



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
ENERGÍA- ENERGÍA Y MEDIO AMBIENTE

TEMA:
DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y EVALUACIÓN DE UN MICROGASIFICADOR PARA
APLICACIONES DE COCCIÓN CON BIOMASA PROCESADA

TESIS
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
DOCTOR EN INGENIERÍA

PRESENTA:
JORGE EMIGDIO SÁNCHEZ PÓLITO

TUTOR PRINCIPAL:
DR. OMAR RAÚL MASERA CERUTTI
INSTITUTO DE INVESTIGACIONES EN ECOSISTEMAS Y SUSTENTABILIDAD (IIES)

COTUTOR:
DR. LUIS AGUSTÍN ÁLVAREZ-ICAZA LONGORIA
INSTITUTO DE INGENIERÍA (IIUNAM)

COMITÉ TUTORAL:
DR. ALBERTO BELTRÁN MORALES
INSTITUTO DE INVESTIGACIONES EN MATERIALES (IIM)

DR. VÍCTOR MANUEL BERRUETA SORIANO
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA (UAM)

DR. VÍCTOR MANUEL RUIZ GARCÍA
INSTITUTO DE INVESTIGACIONES EN ECOSISTEMAS Y SUSTENTABILIDAD (IIES)

CIUDAD UNIVERSITARIA, CD. MX. FEBRERO 2024



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

JURADO ASIGNADO

Presidente: Dr. Luis Agustín Álvarez Icaza Longoria

Secretario: Dr. Víctor Manuel Ruiz García

Vocal: Dr. Omar Raúl Masera Cerutti

1^{er} suplente: Dr. Alberto Beltrán Morales

2do suplente: Dr. Víctor Manuel Berrueta Soriano

Lugar o lugares donde se realizó la tesis:

Facultad de Ingeniería, UNAM, Ciudad de México

TUTOR DE TESIS

Dr. Omar Raúl Masera Cerutti

FIRMA

Dedicatoria

A mis padres, Alejandra y Jorge.

*La vida para mí no es una vela que se apaga.
Es más bien una espléndida antorcha
que sostengo en mis manos durante un momento,
y quiero que arda con la máxima claridad posible
antes de entregarla a futuras generaciones.*

George Bernard Shaw

Agradecimientos

Institucionales

Agradezco a la Universidad Autónoma de México (UNAM), a la Facultad de Ingeniería (FI), al Instituto de Investigaciones en Ecosistemas y Sustentabilidad (IIES) y al Grupo de Innovación Ecotecnológica y Bioenergía (GIEB) por darme la oportunidad de acceder y compartir conocimientos enriquecedores que contribuyen en mi formación académica y profesional, y por brindarme todas las facilidades para lograr el desarrollo de esta investigación.

Agradezco el apoyo financiero otorgado por el Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías para realizar los estudios de doctorado y obtener el grado de doctor. También agradezco el apoyo del Fondo de Sustentabilidad Energética a través del proyecto SENER CONACYT 2014/246911 Clúster de Biocombustibles Sólidos para la Generación Térmica y Eléctrica por las facilidades otorgadas.

Un agradecimiento particular al tutor principal de esta Tesis, el Dr. Omar Masera, por la paciencia, consejos y todo su apoyo brindado para la culminación de la investigación, una gran admiración por su visión y lucha para lograr un futuro común que sea mejor para todas y todos. Asimismo, quiero brindarle un gran agradecimiento al cotutor de la Tesis, el Dr. Luis Álvarez, por compartir sus enseñanzas y conocimientos invaluable que motivaron y ayudaron a mejorar el desarrollo de la investigación. También quiero agradecer a cada miembro de mi jurado: Dr. Alberto Beltrán Morales, Dr. Víctor Manuel Ruiz García y Dr. Víctor Manuel Berrueta Soriano, por aceptar ser parte del proceso de revisión, evaluación y por todo el apoyo que me brindaron.

Agradezco la Unidad de Ecotecnologías y el Laboratorio de Bioenergía, principalmente a los técnicos académicos M. en C. Alfredo F. Fuentes Gutiérrez y M. en C. René D. Martínez Bravo por su ayuda y soporte técnico en la obtención de los insumos necesarios para llevar a cabo esta tesis. También quiero agradecer al Grupo Interdisciplinario de Tecnología Rural Apropiada (GIRA), especialmente a Evaristo Herrera y Marco Cazarez por la ayuda brindada para el diseño y construcción de los dispositivos y al Laboratorio de Innovación y Evaluación en Bioenergía (LINEB), principalmente a los técnicos Juan Carlos Medina, Saraí Ramos y Dante Villanueva por el apoyo para realizar la experimentación que sustenta esta tesis.

Personales

Desde que inicie este viaje fuera de casa, no tengo palabras que expresen el agradecimiento que les tengo a mis padres Alejandra y Jorge, por estar siempre presentes, por sus consejos, apoyo y sobre todo por su motivación para salir adelante y dar siempre lo mejor de mí, gracias. También agradezco a toda mi familia, desde mi abuelita Petrita, hasta mis tías, tíos, primas y primos de Chilpancingo y Acapulco que siempre me han alentado a salir adelante y me han acompañado a lo largo de este camino.

A todos los integrantes del GIEB, que me han brindado su valiosa amistad: Alfred, Anahí, Anita, Ana Laura, Angy, Angelica, Belén, Blanca, Delmer, Dharma, Elias, Eréndira, Erick, Esther, Fany, Fernanda, Fernanda C., Israel, Janik, Juan Carlos, Kike, Manuel, Meli, Montse, Omar, Pablo, Raúl, René, Rosy, Sara, Saraí, Sofia, Teri, Víctor R. y Víctor B. Gracias por las enseñanzas y conocimientos, pero sobre todo por los momentos compartidos.

Gracias a mi familia Guerrerense (Belén, Dante y Daniel) que dicha encontrarnos y apoyarnos, fortaleciendo cada día esta bonita amistad.

Gracias Alfred por las charlas y los consejos, han sido un gran apoyo y guía en mi vida.

Gracias Ere, por compartir el gusto por las películas, la música y los libros, también por cada palabra de apoyo y motivación para dar lo mejor y culminar nuestras respectivas tesis, si se pudo.

A todos mis amigos de Chilpancingo y otros rincones del mundo: Alejandra, Andrea, Ariadna, Carolina, Dalia, David, Dinora, Edith, Erick Pech, Gaby, Hugo, Ivette, Lalo, Leslie, Lichiz, Lili, Luz, Javier, Jesús Iván, Juan, Julio, Martín, Miriam, Nathy, Naye, Nora, Pamela, Paula, Paulo, Sara Isabel, Sarah, Zuly, Zulma y Wero, que a pesar de la distancia siempre me han apoyado y brindado palabras de ánimo para seguir adelante.

Índice de contenido

Dedicatoria.....	3
Agradecimientos	4
Lista de tablas.....	7
Lista de figuras.....	8
Resumen.....	9
Introducción	10
Alcances	15
Hipótesis.....	15
Objetivos	16
1. MARCO TEÓRICO.....	17
1.1 Producción y utilización de pellets como combustibles a partir de biomasa residual.....	17
1.2 Principio de funcionamiento y parámetros de operación de MG-TLUD.....	19
1.3 Estándares nacionales e internacionales para la evaluación de estufas de biomasa.....	25
2. METODOLOGÍA	26
2.1 Análisis del proceso de micro-gasificación.....	27
2.2 Evaluación de las estufas usadas para tareas de cocción intensivas.....	28
2.3 Estudio de las necesidades y requerimientos para la cocción del nixtamal.....	29
2.4 Caracterización fisicoquímica de los BCS	30
2.5 Determinación de los parámetros y las variables que integran la metodología de diseño de los prototipos de MG-TLUD	31
2.6 Evaluación preliminar y rediseño de los prototipos de MG-TLUD	32
2.7 Pruebas de evaluación y comparativa con las normas voluntarias de rendimiento.....	35
2.8 Métricas de desempeño general de los prototipos de MG-TLUD.....	37
2.9 Evaluación preliminar de la adopción y el uso del P3-Chupiri en campo.....	39
3. RESULTADOS	40
3.1 Análisis preliminar del proceso de micro-gasificación	40
3.2 Evaluación de las estufas usadas para tareas de cocción intensivas.....	42
3.3 Estudio de las necesidades y requerimientos para la tarea de cocción del nixtamal	44
3.4 Caracterización de los pellets MAPPAV	45
3.5 Determinación de las variables que integran la metodología de diseño del MG-TLUD	46
3.6 Evaluación preliminar y rediseño de los prototipos de MG-TLUD	49
3.7 Pruebas de evaluación y comparativa con las normas voluntarias de rendimiento.....	51
3.7.1 Desempeño energético	51

3.7.2 Emisiones totales.....	53
3.7.3 Emisiones fugitivas.....	55
3.7.4 Métricas de desempeño general.....	59
3.8 Evaluación preliminar del uso del P3-Chupiri en campo.....	61
4. CONCLUSIONES.....	64
5. RECOMENDACIONES.....	65
6. REFERENCIAS.....	66
7. ANEXOS.....	75

Lista de tablas

Tabla 1. Propuestas para resolver los principales problemas/retos técnicos en los MG tipo TLUD	22
Tabla 2. Parámetros y niveles de rendimiento de la ISO/TR 19867-3 y NMX-Q-001-NORMEX-2018.....	25
Tabla 3. Pruebas implementadas para la evaluación de los prototipos de MG-TLUD, CCR y TSF	35
Tabla 4. Categorías y parámetros de rendimiento para determinar el prototipo de MG-TLUD con mejor desempeño	38
Tabla 5. Resultados de las pruebas CCT en laboratorio con la estufa Patsari nixtamalera/CCR.....	44
Tabla 6. Propiedades fisicoquímicas de los pellets MAPPV y LEB	45
Tabla 7. Parámetros y variables de diseño del prototipo de MG-TLUD (P3-Chupiri)	47
Tabla 7. Parámetros y variables de diseño del prototipo de MG-TLUD (P3-Chupiri) (continuación) .	48
Tabla 8. Resultados de desempeño energético del P3-Chupiri implementando WBT con tres relaciones geométricas de orificios de entrada de AP:AS.....	51
Tabla 9. Parámetros de desempeño energético de los prototipos de MG-TLUD, CCR y TSF.....	52
Tabla 10. Factores de emisión por energía útil entregada y eficiencia térmica comparados con los niveles de rendimiento Tier de la ISO/TR 19867-3	57
Tabla 11. Resultados de los prototipos de MG-TLUD comparados con los Tier de la ISO/TR 19867-3 y la NMX-Q-001-NORMEX para cada categoría de desempeño.....	59
Tabla 12. Resultados de las métricas de desempeño general para el desempeño energético y emisiones de los MG-TLUD.....	60
Tabla 13. Tareas de cocinado realizadas en la Estufa Patsari nixtamalera con el uso del P1-Misiri y CCR.....	61

Lista de figuras

Figura 1. Contribuciones globales estimadas de bioenergía en el consumo total final de energía por sector de uso.....	11
Figura 2. Diagrama general de las etapas involucradas en el proceso de micro-gasificación.....	20
Figura 3. Evolución del proceso de micro-gasificación a nivel global	21
Figura 4. Diagrama esquemático del proceso operativo de un MG-TLUD	24
Figura 5. Parámetros principales que influyen en el rendimiento de los MG-TLUD	24
Figura 6. Diagrama de flujo de la metodología para el desarrollo de los prototipos de MG-TLUD	26
Figura 7. Microgasificador tipo TLUD modelo Atzimba A10XL	27
Figura 8. Estufas evaluadas que se utilizan usualmente en la cocción del nixtamal.....	28
Figura 9. Mapa de ubicación del área de estudio	29
Figura 10. BCS utilizados en las pruebas de evaluación de la estufa Patsari Nixtamalera.....	30
Figura 11. a) Estufa Patsari Nixtamalera/P1-Misiri; b) Estufa Patsari Nixtamalera/CCR; c) <i>TSF</i>	32
Figura 12. a) Patsari Nixtamalera cookstove/P3-Chupiri; b) Patsari Nixtamalera cookstove/CCR	33
Figura 13. Configuración geométrica del prototipo de MG-TLUD (P3-Chupiri)	34
Figura 14. Diagrama general de las categorías y parámetros propuestos para determinar el prototipo MG-TLUD con mejor rendimiento	37
Figura 15. Etapas principales del proceso de micro-gasificación en el dispositivo tipo TLUD modelo Atzimba A10XL.....	40
Figura 16. Resultados de las pruebas WBT para evaluar el desempeño energético de las estufas utilizadas en las comunidades rurales de Michoacán.....	43
Figura 17. Proceso de cocción del nixtamal utilizando la Patsari nixtamalera/CCR en Michoacán.....	44
Figura 18. Prototipos de MG-TLUD desarrollados	49
Figura 19. Masa por intervalo de CO emitido durante las pruebas WBT en el P3-Chupiri.....	50
Figura 20. Valores de la eficiencia modificada de combustión y la eficiencia térmica total para los tres prototipos de MG-TLUD, CCR y <i>TSF</i>	53
Figura 21. Promedio de las tasas de emisión totales de PM _{2.5} y CO para los prototipos de MG-TLUD y RCC, conforme a los niveles de desempeño señalados en la NMX-Q-001-NORMEX 2018.....	54
Figura 22. Promedio de las tasas de emisión fugitivas de PM _{2.5} y CO para los prototipos de MG-TLUD y CCR en cumplimiento de los niveles de desempeño de la ISO/TR 19867-3.....	56
Figura 23. Comparación de los factores de emisión de CO y PM _{2.5} de los prototipos de MG-TLUD desarrollados con otras estufas gasificadoras de pellets reportadas en la literatura.	58
Figura 24. Encuestas tipo Likert para evaluar la interacción del uso del P3-Chupiri por doña Cristina de la comunidad de San Francisco Uricho, Michoacán	62
Figura 25. Encuestas tipo Likert para evaluar la interacción del uso del P3-Chupiri por doña Helodia de la comunidad de Tzurumútaró, Michoacán	62

Resumen

En muchos hogares latinoamericanos se siguen utilizando cocinas tradicionales y de baja eficiencia para realizar tareas de cocción doméstica que requieren una cantidad significativa de energía. El resultado es un alto consumo de combustible y una grave contaminación del aire ambiental y al interior de los hogares, con graves consecuencias negativas para la salud. Se ha demostrado que las estufas gasificadoras de biomasa de tiro ascendente con encendido superior (TLUD), también conocidas como microgasificadores (MG-TLUD), son una tecnología eficiente para la conversión de los biocombustibles sólidos (BCS) en energía calorífica. Sin embargo, hasta ahora sólo se ha realizado un número limitado de estudios que evalúen los efectos de los parámetros geométricos de diseño de los MG-TLUD en su desempeño energético y en las emisiones que contribuyen a la contaminación del aire en interiores (IAP). Además, ningún estudio ha analizado la adaptación de los MG-TLUD de tiro forzado para su uso con estufas de chimenea como cámaras de combustión indirecta en tareas de cocinado de alto consumo energético. Por lo tanto, en esta investigación se diseñaron y evaluaron tres prototipos de MG-TLUD adaptándolos a la estructura de aislamiento de una estufa con chimenea conocida como “Patsari nixtamalera”, esta estufa inicialmente utilizaba una cámara de combustión tipo rocket (CCR), la cual fue sustituida por los prototipos MG-TLUD que utilizan pellets de biomasa residual agroforestal como combustible.

