinada desde el poder calorífico de referencia a 4.06 kWh/kg (Marquina-Zabalza, 2019) por el consumo de combustible (CC) o consumo de leña. El CC fue determinado desde el peso inicial de los leños (Madera de encino), menos el peso al final después que se alcanzó la ebullición y se tomó en cuenta el peso de los residuos (carbón). La temperatura del agua de ebullición, así como las temperaturas en la cámara baja, cámara intermedia y cámara alta (Figura 2b), fueron medidas por termopares tipo K y registradas por un sistema de adquisición de datos portátil Omega® OM-SQ2040.

Por el lado de las variables independientes o factores, el exceso de aire n fue un factor determinado desde el flujo de aire forzado de un ventilador de alimentación de 2.6 W. La definición del rango experimental fue realizada en la primera subetapa del protocolo de pruebas, al usar como criterio la ausencia de humo en la salida de los gases. La cantidad de aire proporcionada por el ventilador fue determinada desde la velocidad media del aire en la salida de los

gases y medida por un anemómetro Steren HER-440, con resolución de 0.01 m/s. La medición se realizó en la salida de la cámara de combustión con área de sección transversal $A_t = 0.01806 \text{ m}^2$. Este registro fue realizado cuando la estufa no estuvo encendida y la entrada de aire por aspiración natural o entrada de aire primario fue cerrada (Figura 2a). La densidad del aire considerado fue de 1.2 kg/m^3 . El segundo factor controlado en la estufa fue la cantidad de combustible, a través del número de leños que pueden ser introducidos en la entrada de leños (Figura 2a). Se utilizaron leños de $40 \pm 5 \text{ cm}$ de largo y $12 \pm 3 \text{ cm}^2$ de área transversal de madera de encino. Los ductos de entrada de aire y combustible de la unidad experimental son de acero y precalientan tanto al aire como al combustible. El diseño experimental seleccionado es un diseño factorial exploratorio 22 (Gutiérrez-Pulido y De la Vara Salazar, 2008), con tres puntos al centro, para estimar el error experimental (Tabla 4 y Tabla 5).

Figura 2. Unidad experimental. a) Corte en sección b) Prueba de ebullición de 5 l de agua c) Prueba de combustión.



Tabla 4. Diseño factorial

Tratamiento	A: Flujo de aire (m/s)	B: Cantidad de Combustible	Eficiencia térmica (%)	Coefficiente de exceso de aire n
1	-1	-1		
2	+1	-1		
3	-1	+1		
4	+1	+1		
5	0	0		
6	0	0		
7	0	0		

Tabla 5. Equivalencia en los niveles de los factores

Factor	Nivel bajo (-1)	Nivel intermedio (0)	Nivel alto (+1)
A: Velocidad media de aire (m/s). Flujo [m ³ /min]	(0.5) [0.542]	(0.9) [0.975]	(1.3) [1.409]
B: Cantidad de Combustible (Leños)	2	4	6

El modelo estadístico de efectos fijos es representado por la Ecuación 3 (Gutiérrez-Pulido y De la Vara Salazar, 2008):

$$Y = \mu + \alpha_i + \beta_j + (\alpha\beta)_{ij} + \varepsilon_{ijk}$$

Donde μ es la media general α_i es el efecto debido al i -ésimo nivel del factor A, β_j es el efecto del j -ésimo nivel del factor B, $(\alpha\beta)_{ij}$ representa al efecto de la interacción AB y ε_{ijk} (0, σ^2) es el error aleatorio que se

distribuye como una distribución de probabilidad normal con media cero y varianza σ^2 .

3.2. Prototipo de estufa rocket

3.2.1. Prueba de eficiencia térmica.

Bajo el aprendizaje obtenido desde la unidad experimental, se diseñó el primer prototipo dúplex (Figura 3). El prototipo incluyó paredes de material cerámico, estructura externa de acero, comal de acero, ducto de salida de humo y accesorios como la caja de secado de leña, para facilitar el encendido de la estufa.

Figura 1. Prototipo de estufa rocket. a) Prototipo sin comal, b) Prototipo con comal



En el diseño del comal se realizó un análisis CFD (Computational Fluid Dynamics), para la definición geométrica del comal y transferencia de calor. Se eliminó la alimentación forzada de aire de la unidad experimental y se sustituyó por dos entradas de aire primario y secundario, ambas entradas por aspiración natural. Bajo el diseño actual, la cantidad de aire ingresado

no pudo ser determinado porque fue dependiente de las condiciones de operación.

En relación con las variables independientes o factores, se tomó el primer factor como entrada de aire secundario, debido a que la compuerta de entrada de aire primario se usó completamente abierta con ingreso de aire por aspiración natural. La compuerta de

entrada de aire secundario se usó a tres niveles: El nivel 1 corresponde a la compuerta cerrada, el nivel 2 parcialmente abierta y el nivel 3 abierta (Tabla 8). El segundo factor sigue siendo la cantidad de leños en 2, 3 y 4. Para considerar las diferentes condiciones de la madera, se agregó un tercer factor de estudio, la humedad de los leños en 7%, 12% y 17%. La humedad de equilibrio de la madera en las instalaciones fue de 7%. Para el control de los niveles de humedad se adicionó agua en bolsa y se selló para su homogenización en al menos 3 días. La medición del nivel humedad fue realizado con el medidor digital con electrodos marca Hohxen, con resolución de 0.1% base húmeda (b.h.). El poder calorífico de la madera fue tomado desde la Tabla 6.

