



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
FACULTAD DE TECNOLOGÍA DE LA INDUSTRIA
INGENIERÍA MECÁNICA

Cocina de Leña tipo Rocket de alta eficiencia y bajo impacto ambiental
en comparación a la Cocina de Leña Convencional

AUTORES

Br. Brandon Joel Saavedra Silva
Br. Clinton Samuel Téllez Mejía
Br. Danny James Robinson Torrez

TUTOR

Ing. María Teresa Castillo Rayo

Managua, 14 de diciembre del 2021

Resumen del tema

El presente trabajo monográfico se trata de la construcción de una cocina mejorada tipo rocket en base a los principios de diseño del Dr. Larry Winiarsky, el cual se centra en mantener un área transversal consistente por donde pasan los gases de combustión para aumentar la eficiencia en las cocinas de leña.

Esta construcción comprende a la vez de una evaluación por transferencia de calor en estado estacionario para la elección del material aislante a utilizar en base a la pérdida de temperatura que hay entre la cámara de combustión y el borde externo del cuerpo de la cocina, teniendo en cuenta para estos cálculos, el valor máximo de temperatura alcanzado dentro de la cámara de combustión. En la evaluación se utilizaron dos métodos diferentes para obtener el resultado teniendo en cuenta siempre que en la conducción de calor por conducción la transferencia de calor es la misma en todos los puntos es por eso que en el documento se iguala la razón de transferencia de calor de métodos numéricos y la transferencia de calor por factor de forma por lo cual se demuestra que la piedra pómez es el material aislante que más retiene el calor en comparación a los otros.

La evaluación energética de esta cocina se realizó mediante la prueba de ebullición de agua 4.2.3. (WBT), en la cual los datos que se toman para medir la eficiencia energética de una cocina de leña son: el tiempo que le lleva a la cocina llevar 5 litros de agua a 100°C, la cantidad de carbón generado, cenizas y peso de leña sin quemar en cada una de las pruebas. En esta investigación se evaluaron la cocina tipo rocket y una cocina convencional de tres piedras obteniendo como resultado que la cocina rocket es más eficiente que la cocina convencional a como se muestra en el estudio.

CONTENIDO

- I. INTRODUCCIÓN..... 1

- II. ANTECEDENTES 3

- III. JUSTIFICACIÓN 4

- IV. OBJETIVOS 5
 - Objetivo General*..... 5

 - Objetivos Específicos* 5

- V. MARCO TEÓRICO..... 6
 - 5.1. COCINAS MEJORADAS..... 6
 - 5.1.1. *Descripción de la cocina limpia tipo Rocket* 6

 - 5.2. TEORÍA DE LAS COCINAS DE LEÑA 7
 - 5.2.1. ***Eficiencia en la combustión*** 7

 - 5.2.2. ***Eficiencia de intercambio térmico*** 8

 - 5.2.3. ***Seguridad en cocinas mejoradas*** 8

 - 5.2.4. ***Estrategias de diseño de cámaras de combustión en cocinas mejoradas*** 8

5.2.5.	Accesorios de las cocinas mejoradas	9
5.3.	TRANSFERENCIA DE CALOR	10
5.3.1.	Transferencia estacionaria	10
5.3.2.	Mecanismo de transferencia de calor	10
5.4.	WATER BOILING TEST (WBT).....	14
5.4.1.	<i>Descripción de la Prueba de Ebullición de Agua (WBT).....</i>	14
VI.	DIMENSIONAMIENTO Y CONSTRUCCIÓN DE COCINA ROCKET.....	17
6.1.	PRINCIPIOS DE DISEÑO DE COCINAS LIMPIAS	17
6.1.1.	<i>Área transversal de cámara de combustión.....</i>	19
6.2.	DIMENSIONAMIENTO DE CÁMARA DE COMBUSTIÓN	23
6.3.	DIMENSIONAMIENTO DE CUERPO DE COCINA LIMPIA	26
6.4.	CONSTRUCCIÓN DE CÁMARA DE COMBUSTIÓN	34
6.5.	CONSTRUCCIÓN DE CUERPO DE COCINA.....	36
6.5.1.	<i>Modificaciones en la construcción para ensamblado de piezas</i>	37
6.5.2.	<i>Materiales utilizados en la construcción de cocina limpia</i>	37
VII.	SELECCIÓN DE AISLAMIENTO.....	38

7.1.	RAZÓN DE TRANSFERENCIA DE CALOR.....	38
7.1.1.	<i>Coeficiente convectivo de transferencia de Calor (h)</i>	39
7.1.2.	<i>Cálculo de caudal por tiro natural</i>	41
7.1.3.	<i>Diámetro hidráulico</i>	42
7.1.4.	<i>Velocidad de descarga del fluido</i>	43
7.1.5.	<i>Viscosidad dinámica</i>	44
7.1.6.	<i>Número de Reynolds</i>	44
7.1.7.	<i>Número de Prandtl</i>	45
7.1.8.	<i>Número de Nusselt</i>	46
7.1.9.	<i>Coeficiente de convectividad</i>	46
7.2.	TRANSFERENCIA DE CALOR BIDIMENSIONAL.....	47
7.2.1.	<i>Ecuación de diferencias finitas</i>	48
7.3.	CONDUCCIÓN DE CALOR POR FACTOR DE FORMA.....	51
7.4.	MATERIALES AISLANTES	52
7.5.	RAZÓN DE TRANSFERENCIA	54
VIII.	PRUEBA DE EBULLICIÓN DE AGUA (WBT)	54

8.1.	REQUERIMIENTOS PARA MEDICIÓN DE DATOS	54
8.2.	PREPARACIÓN DE PRUEBA.....	59
8.2.1.	<i>Espacio de trabajo</i>	59
8.2.2.	<i>Equipo necesario</i>	60
8.3.	PRUEBA	61
8.3.1.	<i>Fase preliminar</i>	61
8.3.2.	<i>Fase I. Inicio en frío</i>	61
8.3.3.	<i>Fase II. Inicio en caliente</i>	62
8.3.4.	<i>Fase III. Baja potencia, hervir a fuego lento</i>	64
IX.	RESULTADOS	65
9.1.	RESULTADOS DE PRUEBAS WBT	65
9.1.1.	<i>Tiempo para llevar a ebullición 5 litros de agua</i>	67
9.1.2.	<i>Eficiencia térmica</i>	67
9.1.3.	<i>Combustible consumido</i>	68
9.1.4.	<i>Tasa de combustión</i>	69
9.1.5.	<i>Potencia</i>	69

X.	CONCLUSIONES.....	71
XI.	RECOMENDACIONES	72
XII.	BIBLIOGRAFÍA.....	73
XIII.	ANEXOS	76

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Temperatura durante fases de prueba de ebullición Fuente: Nordica McCarthy	15
Figura 2. Estufa típica de Winiarski Fuente: (ARC, p. 18)	19
Figura 3. Geometría de la cámara de combustión	25
Figura 4. Diseño de cámara de combustión	25
Figura 5. Cenicero	30
Figura 6. Cuerpo inferior de cocina tipo rocket.....	31
Figura 7. Compartimiento de olla interior	31
Figura 8. Separadores.....	32
Figura 9. Plataformas	34
figura 10. Trazado de baldosa de barro	35
figura 11. Cocina mejorada tipo Rocket	36
Figura 12. Diámetro hidráulico para diferentes formas geométrica Fuente: (Cengel, 2011, p. 468)	43
Figura 13. Red de Nodos Fuente: (Incropera, 2011, p. 213)	47

Figura 14. Conducción en un Nodo Interno desde Nodos Adyacentes Fuente: (Incropera, 2011, p. 217)	48
Figura 15. Disposición de puntos nodales de cámara de combustión.....	49
Figura 16. Ecuaciones resultantes de cámara de combustión	49
Figura 17. Matrices resultantes de cámara de combustión	50
Figura 18. Factor de forma para canales cuadrados Fuente: (Incropera, 2007, p. 210)	51
Figura 19. Sensores MQ7 y MQ135 Fuente: Datasheet	56
Figura 20. Gráfica potencial del sensor MQ135	57
Figura 21. Gráfica potencial del sensor MQ7	57
Figura 22. Gráfica de tiempo de ebullición de agua	67
Figura 23. Gráfica de eficiencia térmica	68
Figura 24. Combustible consumido en la realización de las pruebas.....	68
Figura 25. Tasa de combustión	69
Figura 26. Potencia entregada	70

LISTA DE TABLAS

Tabla 3. Área transversal para cámara de combustión cuadrada (ARC. P.19).....	20
Tabla 4. Área transversal para cámaras de combustión circulares (ACR.p.21)	21
Tabla 5. Tamaños de los espacios sugeridos para el diseño de la cámara de combustión	23
Tabla 7. Resultados de espacios requeridos entre la olla y el borde de la cámara de combustión.....	28
Tabla 8. Separación de la falda con respecto a la olla.	29
Tabla 9. Datos requeridos para dimensionamiento de plataforma de hornillas	33
Tabla 10. Materiales utilizados para la construcción	38
Tabla 11. Temperatura interior y exterior de la cámara de combustión	50
Tabla 12. Factores de forma para los diferentes cuerpos de la cocina	52
Tabla 13. Conductividad térmica para materiales evaluados	52
Tabla 14. Temperatura Nodos Según Material Aislante	53
Tabla 15. Gases a los que son sensibles los sensores Fuente: Datasheet MQ7 y MQ135	55

Tabla 16. Resultados para programa Arduino.....	59
Tabla 17. Resultados del WBT por fases de cocina tradicional.....	65
Tabla 18. Resultados de WBT por fases de cocina tipo rocket	66

I. Introducción

El cocinar con leña es una de las formas más difundidas de preparar alimentos. Según The Global Alliance for Clean Cookstoves. En Nicaragua el 56.5% de la población tanto en área rural como urbana cocinan con este tipo de combustible. Tanto es así que según el Ministerio de Energía y Minas (MEN) la leña ocupa el 45.8% del consumo final de energía del país y esta es utilizada casi exclusivamente en los hogares para la cocción de alimentos.

La forma de cocción tradicional consiste en una cocina convencional de leña en la cual se consume una gran cantidad de combustible y produce emisiones de partículas y gases de combustión que afectan negativamente la salud humana, fundamentalmente de mujeres y niños al pasar más tiempo en sus propios hogares. (Proleña, 2013, P. 1)

En el marco de la Estrategia Nacional de Leña y carbón vegetal de Nicaragua para el periodo 2011-2025 se incide en la necesidad de mejorar la eficiencia energética de la leña y carbón vegetal. Por ello el MEM precisa de la construcción de cocinas mejoradas cuya finalidad es reducir el uso de combustible y proveer una combustión más limpia, lo cual traerá un mejor impacto ambiental y socioeconómico, para las familias del área rural y peri-urbano del país.

En este sentido el presente estudio pretende implementar la construcción de una cocina mejorada, utilizando los principios de diseño del Dr. Larry Winiarski quien desarrollo la Rocket Stoves (cocina cohete), además de evaluar los materiales que se usaran como aislantes mediante un análisis de transferencia de calor determinando la perdida de calor que podría tener la cocina a una determinada temperatura dentro de la cámara de combustión.

Para determinar la eficiencia de esta propuesta de cocina mejorada se comparará con la cocina convencional de leña de fuego abierto, mediante la prueba de ebullición de agua (WBT) la cual es una prueba de laboratorio que se puede usar

Cocina de Leña tipo Rocket de alta eficiencia y bajo impacto ambiental en comparación a la Cocina de Leña Convencional

para medir que tan eficientemente una estufa usa combustible para calentar agua en una olla y la cantidad de emisiones producidas durante la cocción.

II. Antecedentes

La primera investigación sobre este tema fue hecha por el Dr. Samuel Baldwin quien resumió años de experiencia en África occidental con su libro, **Biomass Cookstove: Engineering Desing, Developmente and dissemination (1987)** (estufas con biocarburantes: ingeniería del diseño, elaboración y distribución), donde se da a conocer estrategias que un diseñador de estufas puede utilizar para mejorar las estufas tradicionales y detalla la síntesis de diseño que ha creado el Dr. Larry Winarski en el cual otorga información técnica de apoyo para el diseñador.

En la Universidad Nacional de Ingeniería de Managua, Marcos Antonio Solís Pérez, David Horacio Padilla Pérez, por medio de su monografía: **Evaluación energética de cocinas mejoradas a través del método Water Boiling Test 4.2.3 (2016)**, ellos elaboraron una línea base de parámetros de eficiencia energética para la creación de la norma técnica del país para la evaluación de cocinas limpias.

En la investigación científica de MSc. Jon Fernández Luzuriaga de la Universidad del País Basco, **Optimización bajo criterios de la eficiencia de transferencia de calor de cocinas autoconstruidas por comunidades rurales de Nicaragua (2012)**, se mejoró la eficiencia del fogón tradicional incrementando la transferencia de calor de los gases de escape a los alimentos a cocinar reduciendo eficazmente el consumo de leña.

En la misma labor de búsqueda se encontró el artículo científico publicado Acta de la XXXVIII Reunión de Trabajo de la Asociación Argentina de Energías Renovables y Medio Ambiente Vol. 3, **Diseño, construcción y evaluación de una cocina a leña para la agricultura familiar (2015)** elaborado por E. Batista, S. Justianovich y V. Passamai, quienes retomaron aspectos constructivos presentes en un brasero tipo rocket, calculando el exceso de aire necesario y volumen de la cámara de combustión a partir de los requerimientos energéticos para una olla estándar de 9.5 litros.

III. Justificación

En el sector rural de Nicaragua la mayoría de las familias tienen una cocina convencional o de fuego abierto, las cuales, generan grandes cantidades de materia particulada de monóxido de carbono debido a la ineficiencia de combustión en las mismas, este método tradicional de cocción de alimento dentro de sus casas afecta directamente a todos los miembros de la familia en:

- Salud y economía.
- Suciedad en paredes y techo de la vivienda.
- Alto consumo de leña.
- Contaminación del ambiente dentro y fuera de la vivienda.

Aunque la utilización de la biomasa no es la principal causa de deforestación, el uso insostenible de la misma como combustible está causando la degradación ambiental en los países en vías de desarrollo en los que se utiliza el 90% de esta energía para cocinar los alimentos. En Nicaragua el Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales (MARENA) estimó en 2008 que se están perdiendo 70,000 hectáreas (Ha) de bosques anualmente, mientras que la tasa de reforestación apenas llega a las 15,000 hectáreas (Ha) anuales. En el marco de la estrategia nacional de leña y carbón vegetal de Nicaragua para el periodo 2011-2025 se incide en la necesidad de mejorar la eficiencia energética en la utilización de la leña y del carbón vegetal, y propone para ello, la distribución de cocinas mejoradas en hogares rurales y peri-urbanos.

Por este motivo en nuestro país existe la demanda de construcción cocinas mejoradas que sean accesibles para los hogares de la zona rural del país, he aquí la importancia de este estudio monográfico.

IV. Objetivos

Objetivo General

Construir Cocina de leña tipo Rocket de alta eficiencia y bajo impacto ambiental en comparación a la cocina de leña convencional

Objetivos Específicos

- Describir principios de diseño de cocinas mejoradas de leña de Baldwin y Winiarski para establecer los parámetros iniciales del estudio.
- Calcular razón de transferencia de calor en la cocina tipo rocket para determinar los materiales en base a costo de construcción y grado de aislamiento térmico.
- Comparar la eficiencia energética entre la cocina tipo Rocket y la cocina convencional de leña utilizando el protocolo WBT 4.2.3.

V. Marco Teórico

5.1. Cocinas Mejoradas.

Proleña (2013) describe la cocina mejorada como: “un sistema de cocción de alimentos que permite ahorrar combustible (generalmente leña) y a la vez reduce significativamente la cantidad de emisiones nocivas para la salud humana” (p.6).

5.1.1. Descripción de la cocina limpia tipo Rocket.

La estufa de alta eficiencia Rocket Stove (Cocina Cohete) es la herramienta ideal para asegurar la sostenibilidad del medio ambiente debido a su funcionabilidad y facilidad de construcción, el nombre de esta cocina deriva del hecho que la combustión y la expulsión horizontal del humo genera un efecto cohete.

La cámara de combustión de esta cocina mejorada se puede construir de dos formas con principios similares:

Cámara de combustión en L: Es la más común y se utiliza principalmente como cocina, es más fácil de construir y requiere menos material.

Cámara de combustión en J: Se utiliza comúnmente como calefacción de viviendas, aunque también se puede utilizar para cocinar. Una de las principales ventajas de este modelo es que puede ser alimentada con menor frecuencia, pero en cambio su construcción es más compleja. (Rocket Stoves alrededor del mundo, p. 1, 2)

En el presente estudio la cámara de combustión que se usará será en L, ya que la alimentación de la misma puede ser graduada y esto no se logra hacer en la cámara de combustión en J por lo que su alimentación es por gravedad y puede ocasionar algunos impedimentos al querer retirar el combustible de la cámara de combustión.

5.2. Teoría de las cocinas de leña

Una cocina convencional de leña de fuego abierto puede alcanzar un 90% de eficacia a la hora de convertir madera en calor. Pero solo una pequeña porción, de 10% a 40% del calor producido llega a la olla. Mejorar la eficiencia de la combustión no hace que la estufa use menos combustible, por otra parte, mejorar la eficiencia del intercambio térmico a la olla resulta en una gran diferencia. (Aprovecho Research Center, p. 7)

5.2.1. Eficiencia en la combustión

Mejorar la eficiencia de combustión es necesario para reducir el humo y las emisiones dañinas que perjudican a la salud.

El Aprovecho Research Center en su investigación de los principios de diseño para estufas de cocción con leña da las siguientes recomendaciones para mejorar la eficiencia de la combustión:

- Asegurarse que circule suficiente aire por el fuego.
- Aislar el fuego para que queme más caliente,
- Evitar usar materiales pesados o fríos alrededor de la cámara de combustión.
- Levantar leña que está quemando para que el aire pase por debajo.
- Uso de una chimenea corta y aislada encima del fuego.
- Limitar la entrada de aire frío a la cámara de combustión al crear una abertura de aire lo más pequeña posible. (p. 7)

5.2.2. Eficiencia de intercambio térmico

Mejorar la eficiencia del intercambio térmico puede reducir seriamente el uso de combustible. El fuego es naturalmente eficaz, pero las ollas no captan muy bien el calor por que pasan el calor ineficientemente.

El Aprovecho Research Center en su investigación de los principios de diseño para estufas de cocción con leña da las siguientes recomendaciones para mejorar la eficiencia de la eficiencia térmica:

- Aumentar la velocidad de los gases calientes que salen por la chimenea y rozan la olla.
- Utilizar ollas de metal en lugar de cerámicas.
- Utilizar ollas anchas con diámetros grandes.

5.2.3. Seguridad en cocinas mejoradas

Una de las funciones más importantes en las cocinas mejoradas es el evitar las quemaduras. Las quemaduras son bastantes comunes en casas en las que se utiliza fuego y pueden ser mortales o desfigurar. para proteger a la familia, la temperatura del cuerpo de la estufa debe de ser menor a 70°C dado que a esa temperatura se producen quemaduras instantáneas. La estufa y las ollas deben de estar siempre estables y el fuego debe estar rodeado por el cuerpo de la cocina para evitar accidentes.

5.2.4. Estrategias de diseño de cámaras de combustión en cocinas mejoradas

Los dos diseñadores de cocinas mejoradas enfocan de diferente forma el problema del tamaño del canal. Winiarski, en Rocket Stove Desing Principles (principios del diseño de cocinas Rocket), (1997), recomienda que los técnicos

empiecen a diseñar cocinas mejoradas manteniendo un área transversal constante en toda la estufa. Establece el área en la abertura de combustible, o cargador de combustible y crea a continuación los espacios apropiados alrededor de las ollas, conforme a la necesidad de mantener un área constante en todo momento. Baldwin planteo en su libro Biomass Cookstove: Engineering Design, Development and dissemination (estufas con biocarburantes: ingeniería del diseño, elaboración y distribución), (1987), que el diseñador debe de seleccionar el poder máximo para la cocina mejorada, según el nivel de poder fijo seleccionado se calcula el tamaño del canal.

5.2.5. Accesorios de las cocinas mejoradas

- **Cámara de combustión:** La cámara de combustión es el recinto donde se produce la combustión de la leña. Pueden ser construidas con piezas de material refractario (arcilla cocida), adobes de barro mejorado o chapas metálicas.
- **Armazón o base de la cocina:** Es la estructura donde se instalan los diferentes componentes y accesorios de la cocina, puede ser elaborada con materiales de albañilería local (adobe y barro, cemento y ladrillos, etc).
- **Chimenea:** Es la que permite mantener una adecuada circulación del aire dentro de la cámara de combustión y evacuar los gases de forma eficaz.
- **Rejilla o plataforma de leña:** Se utiliza como soporte de leña al interior de la cámara de combustión, este también es el que permite la entrada de aire a la combustión al mismo tiempo de almacenar las cenizas que se producen.