Para evaluar la influencia de los parámetros geométricos de diseño de los prototipos de MG-TLUD en el rendimiento de la estufa Patsari nixtamalera, se implementaron pruebas experimentales de laboratorio: prueba de ebullición de agua (WBT) y prueba de cocinado controlado (CCT), establecidos en los protocolos de ensayo de laboratorio unificados (ISO 19867-1). La evaluación consideró la variación del tamaño del reactor y la relación geométrica de los orificios de entrada de aire primario y secundario, con el objetivo de mejorar su desempeño energético y la reducción de emisiones en tareas de cocción culturalmente relevantes para los hogares mexicanos. Los resultados de rendimiento del MG-TLUD y CCR se compararon con los objetivos de rendimiento voluntarios para estufas de biomasa basados en pruebas de laboratorio (ISO/TR 19867-3). El prototipo P3-Chupiri alcanzó el nivel máximo de rendimiento (Tier-5) establecido en la ISO/TR 19867-3, respecto a la eficiencia térmica, ahorro de combustible y la reducción de emisiones totales y fugitivas de CO y PM_{2.5}. La evaluación experimental en laboratorio de los parámetros geométricos de diseño de los MG-TLUD permite mejorar la eficiencia energética y reducir las emisiones contaminantes en tareas de cocción doméstica que requieren de un alto consumo energético. Además, es una primera etapa para determinar la viabilidad de su uso y adopción en condiciones reales de operación, por parte de las personas usuarias que viven en las comunidades rurales de México.

Introducción

El suministro y uso de la energía son algunos de los principales desafíos que seguirá enfrentando la humanidad en las próximas décadas, principalmente por la necesidad de abordar los impactos del cambio climático y las implicaciones de la transición hacia fuentes de energía más limpias. Se requiere de distintas acciones coordinadas para lograr transitar a un sistema energético que no dependa de los combustibles fósiles, desde cambiar los hábitos de consumo hasta desarrollar e integrar sistemas y tecnologías eficientes que funcionen a partir de fuentes de energía renovable descentralizada, para alcanzar el objetivo de desarrollo sostenible (ODS-7): “acceso a energía asequible y no contaminante”, y lograr cubrir las necesidades energéticas básicas de la población (iluminación, calefacción, cocción), sobre todo de las más vulnerables, a partir de enfoques sostenibles que preserven el ambiente y la calidad de vida de las personas (Reyes, 2020). Actualmente, las energías renovables representan alrededor del 21.6% del consumo final total de energía global, de la cual la bioenergía¹, es la fuente principal de energía renovable, contribuyendo con un estimado del 12.3% o 44 Exajoules (EJ) al consumo final de energía (REN21, 2022). El uso tradicional de la biomasa² para suministrar energía para cocinar y calefacción en dispositivos sencillos y usualmente ineficientes (6.7%), principalmente en las economías en desarrollo y emergentes, sigue siendo el mayor uso de la bioenergía. Por otro lado, la bioenergía moderna (5.6%) se utiliza para la producción de calor en aplicaciones industriales, calefacción moderna de espacios en casas o edificios, sector transporte y generación de energía eléctrica (ver Figura 1). La bioenergía es un recurso ampliamente disponible y versátil, debido a la flexibilidad que aporta su almacenamiento, permite suministrar la energía en el momento que sea requerida, en este sentido difiere notablemente de las fuentes de energía renovable que presentan intermitencia y variabilidad, como la energía solar y eólica, con la baja de suministro nocturno, estacional o esporádico (García & Maser, 2016). La bioenergía es la mayor fuente de energía renovable en México, con un aproximado del 4-9% de la demanda actual de energía. Se estima que el consumo total de biocombustibles sólidos de biomasa (BCS) alcanzó 481 PJ/año en el 2015, de los cuales el 65% corresponde a leña, 13% a carbón vegetal y 22% a residuos agrícolas, principalmente por medio de tecnologías tradicionales e ineficientes, siendo el sector residencial-comercial el de mayor demanda en el país (Tauro et al., 2018a).

¹ Energía generada por la conversión de productos o biocombustibles sólidos, líquidos y gaseosos derivados de la biomasa (IEA & FAO, 2017).

² Se refiere al uso de los recursos locales de biomasa sólida por parte de los hogares de bajos ingresos que no tienen acceso a tecnologías o combustibles modernos para la cocción y calefacción. La biomasa sólida, como madera, carbón vegetal, residuos agrícolas y estiércol animal, se convierten en energía a través de técnicas básicas, como los fogones a cielo abierto, para la calefacción o cocción en el sector residencial (IEA, 2018).

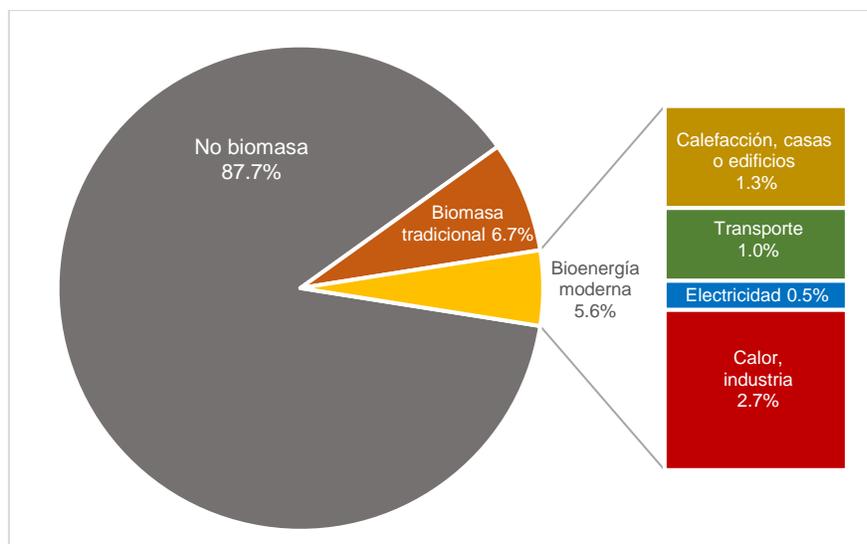


Figura 1. Contribuciones globales estimadas de bioenergía en el consumo total final de energía por sector de uso
Fuente: Elaboración propia a partir de (REN21, 2022)

La bioenergía, como perspectiva del paradigma energético mundial, contribuye significativamente al aumento de la demanda mundial de energía y al desarrollo de tecnologías para convertir la biomasa en energía (Verma et al., 2023). A nivel global, alrededor de 2.8 mil millones de personas no tienen acceso a una cocción limpia, la mayoría de ellas localizadas en el sector rural de los países en desarrollo, utilizan fogones abiertos o estufas tradicionales alimentadas por queroseno, biomasa (madera, estiércol de animales y residuos de cultivos) o carbón para cocinar sus alimentos (IEA et al., 2020). El uso de este tipo de dispositivos usualmente es ineficiente y contribuye a la contaminación del aire en los hogares, lo que provoca graves problemas de salud y la muerte de millones de personas en todo el mundo (Ahmed et al., 2019; Pratiti et al., 2020). Una oportunidad para el desarrollo técnico y uso sostenible de BCS son las estufas mejoradas y/o eficientes de biomasa (ICS, por sus siglas en inglés) tipo-plancha, ya que han demostrado a través de estudios de laboratorio y campo que la leña puede ser una fuente de energía altamente eficiente, renovable y limpia (Berrueta et al., 2008; Medina et al., 2017b; Ruiz-García et al., 2018; Serrano-Medrano et al., 2018). Sin embargo, la utilidad de las ICS tipo-plancha es limitada al realizar tareas de cocción doméstica que requieren de una mayor potencia de fuego, debido a que presentan un desempeño energético limitado (Medina et al., 2017; Pine et al., 2011).

La introducción de estufas y combustibles más limpios ocurre mediante un proceso de “stacking”, donde las familias que logran adoptar estufas de gas LP y/o ICS, continúan utilizando leña en fogones abiertos (como los de tres piedras o tipo "U") para la cocción del nixtamal, el calentamiento de agua para bañarse, la preparación de frijoles u otras tareas intensivas de energía, principalmente por el tiempo y la cantidad de combustible que requieren para realizarlas, a pesar de las implicaciones en la salud y los impactos negativos en el ambiente (Betina et al., 2022; Masera et al., 2015; Ruiz-Mercado & Masera, 2015). En el año 2019, se estimaron 10,000 muertes en México, que se atribuyen principalmente al uso de leña o carbón en fogones abiertos para la cocción de alimentos (Rivera et al., 2021). Por otro lado, los incrementos actuales de los precios del gas LP en todo el mundo, han provocado que muchos hogares sustituyan el uso de los combustibles fósiles por combustibles de leña (Shupler et al., 2022). Para lograr soluciones efectivas se deben estudiar y entender las prácticas tradicionales de cocción doméstica.

El proceso de cocción del nixtamal se utiliza para obtener una masa de maíz que se aprovecha en la preparación de diversos productos, incluyendo tortillas, tamales, tortillas fritas, frituras de maíz y bebidas, ampliamente consumidas en América Latina (Magaña-Cerino et al., 2020). En este proceso, el maíz se cocina usualmente alrededor de treinta minutos agregando cal o cenizas de madera y después se deja remojar durante la noche (Serna-Saldivar 2021). La combinación del tratamiento térmico y cal facilita la eliminación del pericarpio durante la cocción y remojo del maíz, controla la acción microbiana, y afecta la textura, sabor, aroma, color, vida útil y valor nutricional del producto final (Serna-Saldivar & Chuck-Hernandez, 2019). La cocción del nixtamal para hacer tortillas requiere de ollas de cocción grandes que generalmente necesitan un fogón abierto y leña como combustible, ya que casi ninguna ICS es viable para cocinar grandes cantidades de alimentos y hacerlo con gas LP en entornos no industriales resulta ser muy costoso (Troncoso et al., 2019). En México, 28 millones de usuarios utilizan leña como combustible principal para realizar tareas domésticas de cocción que requieren importantes cantidades de energía (INEGI, 2018). La cocción del nixtamal y el calentamiento de agua son tareas domésticas importantes realizadas en el sector rural de México y Centro América que no se han evaluado y necesitan una innovación tecnológica eficiente y limpia para atenderlas.

Actualmente, a nivel global la investigación y desarrollo de ICS se ha enfocado en mejorar el desempeño energético y la reducción de emisiones, ambas características se han considerado en los diseños de estufas de biomasa basadas en la gasificación, también conocidos como microgasificadores (MG), que representan una opción limpia y eficiente para utilizar BCS para cocinar (Roth, 2014). Dentro de los MG, los que presentan un funcionamiento basado en la gasificación de corriente ascendente encendida en la parte superior (TLUD, por sus siglas en inglés) merecen especial atención porque tienen un gran potencial para reemplazar fogones abiertos y estufas integradas con cámaras de combustión rocket (CCR), ya que estos dispositivos presentan eficiencias energéticas limitadas y mayor generación de emisiones en tareas de cocción doméstica que demandan una gran cantidad de energía (Anderson & Schoner, 2016; Getahun et al., 2019). Sin embargo, es importante investigar e implementar mejoras de diseño en los MG-TLUD, porque presentan un alto grado de variabilidad en el desempeño energético y emisiones (Marchese et al., 2018). Diferentes investigadores han desarrollado y evaluado MG-TLUD que utilizan diferentes tipos de materia prima como BCS: cáscara de arroz (Osei et al., 2020), astillas de madera, cáscara de coco, briquetas de cascara de arroz (Obi et al., 2016) y pellets elaborados a partir de residuos agrícolas y forestales como cáscara de cacahuete (Kumar & Panwar, 2019) y madera de pino (De La Hoz C. & González, 2020). La mayoría de estas investigaciones describen las características de la estufa desarrollada, pero omiten la descripción y discusión del proceso de diseño. Además, no contemplan la determinación y el análisis experimental de variables que integran el cálculo de los parámetros de diseño, únicamente consideran los valores sugeridos en la literatura. Por otro lado, la mayoría de los estudios se han enfocado en evaluar experimentalmente el desempeño energético de MG-TLUD (Adedayo et al., 2018; Ismail et al., 2013; Panwar & Rathore, 2008), sin medir y comparar las emisiones contaminantes generadas, respecto a los objetivos voluntarios de rendimiento de la normativa internacional de evaluación de estufas de biomasa basadas en pruebas de laboratorio.

Es importante evaluar las ICS con respecto a diferentes parámetros que son relevantes para una combustión limpia y una mayor eficiencia (Raman et al., 2014). Evaluar el desempeño energético y emisiones de una ICS es parte integral en el proceso de mejora de diseño (Sutar *et al.*, 2015). A nivel internacional, la evaluación del desempeño energético y emisiones de ICS se realiza con base en la normativa (ISO 19867-1, 2018), siendo los protocolos de prueba de ebullición de agua (WBT, por sus siglas en inglés) y prueba de cocinado controlado (CCT, por sus siglas en inglés) los más utilizados. Aunque el rendimiento en campo suele ser diferente que el obtenido en laboratorio, sigue siendo valioso evaluar el desempeño de las ICS a través de las pruebas de laboratorio, ya que pueden ser una

guía para implementar mejoras prácticas de diseño que permitan lograr un mejor desempeño en condiciones reales de operación.

Los objetivos de rendimiento voluntario y niveles asociados (Tier, por sus siglas en inglés) establecidos a nivel internacional (ISO/TR 19867-3, 2018) y en México (NMX-Q-001-NORMEX, 2018), proporcionan un conjunto de valores de referencia para supervisar y evaluar el progreso en cinco criterios: eficiencia térmica, emisiones totales y fugitivas de PM_{2.5} y CO, seguridad y durabilidad. Las emisiones generadas en una estufa de biomasa con chimenea se dividen en dos: la fracción que se libera al ambiente través de la chimenea (emisiones totales) y las emisiones que no ascienden a través de la chimenea (emisiones fugitivas).

Además de la evaluación del desempeño de las ICS, se debe considerar que los BCS a utilizar sean viables en términos energéticos, ambientales y socioeconómicos. El uso de biomasa de residuos agrícolas se considera una importante fuente de energía alternativa que reduce de forma expresa las emisiones de GEI (Kumar et al., 2023). En México, se genera cada año una cantidad considerable de biomasa residual proveniente principalmente de cultivos agrícolas y la producción de madera (Honorato-Salazar & Sadhukhan, 2020; Lozano-García et al., 2020). Los pellets elaborados a partir de mezclas de biomasa residual tienen el potencial de ser fuentes de energía limpia, asequible y renovable (Brand et al., 2021; Tauro et al., 2018b). Además, los pellets tienen el potencial de sustituir de forma sostenible a los BCS convencionales (leña y carbón vegetal) para alimentar ICS, en tareas de cocción doméstica que requieren cantidades intensivas de energía (Yunusa et al., 2023).

Alcances

El presente trabajo de investigación representa una contribución importante para la aplicación de una metodología de diseño integrada por variables teóricas y experimentales que permitan el desarrollo de prototipos de MG-TLUD en México, evaluando el potencial energético y reducción de emisiones totales y fugitivas de monóxido de carbono y material particulado al usar pellets elaborados a partir de biomasa residual agroforestal como BCS a través de pruebas de laboratorio, con el fin de satisfacer la tarea de cocción del nixtamal, que requiere de una cantidad intensiva de energía en el sector rural del país. El monitoreo en campo para evaluar la adopción y el uso sostenido a largo plazo del prototipo final no está considerado en los alcances de esta investigación.

Hipótesis

Los MG-TLUD que se adaptan como cámaras de combustión indirecta y sustituyan el funcionamiento de una CCR en la estructura de una estufa con chimenea, tienen el potencial para alcanzar los niveles de rendimiento más altos respecto a la eficiencia térmica ($\geq 50\%$), la reducción de los factores de emisión por energía útil entregada para $PM_{2.5}$ ($\leq 5 \text{ mg/MJ}_d$) y CO ($\leq 3 \text{ g/MJ}_d$), las tasas de emisión fugitivas para $PM_{2.5}$ ($\leq 0.2 \text{ mg/min}$) y CO ($\leq 133 \text{ mg/min}$) y las tasas de emisión totales para $PM_{2.5}$ ($\leq 50 \text{ mg/min}$) y CO ($\leq 950 \text{ mg/min}$), establecidos en la ISO/TR 19867-3 y NMX-Q-001-NORMEX.

Objetivos

General

El objetivo general de la investigación es diseñar, construir y evaluar tres prototipos de MG-TLUD de tiro forzado con una potencia de fuego regulable, que utilicen pellets de biomasa agroforestal como combustible y lleven a cabo tareas intensivas de energía, principalmente el proceso de cocción del nixtamal.