Tabla 6. Poder calorífico de la madera en función de la humedad

Nivel de humedad de leños b.h. (%)	Poder Calorífico de leños (MacCarty y Ogle, 2010) (kJ/kg de combustible)
7	18,117
12	17,302
17	14,630

En cuanto a las variables dependientes, además de la eficiencia térmica, el consumo de combustible y el tiempo de ebullición;

se agregó la potencia media como variable respuesta que identifica la capacidad térmica de la estufa. Esta variable se determinó desde la energía aportada por el combustible durante el tiempo de la prueba o tiempo de ebullición del agua. La norma NMX-Q-001-NORMEX-2017 fue consultada en sus apartados 9.18 y 9.21 para la determinación de las variables respuesta. Para el registro de las temperaturas de ebullición, se usó el medidor de temperatura con una resolución de 0.1 °C marca Cole Parmer y termopares tipo K.

No se pudo seguir fielmente la norma NMX-Q-001-NORMEX-2017, debido a la indefinición del nivel de potencia baja y alta, para el apartado 9.18 y únicamente se usó la cocción de tortillas, no de frijol en el apartado 9.21.

Para la evaluación del desempeño de la estufa y debido a la presencia de curvatura en la región experimental mostrado por la unidad experimental, se usó el diseño en superficie de respuesta de Box Behnken con 15 tratamientos a tres niveles de cada factor (Gutiérrez-Pulido y De la Vara Salazar, 2008), abarcando las condiciones factibles

de operación hasta el momento identificadas (Tabla 7). Todos los tratamientos fueron aleatorizados y

realizados con la estufa precalentada, con de 10 min después de encendida.

Tabla 2. *Diseño Experimental de Box Behnken (Gutiérrez-Pulido y De la Vara Salazar, 2008)*

Tratamiento	Corrida	Cantidad de Leños	Entrada de aire	Humedad	Consumo de combustible	Tiempo de ebullición del agua	Potencia Media entregada por combustible	Eficiencia Térmica
		(Pieza)	(Posición de compuerta)	(% b.h.)	(kg/5 lt agua)	(Min)	(kW)	(%)
4	1	2	1	12				
8	2	4	1	12				
9	3	2	3	12				
13	4	4	3	12				
15	5	2	2	7				
14	6	4	2	7				
12	7	2	2	17				
10	8	4	2	17				
1	9	3	1	7				
6	10	3	3	7				
11	11	3	1	17				
3	12	3	3	17				
2	13	3	2	12				
5	14	3	2	12				
7	15	3	2	12				

Tabla 3. *Equivalencia en los niveles de los factores*

Factor	Nivel bajo (-1)	Nivel intermedio (0)	Nivel alto (+1)
A: Cantidad de leños	2	3	4
B: Entrada de aire	1	2	3
C: Humedad de leños	7%	12%	17%

3.2.2. Prueba de cocinado controlado (PCC)

En estufas dúplex, la prueba PCC fue realizada durante la elaboración (cocción) de tortillas (Figura 4). En esta prueba se consideraron dos variables respuesta el consumo de leña y el tiempo de elaboración de 1 kg de tortillas. Con la intención de probar el prototipo en las mejores condiciones de eficiencia

(Tratamiento 9, Tabla 12), se utilizó como único factor la cantidad de aire en aspiración natural de la entrada secundaria (Figura 3), a dos niveles (Tabla 9). El primer nivel de compuerta cerrada (1) con tres réplicas y el nivel (2) con la compuerta parcialmente abierta a 2 réplicas.

Figura 2. Prueba de elaboración de tortillas**Tabla 4.** Niveles de apertura de compuerta para aspiración natural en entrada de aire secundaria

	Nivel Bajo (1)	Nivel Alto (2)
Posición de Compuerta	Cerrada	Parcialmente abierta

4. Resultados y discusión

4.1. Unidad Experimental

Después de aleatorizar los tratamientos se realizaron las corridas correspondientes. La Tabla 10 muestra los resultados. La ebullición del agua en los tratamientos 1 y 2 no pudo ser obtenida con los 2 leños usados (Figura 5), debido a que la temperatura del agua no se incrementó más allá de 51°C en 35 min para el tratamiento 1 y 2. La temperatura de las cámaras no superó los 400°C, pues se observó

un exceso de aire para poco combustible. El de mejor desempeño para eficiencia térmica fue el tratamiento 3, con un tiempo de ebullición de 21 min (Figura 6). Se puede notar alta temperatura del orden de 750°C para la cámara alta e intermedia.

Tabla 5. Resultados del diseño experimental factorial

Tratamiento	Corrida	A: Flujo de aire (m/s)	B: Cantidad de Combustible	Consumo de combustible (kg)	Tiempo de ebullición (min)	Eficiencia térmica (%)	Coefficiente de exceso de aire <i>n</i>
1	1	-1	-1	1.4	-	2.38	2.42
2	7	+1	-1	1.1	-	2.14	9.38
3	6	-1	+1	1.505	21	6.72	1.61
4	5	+1	+1	1.855	20	5.53	3.23
5	2	0	0	1.55	32	5.81	4.29
6	3	0	0	1.8	31	4.69	3.58
7	4	0	0	1.95	29	4.18	3.09

Figura 3. Registros de temperatura en el agua y tres posiciones de la cámara de combustión del tratamiento 2