- **Chaqueta o falda:** la chaqueta o falda es una pared que permite crear un espacio entre la olla, su finalidad es que los gases calientes no se escapen al ambiente y rosen las áreas laterales de la olla.
- **Soporte de ollas:** Son apoyos que estabilizan a la olla, el área de los mismos debe de ser pequeña para no escudar la olla de los gases calientes, reduciendo de ese modo la transferencia de calor.

5.3. Transferencia de calor

La transferencia de calor es la ciencia que trata de predecir el intercambio de energía que puede tener lugar entre cuerpos materiales, como resultado de una diferencia de temperatura. La termodinámica enseña que esta transferencia de energía se define como calor. La ciencia de la transferencia de calor pretende no solo explicar cómo la energía térmica puede ser transferida, sino también predecir la rapidez con la que, bajo ciertas condiciones específicas, tendrá lugar esta transferencia. (Holman, 1998, p. 1)

5.3.1. Transferencia estacionaria

El estudio de transferencia de calor de la cocina mejorada como tal, es estacionario, ya que los procesos transitorios se analizan mediante la variación de temperatura respecto al tiempo, pero para poder llevar a cabo este análisis, se tomará en cuenta únicamente la temperatura máxima dentro de la cámara de combustión, así como la temperatura que debe de tener el cuerpo de la cocina para que sea segura al usuario.

5.3.2. Mecanismo de transferencia de calor

En transferencia de calor se reconocen por lo general tres modos distintos de transmisión de calor: por conducción, por radiación y por convección. Hablando

Cocina de Leña tipo Rocket de alta eficiencia y bajo impacto ambiental en comparación a la Cocina de Leña Convencional

de manera estricta, solo la conducción y la radiación se deben clasificar como procesos de transferencia de calor, debido a que solo estos dos mecanismos dependen para su operación de la simple existencia de una diferencia de temperatura, pero como la convección también se realiza transmisión de energía de regiones de temperatura mayor a regiones de temperatura menor, el término de transferencia de calor por convección se ha aceptado generalmente. (Kreith, Manglik y Bohn, p. 6)

5.3.2.1. Transferencia de calor por conducción

Según Cengel, Yunus y Afshin en su libro transferencia de calor y masa, cuarta edición: “La conducción es la transferencia de energía de las partículas más energéticas de una sustancia hacia las adyacentes menos energéticas”. (p. 17)

En este estudio, la transferencia de calor por conducción describe la cantidad de calor que será perdido, al ser entregado al exterior. Esta tasa de calor dependerá de los materiales que conformen la cámara de combustión y las capas externas del fogón, ya que, al presentar materiales de alta conductividad térmica, se entregará más energía calorífica al ambiente; por lo que el aprovechamiento de energía en la olla será menor, aumentando el tiempo de cocción de los alimentos y la cantidad de leña a usar.

$$\dot{Q}_{cond} = KA \frac{T_1 - T_2}{\Delta x} \quad \text{Ecuación 1}$$

Razón de transferencia de calor por conducción. Obtenido de **Transferencia de Calor y Masa: Fundamentos y Aplicaciones** (p. 18), por Yunus A. Cengel, 2011, 4ª. ed. McGraw Hill.

Donde

Cocina de Leña tipo Rocket de alta eficiencia y bajo impacto ambiental en comparación a la Cocina de Leña Convencional

\dot{Q}_{cond} = calor transferido por conducción

K= conductividad térmica del material

Δx = espesor del material

$(T_1 - T_2)$ = la diferencia de temperatura.

5.3.2.1.1. Conductividad Térmica k (W/mK)

(Cengel, 2011, p.20) “Es la capacidad del material para conducir calor. Un valor elevado de conductividad térmica indica que el material es un buen conductor de calor y un valor bajo indica que es un mal conductor o material aislante”.

Para determinar la configuración de materiales de las capas que conforman el cuerpo del fogón, se considera la tasa de calor que se pierde por sus paredes debido a conducción; materiales de alta conductividad térmica favorecerán la transferencia de calor al exterior de la cámara de combustión, disminuyendo la concentración y el aprovechamiento de energía.

5.3.2.1.2. Materiales aislantes

Los materiales aislantes térmicos poseen un coeficiente de conductividad térmica bajo, por lo que disipan el calor menos que los de mayor conductividad. Para lograr sistemas aislantes efectivos, materiales son combinados para obtener conductividades aún más bajas.

5.3.2.1.3. Paredes planas compuestas

La cocina dispone varias capas, las cuales están elaboradas de materiales diferentes, con un desplazamiento de energía desde la cámara de combustión al exterior, por lo que la transferencia de calor unidimensional en estado estacionario.

Cada una de las capas de aislamientos que tendrá esta cocina aporta una resistencia térmica, pero si solo se hace con transferencia de calor por conducción la razón de transferencia de calor sería muy alta, por lo cual se tiene que hacer uso de los coeficientes de transferencia de calor por convección y radiación es uno mismo el cual sería un coeficiente de calor combinado, permitiéndonos obtener un valor más real de la transferencia de calor ya que actúan como una resistencia térmica.

5.3.2.2. Transferencia de calor por convección

La convección es el modo de transferencia de energía entre una superficie sólida y el líquido o gas adyacente que está en movimiento y comprende los efectos combinados de la conducción y el movimiento de fluidos. Entre más rápido es el movimiento de un fluido, mayor es la transferencia de calor por convección. (Yunus et al, 2011, p. 25)

$$\dot{Q}_{conv} = h_o A_s (T_s - T_\infty) \quad \text{Ecuación 2}$$

Razón de transferencia de calor por convección. Obtenido de **Transferencia de Calor y Masa: Fundamentos y Aplicaciones** (p. 26), por Yunus A. Cengel, 2011, 4ª. ed. McGraw Hill.

Donde:

h_o = es el coeficiente de transferencia por convección

A_s = área donde la transferencia de calor tiene lugar

$(T_s - T_\infty)$ = diferencia de temperatura.

5.3.2.3. Transferencia de calor por radiación

Según Cengel, Yunus y Afshin en su libro transferencia de calor y masa, cuarta edición: "La radiación es la energía emitida por la materia en forma de ondas

Cocina de Leña tipo Rocket de alta eficiencia y bajo impacto ambiental en comparación a la Cocina de Leña Convencional

electromagnéticas como resultado de los cambios en las configuraciones electrónicas de los átomos o moléculas. (p. 27)

$$\dot{Q}_{emitida} = \varepsilon\sigma A_s T_s^4 \quad \text{Ecuación 3}$$

Razón de transferencia de calor por convección. Obtenido de **Transferencia de Calor y Masa: Fundamentos y Aplicaciones** (p. 26), por Yunus A. Cengel, 2011, 4ª. ed. McGraw Hill.

Donde:

$\dot{Q}_{emitida}$ = Razón de radiación emitida.

ε = Emisividad.

σ = Constante de Stefan-Boltzman.

A_s = Área superficial.

T_s = Temperatura termodinámica.

5.4. Water Boiling Test (WBT)

La prueba de Ebullición de Agua o WBT (WATER BOILING TEST) está diseñado para calcular el rendimiento energético de la cocina en términos de transferencia de calor y eficiencia de la combustión. Mediante de una simulación simple del proceso de hervor de agua con la finalidad de medir cuan eficiente es una estufa en utilizar combustible para calentar el agua en una olla y la cantidad de emisiones producidas durante el proceso. (WBT, 2014.p.3)

5.4.1. Descripción de la Prueba de Ebullición de Agua (WBT)

Según el protocolo WBT (2014), “la prueba de ebullición de agua consta de tres fases que se realizan de manera consecutiva una a la otra. Todo el WBT debe llevarse a cabo al menos tres veces para cada estufa, de manera continua sin interrupciones ya que constituye un conjunto de pruebas WBT”. (p.7)

Cocina de Leña tipo Rocket de alta eficiencia y bajo impacto ambiental en comparación a la Cocina de Leña Convencional

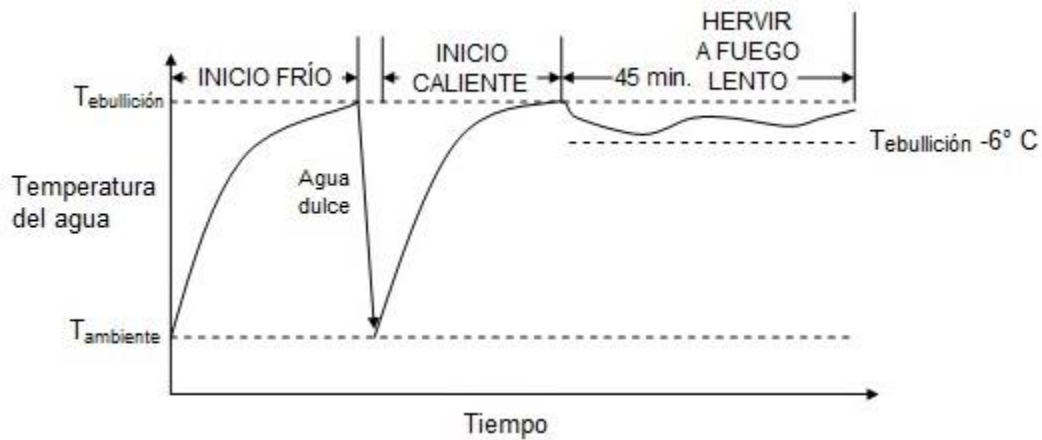


Figura 1. Temperatura durante fases de prueba de ebullición
Fuente: Nordica McCarthy

5.4.1.1. Fase de Alta Potencia de Inicio en Frío de Alto Poder (IFAP)

En esta fase se comienza con la cocina a temperatura ambiente y se utilizan 4 Kg de combustible previamente pesado para hervir una cantidad medida de 5 litros de agua en una olla estándar. Luego se reemplaza el agua hervida con una nueva olla de agua a temperatura ambiente para realizar la segunda fase. (WBT, 2014.p.7)

5.4.1.2. Fase de Alta Potencia de Inicio en Caliente de Alto Poder (ICAP)

Esta fase se lleva a cabo después de la primera fase, mientras la cocina está caliente. Una vez más se utiliza una cantidad de combustible de 4 Kg previamente pesado para hervir una cantidad medida de agua en la olla estándar. Al repetir la prueba con una estufa caliente ayuda a identificar las diferencias en el rendimiento entre una estufa cuando esta fría y cuando está caliente. Esto es importante para las estufas con elevada masa térmica, ya que las mismas pueden mantenerse calientes durante la práctica. (WBT, 2014.p.7)

5.4.1.3. Fase De Hervir a Fuego Lento (FHFL)

Esta fase proporciona la cantidad de combustible requerido para 5 litros de agua y por debajo del punto de ebullición a 94°C durante 45 minutos. Este paso simula el tiempo de cocción de las legumbres o leguminosas que son comunes en gran parte del mundo. (WBT, 2014.p.7)

5.4.2. Descripción de leña de Pithecellobium Arboreum (Quebracho blanco)

El árbol de Lorito de hoja perenne, el cual por lo general crece a una altura de 45 pies o mayor; se caracteriza por su grueso tronco de color marrón oscuro a rojizo y corteza lisa o escamosa. La corona es redonda, ancha, de gran difusión y moderadamente denso. Las ramas jóvenes son ligeramente peludas, llegando a ser suaves con la edad. (TREETWORLD WHOLESale, 2018)

Es una madera de densidad media, contracción volumétrica total moderada, con una relación de contracciones favorables; sus propiedades mecánicas se clasifican de medias a altas; durante el secado presenta defectos leves (curvatura y torcedura); moderadamente resistente al ataque de hongos e insectos; fácil de impregnar con productos preservantes en albura (capa exterior de la leña) y difícil en duramen (parte interna de la leña). (Herrera Alegría & Morales Vargas, 1993)

El quebracho blanco (Pithecellobium Arboreum) tiene un poder calorífico de 7300 Kcal. / Kg (Taramasco, 2008), el cual será tomado como referencia para cumplir los objetivos antes propuestos.

VI. Dimensionamiento y construcción de cocina Rocket.

6.1. Principios de Diseño de Cocinas Limpias

Los principios de diseño de cocinas limpias fueron planteados por el Dr. Larry Winiarski con el fin de proporcionar información técnica de apoyo que los diseñadores pueden utilizar para construir estufas exitosas que combinen una combustión limpia y completa con la optimización del intercambio de calor.

Principio uno: El fuego debe aislarse con materiales livianos con pequeñas cavidades de aire.

El aislamiento mantiene caliente la zona de combustión permitiendo de esta manera reducir los niveles de gases y material particulado, incluso el optar por esta medida asegura que el calor generado por el fuego llegue a la olla en vez de al cuerpo frío de la estufa. (Aprovecho Research Center, p. 12)

Principio dos: Instalar una chimenea corta y aislada directamente encima del fuego. La chimenea corta estimula una fuerte corriente de aire y hace que el fuego aumente su calor, esto se debe a que el humo toca las llamas en la chimenea lo cual permite que se complete la combustión, esta chimenea interna debe tener una altura que sea tres veces el diámetro de su abertura.

Principio tres: Calentar y quemar las puntas de los palos a medida que se meten en el fuego. Un calentamiento irregular en la leña puede provocar humo por lo cual se recomienda que únicamente la madera que se queme debe de estar caliente, esto se debe a que necesita una cantidad apropiada de gas para que arda sin crear carbón humo.

Principio cuatro: Crear temperaturas altas y bajas según la cantidad de leña que se meta en el fuego. (Aprovecho Research Center, p. 13)

Cocina de Leña tipo Rocket de alta eficiencia y bajo impacto ambiental en comparación a la Cocina de Leña Convencional

Principio cinco: Mantener una corriente de aire buena y rápida en todo el carburante.

Principio seis: La falta de corriente de aire en el fuego resulta en humo y exceso de carbón.

Principio siete: La abertura al fuego, el tamaño de los espacios dentro de la estufa por donde pasan los gases calientes y la chimenea externa deben de tener aproximadamente la misma área superficial. Esto se llama mantener una superficie transversal consistente y ayuda a mantener una corriente pareja en la estufa. Una buena corriente no solo mantiene el calor del fuego, sino que también es esencial para que el aire caliente creado por el fuego pueda transferirse efectivamente a la olla. El aire no carga mucha energía por lo cual tiene que pasar mucho aire por la estufa si se debe calentar comida o agua (Aprovecho Research Center, p. 14)

Principio ocho: Usar una reja debajo del fuego. La leña no se puede colocar en el piso de la cámara de combustión por lo que debe pasar aire por debajo de la leña que se están quemando.

Principio nueve: Aislar la trayectoria de los gases calientes. El aislar la trayectoria de estos gases permite un aprovechamiento óptimo del calor generado en la combustión el cual debe de ser utilizado principalmente en la cocción de los alimentos, si la trayectoria de estos gases no se aíslan el calor se esparciría a lugares donde no representa ningún beneficio.

Principio diez: Aumentar el intercambio térmico de la olla con espacios adecuados. Transmitir calor a una plancha o una olla es más fácil con canales pequeños ya que los gases calientes de combustión están forzados a rozar la olla o la plancha. (Aprovecho Research Center, p. 15)

6.1.1. Área transversal de cámara de combustión

Los dos diseñadores de estufas enfocan de manera diferente el problema del tamaño del canal. Winiarski recomienda que los técnicos que empiezan a diseñar cocinas mantengan un área transversal en toda la estufa. Establece el área en la abertura del fuego, o cargador de combustible, y crea a continuación los espacios apropiados alrededor de las ollas, conforme a la necesidad de mantener el área constante en todo momento. El método de Baldwin requiere que el diseñador seleccione el máximo poder para la estufa. Según el nivel de poder fijo seleccionado se calcula el tamaño del canal. En un caso, Winiarski elige el tamaño de la entrada de la leña primero, mientras Baldwin usa el poder de la estufa como punto de inicio. Los espacios en la estufa son determinados por una de estas dos opciones.

6.1.1.1. Método Winiarski

Los siguientes diagramas y cuadros muestran como el tamaño de los canales cerca de la olla o plancha cambia a medida que se agranda la entrada de leña. El Dr. Winiarski aconseja que una abertura de 12cm por 12cm suele bastar para una estufa de una familia. Las aberturas más grandes que permiten el uso de más leña producen fuegos más altos y requieren espacios y canales más grandes.

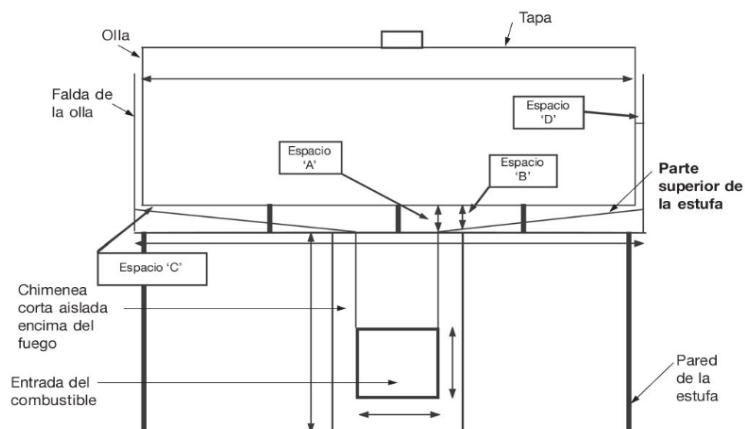


Figura 2. Estufa típica de Winiarski
Fuente: (ARC, p. 18)

Cocina de Leña tipo Rocket de alta eficiencia y bajo impacto ambiental en comparación a la Cocina de Leña Convencional

Establecer una misma área transversal dentro de una estufa asegura que habrá suficiente corriente de aire para mantener una buena combustión mientras se crean canales que mejoren la eficiencia del intercambio térmico. Eso significa que la abertura de la cámara de combustión, el espacio debajo de la olla o la plancha y la chimenea son del mismo tamaño (cantidad constante en centímetros cuadrados) aunque sus formas sean diferentes. Winiarski aconseja a los diseñadores de estufas que construyan prototipos que mantengan un área transversal constante para optimizar el flujo de aire que pasa por la estufa, la **tabla 1** y **tabla 2** muestra algunas de las dimensiones de cámara de combustión que ya han sido definidas.

Tabla 1. Área trasversal para cámara de combustión cuadrada (ARC. P.19)

Cámara de combustión 12x12				
tamaño de la olla(cm)	20	30	40	50
Espacio A (cm)	3	3	3	3
Espacio B (cm)	2,5	2.5	2.5	2.5
Espacio C (cm)	2	1.5	1.1	0.9
Espacio D (cm)	2.1	1.5	1.1	0.9
Cámara de combustión 14x14				
tamaño de la olla(cm)	20	30	40	50
Espacio A (cm)	3.5	3.5	3.5	3.5
Espacio B (cm)	3.1	3.1	3,1	3.1
Espacio C (cm)	3.1	2.1	1.6	1.2
Espacio D (cm)	2.7	2	1.5	1.2
Cámara de combustión 16x16				
tamaño de la olla(cm)	20	30	40	50
Espacio A (cm)	NA	4	4	4
Espacio B (cm)	NA	3.7	3.7	3.7
Espacio C (cm)	NA	2.7	2	1.6

Cocina de Leña tipo Rocket de alta eficiencia y bajo impacto ambiental en comparación a la Cocina de Leña Convencional

Espacio D (cm)	NA	2.5	1.9	1.6
Cámara de combustión 18x18				
tamaño de la olla(cm)	20	30	40	50
Espacio A (cm)	NA	4.5	4.5	4.5
Espacio B (cm)	NA	4.3	4.3	4.3
Espacio C (cm)	NA	3.4	2.6	2.1
Espacio D (cm)	NA	3.1	2.4	2
Cámara de combustión 20x20				
tamaño de la olla(cm)	20	30	40	50
Espacio A (cm)	NA	5	5	5
Espacio B (cm)	NA	4.9	4.9	4.9
Espacio C (cm)	NA	4.2	3.2	2.5
Espacio D (cm)	NA	3.7	3	2.4

Tabla 2. Área transversal para cámaras de combustión circulares (ACR.p.21)

Cámara de combustión 12cm				
tamaño de la olla(cm)	20	30	40	50
Espacio A (cm)	3	3	3	3
Espacio B (cm)	2	2	2	2
Espacio C (cm)	1.8	1.2	0.9	0.7
Espacio D (cm)	1.6	1.2	0.9	0.7
Cámara de combustión 14cm				
tamaño de la olla(cm)	20	30	40	50
Espacio A (cm)	3.5	3.5	3.5	3.5
Espacio B (cm)	2.4	2.4	2.4	2.4
Espacio C (cm)	2.4	1.6	1.2	0.9
Espacio D (cm)	2.2	1.5	1.2	0.9

Cocina de Leña tipo Rocket de alta eficiencia y bajo impacto ambiental en comparación a la Cocina de Leña Convencional

Cámara de combustión 16cm				
tamaño de la olla(cm)	20	30	40	50
Espacio A (cm)	NA	4	4	4
Espacio B (cm)	NA	2.9	2.9	2.9
Espacio C (cm)	NA	2.1	1.6	1.3
Espacio D (cm)	NA	2	1.5	1.3
Cámara de combustión 18cm				
tamaño de la olla(cm)	20	30	40	50
Espacio A (cm)	NA	4.5	4.5	4.5
Espacio B (cm)	NA	3.4	3.4	3.4
Espacio C (cm)	NA	2.7	2	1.6
Espacio D (cm)	NA	2.7	1.9	1.6
Cámara de combustión 20cm				
tamaño de la olla(cm)	20	30	40	50
Espacio A (cm)	NA	5	5	5
Espacio B (cm)	NA	3.8	3.8	3.8
Espacio C (cm)	NA	3.3	2.5	2
Espacio D (cm)	NA	3	2.4	1.9

6.1.1.2. Método Baldwin: el poder del fuego determina el tamaño del canal

Como indica la tabla 5 los métodos de Balwin y Winiarski parecen crear espacios similares en el tamaño. El cuadro es una aproximación cuyo objetivo es servir de guía para la relación entre el poder del fuego, la cantidad de leña usada por hora, el largo y ancho del canal y la eficiencia de la estufa.