Específicos

1. Determinar los parámetros de diseño de los prototipos de MG-TLUD, considerando variables definidas en la literatura y determinadas experimentalmente.
2. Implementar la variación de los parámetros de diseño: dimensiones del reactor y la relación geométrica de los orificios de entrada de aire primario y secundario.
3. Evaluar el desempeño energético y las emisiones de los prototipos de MG-TLUD y la CCR adaptados como cámaras de combustión en una estufa con chimenea a través de pruebas WBT y CCT.
4. Comparar los resultados de desempeño de los dispositivos con los objetivos voluntarios de rendimiento para los niveles (Tier) de la normativa mexicana y las directrices internacionales de evaluación de estufas de biomasa basadas en pruebas de laboratorio.

1. MARCO TEÓRICO

1.1 Producción y utilización de pellets como combustibles a partir de biomasa residual

Alrededor del mundo se utiliza una amplia gama de biomasa como combustibles, según su disponibilidad, asequibilidad, conveniencia y viabilidad en términos energéticos. En general, la biomasa leñosa proporciona alrededor del 90% de la energía prima anual procedente de todas las formas de biomasa (WEC, 2016). Los recursos de biomasa se pueden clasificar en tres clases de materia prima, determinados por su origen: desechos y residuos orgánicos; silvicultura, incluidas las corrientes de biomasa generadas en la gestión forestal; y agricultura, incluidos los cultivos y las plantas lignocelulósicas (IEA & FAO, 2017). La biomasa se puede convertir a través de diferentes procesos en productos que pueden usarse para generar calor, electricidad o el transporte. Los BCS son productos con menor o mayor grado de procesamiento (leña, carbón vegetal, residuos agrícolas y forestales, pellets, briquetas, etc.) que pueden quemarse directamente o previa gasificación o pirólisis, para producir calor o electricidad (San Miguel & Gutiérrez, 2015). Los BCS podrían proporcionar una parte significativa de la demanda energética si se introdujeran tecnologías adecuadas y eficientes. Por esta razón, diversos países de todo el mundo se han involucrado en aplicaciones modernas de BCS para tecnologías energéticas. Estas tecnologías han demostrado que los BCS pueden llegar a ser una opción técnicamente eficiente, económicamente viable y ambientalmente sostenible en el entorno en que se desarrollan e implementan (Van Loo & Koppejan, 2008).

La leña y el carbón siguen siendo los BCS predominantes para cocinar en muchos hogares rurales (Serrano-Medrano et al., 2014). Sin embargo, dado los cambios globales relacionados con la contaminación del aire en los hogares (HAP, por sus siglas en inglés), la deforestación y el cambio climático por el uso insostenible de leña y carbón, el procesamiento de residuos agroforestales en BCS se está convirtiendo en un camino cada vez más importante para avanzar hacia economías circulares y mercados sostenibles de biomasa (GACC, 2015; IEA, 2019). Por lo tanto, teniendo en cuenta la premisa de que se necesitan soluciones energéticas locales y renovables a corto y medio plazo para reducir los impactos de la HAP y deforestación, la implementación de BCS densificados, elaborados a partir de biomasa residual agroforestal, es imperativa y tiene amplias perspectivas de desarrollo (Carvalho et al., 2020; Zhou et al., 2016).

Una forma sostenible de procesar la biomasa residual en términos de eficiencia de combustión, emisiones y el uso de tecnología avanzada para la cocción doméstica, es aprovecharla en forma de pellets. En comparación con la biomasa sin procesar, los pellets producidos a partir de residuos agroforestales tienen una mayor densidad energética y propiedades físicas más homogéneas, lo que impacta directamente en la eficiencia de la conversión termoquímica durante la combustión para generar energía térmica para fines de cocción o calentamiento (Helbig & Roth, 2017). Sin embargo, existen algunas limitaciones, ya que algunas propiedades (humedad, densidad de partícula, relaciones longitud/diámetro, contenido de ceniza, nitrógeno) muestran niveles elevados que podrían causar problemas en dispositivos de conversión energética basados en biomasa, como calderas residenciales, estufas residenciales, gasificadores y otras aplicaciones domésticas (García-Maraver et al., 2014; Miranda et al., 2012; Pradhan et al., 2018). Por lo tanto, para obtener la mejor calidad final de los pellets, es necesario optimizar y hacer compatibles las propiedades de la materia prima, el proceso de acondicionamiento y el equipo de peletización (Kaliyan & Morey, 2009).

Las necesidades de procesamiento de BCS se deben alinear con los requisitos de la tecnología y las necesidades del usuario en las prácticas de cocción locales. El uso de pellets de biomasa agroforestal en cualquier ICS representa un desafío y es necesario comprender mejor las propiedades que influyen en su rendimiento, para garantizar un uso eficiente. Los análisis de laboratorio pueden proporcionar información acerca de las características fisicoquímicas de un combustible. Al considerar la conversión térmica de los pellets, el análisis proximal, elemental y térmico son los métodos de caracterización más importantes (García et al., 2013; Ríos-Badrán et al., 2020; Shen et al., 2010). Los análisis consisten en determinar del BCS en bruto, la composición elemental; los contenidos de humedad, cenizas, materia volátil y carbono fijo; y el poder calorífico, respectivamente.

Las características fisicoquímicas, tienen grandes efectos en la conversión termoquímica de los BCS en energía. La eficiencia de combustión y la formación de contaminantes en el proceso dependen en gran medida de la calidad de los pellets utilizados (Dalena et al., 2017; Kaltschmitt, 2019; Zhang et al., 2012). Un alto contenido de humedad en el combustible reduce significativamente la eficiencia de combustión y el poder calorífico; un combustible con una distribución de tamaño de partícula menor tiene más área de superficie y se calienta más rápido, lo que permite una combustión a mayor velocidad al incrementar la interacción con el oxígeno; el contenido de ceniza elevado puede causar problemas de flujo de aire y combustión si el valor es alto y no se disponen de manera adecuada; un combustible con alto poder calorífico libera más energía por unidad de masa quemada.

Los combustibles de mayor densidad generalmente se queman a un ritmo más lento, esto influye en la alimentación del combustible en el dispositivo; Los volátiles pueden formar productos de la combustión incompleta (PCI)³ si no combustionan completamente. El carbono fijo es importante para la producción de carbón. Las características de los pellets utilizados como combustibles deben de cumplir los valores máximos permitidos en la normativa internacional de pellets no leñosos clasificados (ISO 17225-6, 2014) y pellets de madera para uso no industrial (EN 14961-2, 2011). El suministro de pellets que consideren normas de alta calidad es importante para cumplir los requisitos técnicos y ambientales para su aplicación.

1.2 Principio de funcionamiento y parámetros de operación de MG-TLUD

La necesidad de una combustión limpia en las estufas de biomasa ha llevado a los investigadores y diseñadores a una nueva tecnología de cocción, conocida como estufas gasificadoras o MG, que se basan en el principio de micro-gasificación, como una alternativa para la producción eficiente de calor, reducción significativa de emisiones y la degradación forestal (Kumar et al., 2013). El principio de funcionamiento de la micro-gasificación consiste en la separación y optimización de las condiciones de cada etapa en el proceso de conversión termoquímica de acuerdo a sus principales conductores: regulando el calor alcanzado de la biomasa para mejorar el proceso de secado y pirólisis; controlando el suministro de aire y regulando la disponibilidad de oxígeno para optimizar los subsecuentes pasos de la combustión del gas combustible o “gas-madera” (también conocido como gas de síntesis, cuando es producido en gasificadores) y la gasificación del carbón (ver Figura 2).

³ El origen de los PCI se debe principalmente a una combustión incompleta, cuando la cantidad de oxígeno y la mezcla de combustible-oxígeno es insuficiente, lo que resulta en la conversión parcial del combustible y la emisión de CO, PM_{2.5}, CH₄ y otros hidrocarburos, muchos de los cuales están asociados con riesgos a la salud e impactos al ambiente (Kar et al., 2012).

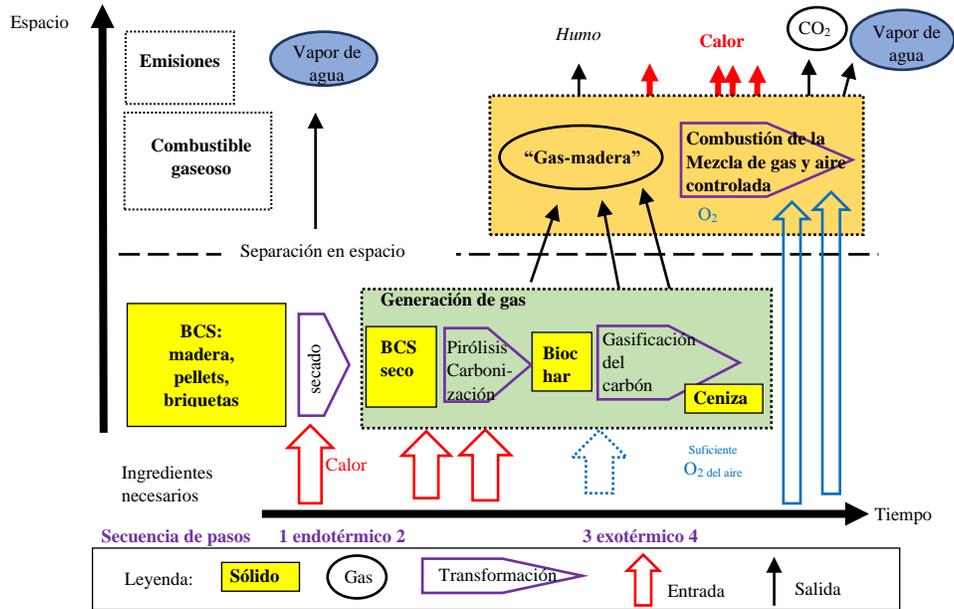
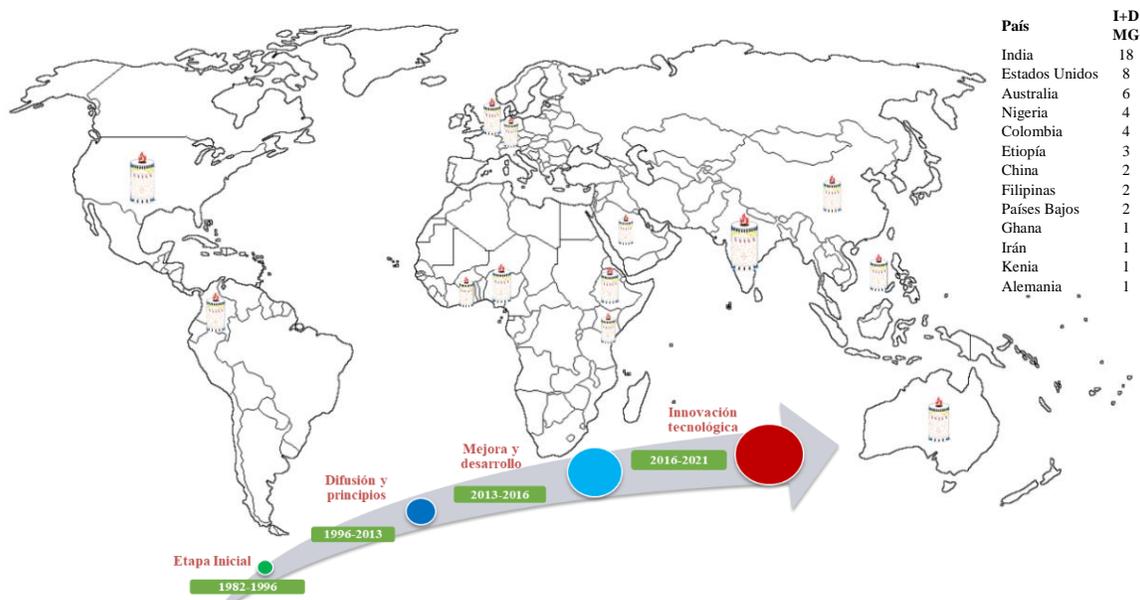


Figura 2. Diagrama general de las etapas involucradas en el proceso de micro-gasificación
Fuente: Adaptado de (Roth, 2011)

La Figura 3 muestra la investigación desarrollada a nivel global respecto al proceso de micro-gasificación en diferentes países del mundo. La India es el país que lidera a nivel internacional con una mayor cantidad de investigaciones, le siguen Estados Unidos y Australia. Tales esfuerzos han ayudado a acelerar el proceso de diseño de MG, tanto en versiones de tiro natural como de tiro forzado, en todo el mundo. Cabe resaltar, que en México aún no existen estudios referentes en el desarrollo de MG, que incluyan las prácticas de cocción locales del país.



I+D: Investigación y Desarrollo

Figura 3. Evolución del proceso de micro-gasificación a nivel global

Asimismo, la Figura 3 presenta un avance cronológico del desarrollo de la micro-gasificación y los principales periodos que lo integran:

- *Etapa Inicial (1982-1996)*: En este periodo se implementaron trabajos pioneros de investigación enfocados en establecer los principios básicos de diseño y funcionamiento de estufas de biomasa, así como las diferentes opciones de suministro de energía, materiales de construcción y mecanismos de transferencia de calor (Baldwin, 1987; Micuta, 1985; Reed & Larson, 1996; Siddhartha Bhatt, 1990; Verhaart, 1982).
- *Difusión y principios (1996-2013)*: Se realizaron los primeros estudios experimentales sobre los MG, también conocidos como estufas de “gas-madera” o “gasificadores de tiro descendente invertido”. Se desarrollaron manuales de diseño, prueba, operación y fabricación de estufas gasificadoras a pequeña escala (Andreatta, 2007; Belonio, 2005; Mukunda et al., 2010; Paul et al., 2007; Reed et al., 2001; Varunkumar et al., 2012).
- *Mejora y desarrollo (2013-2016)*: La investigación en este periodo se orientó a evaluar los efectos del tipo de combustible, caudales de flujo de aire primario y secundario, generación de emisiones y eficiencia de los MG (Kirch et al., 2016; Obi et al., 2016; Tryner et al., 2014, 2016).

- *Innovación tecnológica (2016-2022)*: Se han realizado estudios que priorizan la optimización de los parámetros de diseño para mejorar el rendimiento energético y la reducción de emisiones que tienen un impacto en el ambiente y salud de las personas, respecto al cumplimiento de estándares internacionales de desempeño (Deng et al., 2020; Kirch et al., 2018, 2020; Marchese et al., 2018; Mehta & Richards, 2020).

Por otro lado, a lo largo del desarrollo e innovación tecnológica de los MG, se han identificado algunos de los principales retos técnicos que son imprescindibles resolver para mejorar el funcionamiento general de las estufas, en la Tabla 1 se muestran los retos, hallazgos y propuestas a implementar para contribuir en la solución de los principales retos que se han encontrado en diferentes estudios desarrollados.