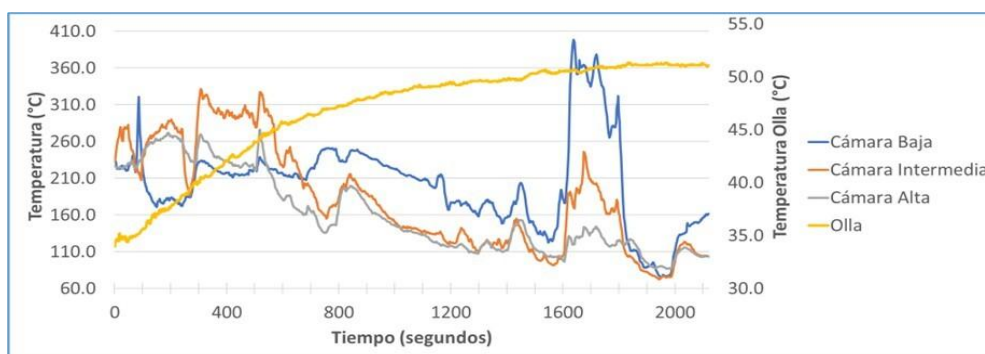
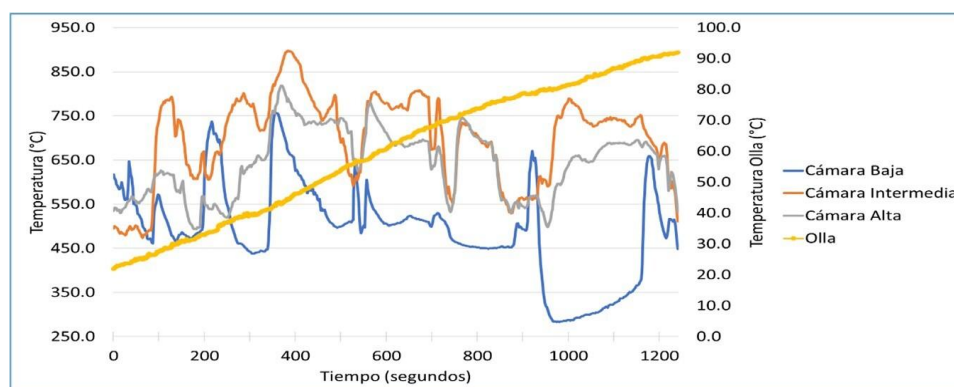


Figura 4. Registros de temperatura en el agua y tres posiciones de la cámara de combustión del tratamiento 3

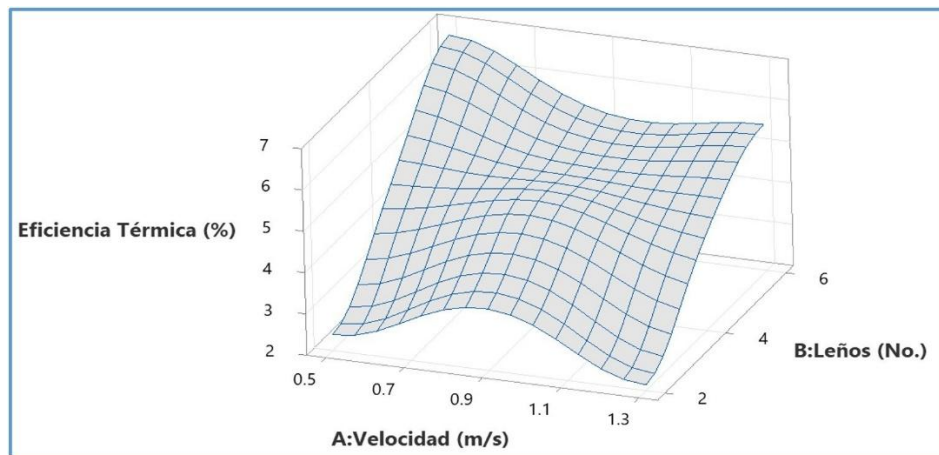


La eficiencia térmica, aunque sí se pudo determinar (en los tratamientos 1 y 2, con 2 leños), aparece con baja magnitud. Sin embargo, el modelo de regresión derivado desde el modelo estadístico con $R^2 = 92.24$, indica que la máxima eficiencia térmica se encuentra en $n = 1.61$,

con baja alimentación de aire (0.5) y alta cantidad de leños (6), es decir el tratamiento 3 (Ecuación 4 y Figura 7).

$$\text{Eficiencia Térmica (\%)} = 0.06 + 0.29 \cdot A + 1.233 \cdot B - 0.297 \cdot A \cdot B$$

Figura 5. Respuesta dada en el modelo de regresión del diseño factorial 2^2 .



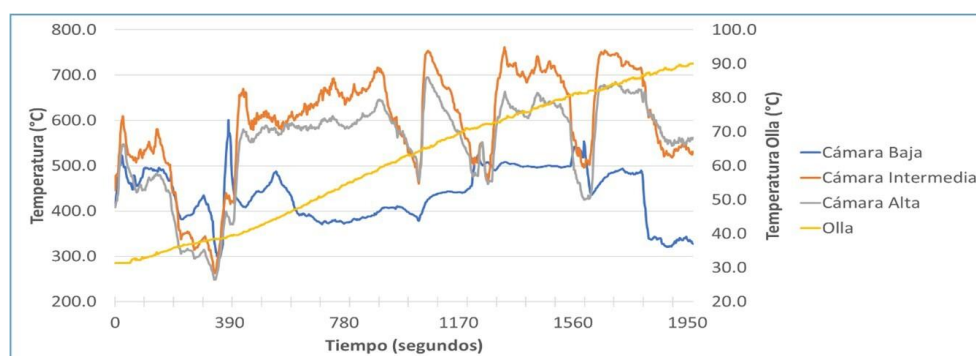
La alimentación forzada de aire de hasta $n = 4.29$, no resultó en la mejor eficiencia, es decir el suministro de aire fue excesivo. La mejor eficiencia se obtuvo con poco suministro de aire ($n = 1.61$). Bajo esta observación, se promovió la realización de 2 pruebas adicionales, con aspiración natural de aire, es decir con la succión obtenida por el

diferencial de temperatura y presión generada en la cámara de combustión. El ventilador no se usó y se selló su entrada de aire, pero se abrió la compuerta de aspiración natural (Ver Figura 2). Los resultados son mostrados en la Tabla 11 e indican que la alimentación forzada no es requerida en la estufa tipo rocket.