Tabla 3. Tamaños de los espacios sugeridos para el diseño de la cámara de combustión

Madera quemada por hora (kg)	Espacio entre olla y falda (mm)	Largo de canal (cm)	Eficiencia térmica de la estufa (%)	Poder del fuego (kW)
0.50	8	20	40	2.8
0.75	10	20	35	4.1
1.00	11	20	30	5.5
1.25	12	20	28	6.9
1.50	13	20	26	8.3
1.75	14	20	25	9.6

6.2. Dimensionamiento de cámara de combustión

La cocina mejorada que se plantea en este estudio es de uso domiciliario, por lo tanto, no necesita tener una cámara de combustión de grandes dimensiones para cumplir con su función, siguiendo las recomendaciones el área transversal de la cámara será de 12x12 cm la cual es una abertura que suele bastar para una estufa familiar.

Los parámetros para el diseño de la cámara de combustión están basados en los principios de diseño cocinas mejoradas del Dr. Winiarski indicados a continuación:

Chimenea interna: el segundo principio establece que la altura de la chimenea interna debe de ser por lo menos tres veces su diámetro, lo cual permite una combustión más limpia debido a que el humo toca las llamas dentro de la cámara de combustión reduciendo las emisiones. Al tener un diámetro hidráulico de 12cm en la cámara de combustión, esto nos da como resultado que la altura de la chimenea interna será de 36cm.

Cocina de Leña tipo Rocket de alta eficiencia y bajo impacto ambiental en comparación a la Cocina de Leña Convencional

Piso de cámara de combustión: la longitud del piso será de 24cm y está dada desde la abertura donde entrara el combustible en este caso la leña, hasta el principio de la abertura del acumulador de cenizas, esto permitirá que el combustible tenga el apoyo suficiente en la cámara y se evita que los leños que estén ardiendo caigan al piso y provoquen algún accidente, por lo general en la construcción de cocinas mejoradas se opta por una longitud menos amplia que después es compensada con una plataforma que sirve de apoyo.

Soporte de leña: el soporte de leña tendrá una separación 3 cm con respecto al piso de la cámara de combustión y su longitud será de 24 cm desde la abertura de entrada de combustible hasta el inicio de la rejilla, este mismo se utiliza para mantener una corriente apropiada de aire por debajo del fuego, lo cual ayudará a mantener altas temperaturas en la estufa o cocina.

Rejilla: Esta situada exactamente en el centro de la cámara de combustión y tiene la misma área transversal, al igual que el soporte de leña tiene una separación de 3 cm del piso de la cámara de combustión, la rejilla se puede realizar en una sola pieza con el soporte de leña realizando orificios por donde caerá la ceniza del combustible, así como también entrará el aire que alimente el fuego, la idea de que el aire entra por debajo del soporte de leña llegue precalentado para que los gases se quemen totalmente.

Apertura de acumulador de cenizas: la salida o apertura del acumulador de ceniza tiene un área transversal igual que la rejilla o la cámara de combustión, permitiendo de este modo que la mayor parte de los residuos del combustible caigan directamente al acumulador. Por lo general en la construcción de cocinas mejoradas se excluye el acumulador de cenizas y estas caen directamente debajo de la rejilla provocando su acumulación y el impedimento del paso del aire precalentado al fuego lo cual dejaría como alimentación solo el aire que pasa por encima de los leños el cual no es útil porque es más fresco y enfría el fuego.

Cocina de Leña tipo Rocket de alta eficiencia y bajo impacto ambiental en comparación a la Cocina de Leña Convencional

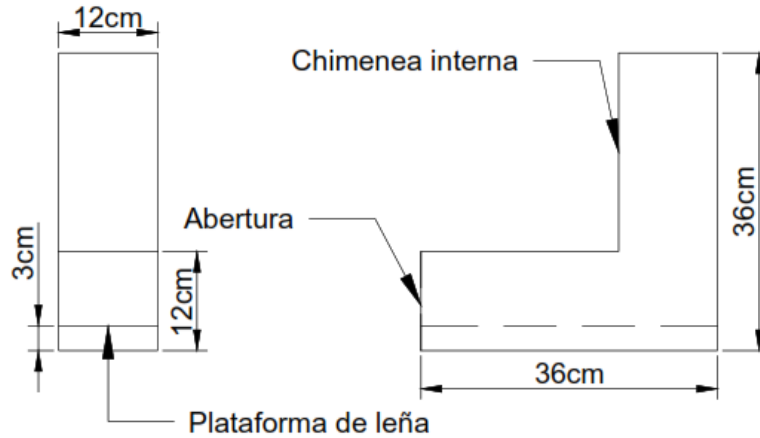


Figura 3. Geometría de la cámara de combustión

Como se puede observar en la **figura 3** la geometría corresponde a la cámara de combustión que se utilizan comúnmente en las cocinas rocket, pero eso no quiere decir que no se le puedan hacer modificaciones a la misma siempre y cuando se respeten los principios de diseño.

Con el fin de aprovechar de forma eficiente el calor generado por los gases de combustión se decidió agregar una ramificación a la chimenea interna la cual nos permita la expulsión de los gases en dos puntos diferentes y de esta forma tener un calentamiento más uniforme en ambas hornillas a utilizar, las dimensiones de la cámara de combustión de la **figura 4** se muestran en el **Anexo 1**.

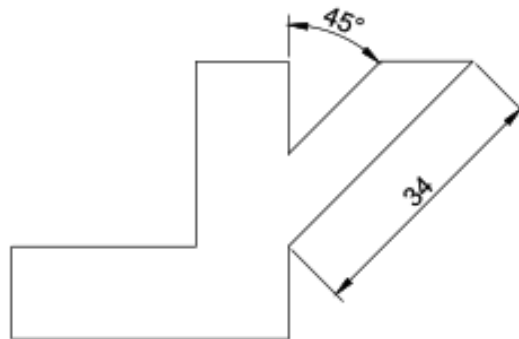


Figura 4. Diseño de cámara de combustión

6.3. Dimensionamiento de cuerpo de cocina limpia

Para el dimensionamiento del cuerpo de la cocina limpia primero se estipularon las funciones requeridas para la misma, en este caso se dimensionarán dos tipos de cocinas una cocina con dos hornillas de olla interna y una cocina con dos hornillas simples (olla encima de la hornilla) y una hornilla de olla interna.

Las dimensiones internas de ambas cocinas son las mismas la única diferencia es la parte externa en cuanto a la configuración geométrica al colocar las diferentes piezas, la base para dimensionar el interior de estas cocinas es el área transversal por donde se mueven los gases de combustión que debe de ser la misma en todos los espacios, para poder obtener esas dimensiones lo primero que se debe hacer es encontrar la altura requerida entre la olla y el borde superior de la cámara de combustión.

Debido a que se está trabajando con el método de Winiarski se debe de mantener una altura correcta por debajo de la olla, esta varia a medida que se desplaza del centro de la cámara de combustión hacia la orilla externa de la olla. Para lograr su evaluación se calcula el espacio que está al borde de la cámara de combustión y al borde de la olla lo cual se hace en los siguientes cinco pasos:

1. Cálculo de área superficial de la cámara de combustión que se mantendrá por toda la estufa.

$$A_s = l W \quad \text{Ecuación 4}$$

Donde:

A_s : Área superficial

l : Altura de abertura

W : Ancho abertura

2. En el borde de la chimenea aislada encima del fuego, los gases voltean y siguen el fondo de la olla. Para determinar el espacio necesario al borde de

Cocina de Leña tipo Rocket de alta eficiencia y bajo impacto ambiental en comparación a la Cocina de Leña Convencional

la cámara de combustión primero se determina el perímetro del área por la cual pasan los gases calientes.

$$C_s = 2l + 2w \quad \text{Ecuación 5}$$

Donde:

C_s : perímetro de cámara de combustión

3. Dividir el resultado del paso 1 entre el resultado del paso 2.

$$G_s = \frac{A_s}{C_s} \quad \text{Ecuación 6}$$

Donde:

G_s : espacio necesario entre el fondo de la olla y el borde superior de la cámara de combustión.

4. Para determinar el espacio óptimo al borde de la olla se mide la circunferencia de la misma.

$$C_p = 2\pi r \quad \text{Ecuación 7}$$

Donde:

C_p : circunferencia de la olla.

5. Dividir el área transversal A_s por C_p para calcular el espacio necesario al borde de la olla.

Cocina de Leña tipo Rocket de alta eficiencia y bajo impacto ambiental en comparación a la Cocina de Leña Convencional

$$G_p = \frac{A_s}{C_p}$$

Ecuación 8

Donde:

G_p : Espacio necesario al borde de la olla

Tabla 4. Resultados de espacios requeridos entre la olla y el borde de la cámara de combustión.

Término	Resultado
A_s	144 cm^2
C_s	48 cm
G_s	3 cm

Dado el cálculo de la altura necesaria entre el borde de la cámara de combustión y el fondo de la olla se logra definir que el ancho del cuerpo de la cocina es de 48 cm , esto se logra mediante un despeje de la fórmula de área superficial.

$$w = \frac{A_s}{l}$$

Ecuación 9

$$w = \frac{144cm^2}{3cm} = 48cm$$

Como se puede observar en las ecuaciones definidas por el Dr. Winiarski el espacio requerido en el borde de la olla se define en base al área de la olla que

Cocina de Leña tipo Rocket de alta eficiencia y bajo impacto ambiental en comparación a la Cocina de Leña Convencional

se utilice, esto impide que el consumidor final pueda variar el diámetro de la misma ya que si lo hace no se podrá aprovechar al máximo la energía que brinda la cocina, sin embargo el espacio requerido en el borde de la olla también se puede utilizar como separación de la falda con respecto a la olla y está se puede dejar definida en base a la olla de mayor diámetro que tenga el usuario, que para este caso de estudio es una olla de 24 cm de diámetro, esto no quiere decir que no se puedan utilizar ollas de diferentes diámetros en las cocinas, lo único es que las eficiencia de las hornillas de olla interna no se podrá aprovechar al máximo por una olla de mayor diámetro, pero en el caso de las hornillas simples se podrán utilizar sin afectar tanto su eficiencia debido a que estas adquieren el calor solo en la base de la olla mientras tanto las ollas que son utilizadas en las hornillas internas adquieren calor en sus paredes laterales y en la base.

Tabla 5. Separación de la falda con respecto a la olla.

Término	Resultado
C_p	75.39cm
G_p	1.91cm \approx 2cm

Teniendo en cuenta todos estos datos y las dimensiones de la cámara de combustión se puede determinar el cuerpo inferior de la cocina, la plataforma de hornillas, el cenicero y la chimenea. A continuación, descripción de las partes antes mencionadas:

Cenicero: Estará colocado en la parte inferior de la cámara de combustión dentro del cuerpo de la cocina, su entrada será de 12x12 cm² teniendo una profundidad de 4 cm, su longitud total es de 30 cm, y su salida es de 2x12 cm², la base en la

Cocina de Leña tipo Rocket de alta eficiencia y bajo impacto ambiental en comparación a la Cocina de Leña Convencional

que está integrado el cenicero es la que sella el cuerpo inferior y las dimensiones de esta son de 48x48 cm y 4 cm de grosor, Ver **Anexo 2**.

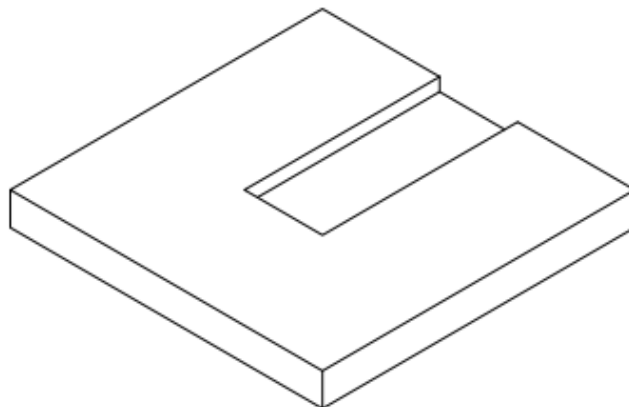


Figura 5. Cenicero

Cuerpo inferior: El cuerpo inferior de la cocina es de 58x58 cm², tiene la función de aislar el calor generado por la cámara de combustión la cual se colocó en el centro para tener el mismo espesor de aislante alrededor de su superficie, la altura del cuerpo inferior es de 35 cm, las paredes de esta misma son de 5 cm por lo cual en su parte interna tiene una sección transversal de 48x48 cm², en el frente del cuerpo inferior tiene una sección transversal hueca donde se ensambla la cámara de combustión que es de 22x22 cm y está a 4 cm del borde inferior.

En la parte posterior tiene una sección trasversal hueca de 2x12 cm que es utilizada para poder extraer la ceniza y de igual forma está a 2 cm del borde inferior, para la construcción de esta pieza se realizara en dos partes las cuales acoplaran gracias a un sistema de ensamble que es de 2 cm de profundidad de ambas piezas en determinadas posiciones a como se mostrara en la siguiente figura, las dimensiones del plano se muestran en el **Anexo 3**.

Cocina de Leña tipo Rocket de alta eficiencia y bajo impacto ambiental en comparación a la Cocina de Leña Convencional

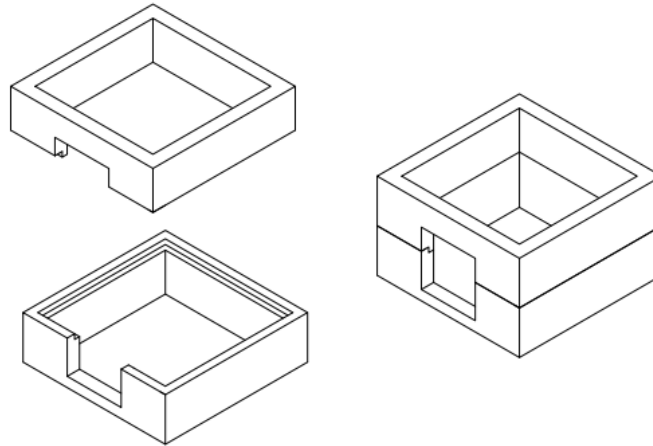


Figura 6. Cuerpo inferior de cocina tipo rocket

Falda: Esta se integra en la cocina como una lámina de zinc que recubre a la olla para aumentar la transferencia de calor, ocurre debido a que entre la olla y la falda se crea un canal angosto permitiendo que los gases de combustión tengan una mayor base de contacto con la olla. En este caso se optó por una plataforma, con una altura de 14 cm y 3 cm de espesor, ver **Anexo 4**.

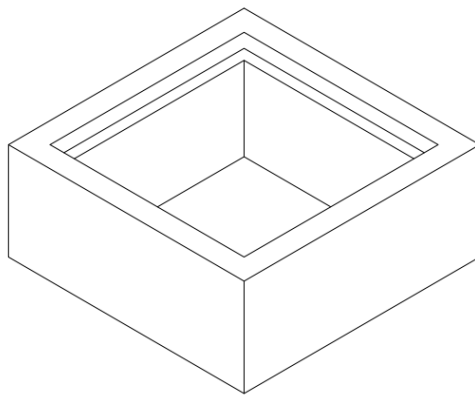


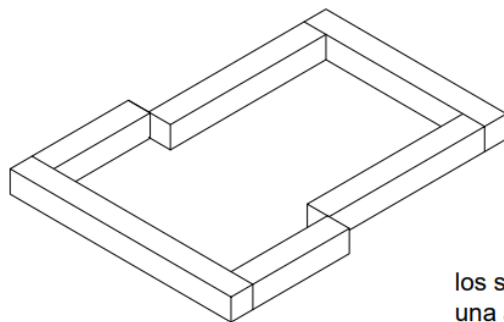
Figura 7. Compartimiento de olla interior

Chimenea: Según los principios de diseño de cocinas limpias a como se ha mencionado en diversas ocasiones el área transversal por donde pasan los gases de combustión deben de ser aproximadamente la misma, la chimenea tendrá un diámetro de 14 cm y un área trasversal de 154 cm^2 la cual tiene una diferencia de 10 cm^2 con respecto a las demás zonas en donde circulan los gases, la chimenea empieza justamente a la altura del borde de la cámara de combustión y tiene una

Cocina de Leña tipo Rocket de alta eficiencia y bajo impacto ambiental en comparación a la Cocina de Leña Convencional

longitud de 2 m permitiendo que los gases de combustión evacuen fuera del hogar, en la mayoría de los casos las chimeneas de las cocinas limpias se instala en el borde posterior a la entrada de la cámara de combustión el cual puede ceder con el tiempo y provocarle quemaduras a las personas que estén cerca, por eso se colocó la chimenea en la parte superior de la plataforma de las hornillas además de proteger al usuario con una malla protectora que no permitirá que toquen el metal de la chimenea.

Separadores de plataformas: Estos separadores están ubicados entre la plataforma de gases y la plataforma de hornillas tienen la función de darle la altura necesaria entre el borde de la cámara de combustión y el bode inferior de la olla, estos separadores tienen una sección transversal de 7x7 cm y su longitud está dada por el perímetro del portador de hornillas, las dimensiones se presentan en el **Anexo 5**.



los separadores de piezas tienen una area trasnversal de 7x7cm

Figura 8. Separadores

Plataforma de hornillas: La plataforma de hornillas será dividida en dos etapas, el portador de hornillas y la plataforma de direccionamiento de gases.

Para este modelo de cocina se designaron tres hornillas, de las cuales dos son hornillas con olla exterior colocadas a lo ancho del portador de hornillas y una hornilla que puede ser utilizada tanto como hornilla de olla exterior e interior con solo retirar la plataforma externa. Para determinar el ancho y longitud del portador y plataforma de direccionamiento de gases se deben de tener en cuenta los

Cocina de Leña tipo Rocket de alta eficiencia y bajo impacto ambiental en comparación a la Cocina de Leña Convencional

siguientes factores: diámetro de olla, separación de falda, diámetro de chimenea y separación entre hornillas.

Tabla 6. Datos requeridos para dimensionamiento de plataforma de hornillas

Dímetro de olla	Separación de falda	Diámetro de chimenea	Separación de hornillas	Ancho de plataforma externa	Ancho de separadores de plataformas
24cm	2 cm	14 cm	3 cm	34cm	5cm

En el caso de una cocina con dos hornillas de olla externa y distribuidas a lo largo del portador de hornillas, la primera hornilla debe de ser colocada en el centro de la chimenea para poder aprovechar al máximo la transferencia de calor, en este caso tenemos dos hornillas de olla externa, distribuida a lo ancho del portador, para que ambas hornillas aprovechen la energía que suministra la primera chimenea teniendo en cuenta que el ancho de los separadores de plataforma no interfiera con ella, es por eso que las primeras hornillas están centradas a 21 cm del borde del cuerpo inferior y a 1.5 cm de separación del centro en donde estaría ubicada la chimenea, desde estos puntos se trazan las dimensiones establecidas en la tabla 1.7 dando un ancho de 71 cm y una longitud de 38 cm, estos datos solo son para la primera etapa del portador de hornillas dado que la hornilla de olla interna se empieza a dimensionar en el borde la primera etapa justamente en su centro y de ahí se empiezan a trazar las demás dimensiones, teniendo en cuenta también el ancho del cuerpo inferior, por lo que tendrá un ancho de 58 cm y una longitud de 57 cm.