Tabla 1. Propuestas para resolver los principales problemas/retos técnicos en los MG tipo TLUD

Retos técnicos	Hallazgos principales	Propuestas a implementar
Reducción de emisiones de PM _{2.5} y PM ultrafino durante las distintas etapas del proceso de micro-gasificación.	El control del flujo de aire en cada una de las distintas fases de combustión de un MG. La inyección de aire forzado. Es necesario prestar más atención a la contaminación por partículas ultrafinas y su riesgo potencial para la salud.	La instalación de un ventilador para el suministro de aire forzado con regulación manual o automática, determinando experimentalmente el caudal óptimo para cada fase, mejorando el precalentamiento del aire suministrado e incrementar el tiempo de residencia de los gases en la zona de combustión puede conducir a un mejor rendimiento energético y la reducción de emisiones.
Variación en la altura de la cama de combustible para una tarea de cocción determinada y las implicaciones del suministro del flujo de aire en el proceso.	La altura o profundidad de la cama de combustible respecto a la entrada de los orificios de aire secundario puede influir en el incremento de emisiones. Asimismo, debe tenerse en cuenta la velocidad en que avanza/desciende el frente de reacción por la cama de combustible.	Adaptar una parrilla ajustable a diferentes alturas que permita alimentar la cantidad de combustible necesaria para completar los requerimientos energéticos sin incrementar la distancia de la cama de combustible respecto a los orificios de aire secundario, así como un mecanismo que permita la disposición adecuada de cenizas/carbón en cada tarea de cocción, sin interferir en el funcionamiento del dispositivo.
La respuesta por el cambio en las propiedades fisicoquímicas del BCS	Las propiedades de los BCS (humedad, cenizas, densidad a granel) en el proceso de micro-gasificación tiene un efecto significativo en el desempeño energético, tasa de consumo de biomasa, propagación de la flama y emisiones.	Es necesario evaluar y comparar el efecto de la variación de las propiedades fisicoquímicas del BCS utilizado a partir de su caracterización, considerando las condiciones específicas de funcionamiento que presenta el prototipo de MG desarrollado.
Encendido del combustible	Las emisiones de los materiales para encender las estufas de biomasa contribuyen a la contaminación del aire doméstico. El papel, plástico, leña, residuos agrícolas e iniciadores como el alcohol isopropílico.	Verificar la cantidad y distribución óptima del iniciador (alcohol isopropílico u otro material con un alto poder calorífico) encima de la cama de combustible antes del encendido y ajustar el suministro de aire con base en el tiempo necesario para el arranque del dispositivo.
Relación óptima de aire primario y secundario	Caudales de aire primario y secundario son similares (4:6 a 6:4). Las emisiones de CO disminuyen para relaciones de flujo de aire primario: secundario de 1:3 y 1:4.	Determinar experimentalmente la relación óptima de caudal de flujo de aire primario y secundario. Así como la ubicación y distribución del número de orificios.

Fuente: (Deng et al., 2020; Díez et al., 2018; Fedak et al., 2019; Huangfu et al., 2014; Kirch et al., 2016, 2018; Mehta & Richards, 2020; Rapp et al., 2016; Sakthivadivel & Iniyana, 2017; Sonarkar & Chaurasia, 2019; Tryner et al., 2016; Wang et al., 2016; Wijianto et al., 2018)

El MG desarrollado en este estudio se ha clasificado en función de la dirección del flujo del aire de entrada como una estufa de corriente descendente invertida, también conocida como estufa gasificadora TLUD con suministro de aire forzado (Paul et al., 2007; Reed & Larson, 1996). Las estufas gasificadoras que utilizan un suministro de aire forzado pueden lograr aumentar su eficiencia térmica (30-50%), facilidad en el encendido, control más preciso durante su funcionamiento y la reducción de emisiones (MacCarty et al., 2010; Sutar et al., 2015). Para operar como un MG-TLUD, la estufa se carga por lotes y se enciende en la parte superior de la cama de combustible, generalmente con un material de ignición. El método de encendido superior genera significativamente menos emisiones que el método de encendido en la parte inferior (Bhattacharya et al., 2002). Los materiales de ignición que presentan un mayor poder calorífico disminuyen la generación de emisiones en el encendido de las estufas (Arora et al., 2014). A diferencia de otras ICS, en un MG-TLUD la conversión termoquímica de los BCS y la combustión indirecta de los productos liberados se separan mediante el suministro de aire por etapas (Kshirsagar & Kalamkar, 2014; Sedighi & Salarian, 2017).

La Figura 4 muestra un diagrama del proceso operativo de un MG-TLUD, podemos observar que la corriente total de aire forzado es suministrada por un ventilador ubicado de forma perpendicular a las paredes del cilindro exterior del dispositivo. En la parte inferior del reactor y la tapa donde se sostiene la parrilla entra un suministro de aire primario (AP) que asciende a través de la parrilla y la cama de combustible. El AP es menor que el flujo de aire secundario (AS) debido al diseño de la estufa y la resistencia de la cama de combustible. La zona de carbonización se forma justo debajo de la flama debido al suministro limitado de oxígeno, procedente del flujo de AP, seguida del frente pirolítico migratorio, que está por encima y se propaga hacia abajo de la cama de BCS no quemado, en dirección opuesta al flujo de gas liberado (Roth, 2014). El AS asciende entre el aislamiento que forman paredes de la cámara del reactor y el cilindro exterior, penetrando a través de orificios ubicados en la zona superior de la cámara del reactor. Esto permite que el AS se precaliente parcialmente, mejorando la mezcla de aire con los gases, promoviendo la mezcla turbulenta, la inyección de oxígeno y reduciendo las emisiones de la combustión incompleta de CO y PM_{2.5} (Caubel et al., 2020; Jetter et al., 2012). El reactor funciona en modo de corriente descendente inversa, donde los gases volátiles liberados de la pirólisis de los BCS y la gasificación del carbón, se queman en la parte superior cuando se mezclan con AS en la zona de combustión designada (Antolini et al., 2019). El tipo de combustible y la variación del flujo de AP:AS son parámetros claves para ajustar el rendimiento de estufas gasificadoras de tiro forzado, bajo condiciones controladas de laboratorio (Patel et al., 2016).

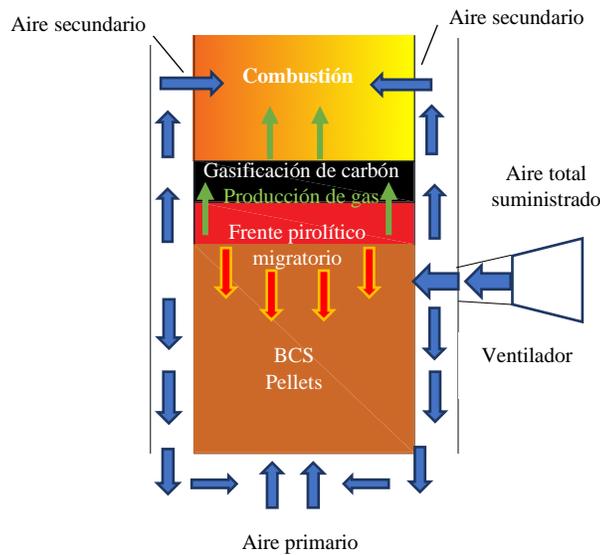


Figura 4. Diagrama esquemático del proceso operativo de un MG-TLUD
Fuente: Adaptado de (Kirch et al., 2018)

La Figura 5 muestra las características y parámetros que afectan el funcionamiento de los MG-TLUD.

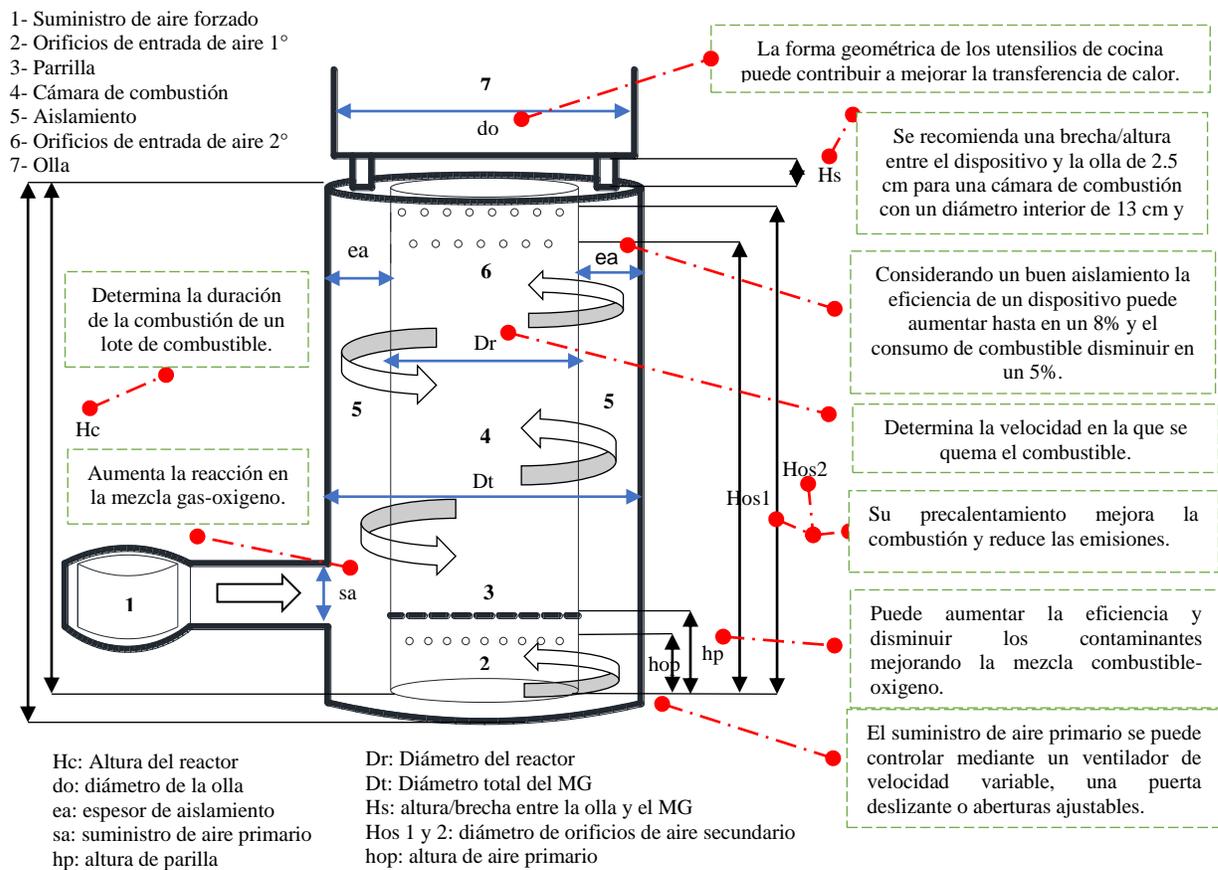


Figura 5. Parámetros principales que influyen en el rendimiento de los MG-TLUD

Fuente: Elaboración propia a partir de (Mehetre et al., 2017; Memon et al., 2020; Robinson et al., 2022; Roth, 2014; Sedighi & Salarian, 2017)

1.3 Estándares nacionales e internacionales para la evaluación de estufas de biomasa

Paralelamente a los parámetros geométricos y operativos, es indispensable considerar la evaluación de MG-TLUD para comparar los objetivos voluntarios de rendimiento asociados a los Tier de desempeño energético (eficiencia térmica y ahorro de combustible) y reducción de emisiones (totales y fugitivas de CO y PM_{2.5}) de estufas de biomasa basadas en pruebas de laboratorio, que integran estándares nacionales e internacionales, mostrados en la Tabla 2. Las estufas que tienen una potencia de fuego superior a 10 kW podrían emitir un número de contaminantes general considerablemente mayor en el entorno doméstico que las de menos 10 kW, sin dejar de cumplir los objetivos basados en los gramos emitidos por megajulio de energía útil entregada (ISO/TR 19867-3, 2018).

Tabla 2. Parámetros y niveles de rendimiento de la ISO/TR 19867-3 y NMX-Q-001-NORMEX-2018

Estándar	Categoría	Parámetro de rendimiento	Unidad	Nivel 0	Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3	Nivel 4	Nivel 5
ISO/TR 19867-3	Energía ¹	Eficiencia térmica	%	<10	≥10	≥20	≥30	≥40	≥50
		Ahorro de combustible	%	-	>0	>50	>67	>75	>80
	Emisiones fugitivas ²	Tasas de emisión al interior de CO	mg/min	>800	≤800	≤500	≤315	≤190	≤133
		Tasas de emisión al interior de PM _{2.5}	mg/min	>45	≤45	≤21	≤9.5	≤2.7	≤0.2
		Factores de emisión al interior de CO	g/MJ _d	>18.3	≤18.3	≤11.5	≤7.2	≤4.4	≤3.0
NMX-Q-001	Emisiones totales ³	Factores de emisión al interior de PM _{2.5}	mg/MJ _d	>1030	≤1030	≤481	≤218	≤62	≤5
		Tasas de emisión a la atmósfera de CO	mg/min	-	≤1300	≤1200	≤1100	≤950	-
		Tasas de emisión a la atmósfera de PM _{2.5}	mg/min	-	≤90	≤70	≤60	≤50	-

NOTAS: *Se considera que los parámetros de desempeño fueron medidos con el funcionamiento de la estufa en alta potencia

¹ El ahorro de combustible previsto es para una estufa de base con una eficiencia térmica del 10% que no produce carbón.

² En el caso de los dispositivos ventilados (con chimenea), las emisiones indicadas representan las emisiones “fugitivas” que no son capturadas por el sistema de ventilación del dispositivo.

³ Los estándares no contemplan aerosoles y gases de efecto invernadero en sus parámetros de desempeño.

Los protocolos de laboratorio basados en procedimientos de calentamiento de agua representan la herramienta más extendida para la evaluación del rendimiento térmico de ICS en el mundo (Lombardi et al., 2017). La WBT es un protocolo que consiste en una simulación aproximada en ambientes controlados del proceso de cocción que pretende ayudar a los diseñadores de estufas a medir las emisiones, entender cómo se transfiere la energía del combustible a la olla de cocción y la influencia de los principales parámetros en el rendimiento de una estufa (Bailis et al., 2007). Por otro lado, la CCT refleja tareas de cocción específicas y culturalmente relevantes de la región de difusión, estandarizando las tareas culinarias en un protocolo científicamente válido y repetible (Lask et al., 2015). Las pruebas experimentales de laboratorio representan una etapa inicial y complementan las evaluaciones en campo, proporcionando una guía para mejorar el desempeño y los procesos de diseño de los dispositivos.

2. METODOLOGÍA

La metodología de la investigación se divide en tres etapas de trabajo: documental, campo y experimental. Cada una de las etapas contempla fases que avanzan de manera secuencial (ver Figura 6). En la primera etapa se analizan las formas en que se realiza la cocción del nixtamal; en la segunda etapa se caracterizan los pellets y se determinan los parámetros de diseño; y en la última etapa se evalúan los prototipos de MG-TLUD mediante pruebas experimentales de laboratorio y el uso preliminar del prototipo con mejor desempeño energético y emisiones en las comunidades rurales de Michoacán.

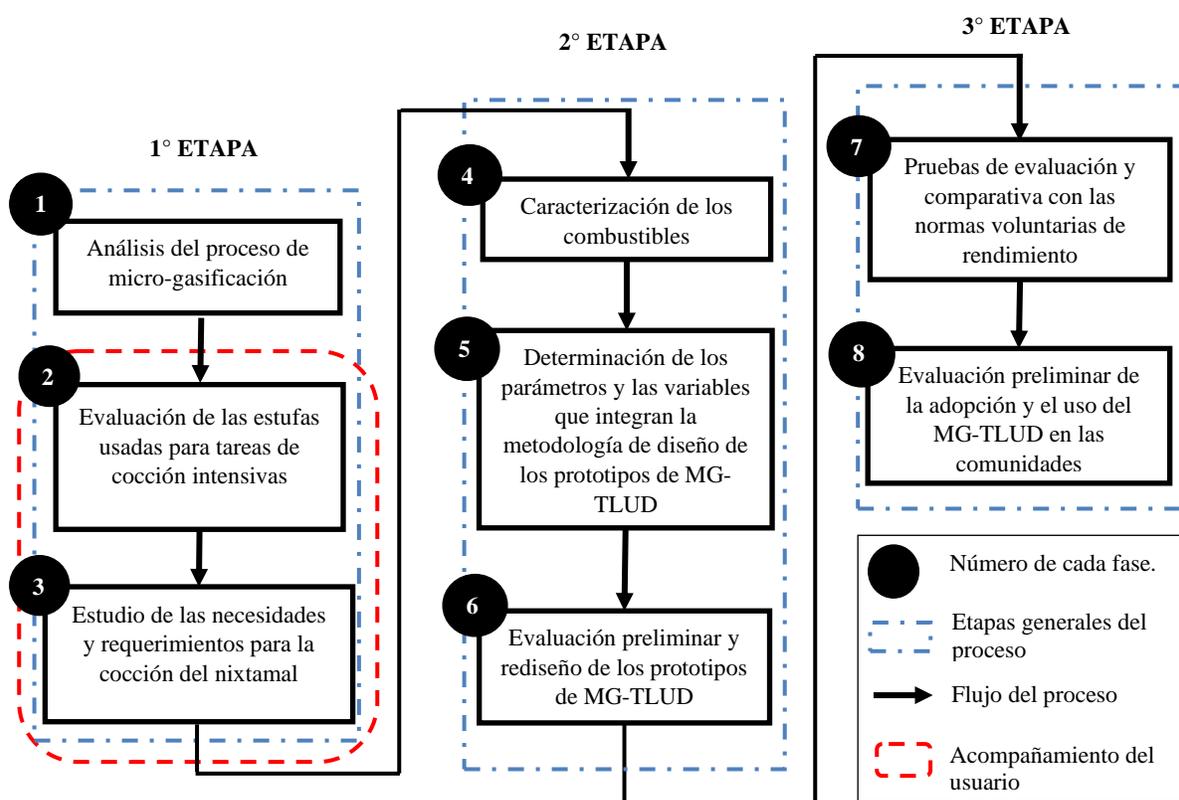


Figura 6. Diagrama de flujo de la metodología para el desarrollo de los prototipos de MG-TLUD

2.1 Análisis del proceso de micro-gasificación

En la primera fase se realiza una revisión bibliográfica del principio de micro-gasificación considerando las fases que integran el proceso: secado, pirolisis, gasificación y combustión. Para identificar de manera preliminar cuáles son los parámetros de diseño que inciden en el proceso de micro-gasificación y en los parámetros de desempeño, respecto a la eficiencia térmica y emisiones.