Tabla 6. Tratamientos adicionales en aspiración natural

Corrida	A: Flujo de aire (m/s)	B: Cantidad de Combustible	Consumo de combustible (kg)	Tiempo de ebullición (min)	Eficiencia térmica (%)
8	Natural	4	1.30	32.5	6.6
9	Natural	6	1.55	23	6.3

Figura 6. Registros de temperatura en el agua y tres posiciones de la cámara de combustión del tratamiento 8



4.2. Prototipo de estufa rocket

4.2.1. Eficiencia térmica

Desde los resultados de la Tabla 12, el desempeño del prototipo de estufa puede ser determinado y comparado con estufas de referencia implementadas. Desde el análisis de la varianza (ANOVA) de la respuesta consumo de combustible (CC) en la Tabla 13, se observa que los efectos de A, B, B*B y A*B son significativos en un nivel de confianza del 90%. La ecuación de regresión (Ecuación 5) expresada en la Figura 9, ilustra que el menor consumo de combustible para la ebullición de 5 l de agua es

del orden de 0.618 kg y se logra para la posición cerrada de entrada de aire secundario (1), con 2 leños y humedad baja de 7%. Si los leños se encuentran en mayor humedad se incrementa el CC. Al consultar la Tabla 14 de estufas ya implementadas, el consumo de combustible para la prueba de ebullición del agua fue de 1.002 kg, para la estufa Onil, pero para ebullicir 3.5 l de agua (0.286 kg/l), es decir la estufa rocket presenta mejor desempeño (0.124 kg/l) o solo el 43.1% del CC de la estufa Onil. Esto se puede verificar en el tratamiento 1 y 9 de la Tabla 12, ambos de baja potencia.

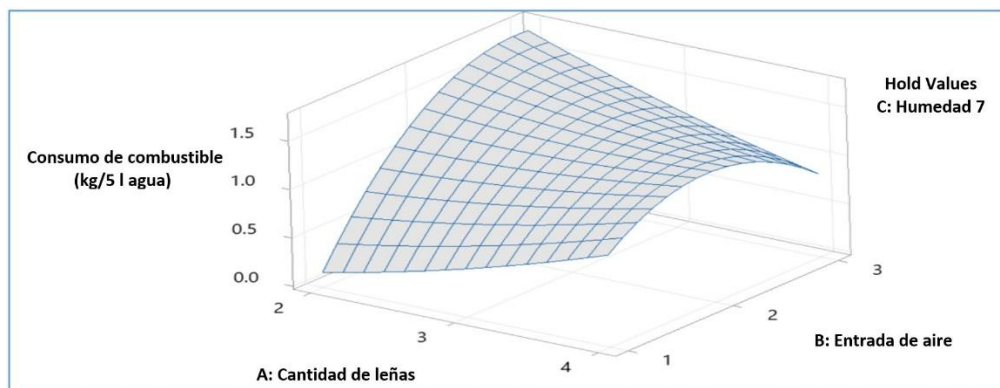
Tabla 7. Resultados del diseño experimental de Box Behnken (Gutiérrez-Pulido & De la Vara Salazar, 2008)

Tratamiento	Corrida	Cantidad de Leños	Entrada de aire	Humedad	Consumo de combustible	Tiempo de ebullición del agua	Potencia Media entregada por combustible	Eficiencia Térmica
		(Pieza)	(Posición compuerta)	(%)	(kg/5 lt)	(Min)	(kW)	(%)
1	4	2	1	12	0.756	20	10.9	10.7
2	8	4	1	12	1.189	18	19.06	6.7
3	9	2	3	12	2.503	75	9.62	2.8
4	13	4	3	12	1.276	18	20.44	6.3
5	15	2	2	7	1.432	46	9.4	4.8
6	14	4	2	7	1.264	19	20.09	6.0
7	12	2	2	17	2.286	90	6.19	4.4
8	10	4	2	17	1.123	13	21.06	8.3
9	1	3	1	7	0.618	17	10.98	11.6
10	6	3	3	7	1.04	25	12.56	7.1
11	11	3	1	17	1.152	17	16.53	8.6
12	3	3	3	17	1.302	24	13.23	7.6
13	2	3	2	12	1.773	38	13.45	4.8
14	5	3	2	12	2.277	38	17.28	4.0
15	7	3	2	12	1.417	27	15.13	5.1

Tabla 8. ANOVA de la respuesta consumo de combustible (CC)

Fuente	GL	Adj SS	Adj MS	Valor F	Valor P
A	1	0.56445	0.56445	4.63	0.084
B	1	0.72360	0.72360	5.94	0.059
C	1	0.28464	0.28464	2.34	0.187
A*A	1	0.01055	0.01055	0.09	0.780
B*B	1	0.73048	0.73048	5.99	0.058
C*C	1	0.45112	0.45112	3.70	0.112
A*B	1	0.68890	0.68890	5.65	0.063
A*C	1	0.24751	0.24751	2.03	0.213
B*C	1	0.01850	0.01850	0.15	0.713
Falta de ajuste	3	0.23599	0.07866	0.42	0.759
Error puro	2	0.37345	0.18673		
Total	14	4.28217			

$$CC \text{ (kg/5l)} = - 6.35 + 0.84*A + 3.488*B + 0.550*C + 0.053*A*A - 0.445*B*B - 0.01398*C*C - 0.415*A*B - 0.0498*A*C - 0.0136*B*C$$

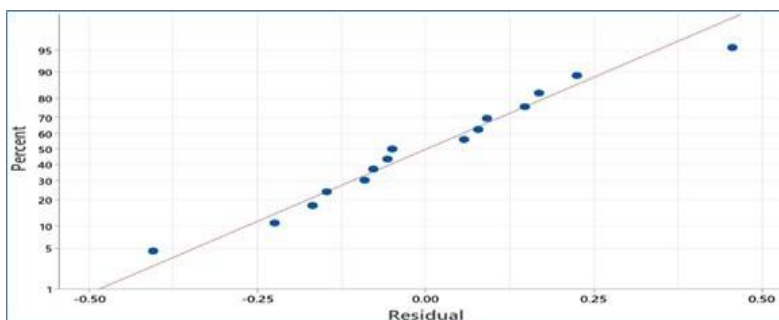
Figura 7. Consumo de combustible para evaporación de 5 l de agua, humedad en 7%**Tabla 9.** Prueba de 4 estufas de leña y fogón abierto (Cárdenas-González et al., 2009)