La plataforma de direccionamiento de gases tiene la misma configuración geométrica a nivel externo del portador de hornillas, la única diferencia es el área transversal hueca que permite el ingreso de los gases de combustión que es de 22x44 cm y se dimensiona a 14 cm del borde del cuerpo inferior, siempre teniendo en cuenta el centro de la plataforma, Ver **Anexo 6**.

Cocina de Leña tipo Rocket de alta eficiencia y bajo impacto ambiental en comparación a la Cocina de Leña Convencional

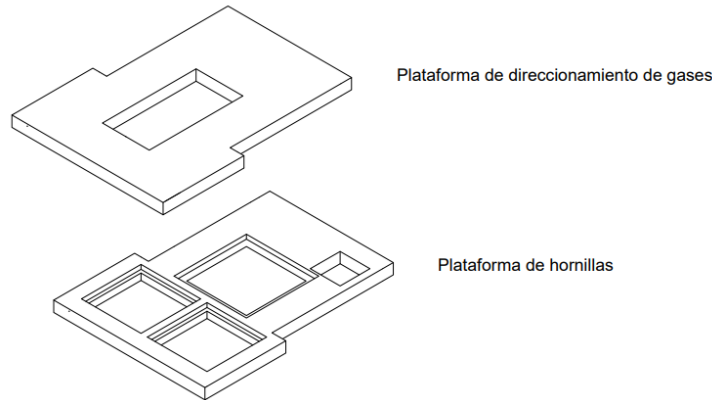


Figura 9. Plataformas

6.4. Construcción de cámara de combustión

Cómo se abordó en el inciso 8.2 para la construcción de la cámara de combustión se utilizaron baldosas de barro que debido a las dimensiones internas de la misma se realizaron las siguientes operaciones:

Dimensionamiento y seccionamiento: Debido a las dimensiones de las baldosas se tuvo que seccionar por partes la cámara de combustión, ya que algunas de sus piezas no se podían sacar en un solo fragmento puesto que sobrepasaba las medidas de la misma, por otra parte, algunas de estas secciones fueron modificadas teniendo en cuenta el grosor de 4cm de las baldosas para así mantener la dimensión interna de la cámara.

Trazado e inspección: para trazar las secciones de la cámara se utilizaron los siguientes elementos:

- Lápiz de grafito
- Regla de 50cm
- Cartabón
- Escuadra

Antes de proceder con el trazado de las secciones en las baldosas, se inspecciono que estas tuvieran las medidas adecuadas para contener las piezas, luego se

Cocina de Leña tipo Rocket de alta eficiencia y bajo impacto ambiental en comparación a la Cocina de Leña Convencional

seleccionaron los bordes con menos imperfecciones para poder utilizarlos como marco referencial en las mediciones de las piezas.



figura 10. Trazado de baldosa de barro

Corte e inspección: Se procedió a colocar el disco de corte en el esmerilador angular de modo en que el área de la sección de corte estuviera en la parte externa de donde fueron trazadas las piezas, con el objetivo de mantener las dimensiones de las piezas y no disminuirlo por el grosor del disco, una vez que las piezas fueron cortadas se midieron nuevamente las dimensiones y se compararon con las medidas originales, esto con el fin de que si una pieza estuviese mal cortada se tendría que repetir el proceso de trazado y corte.

Trazado y corte de lámina de hierro fundido: Con una cinta métrica se mide un rectángulo de 18 cm de ancho por 36 cm de largo en una lámina de hierro, se procede a cortar con una circular con disco de corte de 15 cm de diámetro para luego hacer dobleces de 3 cm a cada lado los cuales funcionan como separación entre el piso de la cámara de combustión y la rejilla de la leña.

Perforaciones en rejilla: En una sección de 12x12 cm al final de la rejilla se trazaron cuadrículas de 1x1cm en donde se ocuparon las intersecciones como

Cocina de Leña tipo Rocket de alta eficiencia y bajo impacto ambiental en comparación a la Cocina de Leña Convencional

centro para hacer perforaciones con un taladro con broca de 1 cm de diámetro, estas perforaciones son las se ocupan como entrada de alimentación de aire hacia la cámara de combustión y como medio para que la ceniza caiga hacia el cenicero.

6.5. Construcción de cuerpo de cocina

El cuerpo de la cocina se construyó a base de mortero, por lo que se elaboraron moldes partiendo del diseño del cuerpo de la cocina. Todas las piezas, excluyendo hornillas, soportes de ollas y chimenea están hechas a partir de mortero.

Para la elaboración de las piezas que forman el cuerpo de la cocina fue necesario:

Construcción de moldes para el llenado de mortero: Fabricados a partir de láminas de poroplast, debido a la facilidad de maniobrabilidad que presentan, con el fin de obtener las dimensiones requeridas de acuerdo al diseño propuesto.

Dimensionamiento de piezas y moldes: La cocina mejorada consta de 5 piezas para su construcción, en donde el cuerpo inferior, así como también la plataforma de direccionamiento de gases, plataforma de hornillas y separación entre borde de cámara de combustión y olla serán de 5 cm, mientras que la plataforma de olla interior es de 3cm y la base del cenicero es de 4 cm.

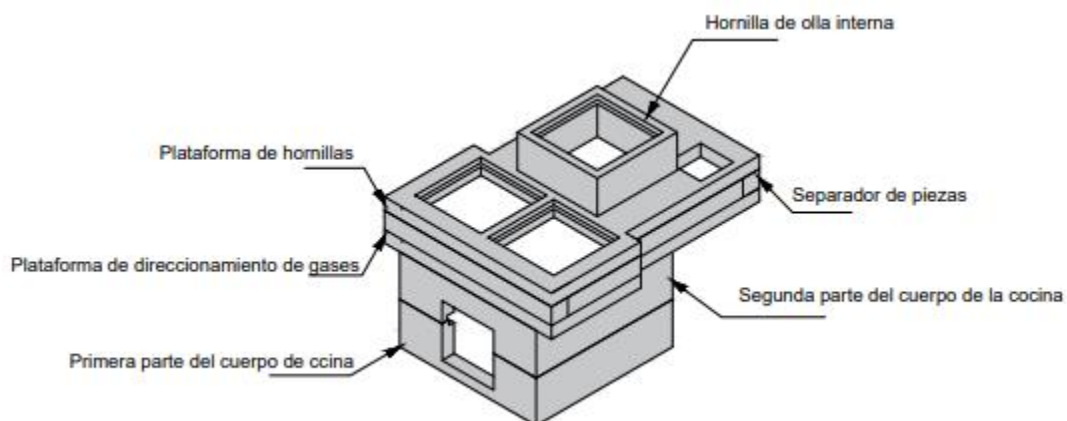


figura 11. Cocina mejorada tipo Rocket

6.5.1. Modificaciones en la construcción para ensamblado de piezas

Cuerpo inferior: La construcción de esta pieza se realizó en dos partes, esto para facilitar el traslado de las piezas en dado caso que el consumidor final requiera cambiar de posición o lugar a la cocina, la pieza como tal del cuerpo inferior será dividida a la mitad y se le incorporara unas aletas de 2 cm de ancho para lograr el acoplamiento entre las piezas.

Plataforma de hornillas: En esta plataforma las modificaciones que se hacen son para el acoplamiento de las hornillas como tal, se realiza un perímetro de 28x28 cm con 2 cm de profundidad para poder colocar la hornilla metálica además de tener en el centro un área transversal hueca de 24x24 cm que será el área en la que tenga contacto los gases de combustión con el borde inferior de la olla, por otro lado para el acoplamiento de la plataforma externa de hornilla de olla exterior se realiza un perímetro de 28x28 cm con 2 cm de profundidad y una sección transversal hueca de 28x28 cm.

Plataforma externa: En esta plataforma se realiza el mismo proceso que se aplicó en el portador de hornillas, pero con la diferencia que el área transversal hueca de 24x24 cm tiene una profundidad de 2 cm dado que luego se da la construcción de la falda interna que se logra con otra sección transversal hueca de 28x28 cm con una profundidad de 12 cm.

6.5.2. Materiales utilizados en la construcción de cocina limpia

Los materiales utilizados en la construcción de la cocina fueron seleccionados debido a su bajo costo y gran acabilidad en el mercado nacional, estos materiales son conocidos debido a que son ampliamente utilizados en la construcción de diferentes edificaciones.

Tabla 7. Materiales utilizados para la construcción

Material	Densidad ρ ($k g/m^3$)	Conductividad Térmica k ($W/(m.k)$)
Cemento portland	1200	0.29
balosas de barro	1800	0.4
zinc liso	7190	140
lamina de hierro fundido	7840	80.2
Arena fina	1500	1.63

En la elaboración de moldes se toma en cuenta el grosor de la lámina de poroplast y conforme a las dimensiones antes descritas se cortaron las piezas, una vez realizados los moldes, se elaboró la mezcla de cemento para hacer mortero y se procedió a rellenar los moldes, para posteriormente pasar por un fraguado de 7 días para que el mortero tenga mayor dureza.

VII. Selección de Aislamiento

7.1. Razón de transferencia de Calor

La determinación de rendimiento de la cocina está dada por la cantidad de calor que esta puede ceder al ambiente a través de su estructura. El análisis de dicha transferencia responde al estudio de los mecanismos de conducción y convección.

El cuerpo de la cocina está constituido por un sistema de capas, desde la cámara de combustión a lo más interno, una capa de material aislante de gran espesor y baja conductividad térmica, y una capa externa estructural, fabricada en concreto tipo Portland.

El análisis conductivo de la cámara de combustión se ve influenciado por los fluidos encontrados dentro de dicha cámara, por lo que se debió determinar el coeficiente de transmisión superficial (h), la cual dicta la razón de transferencia entre un fluido y una superficie sólida.

7.1.1. Coeficiente convectivo de transferencia de Calor (h)

Para el cálculo del coeficiente convectivo fue necesario establecer ciertas condiciones (presión atmosférica, temperatura, densidad del aire), las cuales dependen de la ubicación geográfica de realización del estudio. En este caso, la ciudad de realización de los estudios, corresponde a Managua.

Según la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOOA, por sus siglas en inglés), la presión atmosférica promedio para la ciudad de Managua es de 1012 hPa (1.012 bar) y una temperatura promedio de 35 °C (308.15 K) (Administración Nacional Oceánica y Atmosférica, 2021)

La densidad del aire en el ambiente es calculada mediante la ecuación de los gases ideales (Ver **Ecuación 10**) (Cengel & Boles, 2015, p. 165)

$$PV = \eta RT \quad \text{Ecuación 10}$$

Donde:

P: Presión

V: Volumen

η : Número de moles

T: Temperatura

R: Constante de gas ideal ($R= 0.0831447 \text{ bar}\cdot\text{m}^3 / \text{kmol}\cdot\text{K}$) (Cengel & Boles, Termodinámica, 2015, pág. 3)

La masa es directamente proporcional al número de moles y la masa molar de la sustancia, la cual define la ecuación. respecto a la ley de los gases ideales. (Cengel & Boles, Termodinámica, 2015, pág. 165)

$$m = M\eta \quad \text{Ecuación 11}$$

Cocina de Leña tipo Rocket de alta eficiencia y bajo impacto ambiental en comparación a la Cocina de Leña Convencional

Donde:

m: Masa

M: Masa molar del aire ($M = 28.97 \text{ kg/kmol}$) (Cengel & Boles, Termodinámica, 2015, pág. 908)

η : Número de moles

De la sustitución de **Ecuación 10** en **Ecuación 11** deriva la siguiente ecuación en función de la densidad:

$$\rho = \frac{PM}{RT} \quad \text{Ecuación 12}$$

La densidad del aire en el exterior de la cocina es:

$$\rho_{ext} = \frac{(1.012 \text{ bar})(28.97 \text{ kg/kmol})}{(0.083144 \text{ bar}\cdot\text{m}^3/\text{kmol}\cdot\text{K})(308.15 \text{ K})}$$
$$\rho_{ext} = 1.1448 \text{ kg/m}^3$$

Relacionando la densidad del aire a 0 °C y la temperatura máxima interna de la cocina, obtenida de las pruebas de quemado de la cámara de combustión (225 °C = 498 K), se calcula la densidad de los gases en el interior de la cámara. (Ver **Ecuación 13**) (The Engineering Toolbox, 2013)

$$\rho_i = \frac{\rho_{aire} (273.15 \text{ K})}{(273.15 \text{ K} + T (^{\circ}\text{C}))} \quad \text{Ecuación 13}$$

Donde:

ρ_i : Densidad del aire interno

ρ_{aire} : Densidad del aire a 0 °C ($\rho_{aire} = 1.293 \text{ kg/m}^3$) (The Engineering Toolbox, 2013)

T: Temperatura interna máxima (cámara de combustión)

$$\rho_i = \frac{\rho_{aire} (273.15 K)}{(273.15 K + T (^{\circ}C))}$$

$$\rho_i = 0.7089 \text{ kg/m}^3$$

Esta densidad menor en el interior de la cámara de combustión, crea una presión ascensional en los gases, haciéndolos evacuar por medio de la chimenea, debido a la diferencia de presiones entre la presión atmosférica y una presión mayor en interior de la cocina (Ver **Ecuación 14**) (S&P, 2018)

$$P_i = h g (\rho_e - \rho_i) \quad \text{Ecuación 14}$$

Donde:

P_i: Presión interior cámara de combustión

h: Altura cámara de combustión

ρ_i: Densidad del aire interno

ρ_e: Densidad del aire externo

$$P_i = (0.36 \text{ m})(9.81 \text{ m/s}^2)(1.1442 \text{ kg/m}^3 - 0.7089 \text{ kg/m}^3)$$

$$P_i = 1.537272 \text{ Pa}$$

7.1.2. Cálculo de caudal por tiro natural

El tiro es el medio por el cual se evacuan los gases de combustión debido a una diferencia de presiones entre el interior y exterior de la estufa. Para este caso, el estudio corresponde a evacuación por tiro natural (**Ecuación 15**). (The Engineering Toolbox, 2013)

Cocina de Leña tipo Rocket de alta eficiencia y bajo impacto ambiental en comparación a la Cocina de Leña Convencional

$$Q = CA \sqrt{2gh \frac{T_i - T_e}{T_e}} \quad \text{Ecuación 15}$$

Donde:

Q: Flujo volumétrico

A: Área sección transversal de la cámara de combustión

C: Coeficiente de descarga (C = 0.65) (CALs Arizona , 2011)

g: Gravedad

h: Altura cámara de combustión

T_i: Temperatura interna

T_e: Temperatura externa (ambiente)

$$Q = 0.65 (0.0144 \text{ m}^2) \sqrt{2 \left(9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}\right) (0.36 \text{ m}) \frac{(498.15 \text{ K} - 308.15 \text{ K})}{308.15 \text{ K}}}$$
$$Q = 0.01953 \text{ m}^3/\text{s}$$

7.1.3. Diámetro hidráulico

Por su geometría, de sección transversal cuadrada, se parametriza tal área, de forma tal que pueda entenderse el comportamiento del flujo, de modo que este fuera circular, a esta parametrización se le conoce como diámetro hidráulico (Ver **Ecuación 16**) (Cengel & Ghajar, 2011, pág. 468).

$$D_h = \frac{4a^2}{4a} \quad \text{Ecuación 16}$$

Donde:

D_h: Diámetro hidráulico

Cocina de Leña tipo Rocket de alta eficiencia y bajo impacto ambiental en comparación a la Cocina de Leña Convencional

a: Longitud de la cara del cuadrado

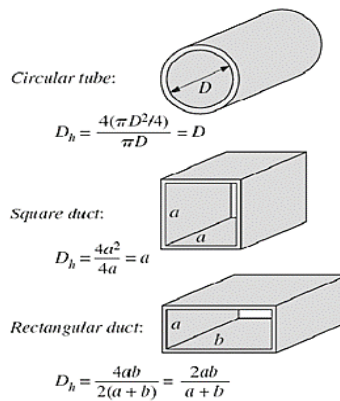


Figura 12. Diámetro hidráulico para diferentes formas geométrica
Fuente: (Cengel, 2011, p. 468)

$$D_h = \frac{4(0.12 \text{ m})^2}{4 (0.12 \text{ m})}$$

$$D_h = 0.12 \text{ m}$$

7.1.4. Velocidad de descarga del fluido

La velocidad de ascenso de los gases de combustión resulta de la diferencia de presiones entre los gases generados en el interior de la cámara de combustión y el exterior (ambiente). A mayor temperatura interna, mayor presión, lo que aumenta proporcionalmente la tasa de descarga de los gases. (The Engineering Toolbox, 2013)

$$v = \frac{4 Q}{\pi D_h^2}$$

Ecuación 17

Donde:

Cocina de Leña tipo Rocket de alta eficiencia y bajo impacto ambiental en comparación a la Cocina de Leña Convencional

v: Velocidad de descarga

Q: Flujo volumétrico

D_h: Diámetro hidráulico

$$v = \frac{4(0.01953 \text{ m}^3/\text{s})}{\pi(0.12 \text{ m})^2}$$

$$v = 1.7271 \text{ m/s}$$

La celeridad de descarga de los gases corresponde a 1.727 m/s. La determinación de la velocidad de descarga de los gases de combustión y el mantener esta celeridad constante, es crucial para el estudio, ya que una rápida evacuación de estos, provocaría un consumo innecesario de energía, y un tiro bajo provocaría una combustión incompleta, generando más humo y ahogamiento de la llama.

7.1.5. Viscosidad dinámica

La viscosidad dinámica (μ) establece la resistencia a la deformación gradual por esfuerzo cortante o tensión. A 225 °C (498 K) y 1 atmósfera de presión, la viscosidad dinámica correspondiente es 2.66×10^{-5} N.s/m² (Ver **Anexo 7**). Este valor es necesario para la determinación del número de Reynolds, el cual determina el comportamiento del fluido, sea este laminar, transitorio o turbulento. (The Engineering Toolbox, 2013)

7.1.6. Número de Reynolds

La transición de flujo laminar a turbulento depende de la configuración geométrica de la superficie, de la aspereza superficial, de la velocidad del flujo, de la temperatura de la superficie y del tipo de fluido. (Cengel & Ghajar, 2011, pág. 385)

De lo anterior mencionado se obtiene la siguiente ecuación:

$$R_e = \frac{\rho_{int} v D_h}{\mu}$$

Ecuación 18

Donde:

R_e : Número de Reynolds

ρ_{int} : Densidad interna

v : Velocidad del fluido

μ : Viscosidad dinámica

$$R_e = 5524.06$$

Este número muestra la relación entre fuerzas inerciales y viscosas. Con este número se predice el patrón de un flujo. Para valores mayores a 4000, se dicta un flujo laminar turbulento. Es de gran importancia para analizar el comportamiento de los gases dentro de la cámara de combustión.