Para evaluar ambos parámetros y analizar las principales fases del proceso de micro-gasificación se propone implementar pruebas experimentales de laboratorio WBT en una olla con cinco litros de agua, utilizando un modelo de microgasificador tipo TLUD nombrado Atzimba A10XL de tiro forzado sin regulación de la potencia de fuego, que usa como combustibles pellets de aserrín de pino como combustible, como se muestra en la Figura 7 (Gutiérrez et al., 2015).



Figura 7. Microgasificador tipo TLUD modelo Atzimba A10XL

2.2 Evaluación de las estufas usadas para tareas de cocción intensivas

Posteriormente, se llevan a cabo visitas de campo en zonas rurales y periurbanas de Michoacán, delimitando como zona de estudio las comunidades cercanas al lago de Pátzcuaro, con el fin de evaluar las estufas que se utilizan cotidianamente en tareas de cocción doméstica que requieren una cantidad intensiva de energía/combustible, específicamente la cocción del nixtamal. Las estufas que son evaluadas se muestran en la Figura 8. La Patsari Nixtamalera es un modelo diseñado para hogares donde se cocinan grandes cantidades de alimentos (como la cocción del nixtamal). Cuenta con una olla insertada en una estructura de aislamiento (carcasa metálica) para disminuir las pérdidas de calor en el ambiente y mantener estables las ollas, reducir el consumo de combustible y disminuir los tiempos de cocción. Asimismo, tiene una chimenea para evitar las emisiones nocivas al interior de la vivienda. Su funcionamiento es a partir de una CCR que se adapta en la parte inferior de la estructura de aislamiento (ver Figura 8d). El fogón abierto tipo-U está conformado por ladrillos colocados en forma de “U” y una parrilla metálica donde se coloca encima la olla (ver Figura 8a).

La Patsari estándar es una estufa tipo plancha rediseñada a partir de la estufa Lorena, está hecha con ladrillos y barro, cuenta con un comal principal para la cocción de tortillas y usualmente tiene una abertura para calentar a fuego directo las ollas, también cuenta con dos comales secundarios para recalentar alimentos previamente cocinados (ver Figura 8b). Es una estufa eficiente adaptada localmente para mejorar la quema de leña a través de una cámara de combustión que separa y aísla las emisiones al interior de la vivienda que son nocivas para la salud de las personas. La Patsari híbrida (ver Figura 8c) tiene el mismo principio de funcionamiento que la Patsari estándar. Sin embargo, solo cuenta con un comal principal y la cámara de combustión se complementa con una estructura metálica.



Figura 8. Estufas evaluadas que se utilizan usualmente en la cocción del nixtamal

Para la evaluación se implementaron pruebas WBT con una olla de 20 litros de agua para medir la eficiencia térmica y la potencia de fuego. El objetivo es determinar la estufa que presenta un mejor desempeño energético, y a partir de esto, implementar un diseño que permita mejorar su funcionamiento.

2.3 Estudio de las necesidades y requerimientos para la cocción del nixtamal

Una vez evaluados los parámetros de desempeño energético de las estufas, es importante estudiar las necesidades energéticas que se requieren para realizar la tarea de cocción del nixtamal que se utiliza para la elaboración de tortillas. Por lo tanto, se llevan a cabo visitas de campo en la comunidad de San Francisco Uricho y Tzurumútar, ubicadas en la cuenca del lago de Pátzcuaro de la región Purépecha de Michoacán (ver Figura 9). El sistema alimentario del maíz sigue siendo hoy en día el pilar de la dieta en esta zona de estudio (Sabán et al., 2016). Por lo tanto, se estudiaron las diferentes formas que se implementan usualmente en la preparación del nixtamal y la interacción entre el combustible, estufa y usuaria, es decir, el sistema de cocinado, para replicar el proceso de elaboración del nixtamal en laboratorio con la estufa que presente un mejor desempeño energético y determinar las variables para calcular los parámetros de diseño respecto a la energía específica y necesaria para la cocción del nixtamal.

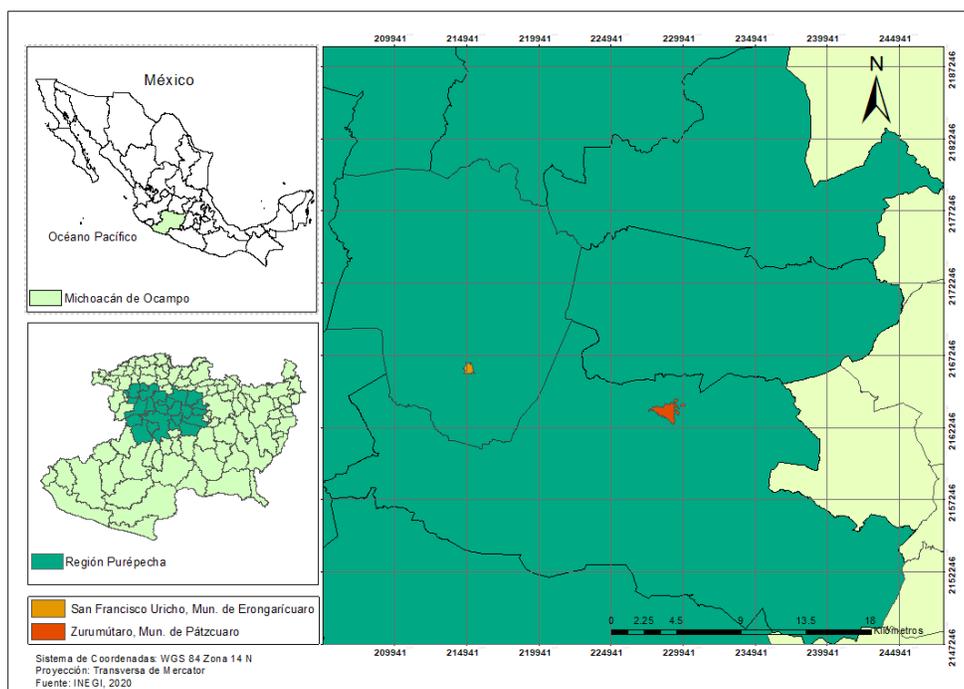


Figura 9. Mapa de ubicación del área de estudio

2.4 Caracterización fisicoquímica de los BCS

En la segunda etapa de la metodología, se elaboran pellets en la planta piloto del Grupo Interdisciplinario de Tecnología Rural Apropriada (GIRA) a partir de residuos agroforestales recolectados en las comunidades cercanas a la cuenca del lago de Pátzcuaro de la meseta Purépecha de Michoacán, usando una mezcla de aserrín de pino, paja de avena y virutas de madera (MAPPAV). Para las pruebas con la CCR se usa leña de encino blanco (LEB). El análisis proximal y térmico de los pellets es realizado en el Laboratorio de Innovación y Evaluación de Bioenergía (LINEB). Se implementan pruebas con tres repeticiones y se determinan los valores promedio. El análisis de humedad es realizado mediante el método gravimétrico descrito en la UNE-EN ISO18134. El poder calorífico inferior (LHV, por sus siglas en inglés) es determinado de acuerdo con la norma UNE-EN ISO 18125:2018, las cenizas y materia volátil (MV) de acuerdo con las normas ISO 18122 y EN-ISO 18123, respectivamente. Por último, se determina el carbono fijo (CF). En la Figura 10 se muestran a detalle ambos BCS.



a) Pellets MAPPAV



b) LEB

Figura 10. BCS utilizados en las pruebas de evaluación de la estufa Patsari Nixtamalera

La composición elemental es determinada en el Laboratorio Nacional de Innovación Ecotecnológica para la Sustentabilidad (LANIES), en Morelia, Michoacán. Los valores de humedad, ceniza, CF, MV y LHV para la leña de encino blanco se toman a partir de los valores reportados por (Ruiz-García et al., 2021; Vassilev et al., 2010).

2.5 Determinación de los parámetros y las variables que integran la metodología de diseño de los prototipos de MG-TLUD

Los tres prototipos de MG-TLUD, denominados P1-Misiri, P2-Jimbani y P3-Chupiri, son desarrollados a través de una metodología colaborativa que incluye a un grupo de trabajo multidisciplinario de expertos en bioenergía e innovación ecotecnológica, así como la participación activa de los usuarios potenciales, para asegurar que los dispositivos sean adecuados para cubrir las necesidades de cocción que demandan una cantidad intensiva de energía de la población en zonas rurales y periurbanas de México. Un enfoque de diseño centrado en el usuario permite evaluar la funcionalidad de la estufa, mejorar el diseño para que se ajuste a la adaptabilidad y la reproducibilidad de los sistemas de cocción tradicionales, y dar prioridad a las preferencias y aspiraciones de los usuarios locales (Shan et al., 2017). Se ha observado que este tipo de enfoques promueve la difusión e implementación efectiva de las estufas en comunidades rurales (Troncoso et al., 2011).

Un estudio realizado por (Deng et al., 2023), destacó la importancia del impacto que tienen los parámetros geométricos, como la altura de la cámara de combustión en las estufas de biomasa y el suministro de aire forzado secundario en estufas gasificadoras de biomasa, para mejorar significativamente la eficiencia térmica, en función de la demanda de la potencia de fuego, las propiedades del combustible y los tipos de estufas durante el periodo de diseño. Por lo tanto, para determinar los parámetros de diseño de los prototipos de MG-TLUD, se utiliza una metodología basada en el principio de conservación de la masa, y consideraciones de diseño que han sido destacadas por la literatura (Belonio, 2005; Bukar et al., 2019; Gupta et al., 2020; Himanshu et al., 2022a; Kumar et al., 2013; Mukunda et al., 2010; Pal et al., 2016). Los principales parámetros de diseño se dividen en dos: 1) lo que se ha destacado en la literatura; 2) lo que se determine a través de pruebas experimentales de laboratorio implementado pruebas WBT y CCT. Además, se realiza el estudio de las necesidades y requerimientos de la cocción del nixtamal para considerarlas en el cálculo de los parámetros geométricos de diseño de los prototipos de MG-TLUD.

En el Anexo A, se muestra el análisis dimensional de las ecuaciones para determinar los parámetros geométricos de diseño de los prototipos de MG-TLUD.

2.6 Evaluación preliminar y rediseño de los prototipos de MG-TLUD

Los tres prototipos de MG-TLUD de tiro forzado fueron diseñados y evaluados usando pellets MAPPV. Se adaptaron en la estufa Patsari nixtamalera (ver Figura 11a). En el diseño original, esta estufa utiliza una CCR (ver Figura 11b), que fue sustituida por un MG-TLUD (P1-Misiri) para el desarrollo de la investigación. La estructura metálica aislante que rodea la olla de cocción en la Patsari nixtamalera incluye una guata (colcha) de fibra cerámica resistente al calor que ayuda a aumentar la eficiencia térmica durante las pruebas experimentales de laboratorio. El espacio entre la capa protectora de la olla, la altura de la cámara de cocción y el aislamiento puede aumentar la eficiencia térmica de una estufa de biomasa hasta un 20%-40% (MacCarty & Bryden, 2015).

El desempeño del MG-TLUD, CCR y fuego abierto de tres piedras (TSF, por sus siglas en inglés) (ver Figura 11c), se comparan a través de pruebas WBT en laboratorio para evaluar el rendimiento energético utilizando una olla de cocción de 37 cm de diámetro y 44 cm de altura con 20 litros de agua.



Figura 11. a) Estufa Patsari Nixtamalera/P1-Misiri; b) Estufa Patsari Nixtamalera/CCR; c) *TSF*

La evaluación preliminar adaptando el P1-Misiri en la estufa Patsari Nixtamalera permitió determinar algunas de las variables experimentales que integran la metodología de diseño para calcular los parámetros geométricos e implementar el rediseño de los prototipos de MG-TLUD (P2-Jimbani y P3-Chupiri) y así, proponer mejoras en el desempeño energético (eficiencia térmica, potencia de fuego, tiempos de cocinado) al realizar la tarea de cocción del nixtamal.

En los prototipos P2-Jimbani y P3-Chupiri se considera la variación del tamaño del reactor y la relación espacial entre los orificios de entrada de AP:AS, para mejorar el desempeño energético y disminuir las emisiones. Los prototipos de MG-TLUD se adaptan para funcionar como cámaras de combustión indirecta, bajo el principio de la micro-gasificación, en la estufa Patsari Nixtamalera, sustituyendo la CCR en el diseño original. La Figura 12 muestra los principales elementos que conforman el sistema de cocinado de la estufa Patsari Nixtamalera con la adaptación del P3-Chupiri (a) y la CCR (b).

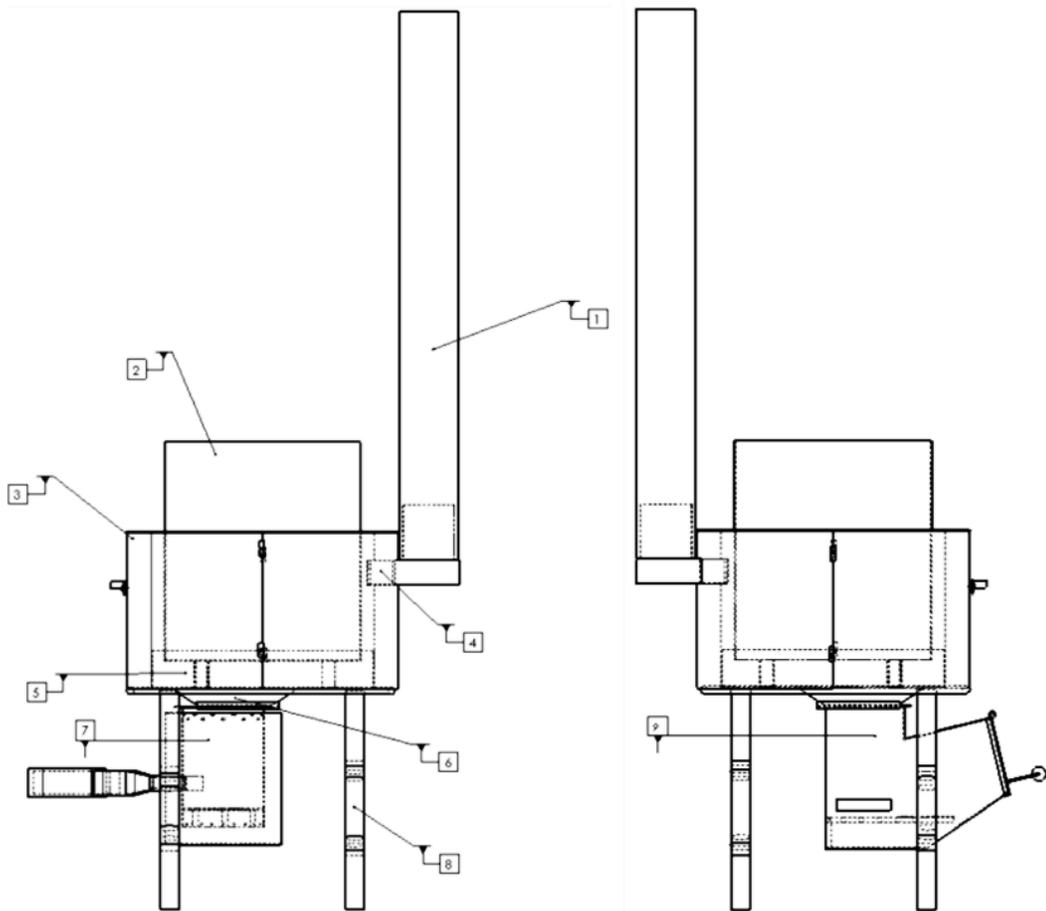


Figura 12. a) Patsari Nixtamalera cookstove/P3-Chupiri; b) Patsari Nixtamalera cookstove/CCR
 1) Chimenea, 2) Olla de cocción, 3) Puerta y carcasa de aislamiento de la olla, 4) Abertura de salida de gases, 5) Estructura de soporte de la olla, 6) Conector adaptador, 7) Prototipo de MG-TLUD (P3-Chupiri), 8) Base de la estufa, 9) CCR.