Prueba	Descripción	Estufa Mejorada				
		Citlalli	Mexalit	Onil	Patsari	Fogón
PCCT (Prueba de Cocinado Controlado para la elaboración de tortillas)	Tiempo (min)	38	23.5	27.6	22.5	19
	Consumo de la leña (kg)	0.622	0.799	0.906	0.830	1.379
PEA (Prueba de ebullición de Agua de 3.5 l)	Tiempo (min)	74	43	39	34	13
	Consumo de la leña (kg)	1.533	2.388	1.002	1.187	0.774

La verificación de los supuestos de distribución normal del error, la varianza constante e independencia de la varianza fueron verificados.

Solo se muestra la distribución normal en la Figura 10 para el consumo de combustible.

Figura 8. Verificación de normalidad en los residuos



El tiempo de ebullición (Figura 11) presenta una superficie de respuesta muy similar al CC (Figura 9). El menor tiempo de ebullición de 13 min (2.6 min/l agua) fue obtenido en el tratamiento 8 (Tabla 12) y le corresponde a la mayor cantidad de leños (4), compuerta parcialmente abierta y 17% de humedad. Esta

combinación corresponda a la máxima potencia registrada (Figura 12) y corresponde al 70% del mejor tiempo de ebullición del fogón (3.71 min/l agua). En la variable de respuesta potencia media, solo la cantidad de leños presenta un efecto estadísticamente significativo (Valor-P de 0.001 al 95% de confianza).

Figura 9. Tiempo de ebullición de 5 l de agua

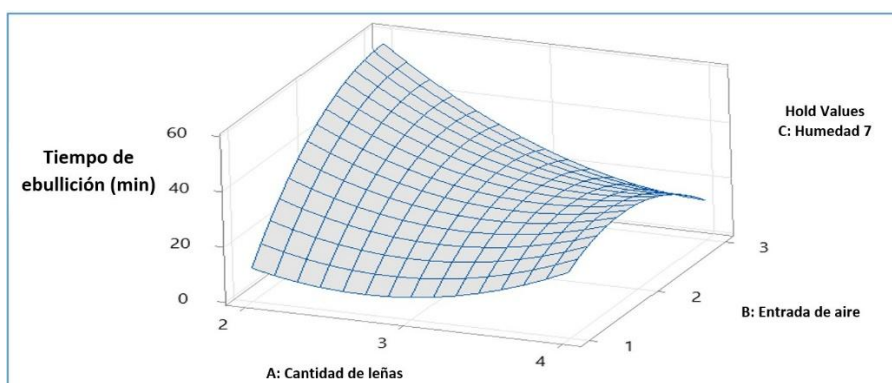
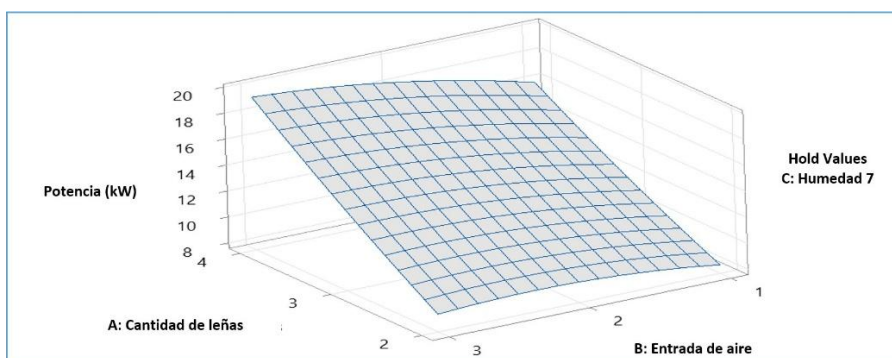


Figura 10. Potencia media entregada por el combustible en el tiempo de ebullición de 5 l de agua



En cuanto a la eficiencia térmica, el ANOVA muestra que con un nivel de confianza del 94% (Tabla 15), el efecto principal (B) de entrada de aire y el efecto cuadrático (B*B) tienen un efecto significativo en la eficiencia térmica. Así también el efecto cuadrático de la humedad

(C*C) y la interacción A*B. Por jerarquía de los efectos, los tres factores A, B y C tienen efectos importantes en la respuesta de eficiencia térmica. El modelo de regresión (Ecuación 6) presenta un coeficiente de correlación aceptable $R^2 = 90.65$.

Tabla 10. Tabla del análisis de la varianza (ANOVA) para la eficiencia térmica

Fuente	G.L.	Adj SS	Adj MS	Valor de F	Valor de P
A: Cantidad de leños	1	2.6450	2.6450	1.66	0.254
B: Entrada de aire	1	23.8050	23.8050	14.94	0.012
C: Humedad	1	0.0450	0.0450	0.03	0.873
A*A	1	0.6801	0.6801	0.43	0.542
B*B	1	21.6385	21.6385	13.58	0.014
C*C	1	10.3078	10.3078	6.47	0.052
A*B	1	14.0625	14.0625	8.83	0.031
A*C	1	1.8225	1.8225	1.14	0.334
B*C	1	3.0625	3.0625	1.92	0.224
Error	5	7.9667	1.5933		
Falta de ajuste	3	7.3200	2.4400	7.55	0.119
Pure Error	2	0.6467	0.3233		
Total	14	85.1773			

$\text{Eficiencia Térmica (\%)} = 42.3 - 2.22*A - 19.13*B - 2.374*C - 0.429*A*A + 2.421*B*B + 0.0668*C*C + 1.875*A*B + 0.135*A*C + 0.175*B*C$

La tendencia de mejor eficiencia térmica se muestra en la superficie de respuesta de la Figura 13 y Figura 14. Esta tendencia es similar al consumo de combustible (CC), es decir la compuerta debe usarse en posición cerrada (1), el menor número de leños 2 y la humedad

más baja del 7%. Consecuentemente con la unidad experimental, también en el prototipo se observa que existe aún exceso de aire y puede estar presente en estufas de aspiración natural.