7.1.7. Número de Prandtl

Es un factor adimensional, que relaciona la capa límite del momento con la térmica durante la transferencia de calor a través del fluido. Cuando existe transferencia entre un cuerpo sólido y un fluido, el calor del fluido hacia la pared, fluye mediante una capa límite de impulso que comprende la sustancia del fluido y una capa de transición. Esta pared se puede representar como una película de fluido estancada, en la que se produce la transferencia de calor por conducción. (Cengel & Ghajar, 2011, pág. 384)

El número de Prandtl es obtenido fácilmente por tablas a una temperatura interna de la cámara de combustión de 225 °C (498 K) y 1 atm de presión interna. (Ver **Anexo 8: Número de Prandtl**)

$$P_r = 0.696$$

7.1.8. Número de Nusselt

El componente conductor se mide en las mismas condiciones que la convección de calor, pero con un fluido estancado. El número de Nusselt es para la capa límite térmica lo que es el coeficiente de fricción para la capa límite de velocidad. (Thermal Engineering, 2019)

$$N_U = 0.102 R_e^{0.675} P_r^{\frac{1}{3}} \quad \text{Ecuación 19}$$

$$N_U = 30.3298$$

7.1.9. Coeficiente de convectividad

El coeficiente de convección precisa la velocidad de transferencia entre una superficie sólida y un fluido. Este coeficiente cuantifica la influencia de los gases internos de la cocina, de la superficie en contacto y el flujo de calor debido a la transferencia de calor por convección.

$$h = \frac{k}{D_h} N_U \quad \text{Ecuación 20}$$

Por su geometría, el coeficiente de convectividad se calcula mediante la Ecuación , en la que se detalla dicho coeficiente para secciones transversales cuadradas. (Cengel & Ghajar, 2011, pág. 436)

Donde:

h: Coeficiente convectivo

D: Diámetro hidráulico

Nu: Número de Nusselt

k: Coeficiente de conductividad

$$h = \frac{0.72 \text{ W/m K}}{0.12 \text{ m}} (30.32987)$$

$$h = 181.9792 \text{ W/m}^2\text{K}$$

7.2. Transferencia de calor bidimensional

Debido a la complejidad geométrica del cuerpo de la cocina limpia, el análisis de transferencia de calor de conducción bidimensional, se define mediante el método de diferencias finitas, el cual permite discretizar ecuaciones diferenciales y permitir un tratamiento más simple del problema diferencial parcial. (Incropera , 2007, pág. 215)

El primer paso para su solución es seleccionar los puntos de análisis, los cuales son subdivididos de la red en pequeñas regiones y asignados a esta un punto de referencia en su centro. Este punto de referencia es definido como punto nodal o nodo.(Incropera , 2007, pág. 210)

A estos puntos nodales se le asigna un número en el esquema bidimensional. Las ubicaciones x y y son designadas por los índices m y n respectivamente. (Incropera , 2007, pág. 215)

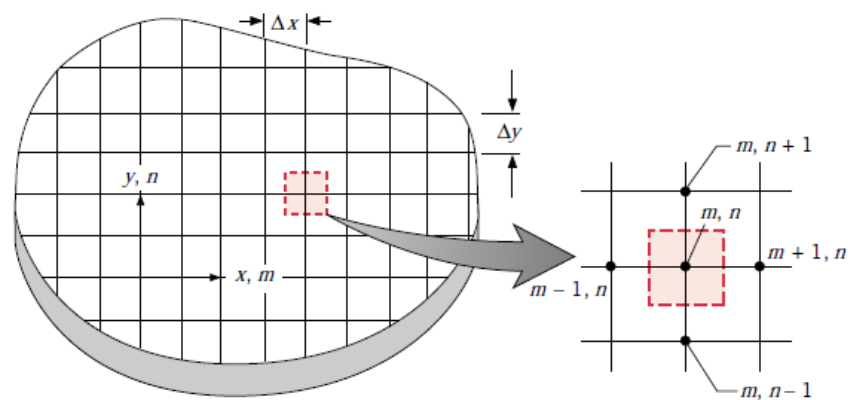


Figura 13. Red de Nodos
Fuente: (Incropera, 2011, p. 213)

Cocina de Leña tipo Rocket de alta eficiencia y bajo impacto ambiental en comparación a la Cocina de Leña Convencional

Cada nodo representa cierta región y, su temperatura es un promedio de las temperaturas de la región. La selección de los nodos es arbitraria, la cual dependerá de la conveniencia a ser tomado por su geometría y la precisión deseada, ya que esta depende del número de nodos asignados; por lo cual, a mayor número de nodos, mayor será la precisión. (Incropera , 2007, pág. 215)

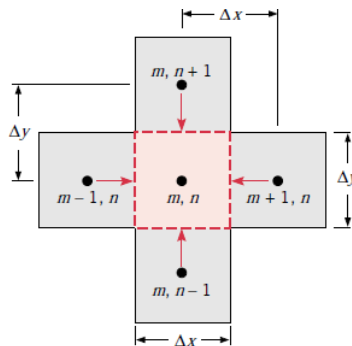


Figura 14. Conducción en un Nodo Interno desde Nodos Adyacentes
Fuente: (Incropera, 2011, p. 217)

7.2.1. Ecuación de diferencias finitas

Para todos los casos de estudio, hay que considerar que los nodos deben tener la misma distancia entre sí, por lo que se tiene que $\Delta x = \Delta y$. Como se muestra en la Ecuación , la resultante para nodos internos es igual al promedio de la relación de los puntos que rodean a nodo en estudio.

$$T_{m,n+1} + T_{m,n-1} + T_{m+1,n} + T_{m-1,n} - 4T_{m,n} = 0 \quad \text{Ecuación 21}$$

La **Figura 15** muestra la elección y posición de los puntos de análisis de temperaturas correspondiente a la cámara de combustión, la cual tiene dimensiones de 4 cm x 4 cm x 12 cm, son un espesor del ladrillo de 4 cm.

Cocina de Leña tipo Rocket de alta eficiencia y bajo impacto ambiental en comparación a la Cocina de Leña Convencional

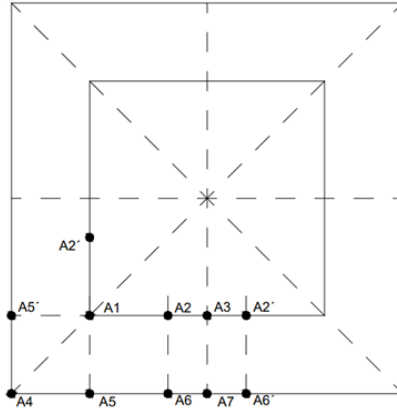


Figura 15. Disposición de puntos nodales de cámara de combustión

A partir de los puntos nodales anteriormente presentados, se exteriorizan las ecuaciones resultantes de los balances de energía para puntos nodales de geometría recurrente en la cámara de combustión, teniendo en cuenta que en estos nodos no debe existir generación de energía interna.

Nodo 1 ($T_5 = T_5$, nodo especular): $-26.22 T_1 + 1T_2 + 2T_5 = -10072.54$

Nodo 2: $T_1 - 24.22T_2 + T_3 + 2T_6 = -10072.54$

Nodo 3 (Al no estar expuesto a convección, se considera $T_\infty=0$ y $h=1$): $T_2 - 14.11T_2 + 2T_7 = -5036.27$

Nodo 4 ($T_5 = T_5$, nodo especular): $2T_5 - 2.04 T_4 = 0$

Nodo 5 (superficie externa simétrica, por lo tanto, $q''=0$): $2T_1 + T_4 - 4T_5 + T_6 = 0$

Nodo 6 (superficie externa simétrica, por lo tanto, $q''=0$): $2T_2 + T_5 - 4T_6 + T_7 = 0$

Nodo 7 (superficie externa simétrica, por lo tanto, $q''=0$) ($t_6 = t_6$, nodo especular): $2T_3 + 2T_6 - 4T_7 = 0$

Figura 16. Ecuaciones resultantes de cámara de combustión

Las ecuaciones mostradas anteriormente, son producto del análisis bidimensional de transferencia de calor debido a convección y conducción para la cámara de combustión. Estas ecuaciones han sido desarrolladas, mediante el método de Para la resolución de estas ecuaciones, fue necesario la resolución de sistemas de ecuaciones por método de matriz inversa.

Cocina de Leña tipo Rocket de alta eficiencia y bajo impacto ambiental en comparación a la Cocina de Leña Convencional

$$X = A^{-1} \cdot B = \begin{pmatrix} -26,219 & 1 & 0 & 0 & 2 & 0 & 0 \\ 1 & -24,219 & 1 & 0 & 0 & 2 & 0 \\ 0 & 1 & -14,109 & 0 & 0 & 0 & 2 \\ 0 & 0 & 0 & -2,04 & 2 & 0 & 0 \\ 2 & 0 & 0 & 1 & -4 & 1 & 0 \\ 0 & 2 & 0 & 0 & 1 & -4 & 1 \\ 0 & 0 & 2 & 0 & 0 & 2 & -4 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} -10072,550 \\ -10072,550 \\ -5036,275 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

Figura 17. Matrices resultantes de cámara de combustión

De la solución de la matriz inversa (ver **Figura 17**), se obtuvo el resultado de las temperaturas para la cámara de combustión:

Tabla 8. Temperatura interior y exterior de la cámara de combustión

Nodo	Temperatura (K)	Temperatura (°C)
TA1	436.97 K	163.82 °C
TA2	491.97 K	218.82 °C
TA3	457.85 K	184.70 °C
TA4	437.67 K	164.52 °C
TA5	446.42 K	173.27 °C
TA6	474.08 K	200.93 °C
TA7	465.96 K	192.81 °C

7.3. Conducción de calor por factor de forma

A partir de los puntos nodales de la cámara de combustión, los siguientes puntos de análisis se realizaron mediante el método de conducción de calor bidimensional por factor de forma para canales cuadrados (Incropera , 2007, pág. 208)

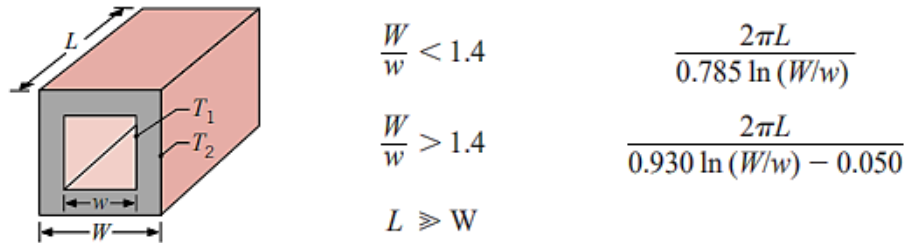


Figura 18. Factor de forma para canales cuadrados
Fuente: (Incropera, 2007, p. 210)

Debido a este factor, se puede determinar con facilidad la tasa de transferencia de calor para la forma geométrica dada (Ver **Ecuación 22**).

$$q = Sk \Delta T_{1-2} \quad \text{Ecuación 22}$$

Para el cálculo de factor de forma, solamente es necesario conocer el ancho interno y externo de cada cuerpo y su altura. Para la cámara de combustión se obtiene un ancho interno de 12 cm y un externo de 20 cm; el ancho interno del material aislante corresponde al ancho del exterior de la cámara de combustión, el cual equivale a 20 cm y un exterior de 48 cm, y para la capa de cemento, un ancho interno de 48 cm y un externo de 58 cm. Para todas las recamaras, una altura equivalente a 36 cm.

La siguiente tabla detalla el factor de forma para la cámara de combustión, el material aislante y la capa exterior de cemento:

Tabla 9. Factores de forma para los diferentes cuerpos de la cocina

$S_{Cámara\ de\ combustión}$	47.563
$S_{Aislante}$	27.731
$S_{Cemento}$	15.226

7.4. Materiales aislantes

En la evaluación de la cocina se utilizó diferentes materiales aislantes, de baja conductividad térmica, de bajo costo y fácil obtención en la región. Para ello, se decidió calcular a partir de la Pumicita (Piedra Pómez), el yeso y arena.

Tabla 10. Conductividad térmica para materiales evaluados

Materiales	Conductividad Térmica (W/mk)
Pumicita	0.13
Arena	0.43
Yeso	0.27

Debido a la existencia de múltiples capas, la razón de transferencia en estado estacionario será la misma en cada una de ellas, debido a que las resistencias se comportan como un total de la suma aritmética de la resistencia de cada capa. De

Cocina de Leña tipo Rocket de alta eficiencia y bajo impacto ambiental en comparación a la Cocina de Leña Convencional

esta aseveración, podemos encontrar el resto de las temperaturas nodales, a partir de una igualación de sus razones de transferencia bidimensional de calor por conducción (ver **Ecuación 23**), a través del método de razón por factor de formas para secciones transversales cuadradas (Cengel & Ghajar, 2011, pág. 142)

$$q_1 = q_2 = q_3$$

Ecuación 23

Tabla 11. Temperatura Nodos Según Material Aislante

NODO	TEMP.	MATERIAL
TA7	192.81 °C	Pumicita
TB5	115.69 °C	
TC5	61.98 °C	
TA7	192.81 °C	Yeso
TB5	169.50 °C	
TC5	115.79 °C	
TA7	192.81 °C	Arena

Cocina de Leña tipo Rocket de alta eficiencia y bajo impacto ambiental en comparación a la Cocina de Leña Convencional

TB5	155.68 °C	
TC5	101.97 °C	

El uso de pumicita (piedra pómez) como material aislante, provoca una mayor caída en la temperatura final, por lo cual se eligió como aislamiento para la construcción de la cocina, presentando una temperatura final de 61.98 °C.

7.5. Razón de transferencia

Del cálculo de las temperaturas finales y debido al factor de forma, se obtuvo la razón de transferencia de calor por conducción en la cocina.

$$q = 278.04 W$$

VIII. Prueba de Ebullición de Agua (WBT)

8.1. Requerimientos para medición de datos

La evaluación se llevó a cabo utilizando la prueba de ebullición de agua (WBT- Water Boiling Test) la cual es una simulación simple del proceso de cocción de alimentos con la finalidad de calcular la eficiencia térmica, lo que permitió hacer comparaciones entre la cocina rocket y la cocina convencional (Tres piedras).

La eficiencia del combustible, es un factor de alta importancia en la prueba de ebullición de agua, debido a que una combustión incompleta de los combustibles sólidos, aumenta los índices de contaminación atmosférica emitida que tienen muchas repercusiones sanitarias y medioambientales. La prueba contempla la medición de los contaminantes emitidos por la estufa durante la cocción, brindando las directrices necesarias para determinar la eficiencia del material combustible y el rendimiento de la cocina. las medidas de emisiones del WBT no indican el nivel de exposición a las emisiones de gases del combustible al que

Cocina de Leña tipo Rocket de alta eficiencia y bajo impacto ambiental en comparación a la Cocina de Leña Convencional

están expuestas las personas, sino que mide los contaminantes que salen de la estufa.

Para la prueba de emisiones de gases fue necesario el diseño de un sistema electrónico de medición de CO (Monóxido de carbono), CO₂ (Dióxido de carbono) y temperatura para recopilar la información necesaria para realizar los cálculos proporcionados en el WBT. Este sistema se compone por sensores de gas y termocuplas.

El sistema electrónico se realizó en la plataforma de código abierto Arduino la cual está basada en hardware y software libre, esto permitió la facilidad de obtener las herramientas necesarias para el análisis, dado que existen múltiples sensores con los que se pueden trabajar de manera secuencial.

Los sensores de gas Mq7 y Mq135 que se utilizaron en el sistema son sensibles a varios tipos de gases a como se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 12. Gases a los que son sensibles los sensores Fuente: Datasheet MQ7 y MQ135

MQ7	MQ135
CO	Co2
H2	NH4
LPG	Tolueno
CH4	Acetona
Alcohol	Alcohol
Aire	NH3

Cocina de Leña tipo Rocket de alta eficiencia y bajo impacto ambiental en comparación a la Cocina de Leña Convencional

Los sensores de gas tienen dos tipos de salidas una analógica y una digital, para el sistema electrónico que se diseñó se utiliza la salida analógica dado que así se puede trabajar con diferentes niveles de presencia de gas y escalarlo de acuerdo a las necesidades de la prueba de ebullición de agua (WBT).



Figura 19. Sensores MQ7 y MQ135
Fuente: Datasheet

En la prueba de emisiones solamente es necesario obtener los valores del CO₂ y CO en ppm, por lo que en la programación del código se necesitan los valores de las unidades correspondientes a un solo tipo de gas, para ello se debe escalar el valor leído, pero el problema de esto es que la relación entre la lectura y el valor real no es lineal por lo que se estima la curva característica de estos gases de cada uno de los sensores.

Las curvas características que fueron utilizadas se observan en el **Anexo 9** y **Anexo 10**, Debido a que la gráfica solo muestra la curva y no la ecuación como tal se procedió a hacer una regresión lineal, esto se hizo con la ayuda de la página [webplotdigitizer \(https://apps.automeris.io/wpd/\)](https://apps.automeris.io/wpd/), la cual extrae la información de las imágenes después de dar ciertos datos como inicio y fin de sus ejes (x,y) así como los valores de los mismos, una vez dado esos datos se procede a marcar cada una de las intercepciones de la curva de interés y nos lanzara los datos correspondientes. (ver **Anexo 11** y **Anexo 12**)

La ecuación obtenida de la curva se procesó mediante Excel, se integraron los datos obtenidos de la página para crear un gráfico de dispersión con línea de tendencia y ecuación de potencia para obtener la ecuación que nos permitirá obtener los valores de ppm para la prueba.

Cocina de Leña tipo Rocket de alta eficiencia y bajo impacto ambiental en comparación a la Cocina de Leña Convencional

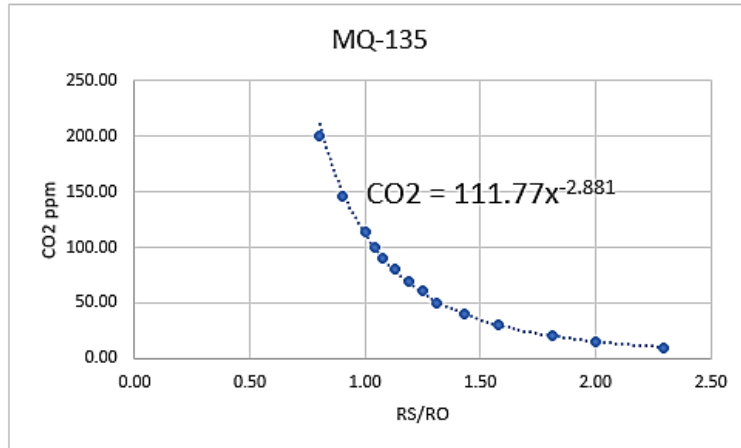


Figura 20. Gráfica potencial del sensor MQ135

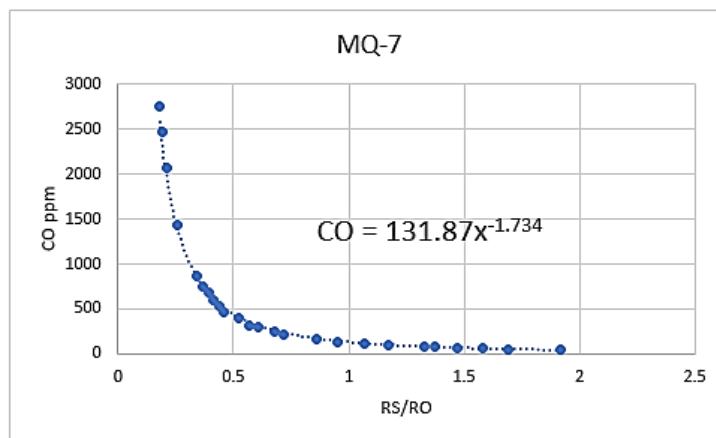


Figura 21. Gráfica potencial del sensor MQ7

La **Ecuación 24** muestra la tendencia del Dióxido de (Carbono CO₂) y la **Ecuación 25** la correspondiente al Monóxido de Carbono (CO):

$$CO_2 = 111.77 * ((Rs/Ro)^{-2.881}) \quad \text{Ecuación 24}$$

$$CO = 131.87 * ((Rs/Ro)^{-1.734}) \quad \text{Ecuación 25}$$

Cocina de Leña tipo Rocket de alta eficiencia y bajo impacto ambiental en comparación a la Cocina de Leña Convencional

El valor de R_o es una constante que obtiene con el voltaje máximo al exponer al sensor a altas concentraciones de un gas en específico, para estos casos en especial la mejor forma de obtener estos datos es con el alcohol dado que es el más fácil de obtener, esto se hace por medio de la programación de Arduino transformando los valores obtenidos en el puerto analógico a voltaje, como se muestra a continuación:

$$\text{Voltaje} = \text{adc}_{MQ} * \left(\frac{5.0}{1023.0} \right) \quad \text{Ecuación 26}$$

Donde:

adc_{MQ135} : Entrada analógica de Arduino que registra la información del sensor

Los datos obtenidos en la ecuación se utilizan para obtener el valor de RS máximo en donde se integra el valor de la resistencia del sensor que en este caso es de 1000Ω .

$$RS_{maximo} = 1000 \left(\frac{5 - V}{V} \right) \quad \text{Ecuación 27}$$

Este procedimiento se realiza basándose en que los sensores llegan a saturarse en 200 ppm para el MQ-135 y 2,761 ppm para el MQ-7 para los cuales el RS/R_o sería de 0.8 y 0.18 respectivamente, para poder obtener el valor de la constante RO . Las siguientes ecuaciones muestran las resultantes de cálculo de RO_{CO_2} (**Ecuación 28**) y RO_{CO} (**Ecuación 29**).

$$RO_{CO_2} = \frac{RS_{CO_2}}{0.8} \quad \text{Ecuación 28}$$

$$RO_{co} = \frac{RS_{co}}{0.8}$$

Ecuación 29

Tabla 13. Resultados para programa Arduino

Término	Resultados MQ-135	Resultados MQ-7
<i>Voltaje</i>	4.25	4.52
<i>RS_{maximo}</i>	176.47	106.19
<i>RO</i>	220.58	589.94

Otro de los datos de vital importancia en el protocolo del WBT es la temperatura, tanto de la olla principal, así como en la chimenea. Para adjuntarlo en el procesamiento de datos de esto se realizó mediante el uso de una termocupla tipo k con un módulo de Arduino MAX6675 el cual permitió la lectura de los datos de manera digital, esto implica que en lugar de recolectar información sobre el voltaje de la termocupla y después utilizar la tabla para poder saber la temperatura de los puntos directamente brinda la información de éstos, el programa de Arduino que se utilizó para obtener los valores de las pruebas se presenta en el Anexo 13.