La Figura 13 presenta una vista detallada de los parámetros geométricos y los principales componentes del P3-Chupiri, el dispositivo consta de un conector adaptador para la Patsari Nixtamalera, una cámara de reactor, el cilindro exterior, capa aislante, rejilla y un ventilador centrífugo que suministra un tiro forzado a través de los orificios de AP en la parte y circunferencia inferiores del reactor, y orificios AS en la zona superior de la circunferencia del reactor. La presión que puede ejercer un ventilador de tipo caracol puede ser mucho mayor que la de un ventilador axial. Además, la colocación del ventilador en posición tangencial permite mezclar y distribuir mejor el aire suministrado a través de los orificios de entrada de AP y AS. La variación de los parámetros de funcionamiento, la configuración geométrica del reactor, el tipo de combustible y el diseño del MG-TLUD tienen una influencia importante en el rendimiento de las cocinas y en la concentración de emisiones contaminantes (Pérez et al., 2012; Tryner et al., 2014).

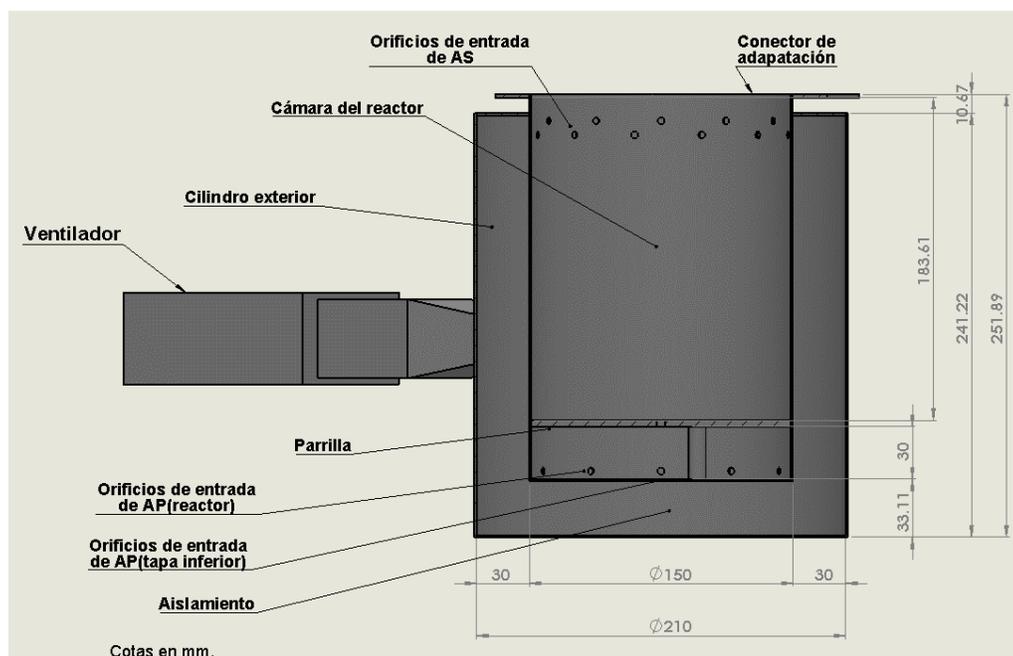


Figura 13. Configuración geométrica del prototipo de MG-TLUD (P3-Chupiri)

Las principales diferencias entre el funcionamiento de la estufa Patsari adaptando la CCR, respecto a los prototipos de MG-TLUD radican en la carga de combustible y la combustión de la biomasa sólida. Las ventajas de la CCR son especialmente la carga de la estufa desde el costado, lo que hace posible una especie de funcionamiento continuo durante tiempos más largos, y que las piezas de leña no deban tener un tamaño tan limitado como los pellets en los MG-TLUD. Sin embargo, debido a la inserción de piezas de biomasa más grandes durante la operación, no se pueden mantener condiciones de combustión estables y bien definidas en el lecho de combustible, lo que puede conducir a un aumento considerable de las emisiones.

2.7 Pruebas de evaluación y comparativa con las normas voluntarias de rendimiento

Las pruebas de laboratorio de las estufas de biomasa tienen por objetivo comparar el desempeño de los diseños de los dispositivos en condiciones controladas y uniformes, siendo las normas voluntarias de rendimiento tanto nacional e internacional la guía para evaluar y garantizar un desempeño óptimo. La estufa Patsari Nixtamalera fue evaluada con cada uno de los tres prototipos experimentales de MG-TLUD, tomando como referencia la CCR y el TSF, con el objetivo de medir y comparar los valores de desempeño energético y emisiones en una prueba WBT de arranque en frío, como se indica en la norma ISO 19867-1. Para las pruebas, son hervidos 20 litros de agua en una olla y se utiliza una mezcla de alcohol isopropílico de 30 gramos, vertida sobre el lecho de pellets, como iniciador de fuego. También se realizaron pruebas CCT, siguiendo el protocolo de (Controlled Cooking Test, CCT, 2021), para validar el funcionamiento de las estufas al cocinar el nixtamal, en cada prueba se utilizaron 20 litros de agua, 8,000 g de maíz y 90 g de cal. Por lo general, para el proceso de cocción se utiliza una proporción de maíz a agua de 1:3 (Palacios-Rojas et al., 2016). La configuración experimental y los detalles de funcionamiento en las pruebas se describen en la Tabla 3.

Tabla 3. Pruebas implementadas para la evaluación de los prototipos de MG-TLUD, CCR y TSF

Protocolo de prueba	Tipo de estufa	Tipo de combustible	Carga de combustible (gr)	Tamaño del reactor (cm)	Relación AP:AS	Análisis
WBT y CCT	P1-Misiri	MAPPAV	1000	D: 14 H: 16	1:2	Configuración del tamaño del reactor y relación AP:AS.
WBT y CCT	P2-Jimbani	MAPPAV	1000	D: 15 H: 18	1:7	Mayor tamaño del reactor y la relación geométrica de orificios de entrada de AS. Menor relación geométrica de orificios de entrada de SA; mismo tamaño del reactor.
WBT y CCT	P3-Chupiri	MAPPAV	1000	D: 15 H: 18	1:3	
WBT y CCT	CCR	LEB	1800-2000	N/A	Suministro de aire ambiental	Rendimiento comparativo con respecto a los prototipos de MG-TLUD
WBT	TSF	LEB	3000-4000	N/A	Suministro de aire no controlado	Rendimiento comparativo con respecto a los prototipos de MG-TLUD

Nota: Cada prueba se repitió cinco veces para cada estufa.

MAPPAV: mezcla de serrín de pino, paja de avena y virutas de madera; LEB: leña de encino blanco; N/A: no aplicable.

El caudal de aire suministrado por el ventilador fue de 25 m³/h en los tres prototipos de MG-TLUD para todas las pruebas.

El rendimiento energético y los niveles de emisiones de los prototipos son comparados con los objetivos de rendimiento voluntario de las normas ISO/TR 19867-3, 2018 y NMX-Q-001-NORMEX, 2018. Las emisiones se miden en un ambiente controlado para comparar los resultados de las diferentes pruebas. Cada prueba se repite cinco veces en la fase de alta potencia (inicio en frío), y los valores promedio son determinados. Las emisiones fugitivas se miden usando un sistema de doble campana, que permite medir simultáneamente emisiones de la chimenea de la estufa y las emisiones fugitivas presentes en la habitación (Ruiz-García et al., 2018), de acuerdo con el protocolo descrito en la ISO 19867-1. Los objetivos voluntarios de rendimiento descritos en la ISO/TR 19867-3, para dispositivos con chimenea, incluyen directrices para emisiones fugitivas de CO y PM_{2.5} que no son capturadas por el sistema de ventilación del dispositivo. Como han demostrado Islam et al., la ventilación de la cocina cuando se utiliza una ICS con chimenea puede ser tan importante como la tecnología de la propia estufa para mejorar la calidad del aire interior (Islam et al., 2022).

Se utiliza un sistema de monitoreo de emisiones portátil (PEMS, por sus siglas en inglés) para medir las emisiones totales. El PEMS consta de una computadora portátil (con software), una caja de sensores, una cubierta y un compartimiento gravimétrico (porta filtros). La caja se conecta a la computadora, donde son procesados los datos de los sensores de temperatura y emisiones de CO₂, CO y PM. Las concentraciones en tiempo real se miden utilizando un NDIR (infrarrojo no dispersivo) para el CO₂, una celda electroquímica para el CO y un fotómetro de dispersión para PM. Las emisiones fugitivas de PM_{2.5} se determinan a través de un análisis gravimétrico, siguiendo el método descrito por Medina et al., (Medina et al., 2017b)

Los objetivos de rendimiento voluntarios para las estufas de biomasa establecidos en la ISO/TR 19867-3, están destinados a complementar y utilizarse con los resultados de las pruebas de laboratorio especificadas en la norma ISO 19867-1. Por lo tanto, es importante mencionar que los resultados de las tasas de emisión totales y fugitivas, y los factores de emisión de CO y PM_{2.5} que se obtuvieron al evaluar los prototipos de MG-TLUD, RCC y TSF a través del protocolo WBT se pueden comparar con las tasas de emisión normalizadas y los factores de emisión por defecto de CO y PM_{2.5} teniendo en cuenta las concentraciones equivalentes de contaminantes en la cocina según las predicciones del modelo de emisiones y los porcentajes de viviendas que cumplen criterios clave en cada nivel para diferentes entornos. Sin embargo, en el caso del protocolo CCT se pueden considerar los objetivos de rendimiento voluntarios como ejemplos de orientación para realizar la comparativa.

2.8 Métricas de desempeño general de los prototipos de MG-TLUD

Para definir el prototipo de los MG-TLUD con un mejor desempeño, se propone un marco de evaluación integral para definir las métricas de desempeño general que permita integrar los parámetros que tienen un mayor impacto en el funcionamiento de los MG-TLUD para asegurar las emisiones fugitivas y totales mínimas, y que los parámetros de desempeño cumplan con los requerimientos energéticos para realizar el proceso de cocción del Nixtamal de una manera idónea. A partir de esto, se implementa una propuesta para definir las métricas de desempeño general y determinar el prototipo de MG-TLUD que presente un mejor desempeño general en las pruebas de evaluación WBT y CCT respecto a los estándares locales e internacionales, cumpliendo con las categorías de energía, emisiones totales, emisiones fugitivas y usabilidad (ver Figura 14).

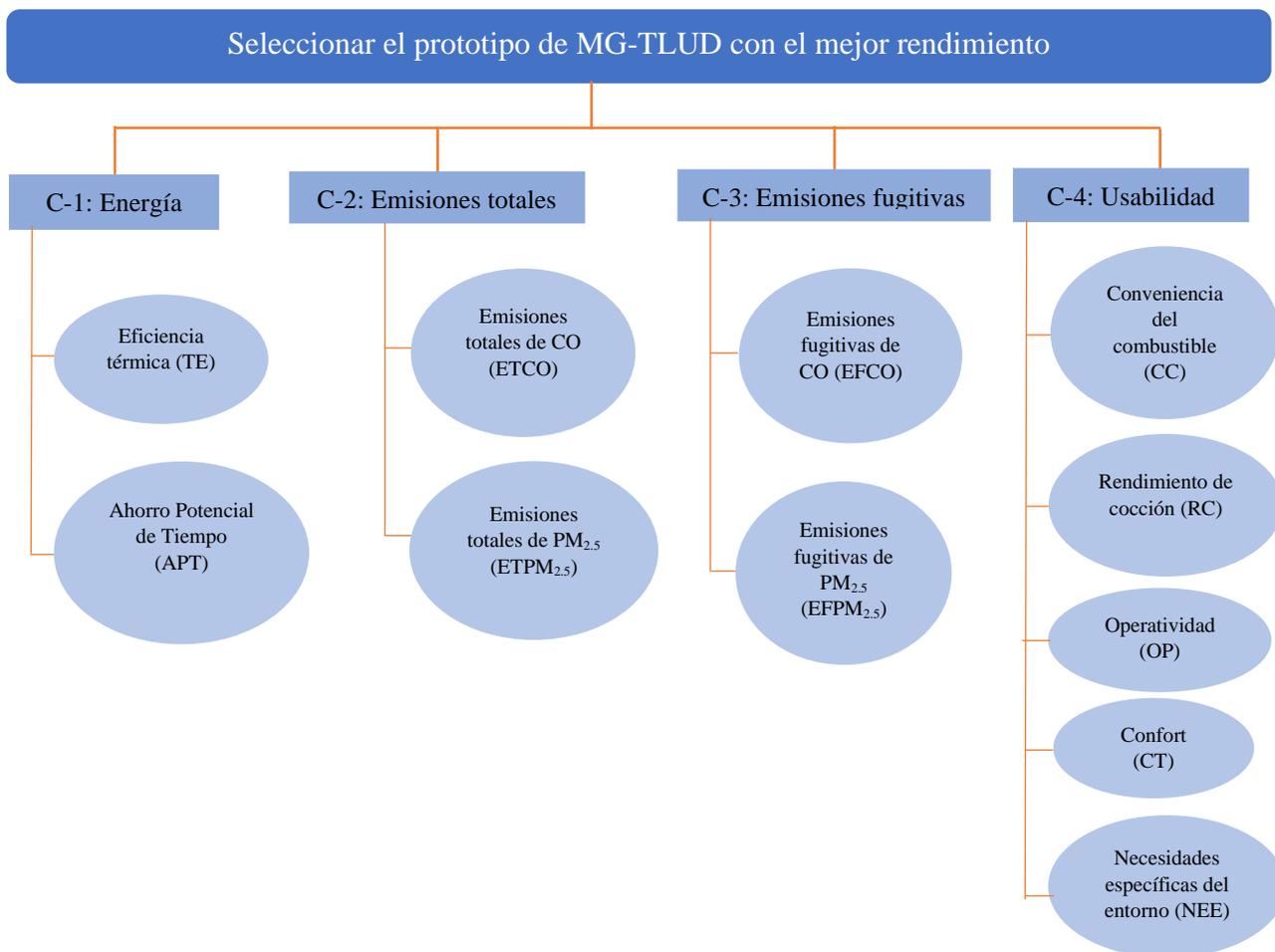


Figura 14. Diagrama general de las categorías y parámetros propuestos para determinar el prototipo MG-TLUD con mejor rendimiento

Fuente: Elaboración propia a partir de: (Boafo-Mensah et al., 2021; Moses et al., 2019)

Diferentes estudios han destacado la importancia de implementar indicadores o métricas realistas para la evaluación del rendimiento de estufas de biomasa domésticas que reflejen el efecto de diferentes parámetros con la ayuda de un solo valor (Arora & Jain, 2016; Jetter et al., 2012). Por otro lado, investigadores se han enfocado en desarrollar un marco que integre simultáneamente factores técnicos, económicos, sociales/salud pública y ambientales en la evaluación del rendimiento potencial de las estufas de biomasa mejoradas (Boafo-Mensah et al., 2021). Un parámetro de desempeño individual no puede definir totalmente el desempeño de una estufa. Por ejemplo, la eficiencia térmica puede ser un parámetro de desempeño sobre valorado. Como se muestra en la Figura 14 es necesario implementar una métrica de desempeño general que integre simultáneamente diferentes categorías de evaluación. Sin embargo, por los alcances específicos de este estudio y el tiempo que conlleva evaluar parámetros de usabilidad a largo plazo en campo con los diferentes prototipos desarrollados, solo se consideran tres categorías de rendimiento: energía, emisiones totales y fugitivas. En la Tabla 4, se describen a detalle los parámetros de desempeño que integran el marco general propuesto para evaluar las tres categorías en cada prototipo de MG-TLUD adaptados a la estufa Patsari nixtamalera.