Figura 11. Superficie de respuesta de la eficiencia térmica para A y B, con C fijado en 7%.

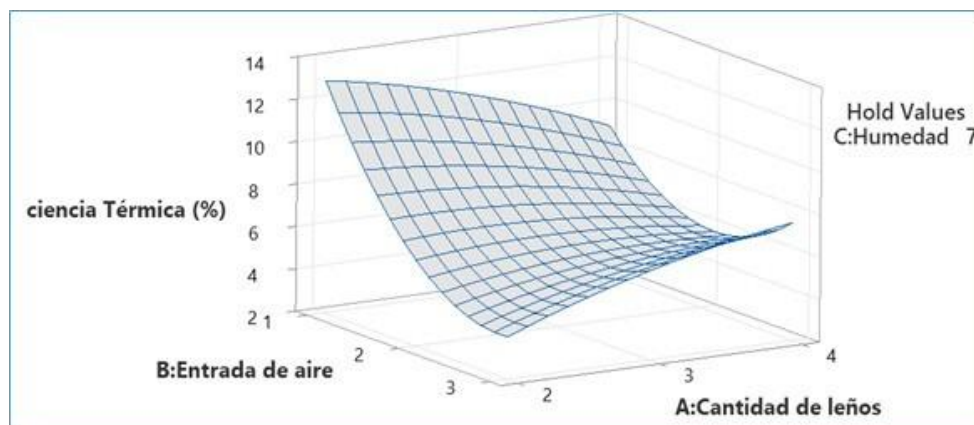
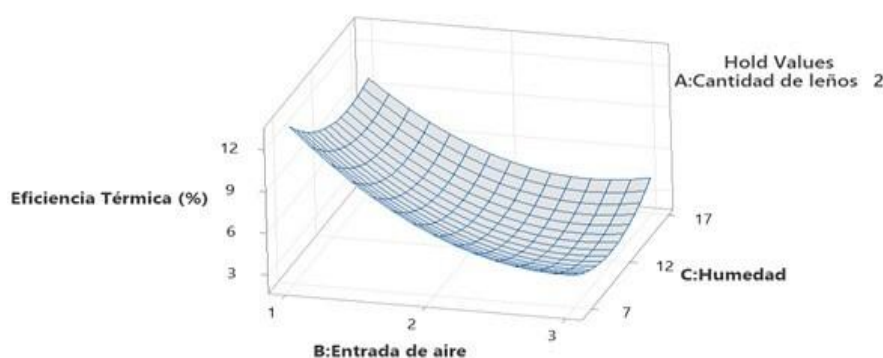


Figura 12. Superficie de respuesta de la eficiencia térmica para B y C, con A fijado en 2 leños



Para una comparación objetiva en eficiencia térmica, es necesario que las comparaciones se realicen por un laboratorio acreditado en la norma NMX-Q-001-NORMEX-2017 o ISO19867-1:2018 y la comparación sea entre estufas tipo plancha o dúplex. Sin embargo, por el estudio del desempeño inicial de la estufa rocket, esta comparación será realizada en el presente documento por datos de literatura. La eficiencia térmica de la estufa Patsari, la cual

es dúplex, fue reportada por Ruiz-García (2018). Para esta prueba se usó como referencia el protocolo 4.2.4 WBT-2014. La eficiencia térmica fue reportada con tres tipos de olla, área de olla en porcentaje del total del comal (A), BP y AP (Tabla 16). La mayor eficiencia del 38% es para el Comal-olla (A-100%) y se interpreta que el 100% indica que no existe área de disipación de calor en el comal fuera de la olla. Esta condición es inalcanzable para estufas dúplex, ya que el doble

propósito implica que las ollas de cocción de alimentos no siempre abarcan toda la zona del comal. Para el caso de la estufa rocket, la proporción de áreas (olla/comal) es 11.2%, aun menor que el valor más

pequeño reportado del 22% de la estufa Patsari y donde se obtuvo el 7% de eficiencia (Tabla 16). El tratamiento 9 de la estufa rocket registró 11.6% de eficiencia térmica.

Tabla 11. Resultados de eficiencia térmica en a la estufa Patsari en tres tipos de ollas (Ruiz-García, 2018).

Tipo de recipiente	Parámetro	Promedio (SD) (%)
Ollas aluminio (A-22%)	TE-AP%	7(1)
	TE-BP%	16(1)
Comal-olla (A-100%)	TE-AP%	31(2)
	TE-BP%	38(7)
Comal-olla (A-70%)	TE-AP%	32(3)
	TE-BP%	29(1)
Comal-olla (A-40%)	TE-AP%	24(2)
	TE-BP%	24(2)
Mylar (A-22%)	TE-AP%	22(3)
	TE-BP%	17(0)
Mylar (A-60%)	TE-AP%	26(3)
	TE-BP%	18(2)

Nota: TE= eficiencia térmica, AP=alto poder, BP=bajo poder, material (Área en % respecto al total del comal).

4.2.2. Prueba de cocinado controlado (PCC)

La Tabla 17 muestra los resultados de las variables respuesta, las cuales pueden ser comparadas con datos de referencia de la Tabla 14. El menor consumo de combustible obtenido en la estufa rocket fue de 0.56 kg de leña por kg de tortilla. En promedio de tres réplicas fue de 0.653 ± 0.08 kg de leña por kg de tortilla, con la compuerta cerrada de acceso de aire secundario. Esto indica que la posición cerrada o parcialmente abierta, no tiene un efecto estadísticamente significativo

sobre el consumo de leña (Tabla 18) y no necesita el acceso de aire secundario. Incluso, puede ser factible regular el acceso de aire primario. El valor obtenido de 0.653 kg es comparable con el menor valor obtenido en el estudio de Cárdenas-Gonzales et al. 2009, donde la estufa Citlalli consumió 0.622 kg de leña, el resto de las estufas consumieron más combustible o leña por cada kg de tortillas.