8.2. Preparación de prueba

8.2.1. Espacio de trabajo

El espacio de trabajo de cada una de las pruebas debe de permitir una movilidad fluida en donde se puedan manipular correctamente cada paso del protocolo del WBT, así como también el lugar en donde deben de estar situados los diversos

Cocina de Leña tipo Rocket de alta eficiencia y bajo impacto ambiental en comparación a la Cocina de Leña Convencional

sensores que permiten obtener los valores requeridos para el cálculo de eficiencia energética.

- La instalación de los medidores de emisiones, según el protocolo para la medición de emisiones desarrollado por “indoor Air Pollution meter” de la Universidad de Berkeley California en 2005 los dispositivos de medición deben de estar a unas distancias estandarizadas. Las distancias estandarizadas son las siguientes:
 - Distancia horizontal de separación del borde de la zona de combustión.
 - Altura de 145 cm del suelo
- Sensor de temperatura debe de mantener a 5 cm del borde de la olla
- Sensor de temperatura de chimenea se debe de poner a la mitad de la altura de la chimenea en la parte interna.

8.2.2. Equipo necesario

La siguiente lista son los requerimientos necesarios para realizar la prueba

- Balanza con una capacidad de al menos 6 kg y precisión de ± 1 g.
- Aislante para proteger la balanza.
- Termómetro digital o termocupla con una precisión de 0.5 °C.
- Cronometro.
- Cinta métrica para medición de la madera.
- Ollas estándar: ollas que se utilizan en la región y tienen un volumen aproximado a 7 litros.
- Espátula para quitar el carbón de la estufa.
- Cacerola para transferencia de carbón.
- Bandeja de metal.
- Guantes resistentes al calor.

8.3. Prueba

8.3.1. Fase preliminar

- Registrar la temperatura del ambiente al inicio de la prueba
- Determinar temperatura de ebullición de agua en la zona en el caso de estudio que se realizó en La Paz Centro, león es de 100 °C
- Se usan tantas ollas como hornillas tenga la cocina
- Pesar ollas vacías antes del inicio de la prueba, así como también numerarlas si se van a utilizar más de una
- Pesar bultos de leña de aproximadamente 5 kg para cada una de las pruebas
- Pesar iniciador de fuego (astillas con keroseno)
- Entre cada una de las pruebas el tiempo máximo de preparación es de 5min.

8.3.2. Fase I. Inicio en frío

Para la realización de esta fase toda la cocina debe de estar fría, es decir, que no se haya usado recientemente para que su temperatura sea lo más cercana a la temperatura ambiente.

- Preparar cronometro para el inicio de la prueba
- Colocar la olla en la en la cocina. Usar los accesorios de madera para colocar la termocupla en cada una de las ollas para que la temperatura del agua puede ser medida en el centro, a 5cm de la parte interior. Si hay ollas adiciones se utilizan termocuplas adicionales si es posible.
- Medir la temperatura inicial del agua en cada olla confirmando que no varie notablemente de la temperatura ambiente

Cocina de Leña tipo Rocket de alta eficiencia y bajo impacto ambiental en comparación a la Cocina de Leña Convencional

- Anotar las concentraciones base ($CO_{2\text{base}}$, CO_{base}) y temperatura del ducto. Para las mediciones de emisiones en tiempo real, empezar a anotar la medición de partículas por millón de monóxido y dióxido de carbono.
- Iniciar el fuego, tomando en cuenta el peso del iniciador de fuego.
- Una vez que el fuego ha sido encendido, inicie el cronómetro y registre la hora. Lleve rápidamente la primera olla al punto de ebullición sin ser excesivamente derrochador de la utilización de leña del paquete previamente pesado.
- Cuando el agua de la primera olla alcanza el punto de ebullición local predeterminado mostrado en el termómetro digital, hacer rápidamente los siguientes pasos:
 - Registre el tiempo en el cual el agua de la olla primaria (La olla #1) alcanza la temperatura de ebullición local. Anote esta temperatura también.
 - Quite toda la leña de la estufa y apague las llamas. Las llamas pueden extinguirse colocando los palos en un cubo de ceniza o arena, no utilice agua ya que afectará el peso de la madera. Elimine todo el carbón suelto de los extremos de la madera en el recipiente para pesar carbón. Pesar la leña sin quemar retirándola de la estufa junto con la madera restante del paquete previamente pesado. Extraer todo el carbón que queda de la estufa. Pesar el carbón restante con el carbón que se desprendió de los palos.
 - Para las estufas con varias ollas, medir la temperatura del agua de cada olla (la olla principal debe estar en el punto de ebullición).
 - Pesar cada olla con agua.
 - Botar el agua caliente de cada olla

8.3.3. Fase II. Inicio en caliente

- Prepare los insumos rápidamente para la realización de la prueba (menos de 5 minutos)

Cocina de Leña tipo Rocket de alta eficiencia y bajo impacto ambiental en comparación a la Cocina de Leña Convencional

- Ajuste el cronometro para inicio de la prueba
- Colocar la olla en la en la cocina. Usar los accesorios de madera para colocar la termocupla en cada una de las ollas para que la temperatura del agua puede ser medida en el centro, a 5cm de la parte interior. Si hay ollas adiciones se utilizan termocuplas adicionales si es posible.
- Medir la temperatura inicial del agua en cada olla confirmando que no varie notablemente de la temperatura ambiente
- Anotar las concentraciones base($CO_{2_{base}}$ CO_{base}) y temperatura del ducto. Para las mediciones de emisiones en tiempo real, empezar a anotar la medición de partículas de los gases de combustión.
- Iniciar el fuego usando combustible del segundo paquete de leña pesado previamente designado para esta fase de la prueba. Siga el proceso de encendido que se utiliza en la fase I.
- Una vez que el fuego ha encendido, iniciar el cronómetro. Anotar la hora de inicio. Lleve la primera olla rápidamente a ebullición sin desperdiciar leña. Controlar el fuego mediante el procedimiento utilizado en la Fase I.
- Cuando el agua de la primera olla alcanza la temperatura de ebullición local predeterminada como se muestra en el termómetro digital, hacer rápidamente los siguientes pasos:
 - Registre el tiempo en el que el agua en la olla primaria (La olla #1) alcanza la temperatura de ebullición local. Anote esta temperatura también.
 - Quite toda la leña de la estufa y apague las llamas. Elimine todo el carbón suelto de los extremos de la madera en la cámara de combustión de la estufa. (En esta parte no se pesa el carbón ni ceniza). Pesar la leña sin quemar retirándola de la estufa junto con la madera restante del paquete previamente pesado.
 - Para las estufas con varias ollas, medir la temperatura del agua de cada olla (la olla principal debe estar en el punto de ebullición).
 - Pesar cada olla con agua

Cocina de Leña tipo Rocket de alta eficiencia y bajo impacto ambiental en comparación a la Cocina de Leña Convencional

- Meta la leña quemada otra vez dentro de la estufa. Proceda inmediatamente con la prueba de baja potencia.

8.3.4. Fase III. Baja potencia, hervir a fuego lento

Esta parte de la prueba está diseñada para poner a prueba la capacidad de la estufa para pasar a una fase de baja potencia después de una fase de alta potencia con el fin de hervir el agua durante 45 minutos utilizando una cantidad mínima de combustible. Para las estufas con varias ollas, sólo se evaluará el rendimiento a fuego lento para la primera olla.

- Prepare el cronómetro, pero aún no empiece
- Anote el peso de la olla con agua.
- Anote el peso del combustible sobrante de la segunda fase más el tercer paquete de combustible y las astillas.
- Reencienda la leña caliente que fue reemplazada. Siga el procedimiento de la Fase I.
- Una vez que el fuego ha sido encendido, iniciar el cronómetro. Anotar la hora de inicio.
- Coloque la olla en la estufa e introduzca el termómetro en el agua.
- Por 45 minutos mantenga el fuego a un nivel que mantiene la temperatura del agua lo más cerca posible a 3 grados por debajo del punto de ebullición. La prueba es inválida si la temperatura en la olla baja de más de 6 ° C por debajo del punto de ebullición local.
- Después de los 45 minutos, rápidamente haga estos pasos:
 - Anote el tiempo. Registre la temperatura final del agua que todavía debe ser de 3 °C por debajo del punto de ebullición establecido
 - Quite toda la leña de la estufa y apague las llamas. Elimine todo el carbón suelto de los extremos de la leña en el recipiente para carbón. Pesar la leña sin quemar retirada de la estufa junto con la leña restante del segundo bulto pesado previamente. Extraer todo el carbón que queda de

Cocina de Leña tipo Rocket de alta eficiencia y bajo impacto ambiental en comparación a la Cocina de Leña Convencional

la estufa. Pesar el carbón restante junto con el carbón de las puntas de los leños.

- Pese la olla con el agua que ha quedado

IX. Resultados

9.1. Resultados de pruebas WBT

Los datos de las pruebas de WBT se procesaron inicialmente en plantillas de recolección de datos crudos para luego ser ingresados en las hojas de cálculo del WBT versión 4.2.3. La planilla que provee este software entrega los resultados procesados para los indicadores más utilizados en las pruebas de cocinas limpias reflejado en las tablas a como se muestra en el **Anexo 14 y Anexo 15**.

Tabla 14. Resultados del WBT por fases de cocina tradicional

Fase	Resultado	Unidad	Test 1	Test 2	Test 3	Promedio
Fase 1 Inicio en frio alto poder (IFAP)	Tiempo para llevar a ebullición 5L	Min	34	44	23	33.66
	Eficiencia térmica	%	9	6	10	8.33
	Combustible consumido	g/L	229	309	185.5	241.19
	Tasa de combustión	g/min	23.4	23.9	26.9	24.73
	Potencia de estufa	KW	8.330	8.524	9.592	8.79
Fase 2 Inicio en calient e de alto	Tiempo para llevar a ebullición 5L	Min	33	34	29	32
	eficiencia térmica	%	7	5	8	6.66
	combustible consumido	g/L	295.2	345.2	210.6	283.73
	tasa de combustión	g/min	7	5	9	30.1

Cocina de Leña tipo Rocket de alta eficiencia y bajo impacto ambiental en comparación a la Cocina de Leña Convencional

poder (ICAP)	potencia de estufa	KW	10.72 9	12.64 5	8.809	10.727
Fase 3	Tiempo para llevar a ebullición 5L	Min	45	45	45	45
Fuego lento (FL)	eficiencia térmica	%	12	11	10	11
	combustible consumido	g/L	327.8	184.6	545.7	352.7
	tasa de combustión	g/min	23.1	12	26.1	20.4
	potencia de estufa	KW	8.222	4.275	9.287	7.261

Tabla 15. Resultados de WBT por fases de cocina tipo rocket

Fase	Resultado	Unidad	Test 1	Test 2	Test 3	Promedio
Fase 1 Inicio en frio alto poder (IFAP)	Tiempo para llevar a ebullición 5L	Min	35	28	50	37.66
	Eficiencia térmica	%	15	22	25	20.66
	Combustible consumido	g/L	133	91	87.66	103.88
	Tasa de combustión	g/min	23.6	21	10.9	18.5
	Potencia de estufa	KW	8.399	7.461	3.879	6.579
Fase 2 Inicio en caliente de alto poder (ICAP)	Tiempo para llevar a ebullición 5L	Min	17	22	19	19.33
	eficiencia térmica	%	32	30	20	27.33
	combustible consumido	g/L	74.14	81.08	122.62	92.61
	tasa de combustión	g/min	23	21.3	34.4	26.23
	potencia de estufa	KW	8.184	7.570	12.250	9.33
Fase 3 Fuego lento (FL)	Tiempo para llevar a ebullición 5L	Min	45	45	45	45
	eficiencia térmica	%	25	17	14	18.66
	combustible consumido	g/L	87.6	170.3	204.2	154.03
	tasa de combustión	g/min	9.8	18.9	22.1	16.93

Cocina de Leña tipo Rocket de alta eficiencia y bajo impacto ambiental en comparación a la Cocina de Leña Convencional

	potencia de estufa	KW	3.471	3.638	7.881	4.996
--	--------------------	----	-------	-------	-------	-------

9.1.1. Tiempo para llevar a ebullición 5 litros de agua

En la **Figura 22** se muestra el tiempo promedio que se requiere para llevar al punto de ebullición en cada una de las pruebas, en la cual podemos observar que solo en uno de los casos de inicio en frío el tiempo es mayor para la cocina tipo rocket, esto se debe a que en la cocina tradicional de tres piedras se tiene una mayor circulación de aire lo cual en algunos casos da mayor ventaja en esta prueba y en caso contrario en la fase de inicio en caliente el tiempo de la cocina tradicional es mayor por lo que no retiene calor en su interior.

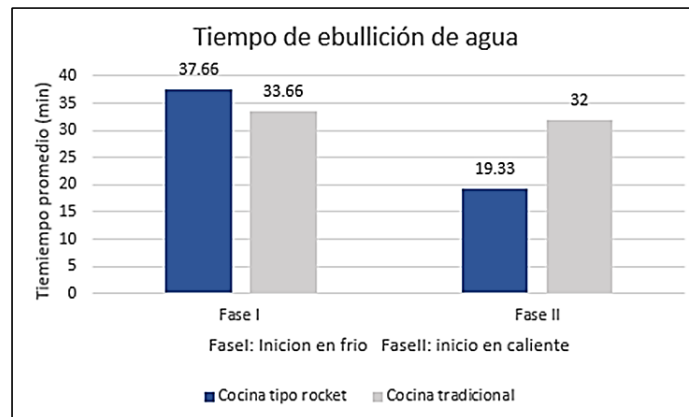


Figura 22. Gráfica de tiempo de ebullición de agua

9.1.2. Eficiencia térmica

Los resultados de eficiencia térmica de ambas cocinas (**Figura 23**), muestran un rendimiento bajo en la cocina tradicional esto se debe a que el calor total generado en la cocina no es totalmente aprovechado dado que se pierde en todas las direcciones, caso contrario la cocina tipo rocket con su chimenea interna distribuye los gases de combustión a las zonas específicas en donde se necesitan.

Cocina de Leña tipo Rocket de alta eficiencia y bajo impacto ambiental en comparación a la Cocina de Leña Convencional

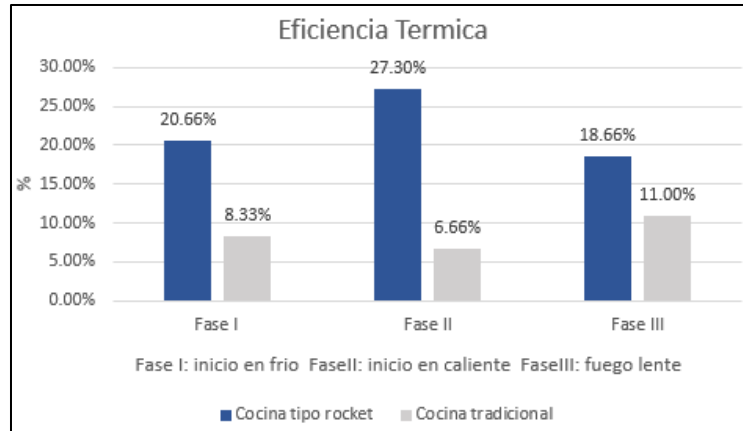


Figura 23. Gráfica de eficiencia térmica

9.1.3. Combustible consumido

La gráfica de la **Figura 24** muestra que el consumo de combustible en la cocina tipo rocket es mayor en la fase III debido a que requiere más combustible para mantener la temperatura deseada a lo largo de la prueba, en las pruebas que solo se debía de llevar a 100 °C el agua se ocupó mayor cantidad de combustible al inicio, pero una vez calentadas todas las superficies de la cocina el consumo disminuye de manera significativa. En el caso de la cocina tradicional al no tener los beneficios de la cocina rocket el consumo de combustible es mayor en todas las fases.

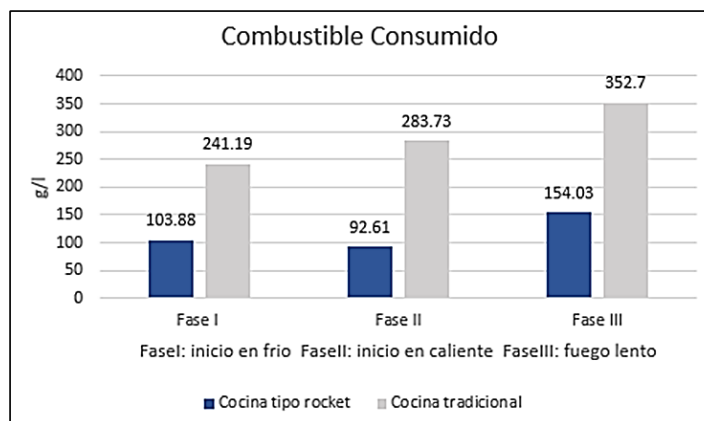


Figura 24. Combustible consumido en la realización de las pruebas

9.1.4. Tasa de combustión

La tasa de combustión en la cocina tradicional es mayor a la cocina tipo rocket debido al exceso de ventilación que tiene, lo cual permite que el combustible se consuma con mayor velocidad. En la cocina tipo rocket al tener controlado el ingreso de oxígeno a la cámara de combustión el consumo de combustible es controlado a como se muestra en la gráfica de comparación de tasa de combustión entre ambas cocinas.

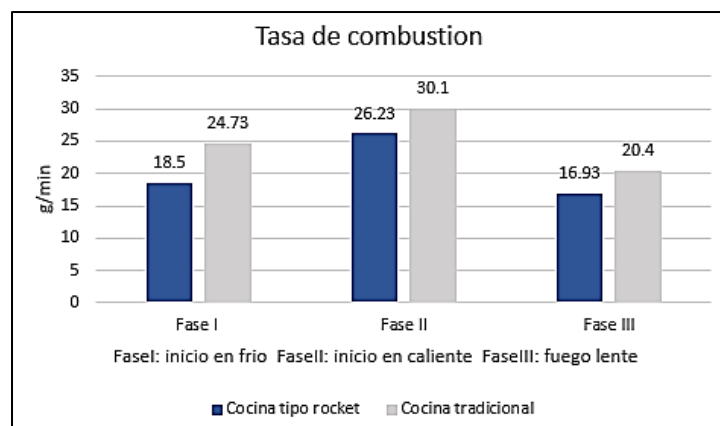


Figura 25. Tasa de combustión

9.1.5. Potencia

La figura muestra una relación entre el combustible consumido en cada una de las pruebas y la potencia de las mismas, dado que la cocina tradicional se utiliza más combustible que en la cocina tipo rocket, lo que quiere decir que entre mayor sea el consumo de combustible mayor será la potencia que entregue la cocina.

También se debe de tomar en cuenta que parte de la energía entregada se pierde en el humo en forma de calor y la cocina tipo rocket al minimizar las emisiones se aprovecha al máximo la potencia generada en la cámara de combustión.

Cocina de Leña tipo Rocket de alta eficiencia y bajo impacto ambiental en comparación a la Cocina de Leña Convencional

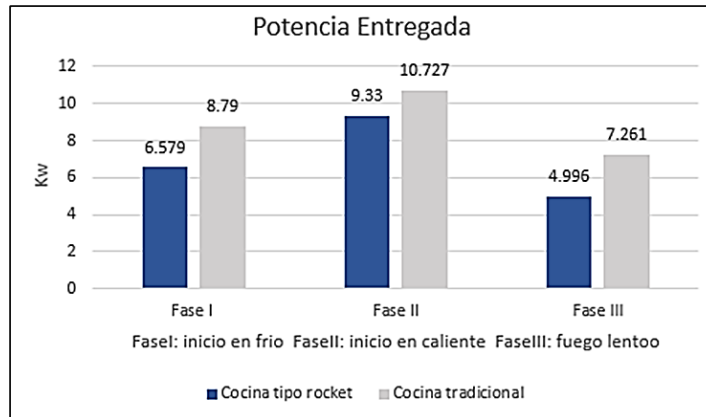


Figura 26. Potencia entregada

X. Conclusiones

- Los datos de contaminación intradomiciliaria no son presentados dado a que no se contaba con instalaciones adecuadas para poder realizar este tipo de pruebas, puesto que las pruebas de la cocina tipo rocket se hicieron en un espacio abierto que impedía la interferencia de viento por las paredes que lo rodeaban, los valores que detectaron los sensores de monóxido de carbono y dióxido de carbono eran prácticamente imperceptibles a como se muestra en el anexo.
- La evolución energética entre ambas cocinas ha demostrado que la cocina tipo rocket tiene mejor eficiencia que la cocina tradicional (Tres piedras) debido al tiempo de llevar a cabo las tareas con menor cantidad de combustibles y esto aumenta una vez que la cocina pasa por el proceso de calentamiento.
- El dimensionamiento de las partes de la cocina fue realizado en base a las especificaciones de diseño del Dr. Baldwin. Cada una de las partes construidas se realizaron teniendo como objetivo el fácil desmontaje de la misma, por si en algún momento se desea trasladar a otro punto, al tener estas piezas desmontables el manejo de las mismas es menos tedioso dado que no se mueve el peso total de la cocina.
- La selección del material aislante utilizado en el cuerpo de la cocina se realizó mediante la transferencia de calor por métodos numéricos y factor de forma, al evaluar diversos materiales aislantes que se encuentran en el país, de forma natural la piedra pómez resaltaba entre los demás al tener un valor teórico bajo en la temperatura exterior de la cocina.