Tabla 4. Categorías y parámetros de rendimiento para determinar el prototipo de MG-TLUD con mejor desempeño

Categoría	Parámetros	Descripción	Objetivo	Relevancia
C-1 Energía	Eficiencia térmica (%)	Es una medida de la cantidad de energía generada por el combustible que se transfiere al agua en la olla para que hierva.	Maximizar	Indica la cantidad de combustible que utilizará una estufa y por ende comprender cómo influye en el ahorro de combustible, tiempo requerido de operación, emisiones de GEI y degradación del ambiente.
	Ahorro potencial de tiempo (%)	Tiempo que utiliza el prototipo de MG-TLUD en completar la prueba para llegar a la temperatura de ebullición del agua comparado con el tiempo que requiere la CCR.	Maximizar	Esto repercute en el tiempo que se puede ahorrar el usuario en atender el dispositivo y que puede ser destinado para actividades enfocadas en la educación, recreativas o generadoras de ingresos.
C-2 Emisiones totales ¹	Emisiones de CO liberadas a la atmósfera	Tasas de emisión totales de CO (mg/min)	Minimizar	Las emisiones totales de CO contribuyen al cambio climático.
	Emisiones de PM _{2.5} liberadas a la atmósfera	Tasas de emisión totales de PM _{2.5} (mg/min)	Minimizar	Las emisiones totales de PM _{2.5} contribuyen al cambio climático.
C-3 Emisiones fugitivas ²	Emisiones fugitivas de CO en el ambiente de cocinado	Tasas de emisión fugitivas de CO (mg/min) Factores de emisión de CO por MJ entregado a la olla (g/MJ _d)	Minimizar	Puede provocar una mayor morbilidad y mortalidad respiratorias y cardiovasculares. Efectos sobre el desarrollo y el sistema nervioso central.
	Emisiones fugitivas de PM _{2.5} en el ambiente de cocinado	Tasas de emisión fugitivas de PM _{2.5} (mg/min) Factores de emisión de PM _{2.5} por MJ entregado a la olla (mg/MJ _d)	Minimizar	Las partículas ultrafinas inhaladas pueden evadir el sistema de defensa mucociliar del cuerpo y depositarse en las profundidades de la región alveolar de los pulmones, lo que puede provocar problemas pulmonares de salud.

Fuente : (Boafo-Mensah et al., 2021; Bond, 2004; Furszyfer Del Rio et al., 2020; Garland et al., 2017; ISO/TR 19867-3, 2018; Jetter et al., 2012; Johnson et al., 2008, 2010; Moses et al., 2019; Naeher et al., 2007; NMX-Q-001-NORMEX, 2018; Pakravan & MacCarty, 2020; Pratiiti et al., 2020).

¹ Considera los Tier de rendimiento para las pruebas de emisión de la NMX-Q-001-NORMEX 2018.

² Considera los Tier de rendimiento para las pruebas de emisión de la ISO/TR 19867-3.

2.9 Evaluación preliminar de la adopción y el uso del P3-Chupiri en campo

Uno de los principales desafíos que enfrentan las comunidades rurales es la satisfacción de su demanda energética mediante procesos sostenibles, en los que la producción, distribución y consumo final de energía se realicen de forma eficiente, asequible y no contaminante. El proceso de diseño y producción de las tecnologías debe considerar la inclusión de los habitantes del territorio sociocultural en el que serán implementadas (López-Sosa & García, 2022). Asimismo, este proceso debe de ir acompañado con la evaluación de la adopción y el uso de los dispositivos por los usuarios al realizar su funcionamiento en condiciones reales. Por lo tanto, en este trabajo se propone implementar una evaluación preliminar que incluya mediciones y observaciones objetivas, así como encuestas subjetivas y entrevistas semiestructuradas (Moses et al., 2019). En ese sentido, se implementan entrevistas, encuestas tipo Likert y mediciones para analizar el proceso de cocción del Nixtamal usando el P3-Chupiri durante un lapso de tres semanas por dos usuarias que anteriormente usaban el P1-Misiri y la estufa Patsari nixtamalera con la CCR. La evaluación consiste en identificar preliminarmente las principales métricas cualitativas que intervienen en el uso de la estufa Patsari nixtamalera con la sustitución de la P1-Misiri y la CCR, para adaptar el P3-Chupiri, tomando como base los siguientes enfoques:

1. Encendido/operación: Facilidad en el encendido, la instalación-manipulación del P3-Chupiri en la estructura de la estufa Patsari nixtamalera, manejo del rango de potencia de fuego requerido, visibilidad del fuego y temperatura de la estufa.
2. Combustible/dispositivo: La capacidad de alimentación y la frecuencia/esfuerzo de recarga del combustible en el dispositivo para lograr la cocción correcta de la cantidad de Nixtamal requerida, así como la versatilidad para realizar otras tareas de cocinado.
3. Interacción usuaria/dispositivo: La atención durante el proceso de cocción, depósitos de hollín en el área de cocinado y la olla, exposición al humo percibida, altura de cocción, estética/vista de la estufa, seguridad y durabilidad de la estufa percibida.
4. Producto final (nixtamal): Velocidad de cocción, consistencia/sabor del nixtamal y de las tortillas cocinadas.

En el Anexo B, se muestran las entrevistas y encuestas aplicadas en campo a las usuarias para evaluar la usabilidad preliminar del MG-TLUD P3-Chupiri al realizar la tarea de cocción del nixtamal.

3. RESULTADOS

3.1 Análisis preliminar del proceso de micro-gasificación

La Figura 15 muestra las características principales y los rangos de potencia de fuego que alcanza el dispositivo Atzimba A10XL en cada etapa del proceso de micro-gasificación, al implementar pruebas WBT con cinco litros de agua. Se analizó que la potencia de fuego era variable para cada una de las etapas del proceso de micro-gasificación, alcanzando el valor mayor en la pirólisis (12 kW) y los rangos menores en las etapas de encendido y apagado de los pellets (0-4 kW), con un tiempo total de duración de la prueba de 80 minutos desde el encendido hasta la conversión de los pellets en ceniza.

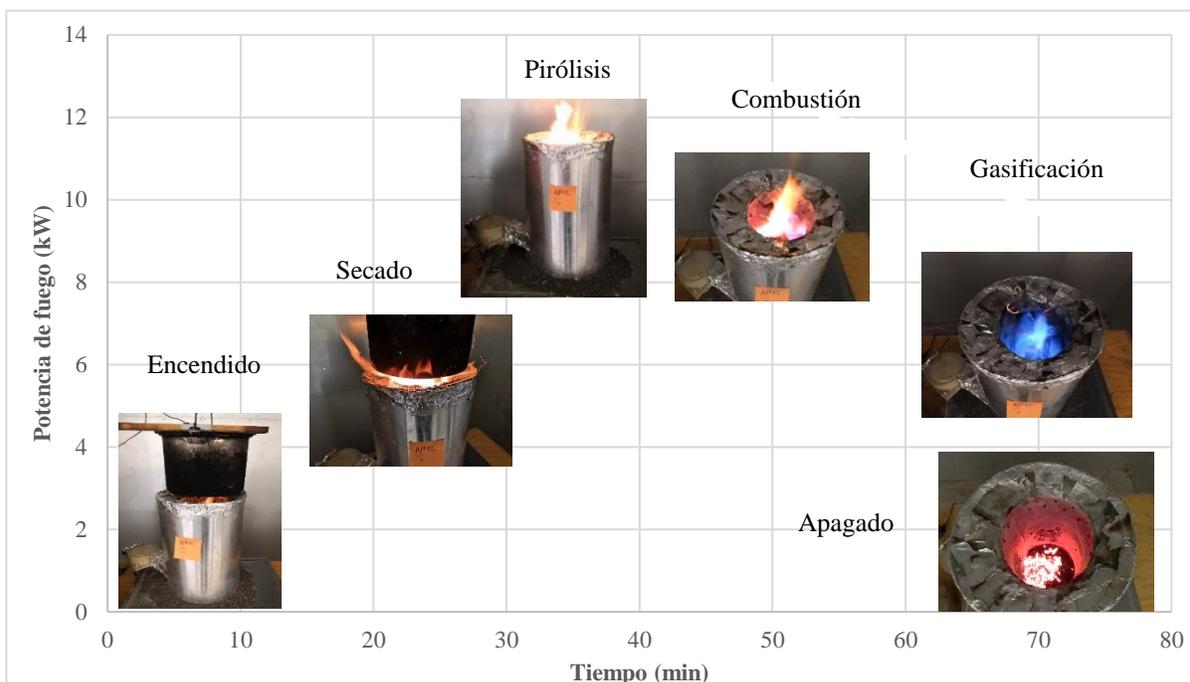


Figura 15. Etapas principales del proceso de micro-gasificación en el dispositivo tipo TLUD modelo Atzimba A10XL

A continuación, se describen las observaciones y complicaciones que se presentaron en cada etapa en el microgasificador Atzimba A10XL:

Encendido: Se inició el encendido del combustible en la parte superior de la cámara del reactor con la ayuda de un iniciador (alcohol isopropílico), se generó una pequeña flama que empezó a hacer contacto con la parte inferior de la olla. Se identificó que, si el iniciador era insuficiente o no se distribuía de una manera uniforme en la parte superior de la cama de pellets de aserrín de pino, el encendido era lento y generaba humo.

Secado: Después de encender el combustible y en el transcurso de dos minutos, se conectó y activó el ventilador para comenzar a suministrar AP forzado y transferir calor al combustible. Esto permitió remover la fracción de agua absorbida por la biomasa. Es deseable que el contenido de humedad sea bajo para lograr un mejor rendimiento energético.

Pirólisis: La descomposición pirolítica ocurre después del secado. A medida que avanza el frente de reacción (frente pirolítico migratorio) la temperatura incrementa. De este modo, también aumenta la tasa de consumo de biomasa y la altura de la flama. Este proceso se ejecuta en condiciones donde se necesita energía (condiciones endotérmicas) y comienza en un rango de 150-220 °C. A medida que los gases volátiles escapan de la biomasa, se mezclan con el oxígeno y se queman a unos 550 °C, por lo que la ignición produce una flama amarilla (Kumar et al., 2013); a esta temperatura solo queda un sólido compuesto principalmente de carbono (carbón vegetal) y cenizas. Los volátiles producidos por esta descomposición pueden escapar en forma hollín y humo. Se observó que el flujo de AP influye y regula la potencia de fuego, es decir la velocidad a la que se producen los gases volátiles. Por lo tanto, es importante asegurar que el flujo de AP sea el óptimo para activar la pirolisis.

Combustión: A medida que el frente pirolítico avanza hacia abajo de la cama de combustible, en la parte superior del reactor donde se localiza los orificios de entrada de AS, ocurre la etapa de conversión termoquímica conocida como combustión, que se refiere a la oxidación completa de los productos liberados por la pirólisis y la gasificación con oxígeno bajo liberación de calor. El AS debe ser suministrado con una cantidad y temperatura adecuada para asegurar la combustión completa del combustible en la mayoría de las aplicaciones. Se observó que el flujo de AS debe entrar con suficiente presión de manera concéntrica en el diámetro de la cámara del lecho superior de combustible para mejorar la combustión de los gases volátiles y disminuir las emisiones. Sin embargo, se debe procurar no suministrar demasiado, ya que puede enfriar los gases volátiles y disminuir la eficiencia térmica. El análisis de las etapas que integran el proceso de micro-gasificación y la revisión de la literatura, permitieron determinar de manera preliminar que la relación geométrica de orificios de AP:AS debe estar en un rango de 1:3 y 1:4 respectivamente.

Gasificación: en esta etapa ocurre la conversión termoquímica del carbón vegetal residual formado en la descomposición pirolítica en gases combustibles para proporcionar carbón útil. Por lo tanto, es necesario un agente de gasificación, que usualmente es oxígeno o aire para convertir el carbono sólido en monóxido de carbono (CO) o metano (CH₄). Se observó una flama de menor altura que se tornó color azul. Un problema que se presentó durante esta etapa fue la presencia de humo al momento de recargar con pellets de manera semicontinua el dispositivo.

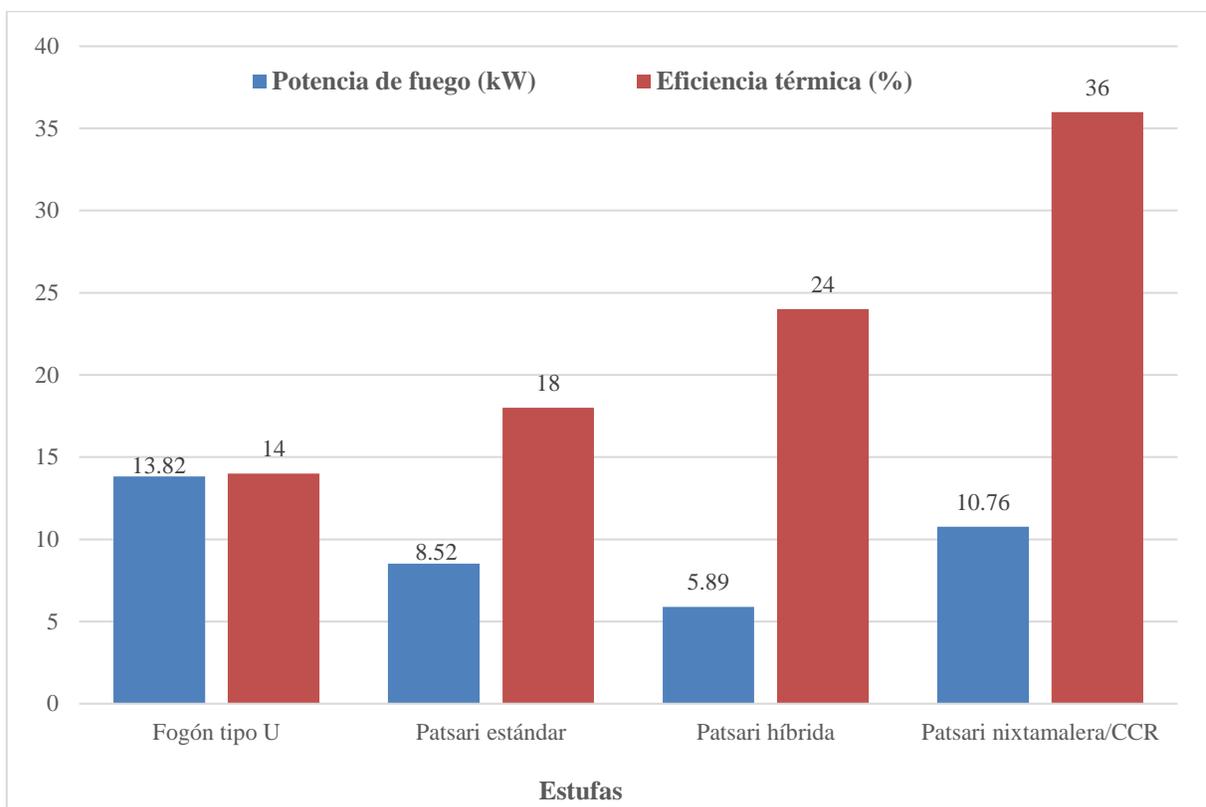
Apagado: En la Figura 15 se puede observar en el fondo de la cámara del reactor el carbón y cenizas que quedan como residuos del proceso. Se observó que la posición de los orificios de entrada de aire primario respecto a la parrilla puede generar cenizas o carbón vegetal (biochar). Cuando los orificios de aire primario se ubican arriba de la parrilla se generan como subproducto del proceso de microgasificación cenizas. Por otro lado, cuando los orificios están arriba de la parrilla el residuo es carbón vegetal.