Tabla 12. Resultados de la Prueba de Cocinado controlado de tortillas

Posición de Compuerta (Tratamiento)	Consumo de combustible CC	Promedio CC por nivel	D.E. CC	Tiempo de elab.	Promedio tiempo de elab.	D.E. Tiempo de elab.	Potencia	Potencia Promedio	D.E. Potencia
	kg	kg	kg	min	min	min	kW	kW	kW
1	0.56	0.653	0.08	6	6.7	0.58	28.18	29.5	1.17
1	0.7			7			30.2		
1	0.7			7			30.2		
2	0.74	0.700	0.06	11	11.5	0.71	20.31	18.5	2.62
2	0.66			12			16.61		

D.E. es la Desviación Estándar

La posición de la compuerta sí fue significativa en el tiempo de elaboración de tortillas al 95% de nivel de confianza (Tabla 19). Esto implica mayor sensibilidad por parte de la respuesta tiempo de elaboración de tortillas. El mejor

tiempo de elaboración fue de 6.7 ± 0.58 min y fue comparativamente más bajo que todas las estufas, incluido el menor valor del fogón de 19 min (Tabla 14). Es decir, en la estufa rocket se elaboró un kilogramo de tortillas con un 35% del mejor tiempo del fogón.

Tabla 13. ANOVA para respuesta consumo de combustible CC

Fuente	G.L.	Adj SS	Adj MS	Valor F	Valor P
Posición Compuerta	1	0.002613	0.002613	0.48	0.537
Error	3	0.016267	0.005422		
Total	4	0.018880			

Tabla 14. ANOVA para respuesta Tiempo de elaboración de tortillas

Fuente	G.L.	Adj SS	Adj MS	Valor F	Valor P
Posición_Compuerta	1	28.033	28.0333	72.09	0.003
Error	3	1.167	0.3889		
Total	4	29.200			

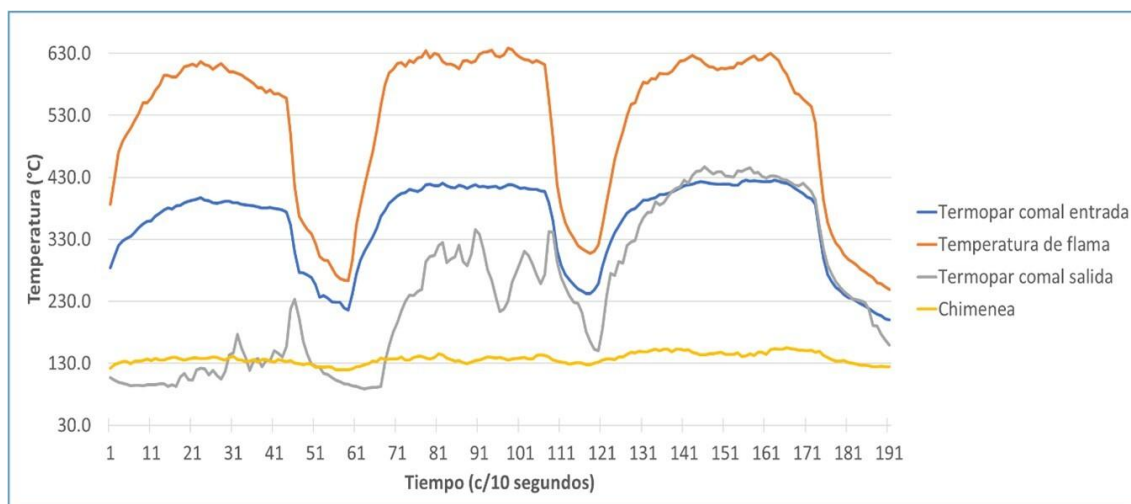
La Figura 15 presenta el registro de temperatura de la estufa para las tres

réplicas de tratamiento 1 o posición de compuerta 1. Cada registro de

temperatura fue realizado en un periodo de 10 s ó 0.1 Hz. La temperatura de la flama durante la prueba estuvo en el orden de 600 a 630°C. La temperatura de la flama en cada réplica fue mantenido contante, debido a que se usaron las mejores condiciones de operación de a estufa y se tuvo un indicador de la temperatura de la flama. Este

indicador no fue usado en la prueba de la Figura 8, donde se presentan instantes de alta y baja temperatura de cámara alta o temperatura de flama. Estos registros altos o bajos de temperatura son el resultado de la alimentación no continua del combustible observados desde el indicador.

Figura 13. Registros de temperatura en los diferentes puntos de la estufa, para la posición de compuerta 1 o cerrada



5. Conclusiones

A través de la caracterización de la unidad experimental se pudo evidenciar que la alimentación en exceso de aire no solamente enfría la estufa, sino que reduce la eficiencia térmica de la estufa. Por lo tanto, la caracterización de cualquier prototipo de estufa rocket que incluya el suministro de aire debe ser una actividad imprescindible.

En el estudio del desempeño del prototipo se usaron cuatro variables respuesta y tres factores o variables independientes. Los resultados mostraron que tanto la cantidad de combustible, el flujo de aire y la humedad tienen efectos estadísticamente significativos en las variables respuesta: consumo de combustible (leña), tiempo de ebullición y eficiencia térmica. En la

potencia media solo la cantidad de combustible fue significativa.

Bajo esta caracterización ahora es posible seleccionar las condiciones de operación más favorables para su desempeño. La compuerta debe usarse en posición cerrada (1), el menor número de leños (2) y la humedad más baja del combustible en 7%.