XI. Recomendaciones

- La hornilla de olla interna al ser la principal es a la que trasfiere mayor energía y se puede utilizar para cocinar con mayor rapidez, una de las principales ventajas es que al ser desmontable esa hornilla se pueden ocupar ollas de mayor tamaño, pero teniendo en cuenta que su aprovechamiento máximo se da al utilizar una olla de 24 cm de diámetro.
- Las hornillas de olla externa tienen menor capacidad de calentamiento por lo que se pueden utilizar para cocciones controladas.
- Para aumentar la resistencia de las piezas de la cocina se pueden construir moldes de madera dado que mantienen la altura de la pieza uniformemente además de que se puede proporcionar la compactación necesaria al mortero obteniendo mayor resistencia.
- la instalación de la cocina se debe de realizar en un lugar entechado debido a que si esta se moja el combustible consumido será aún mayor dado que lo primero que hará es calentar todo su cuerpo.
- En cada ocasión que se vaya a ocupar la cocina asegúrese de eliminar la ceniza restante, esto puede impedir la circulación de aire en la cámara de combustión.

XII. Bibliografía

Dr. Samuel Baldwin, (1987). Biomass Cookstove: Engineering Design, Development and dissemination. New Jersey: VITA.

Marcos S., & David P., (15 de marzo del 2016). Evaluación energética de cocinas mejoradas a través del método Water Boiling Test 4.2.3 (Monografía). Universidad Nacional de Ingeniería, Nicaragua.

Jon Luzuriaga, (2015). Optimización bajo criterios de la eficiencia de transferencia de calor de cocinas autoconstruidas por comunidades rurales de Nicaragua. Universidad del País Vasco, Bilbao.

E. Batista, S. Justianovich y V. Passamai, (2015). Diseño, construcción y evaluación de una cocina a leña para la agricultura familiar. Argentina:

Fortalecimiento de la Capacidad en Energía Renovable para América Central (FOCER), (2002). Manual sobre energía renovable: Biomasa. Recuperado de <http://www.bio-nica.info/biblioteca/BUNCA2002Biomasa.pdf>

Transbioma FP, (2012). Biomasa, Biocombustible y Sostenibilidad. Recuperado de <http://sostenible.palencia.uva.es/system/files/publicaciones/Biomasa%2C%20Biocombustibles%20y%20Sostenibilidad.pdf>

Centro Humboldt, (7 de febrero 2018). La leña representa el 44% del consumo de energía en Nicaragua. Recuperado de: <https://humboldt.org.ni/la-leña-representa-el-44-del-consumo-de-energía-en-nicaragua/>

Cocina de Leña tipo Rocket de alta eficiencia y bajo impacto ambiental en comparación a la Cocina de Leña Convencional

Torrez H. (2005). Evaluación comparativa de una Cocina Tradicional y una Cocina Mejorada para Ahorrar Leña. DOI: 10.13140/RG.2.1.1762.7365

Proleña, (2013). Cocinas Mejoradas de Nicaragua. Managua, Nicaragua: Genesis Impresiones.

Rocket stoves Alrededor del Mundo. Principios de Cocina Rocket. Recuperado de: <http://www.ideassonline.org/public/pdf/rocketstovesesp.pdf>

Aprovecho Research Center. Principios de Diseño para Estufas de Cocción con Leña. Recuperado de: <http://aprovecho.org/publications-3/>

Holman, (1998). Transferencia de Calor. Mexico: MC Graw Hill

Kreith, Manglik y Bohn. Principios de Transferencia de Calor. México: CEGAGE Learning.

Yunus, Cengel y Afshin, (2011). Transferencia de Calor y Masa: fundamentos y aplicaciones. México Mc Graw Hill

CLEAN COOKING ALLIANCE, (2018). Protocolo de Prueba de Ebullición de agua. Recuperado de: <https://www.cleancookingalliance.org/technology-and-fuels/testing/protocols.html>

TREEWORLD WHOLESALE. (2018). PITHECELLOBIUM ARBOREUM: <http://treeworldwholesale.com/es/flores-de-primavera/230pithecellobium-arboreum-syn-cojoba-arborea.html>

Cocina de Leña tipo Rocket de alta eficiencia y bajo impacto ambiental en comparación a la Cocina de Leña Convencional

TREEWORLD WHOLESALE, (2018). PITHECELLOBIUM ARBOREUM. Recuperado de: <http://treeworldwholesale.com/es/flores-de-primavera/230pithecellobium-arboreum-syn-cojoba-arborea.html>

Administración Nacional Oceánica y Atmosférica. (2021). NOAA. Obtenido de <https://tgftp.nws.noaa.gov/weather/current/MNMG.html>

CALS Arizona. (2011). Medición de Flujo. Obtenido de <https://cals.arizona.edu/classes/ABE404/Assignments/Solution19.htm>

Cengel, Y. A., & Boles, M. A. (2015). Termodinámica (8a. ed.). México D.F.: McGraw-Hill.

Incropera, F. P. (2007). Fundamentos de Transferencia de Calor y Masa (6th ed.). John Wiley & Sons.

S&P. (2018). El Blog de la ventilación eficiente. Obtenido de <https://www.solerpalau.com/es-es/blog/efecto-chimenea/>

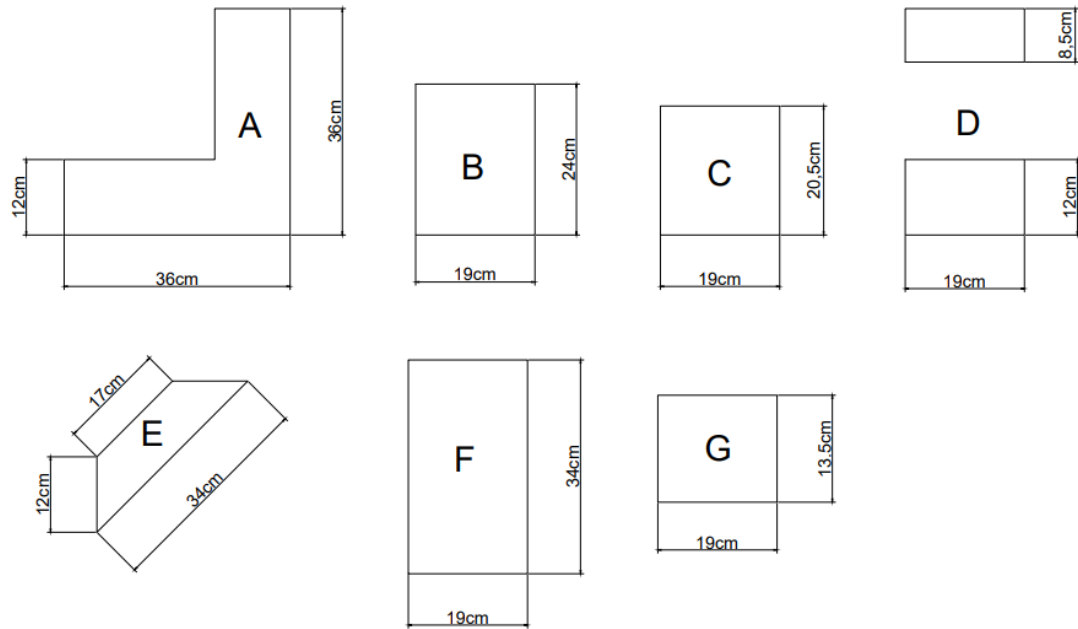
The Engineering Toolbox. (2013). Aire - Viscosidad dinámica y cinemática. Obtenido de https://www.engineeringtoolbox.com/air-absolute-kinematic-viscosity-d_601.html

The Engineering Toolbox. (2013). Flujo de aire y velocidad debido a corrientes de aire naturales. Obtenido de https://www.engineeringtoolbox.com/natural-draught-ventilation-d_122.html

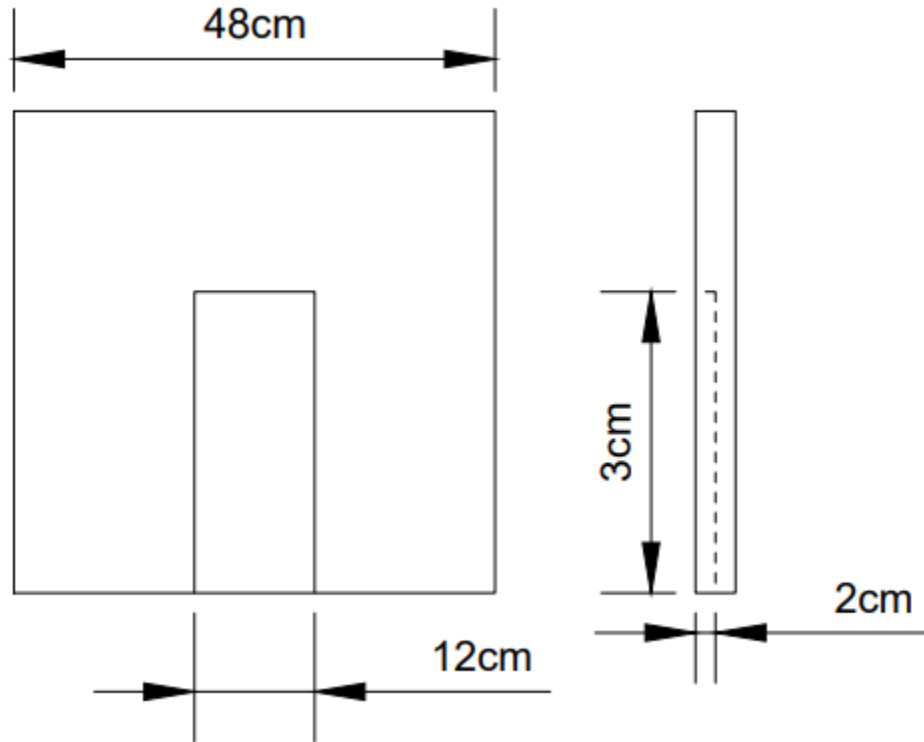
Thermal Engineering. (2019). Nusselt Number. Obtenido de <https://www.thermal-engineering.org/es/que-es-el-numero-de-nusselt-definicion/>

XIII. ANEXOS

Anexo 1: dimensiones de partes de cámara de combustión

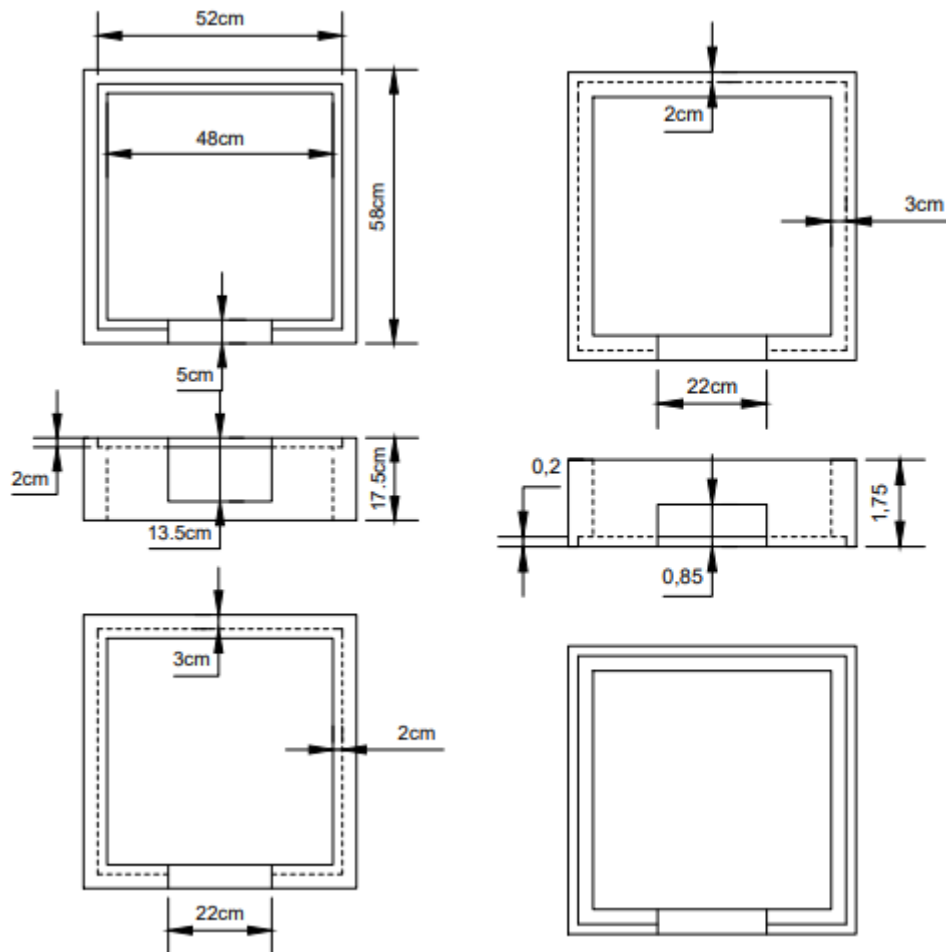


Anexo 2: recolector de cenizas

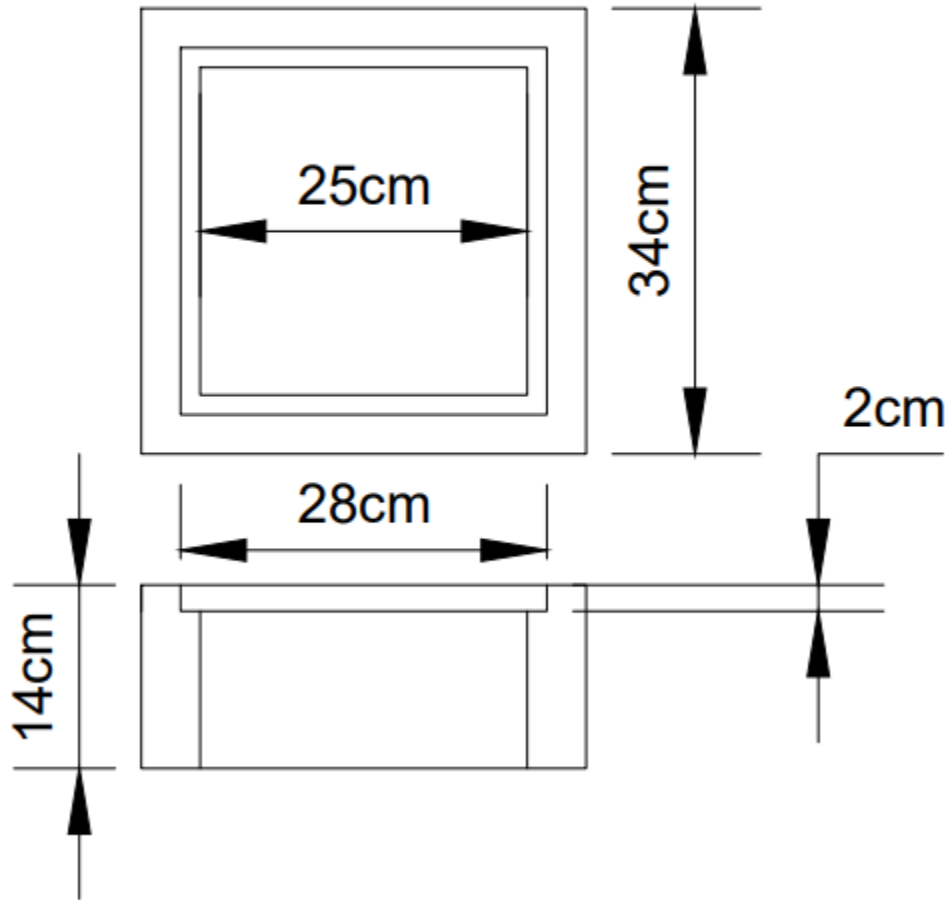


Cocina de Leña tipo Rocket de alta eficiencia y bajo impacto ambiental en comparación a la Cocina de Leña Convencional

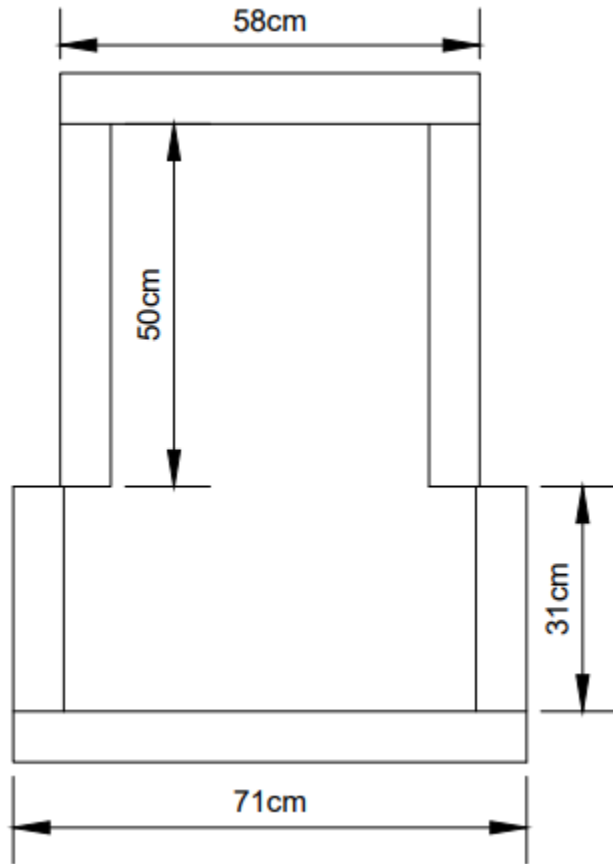
Anexo 3: dimensiones del cuerpo de la cocina