En las comparaciones de consumo de combustible (CC) para ebullicir 5 l de agua fue de 0.618 kg de leña, el 43.1% del CC de la estufa Onil. En tiempo de ebullición también la estufa rocket mejoró el indicador con un tiempo del 70% respecto al mejor tiempo del fogón de 3.71 min/l agua. En cuanto a la eficiencia térmica, la comparación fue realizada con la estufa Patsari, la cual presentó una eficiencia térmica del 7% para una razón de áreas olla/comal del 32%. La estufa rocket en su relación más cercana de relación de áreas del 11.2%, la eficiencia térmica fue del 11.6%.

La potencia media es una variable que se menciona en las normas de referencia, pero no se observa la definición de potencia alta, media y baja. Esta variable también fue estudiada y puede asociarse a la

cantidad de leños o cantidad de combustible alimentado a la cámara de combustión, en el tiempo de la prueba. Con las ecuaciones de regresión, se puede manejar los tres niveles de potencia requeridos por la norma ISO19867-1:2018.

Con las pruebas experimentales del prototipo de la estufa rocket se puede determinar que existe un ahorro considerable de combustible de leña para la cocción de alimentos en comparación con algunas estufas del mercado, lo que se traduce también en ahorro de combustible y tiempo de cocinado, así de manera también una reducción de contaminantes. Aunque en las pruebas se realizaron mediciones de CO, CO₂ y PM_{2.5}, tales registros serán analizados en trabajo futuro, debido a que la instrumentación disponible no permitió enlazar las señales con el sistema de adquisición de datos.

El prototipo de estufa rocket aun presenta áreas de oportunidad para optimizar su desempeño como la alimentación continua y el aislamiento térmico en la cámara de combustión, pero ya ofrece un desempeño sobresaliente en su operación, esperando ofrecer una

solución práctica a usuarios clasificados en pobreza energética o pobreza extrema de la zona sureste de México.

Bibliografía

- Ángel-Jiménez, W. J. (2013). Utilización de Energías Renovables en el Medio Rural [Facultad de Ingeniería. Universidad Nacional Autónoma de México]. <http://132.248.9.195/ptd2013/agosto/0700419/0700419.pdf>
- Cárdenas-González, B., Laguna, I., Ángeles-García, F., Lazy-Tamayo, R., Masera-Ceruti, O., Maíz-Larralde, P., Guevara-Sanginés, A., & Becerril-García, J. (2009). Estudio comparativo de estufas mejoradas para sustentar un programa de intervención masiva en México. Convenio INE/ADE-038/2008. Instituto Nacional de Ecología/SEMARNAP.
- Díaz-Jiménez, R., Berrueta-Soriano, V., & Masera-Cerutti, O. (2011). ESTUFAS DE LEÑA. Red Mexicana de Bioenergía, A. C. <https://ecotec.unam.mx/wp-content/uploads/Cuaderno-Tem--tico-de-Estufa-de-Le--a.pdf>
- Enríquez. (2015, noviembre 11). Enríquez. Energía y Sociedad: Estufa Patsari.
- Enríquez. Energía y Sociedad. <http://5adsenriquezraquel.blogspot.com/2015/11/estufa-patsari.html>
- García-Ochoa, R., & Graizbord, B. (2016). Caracterización espacial de la pobreza energética en México. Un análisis a escala subnacional. Economía, Sociedad y Territorio, XVI(51), 289–337.
- Gutiérrez-Pulido, H., & De la Vara Salazar, R. (2008). Análisis y diseño de experimentos (2da ed.). McGraw-Hill.
- HELPS. (2023). Desarrollo Comunitario – HELPS International. Impacto del Programa. <https://www.helpsintl.org/es/desarrollo-comunitario/>
- InfraRural. (2023). Estufa Xalpaneca. CiHub. <https://www.cihub.mx/virtualmind>
- Jaime, E., Moreno, A. L., Grunstein, M., Patiño, V., Illingworth, S. J., O'Neill, S., & Lynen, J. L. (2020). VIVIR A OSCURAS: la pobreza energética en México Razones y soluciones. https://www.mexicoevalua.org/wp-content/uploads/2021/12/pobreza-energetica-ok.pdf?rtbref=rtb_cjoydtbhoq7bothp27e_1714633556004

- Jiménez-Romo, L. M. (2016). Apropiación, uso y adaptación de las Estufas Ahorradoras de Leña en Amatenango del Valle [El Colegio de la Frontera Sur]. <https://ecosur.repositorioinstitucional.mx/jspui/handle/1017/1615>
- MacCarty, N., & Ogle, D. (2010). Fuel use and emissions performance of fifty cooking stoves in the laboratory and related benchmarks of performance'. *Energy for Sustainable Development*, 14(3), 161–171.
- Marquina-Zabalza, E. (2019). Estufas de inercia. Diseño, Asesoramiento y Construcción estufas de leña a medida. Combustión. Estufas de inercia. <https://estufasdeinercia.wordpress.com/proyectos/combustion/>
- Muñoz-Hernández, G., Cruz Pérez, W. V., Quijada Escamilla, F., & Colín Martínez, J. L. (2024). REVISIÓN DEL DESEMPEÑO DE ESTUFAS DE LEÑA. *REVISTA CAPITAL INTELECTUAL*, 10(No, 29), 59–65.
- Ruiz-García, V. M. (2018). Evaluación comparativa del desempeño energético, emisiones intramuros y a la atmósfera de diferentes modelos de estufas eficientes de leña. Universidad Nacional Autónoma de México.
- SEMARNAT. (2010). FOGÓN SIN HUMO Una alternativa: Para las familias que cocinan con leña. Secretaría de Medio ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT Y El Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA)). <http://www.bioenergylists.org/files/MANUAL%20FOGoN%20SIN%20HUMO.pdf>