Anexo 4: Plataforma de falda

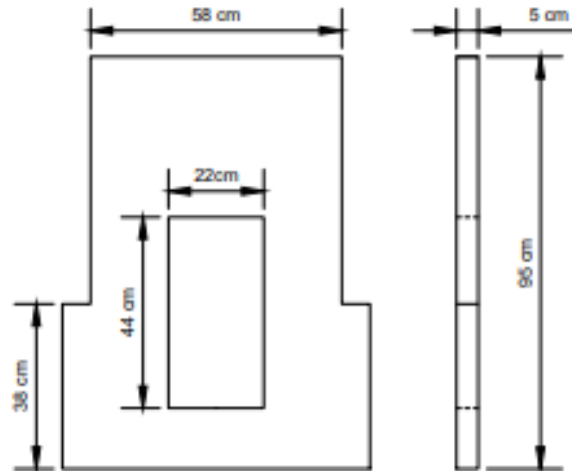


Anexo 5: Dimensiones de separadores de plataformas

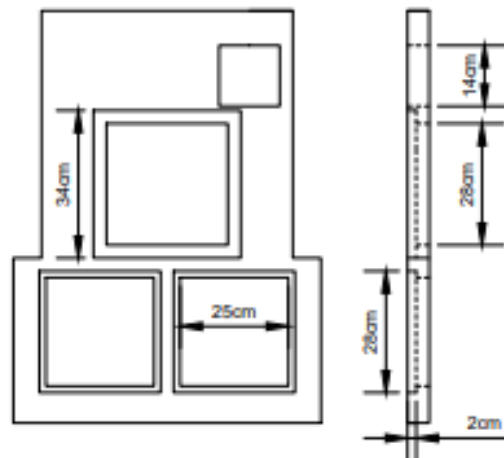


Anexo 6: Dimensiones de Plataforma de Gases

Plataforma de direccionamiento de gases



Plataforma de hornillas



Anexo 7: Viscosidad dinámica

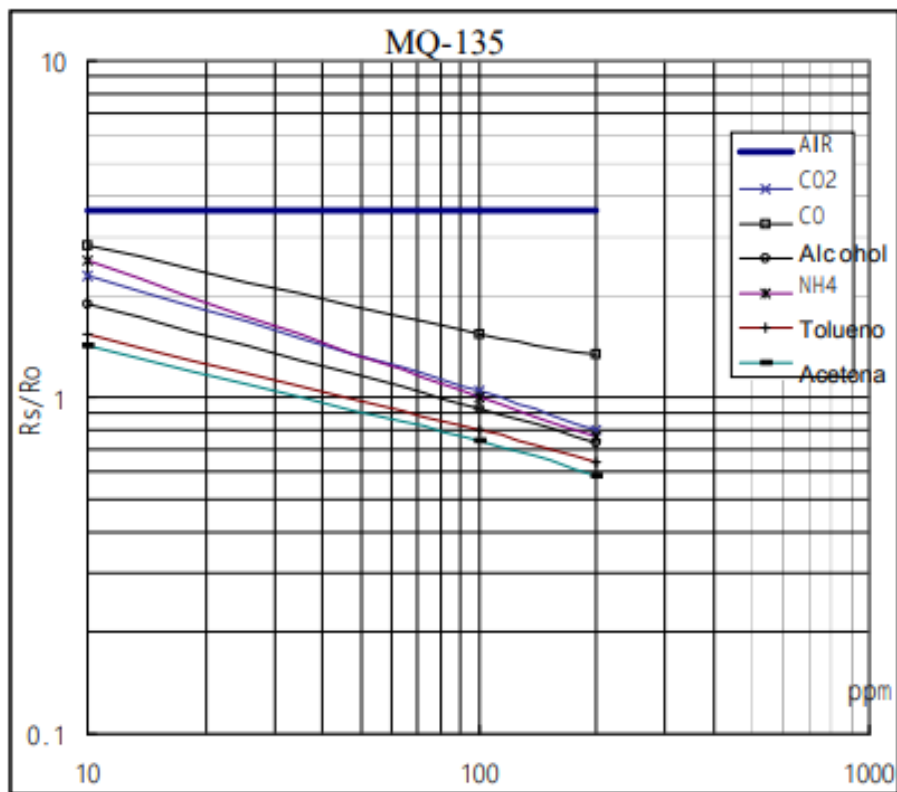
Temp. (°C)	Densidad (Kg /m ³)	Viscosidad (Pa.s)	Viscosidad cinemática (m ² /s)	Calor específico de pres. cte. (J /kg·K)	Calor específico de vol. cte. (J/kg·K)
0	1.29000004	0.0000171	0.0000133	1000	716
50	1.09000003	0.0000195	0.0000179	-	-
100	0.94599999	0.0000217	0.000023	1010	723
150	0.83500001	0.0000238	0.0000285	-	-
200	0.74599998	0.0000257	0.0000345	1020	737
225	0.71050000	0.0000266	0.00003765	-	-
250	0.67500002	0.0000275	0.0000408	-	-
300	0.61599998	0.0000293	0.0000475	1040	758
400	0.52499998	0.0000325	0.000062	1070	781
500	0.45699999	0.00003755	0.0000775	287	1090

Cocina de Leña tipo Rocket de alta eficiencia y bajo impacto ambiental en comparación a la Cocina de Leña Convencional

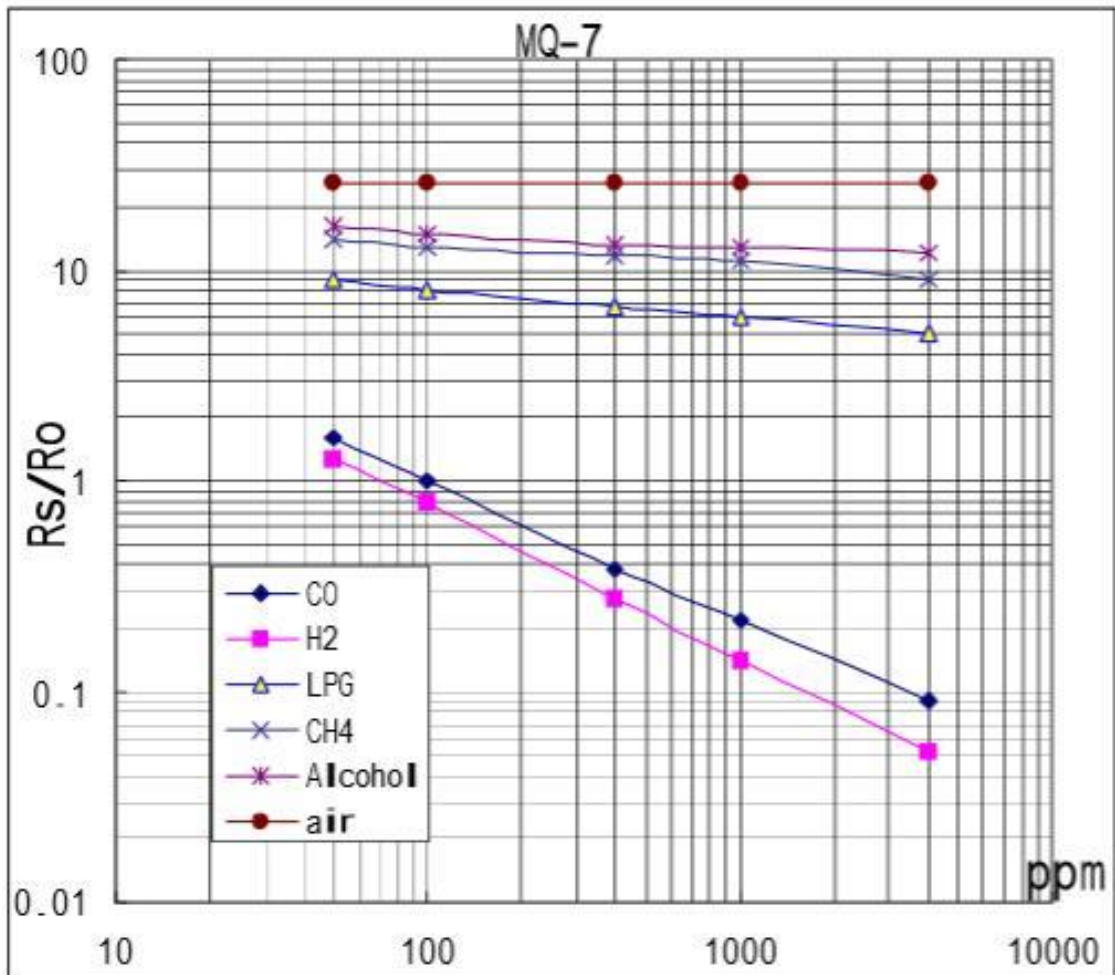
Anexo 8: Número de Prandtl

Temperatura (°C)	Temperatura (°F)	Temperatura (K)	Número de Prandtl
80	176	353.15	0.7154
100	212	373.15	0.7111
120	248	393.15	0.7073
140	284	413.15	0.7041
160	320	433.15	0.7014
180	356	453.15	0.6992
200	392	473.15	0.6974
225	437	498.15	0.696
250	482	523.15	0.6946
300	572	573.15	0.6935
350	662	623.15	0.6937
400	752	673.15	0.6948
450	842	723.15	0.6965
500	932	773.15	0.6986
600	1112	873.15	0.7037
700	1292	973.15	0.7092
800	1472	1073.15	0.7149
900	1652	1173.15	0.7206
1000	1832	1273.15	0.726
1500	2732	1773.15	0.7478
2000	3632	2273.15	0.7539

Anexo 9: Curva característica de sensor MQ-135



Anexo 10: Curva característica de sensor MQ-7



Cocina de Leña tipo Rocket de alta eficiencia y bajo impacto ambiental en comparación a la Cocina de Leña Convencional

Anexo 11: Datos obtenidos de la curva del sensor MQ-135

y	x
2.29	9.97
2.00	15.05
1.81	20.19
1.58	30.47
1.43	40.21
1.31	50.02
1.25	60.68
1.19	69.99
1.13	80.73
1.08	90.04
1.04	100.43
1.00	113.91
0.90	146.55
0.80	199.95

Cocina de Leña tipo Rocket de alta eficiencia y bajo impacto ambiental en comparación a la Cocina de Leña Convencional

Anexo 12: Datos obtenidos de la curva característica del sensor MQ-7

Y	X
1.92	44.97
1.69	53.63
1.58	62.25
1.47	70.32
1.37	78.36
1.33	86.16
1.17	104.15
1.07	119.25
0.95	138.41
0.86	162.84
0.72	219.37
0.68	244.48
0.61	291.55
0.57	311.97
0.52	392.75
0.46	468.37
0.44	536.3
0.41	605.83
0.39	675.17
0.37	752.44
0.34	861.58
0.26	1441.53
0.21	2078.01
0.19	2478.09
0.18	2761.7

Anexo 13: Programación de Sensores en Arduino

```
void setup() {
  Serial.begin(9600);
}

#include <max6675.h>
int ktcSO_1 = 11;
int ktcCS_1 = 12;
int ktcCLK_1 = 13;
int ktcSO_2 = 8;
int ktcCS_2 = 9;
int ktcCLK_2 = 10;

MAX6675 ktc_1(ktcCLK_1, ktcCS_1, ktcSO_1);
MAX6675 ktc_2(ktcCLK_2, ktcCS_2, ktcSO_2);

void loop() {

  int adc_MQ135_1 = analogRead(A0); // lectura de salida analogica de sensor de
CO2-1

  int adc_MQ7_1 = analogRead (A2); // lectura de salida analogica de sensor de
CO-1

  float voltaje_1 = adc_MQ135_1 * (5.0 / 1023.0); // convertimos lectura analogica
en voltaje

  float voltaje_2 = adc_MQ7_1 * (5.0 / 1023.0); // convertimos lectura analogica en
voltaje

  double Rs_1 = 1000 * ((5 - voltaje_1) / voltaje_1); // se calcula RS con un RL de
1k

  double Rs_2 = 1000 * ((5 - voltaje_2) / voltaje_2); // se calcula RS con un RL de
1k

  double CO2_1 = 111.77 * pow ((Rs_1 / 148.2), -2.881); // calculo de
concentracion de CO2_1

  double CO_1 = 131.87 * pow ((Rs_2 / 589.94), -1.734); // calculo de
concentracion de CO_1
```

Cocina de Leña tipo Rocket de alta eficiencia y bajo impacto ambiental en comparación a la Cocina de Leña Convencional

```
Serial.print(" ppm CO2_1:");
Serial.print(CO2_1);

Serial.print ("voltaje_1");
Serial.print (voltaje_1);
Serial.print(" ppm CO_1:");
Serial.print(CO_1);
Serial.print ("voltaje_2");
Serial.print (voltaje_2);

Serial.print ("graddos °C_1:");
Serial.print(ktc_1.readCelsius());
Serial.print ("graddos °C_2:");
Serial.println(ktc_2.readCelsius());

delay(1500);
}
```

Anexo 14. Resultados WBT de cocina tradicional

WATER BOILING TEST - VERSION 4.2.3		TEST #	1.00
All cells are linked to data worksheets, no entries are required			
Stove type/model	rst		
Location	la paz centro		
Fuel description	Pithecellobium Dulce (Quamachil, Guamuchil (Mexico), Manila Tamaimd)		
Wind conditions	No wind; No wind; No wind;		
Ambient temperature	30°C; 29°C; 29°C; 29°C; 29°C; 29°C; 29°C; 29°C; 29°C; 29°C		

1. HIGH POWER TEST (COLD START)	units	Test 1	Test 2	Test 3	Test 4	Test 5	Test 6	Test 7	Test 8	Test 9	Test 10	Average	St Dev	COV
Time to boil Pot # 1	min	34	44	23	-	-	-	-	-	-	-	33.666667	-	-
Temp-corrected time to boil Pot # 1	min	35	45	23	-	-	-	-	-	-	-	34	-	-
Burning rate	g/min	23	24	27	▶	▶	▶	▶	▶	▶	▶	25	▶	▶
Thermal efficiency	%	9%	6%	10%	▶	▶	▶	▶	▶	▶	▶	0.0844801	▶	▶
Specific fuel consumption	g/liter	229	309	186	▶	▶	▶	▶	▶	▶	▶	241	▶	▶
Temp-corrected specific consumption	g/liter	235	317	189	▶	▶	▶	▶	▶	▶	▶	247	▶	▶
Temp-corrected specific energy cons.	kJ/liter	5,019	6,761	4,029	▶	▶	▶	▶	▶	▶	▶	5270	▶	▶
Firepower	watts	8,330	8,524	9,592	▶	▶	▶	▶	▶	▶	▶	8815.2237	▶	▶

2. HIGH POWER TEST (HOT START)	units	Test 1	Test 2	Test 3	Test 4	Test 5	Test 6	Test 7	Test 8	Test 9	Test 10	Average	St Dev	COV
Time to boil Pot # 1	min	33	34	29	-	-	-	-	-	-	-	32	-	-
Temp-corrected time to boil Pot # 1	min	34	36	30	-	-	-	-	-	-	-	33	-	-
Burning rate	g/min	30	36	25	▶	▶	▶	▶	▶	▶	▶	30	▶	▶
Thermal efficiency	%	7%	5%	8%	▶	▶	▶	▶	▶	▶	▶	0	▶	▶
Specific fuel consumption	g/liter	295	345	211	▶	▶	▶	▶	▶	▶	▶	284	▶	▶
Temp-corrected specific consumption	g/liter	302	366	219	▶	▶	▶	▶	▶	▶	▶	296	▶	▶
Temp-corrected specific energy cons.	kJ/liter	6,458	7,812	4,675	▶	▶	▶	▶	▶	▶	▶	6315	▶	▶
Firepower	watts	10,729	12,645	8,809	▶	▶	▶	▶	▶	▶	▶	10728	▶	▶

3. LOW POWER (SIMMER)	units	Test 1	Test 2	Test 3	Test 4	Test 5	Test 6	Test 7	Test 8	Test 9	Test 10	Average	St Dev	COV
Burning rate	g/min	23	12	26	▶	▶	▶	▶	▶	▶	▶	20	▶	▶
Thermal efficiency	%	12%	11%	10%	▶	▶	▶	▶	▶	▶	▶	0.1141821	▶	▶
Specific fuel consumption	g/liter	328	185	546	▶	▶	▶	▶	▶	▶	▶	353	▶	▶
Temp-corrected specific energy cons.	kJ/liter	7,001	3,943	11,657	▶	▶	▶	▶	▶	▶	▶	7534	▶	▶
Firepower	watts	8,222	4,275	9,287	▶	▶	▶	▶	▶	▶	▶	7261	▶	▶

Cocina de Leña tipo Rocket de alta eficiencia y bajo impacto ambiental en comparación a la Cocina de Leña Convencional

BENCHMARK VALUES (for 5L)												
	Test 1	Test 2	Test 3	Test 4	Test 5	Test 6	Test 7	Test 8	Test 9	Test 10	Average	COV
Fuel Use Benchmark Value	2,982	2,629	3,747								3119	
Energy Use Benchmark Value	63,699	56,149	80,044								66631	
Carbon Monoxide Benchmark Value												
Particulate Matter Benchmark Value												

IWA PERFORMANCE METRICS												
	Test 1	Test 2	Test 3	Test 4	Test 5	Test 6	Test 7	Test 8	Test 9	Test 10	Average	COV
High Power Thermal Efficiency	7.5%	5.8%	9.3%								0.0755774	
Low Power Specific Fuel Consumption	0.156	0.088	0.259								0.167	
High Power CO												
Low Power CO												
High Power PM												
Low Power PM												
Indoor CO Emissions												
Indoor PM Emissions												

IWA PERFORMANCE TIERS	Tier
High Power Thermal Efficiency	0
Low Power Specific Fuel Consumption	0
High Power CO	NA
Low Power CO	NA
High Power PM	NA
Low Power PM	NA
Indoor CO Emissions	NA
Indoor PM Emissions	NA

NA = Not Applicable, IWA Performance Tiers are not reported if there are fewer than 3 tests conducted.

Anexo 15. Resultados WBT para cocina tipo rocket

Cocina de Leña tipo Rocket de alta eficiencia y bajo impacto ambiental en comparación a la Cocina de Leña Convencional

WATER BOILING TEST - VERSION 4.2.3 **TEST #** 1.00

All cells are linked to data worksheets, no entries are required

Stove type/model: rst

Location: la paz centro

Fuel description: Pithecellobium Dulce (Quamachil, Guanuchil (Mexico), Manila Tamarind)

Wind conditions: No wind; No wind; No wind;

Ambient temperature: 30°C; 30°C; 29.6°C; °C; °C; °C; °C; °C; °C; °C

1. HIGH POWER TEST (COLD START)												
	units	Test 1	Test 2	Test 3	Test 4	Test 5	Test 6	Test 7	Test 8	Test 9	Test 10	COV
Time to boil Pot # 1	min	35	28	50	-	-	-	-	-	-	-	37.666667
Temp-corrected time to boil Pot # 1	min	36	30	51	-	-	-	-	-	-	-	39
Burning rate	g/min	24	21	11	-	-	-	-	-	-	-	18
Thermal efficiency	%	15%	22%	25%	-	-	-	-	-	-	-	0.2051059
Specific fuel consumption	g/liter	133	91	88	-	-	-	-	-	-	-	104
Temp-corrected specific consumption	g/liter	136	97	90	-	-	-	-	-	-	-	108
Temp-corrected specific energy cons.	kJ/liter	2,903	2,068	1,924	-	-	-	-	-	-	-	2298
Firepower	watts	8,399	7,461	3,879	-	-	-	-	-	-	-	6679.7239

2. HIGH POWER TEST (HOT START)												
	units	Test 1	Test 2	Test 3	Test 4	Test 5	Test 6	Test 7	Test 8	Test 9	Test 10	COV
Time to boil Pot # 1	min	17	22	19	-	-	-	-	-	-	-	19.333333
Temp-corrected time to boil Pot # 1	min	17	23	20	-	-	-	-	-	-	-	20
Burning rate	g/min	23	21	34	-	-	-	-	-	-	-	26
Thermal efficiency	%	32%	30%	20%	-	-	-	-	-	-	-	0
Specific fuel consumption	g/liter	72	81	117	-	-	-	-	-	-	-	90
Temp-corrected specific consumption	g/liter	74	87	123	-	-	-	-	-	-	-	94
Temp-corrected specific energy cons.	kJ/liter	1,584	1,848	2,619	-	-	-	-	-	-	-	2017
Firepower	watts	8,184	7,570	12,250	-	-	-	-	-	-	-	9335

3. LOW POWER (SIMMER)												
	units	Test 1	Test 2	Test 3	Test 4	Test 5	Test 6	Test 7	Test 8	Test 9	Test 10	COV
Burning rate	g/min	10	19	22	-	-	-	-	-	-	-	17
Thermal efficiency	%	25%	17%	14%	-	-	-	-	-	-	-	0.1848713
Specific fuel consumption	g/liter	88	170	204	-	-	-	-	-	-	-	154
Temp-corrected specific energy cons.	kJ/liter	1,872	3,638	4,361	-	-	-	-	-	-	-	3290
Firepower	watts	3,471	6,726	7,881	-	-	-	-	-	-	-	6026
Turn down ratio	--	2.42	1.11	0.49	-	-	-	-	-	-	-	1

Cocina de Leña tipo Rocket de alta eficiencia y bajo impacto ambiental en comparación a la Cocina de Leña Convencional

BENCHMARK VALUES (for 5L)													
	Test 1	Test 2	Test 3	Test 4	Test 5	Test 6	Test 7	Test 8	Test 9	Test 10	Average	St Dev	COV
Fuel Use Benchmark Value	963	1,310	1,553								1275		
Energy Use Benchmark Value	20,573	27,979	33,162								27238		
Carbon Monoxide Benchmark Value													
Particulate Matter Benchmark Value													

IWA PERFORMANCE METRICS													
	Test 1	Test 2	Test 3	Test 4	Test 5	Test 6	Test 7	Test 8	Test 9	Test 10	Average	St Dev	COV
High Power Thermal Efficiency	23.6%	26.0%	22.1%								0.2392795		
Low Power Specific Fuel Consumption	0.042	0.081	0.097								0.073		
High Power CO													
Low Power CO													
High Power PM													
Low Power PM													
Indoor CO Emissions													
Indoor PM Emissions													

IWA PERFORMANCE TIERS	
	Tier
High Power Thermal Efficiency	1
Low Power Specific Fuel Consumption	0
High Power CO	NA
Low Power CO	NA
High Power PM	NA
Low Power PM	NA
Indoor CO Emissions	NA
Indoor PM Emissions	NA

NA = Not Applicable; IWA Performance Tiers are not reported if there are fewer than 3 tests conducted.