Los resultados de la medición de emisiones realizada por (Arriaga, 2021) en el microgasificador TLUD modelo Atzimba A10XL, muestran que el promedio de los factores de emisión por energía liberada de pellets de pino, agave y café para CO (2.27 g/MJ) y PM_{2.5} (1.80 g/MJ) alcanzaron el nivel más alto (Tier-5) y el nivel más bajo (Tier-0) respectivamente, entorno a los objetivos de rendimiento voluntario establecidos en la ISO/TR 19867-3. Las emisiones significativamente mayores de PM_{2.5} pueden estar directamente relacionadas con el aumento de la potencia de fuego y la tasa de combustión, es decir, la relación aire/combustible disminuye, lo que resulta en una menor oxigenación y una mayor producción de hollín durante la combustión (Quiñones-Reveles et al., 2021). Por lo tanto, los principales retos que se identificaron a partir de estas pruebas fue disminuir las emisiones de PM_{2.5} a través de la regulación del suministro de aire, la relación geométrica de orificios de entrada de AP:AS y el dimensionamiento de la altura y el diámetro del reactor.

3.2 Evaluación de las estufas usadas para tareas de cocción intensivas

En la Figura 16 se muestran los resultados de las pruebas WBT modificadas con 20 litros de agua que se implementaron para evaluar el rendimiento energético de cuatro estufas que se utilizan usualmente en las comunidades rurales de Michoacán para tareas domésticas intensivas en energía, como calentar agua para bañarse y la cocción del nixtamal. Se puede observar que las estufas tipo plancha (Patsari híbrida y estándar) presentaron las potencias menores seguida de la Patsari nixtamalera/CCR y Fogón

tipo U. La eficiencia térmica resulto ser mayor en la Patsari nixtamalera debido al aislamiento de la carcasa metálica con colcha cerámica que rodea la olla de cocción. El Fogón tipo U presentó la eficiencia térmica más baja.



NOTA: Las pruebas se repitieron tres veces para cada estufa.

Figura 16. Resultados de las pruebas WBT para evaluar el desempeño energético de las estufas utilizadas en las comunidades rurales de Michoacán

A partir de estas evaluaciones se determinó que la estufa Patsari nixtamalera/CCR fue la más eficiente energéticamente. Por lo tanto, los prototipos de MG-TLUD se adaptaron para funcionar como cámaras de combustión indirecta de la estufa Patsari nixtamalera, sustituyendo a la CCR del diseño original. Para mejorar el desempeño energético y disminuir las emisiones de la estufa Patsari nixtamalera.

3.3 Estudio de las necesidades y requerimientos para la tarea de cocción del nixtamal

Se estudió el procedimiento de cocción del nixtamal para identificar las necesidades y requerimientos energéticos para su elaboración. En la Figura 17 se describen las etapas cronológicas en la preparación del nixtamal por una usuaria de la comunidad de San Francisco Uricho integrante de la red Tsiri, con la estufa Patsari nixtamalera/CCR.



1) Se coloca el agua (20,000 gr) y maíz (11,000 gr) dentro de la carcasa de aislamiento de la estufa.



2) Se alimenta la cámara de combustión con leña y se enciende la estufa con un fosforo.



3) Los granos secos de maíz se vacían en la olla para que se cuezan, posteriormente se agrega cal (hidróxido de calcio) cuando empieza a sacar vapor el agua (65 °C aproximadamente).



4) Se mezcla la cal con el agua y el maíz cada diez minutos hasta que alcanza una temperatura adecuada (90-92 °C), se deja reposando toda la noche y al otro día se muele para hacer la masa para las tortillas.

Figura 17. Proceso de cocción del nixtamal utilizando la Patsari nixtamalera/CCR en Michoacán

Posteriormente, se implementaron pruebas CCT en laboratorio replicando el proceso de cocción del nixtamal para determinar los requerimientos energéticos de esta tarea con la estufa Nixtamalera Patsari/CCR. Los resultados de los parámetros de desempeño energético se muestran en la Tabla 5.

Tabla 5. Resultados de las pruebas CCT en laboratorio con la estufa Patsari nixtamalera/CCR

Estufa	Tiempo (min)	Equivalente de combustible seco consumido (kg)	Tasa de quemado (g/min)	Alimento sin cocinar (kg)	Alimento cocinado (kg)	Potencia de fuego (kW)
Patsari nixtamalera/CCR	36.29 ± 6.99	1.34 ± 0.06	37.91 ± 5.70	28.08 ± 0	27.76 ± 0.07	10.88 ± 1.64

Nota: Se realizaron cinco repeticiones para cada tipo de prueba. Las barras de error representan la desviación estándar.

3.4 Caracterización de los pellets MAPPAV

El primer paso para diseñar una estufa de biomasa es determinar qué tipo de combustible consumirá y sus características principales. La Tabla 6 muestra un resumen de las características fisicoquímicas de los pellets MAPPAV que fueron utilizados en las pruebas de evaluación de la estufa Patsari nixtamalera con prototipos de MG-TLUD. Los valores de humedad, cenizas y poder calorífico inferior cumplieron con los valores mínimos especificados en las normas internacionales de pellets para aplicaciones no industriales (EN 14961-2, 2011). Los contenidos de carbón, hidrogeno, nitrógeno y azufre eran similares a los indicados en la literatura para pellets fabricados a partir de biomasa residual mezclada (García et al., 2019; Murillo et al., 2021; Sonarkar & Chaurasia, 2019).

Tabla 6. Propiedades fisicoquímicas de los pellets MAPPAV y LEB

Tipo de BCS	Análisis proximal (base seca, %)			Composición elemental (base seca, %)					LHV (MJ/kg)	
	Humedad	Materia volátil	Ceniza	Carbono fijo	C	H	O	N		S
Pellets MAPPAV	9.87 ± 0.02	84.21 ± 0.3	1.07 ± 0.02	4.85 ± 0.2	44.2	7.9	46.4	0.6	0.9	19.72 ± 0.1

MAPPAV: mezcla de serrín de pino, paja de avena y virutas de madera; LHV: poder calorífico inferior.

NOTA: La composición de los pellets MAPPAV es la siguiente: aserrín de pino 82%, paja de avena 12% y viruta 6%.

El oxígeno se estimó como la diferencia de la sumatoria de los porcentajes de los demás elementos.

Para la prueba CCT en el P3-Chupiri se utilizó un lote diferente de pellets MAPPAV, que tenía un contenido de humedad del 6.30%.

Comparados con otros BCS, las principales ventajas de los pellets son:

- ❖ Masa y tamaño de partículas pequeñas y homogéneas (0.5-2 g; 25-35 mm) con alta superficie específica, lo que facilita la mezcla con el aire de combustión.
- ❖ Baja humedad (menos de 10%) y alto poder calorífico inferior (superior a 15 MJ/kg) (Van Loo & Koppejan, 2008).
- ❖ Alto contenido de materia volátil mejora la descomposición térmica y el comportamiento durante la combustión.
- ❖ Facilidad de transporte, almacenamiento y manejo.

3.5 Determinación de las variables que integran la metodología de diseño del MG-TLUD

La Tabla 7 contiene información detallada de las fórmulas y variables que se utilizaron para determinar los parámetros de diseño del P3-Chupiri, considerando las características fisicoquímicas de los pellets y los requerimientos energéticos para la cocción del nixtamal, con base en la evaluación preliminar del P1-Misiri. Una novedad aportada por el estudio es la determinación de variables experimentalmente para el cálculo de los parámetros de diseño de MG-TLUD, en comparación con otros estudios, que consideran los valores de las variables reportados en la literatura.

Variables determinadas experimentalmente

Para el cálculo de la energía específica y necesaria de la estufa se tomaron en cuenta los requerimientos energéticos, las necesidades del usuario y los métodos tradicionales de cocción del nixtamal. A partir del análisis fisicoquímico de los pellets MAPPV y el desarrollo del P1-Misiri, se calcularon las variables experimentales y se determinaron los parámetros de diseño para la versión final de los prototipos de MG-TLUD (P3-Chupiri). En el diseño de este prototipo, la dimensión del reactor y la relación espacial entre los orificios de entrada de AP:AS se optimizaron para maximizar el rendimiento energético y reducir las emisiones. Para determinar el caudal del gas la chimenea del P1-Misiri se utilizó un medidor de flujo de aire (Fluke 922), con este valor se calculó la eficiencia de gasificación del P3-Chupiri (ver Tabla 7).

Tabla 7. Parámetros y variables de diseño del prototipo de MG-TLUD (P3-Chupiri)

Parámetro	Fórmula	Variables		Resultados		
		Determinadas	Estimadas			
Es: energía específica	$Es = \frac{f_d * LHV_f}{W_f}$	f_d : Consumo equivalente seco de leña de encino blanco (kg)/CCT-CCR	1.34	LHV _f : poder calorífico inferior de la leña (kJ/kg) (Ruiz-García et al., 2021)	15,990	774 kJ/kg
		W_f : peso total del agua y/o alimentos (maíz, agua y cal) cocidos (kg)/CCT-CCR	27.76			
Qn: energía necesaria	$Qn = \frac{M_f * Es}{T}$	M_f : masa del agua y/o alimentos (maíz, agua y cal) sin cocinar (kg)/CCT-CCR	28.08	H _g : Poder calorífico del gas (kJ/m ³) (Anukam et al., 2014; Belonio, 2005; Erlich & Fransson, 2011)	5,000	36204 kJ/h
		E_s : energía específica (kJ/kg)	774			
		T : tiempo promedio en que se cocina el nixtamal (h)/CCT-CCR	0.60			
n_g : eficiencia de gasificación	$n_g = \frac{H_g * Q_g}{H_s * M_s}$	Q_g : Caudal del gas en la chimenea (m ³ /seg)/ WBT-P1 Misiri	0.0013			55%
		H_s : Poder calorífico superior de los pellets de la mezcla de aserrín, viruta y paja (kJ/kg)	19724			
		M_s : Tasa de consumo de pellets (kg/seg)/ WBT-P1 Misiri	0.00061			
FCR: energía de entrada o tasa de consumo de combustible	$FCR = \frac{Qn}{LHV_p * \eta_g}$	Qn : energía necesaria (kJ/h)	36204			3.33 kg/h
		LHV _p : poder calorífico inferior de los pellets de la mezcla de aserrín, viruta y paja (kJ/kg)	19,710			
		η_g : eficiencia de gasificación (%)	0.55			
SGR: tasa específica de gasificación	$SGR = \frac{W_p}{A_m * T_m}$	W_p : peso de los pellets de la mezcla de aserrín, viruta y paja (kg)/WBT-MG	1.00			184 kg/m ² -h
		D_m : diámetro del reactor/prototipo (m)/ WBT-P1 Misiri	0.14			
		A_m : área del reactor/ prototipo (m ²) / WBT-P1 Misiri	0.015			
		T_m : Tiempo de operación promedio en que alcanza a hervir el agua en la olla (h)/ WBT-P1 Misiri	0.35			
D: diámetro del reactor	$D = \left(\frac{1.27 * FCR}{SGR} \right)^{0.5}$	FCR: tasa de consumo de combustible (kg/h)	3.33			0.15 m
		SGR: tasa específica de gasificación de pellets de la mezcla de aserrín, viruta y paja usado (kg/m ² -h)	184			
H: altura del reactor a partir de la parrilla	$H = \left(\frac{SGR * T}{\rho} \right)$	T : tiempo requerido para operar el dispositivo tomando como referencia la tarea de cocción del Nixtamal (h)	0.60			0.18 m
		ρ : densidad de los pellets de la mezcla de aserrín, viruta y paja (kg/m ³)	600			
		SGR: tasa específica de gasificación de pellets de la mezcla de aserrín, viruta y paja usado (kg/m ² -h)	184			
HT: altura total del MG-TLUD	$HT = H + A_p + A_r + A_c$	H : altura del reactor a partir de la parrilla (m)	0.18			0.25 m
		A_p : altura de la parrilla (m)	0.03			
		A_r : aislamiento del reactor (m)	0.03			
		A_c : altura del conector (m)	0.01			

Tabla 7. Parámetros y variables de diseño del prototipo de MG-TLUD (P3-Chupiri) (continuación)

Parámetro	Fórmula	Variables		Resultados	
		Determinadas	Estimadas		
T: tiempo requerido para el consumo de combustible	$T = \frac{\rho * V_r}{FCR}$	FCR: tasa de consumo de combustible (kg/h)	3.33	36 min	
		Am: área del reactor para el prototipo de microgasificador (m ²)	0.018		
		Hm: altura del reactor para el prototipo de microgasificador (m)	0.18		
		V _r : volumen del reactor (m ³)	0.003		
		p: densidad de los pellets de la mezcla de aserrín, viruta y paja (kg/m ³)	600		
ATS: aire total suministrado al reactor (m ³ /h)	$ATS = [(1.5 * FCR) + (4.5 * FCR)] * \rho_a$	FCR: tasa de consumo de combustible (kg/h)	3.33	25 ± 1 m ³ /h	
		A _p : aire primario es 1.5 veces FCR (kg/h) (Gupta et al., 2020; Mukunda et al., 2010)	6.24		
		A _s : aire secundario es 4.5 veces FCR (kg/h) (Gupta et al., 2020; Mukunda et al., 2010)	18.72		
		P _a : densidad del aire (kg/m ³) (Bukar et al., 2019)	1.25		
Ap/As: relación de orificios de aire primario y secundario	$N = \frac{P}{(d + b)}$ $A_p/A_s = \frac{A_{oas}}{A_{oap} + A_{oapt}}$	P: Perímetro de la CR (cm)	47.64	P: Perímetro en la TIR (cm)	47.64
		d1: Diámetro orificios de aire primario (cm)	0.25	dt1: diámetro de los orificios de aire primario en la TIR (cm)	0.25
		b1: Separación entre los orificios de aire primario (cm)	4.50	Nt1: número de orificios de aire primario en la TIR	13
		N1: Número de orificios de aire primario en la CR	11	A _{oapt} : Área de orificios de aire primario en la TIR (cm ²)	0.64
		A _{oap} : Área de los orificios de aire primario en la CR (cm ²)	0.54		
		P: Perímetro de la CR (cm)	47.64		
		d2: Diámetro de los orificios de aire secundario (cm)	0.45		
		b2: separación entre los orificios de aire secundario (cm)	1.50		
		N2: Número de orificios de aire secundario en la CR	24		
		A _{oas} : Área de orificios de aire secundario en la CR (cm ²)	3.89		
N _{op} : número de orificios en la parrilla	$A_{cop} = \frac{(A_{cp} * A_{top})}{A_{cp}}$ $N_{op} = \frac{A_{cop}}{A_{op}}$	D _{op} : Diámetro de orificios (cm)	0.45	D _{op} : diámetro de orificios (cm)	0.50
		A _{op} : Área de orificios (cm ²)	0.16	N _{op} : número orificios	50
		D _{cp} : Diámetro de la circunferencia de la parrilla (cm)	14.60	A _{top} : área total de orificios (cm ²)	9.82
		A _{cp} : Área de la circunferencia de la parrilla (cm ²)	167.42	D _{cp} : diámetro de la circunferencia parrilla (cm)	20
		A _{cop} : Área a cubrir por los orificios en la parrilla respecto a lo reportado por (Wijianto et al., 2018)	5.23	A _{cp} : área de la circunferencia de la parrilla (cm ²)	314.16

CR: circunferencia del reactor; TIR: tapa inferior del reactor

3.6 Evaluación preliminar y rediseño de los prototipos de MG-TLUD

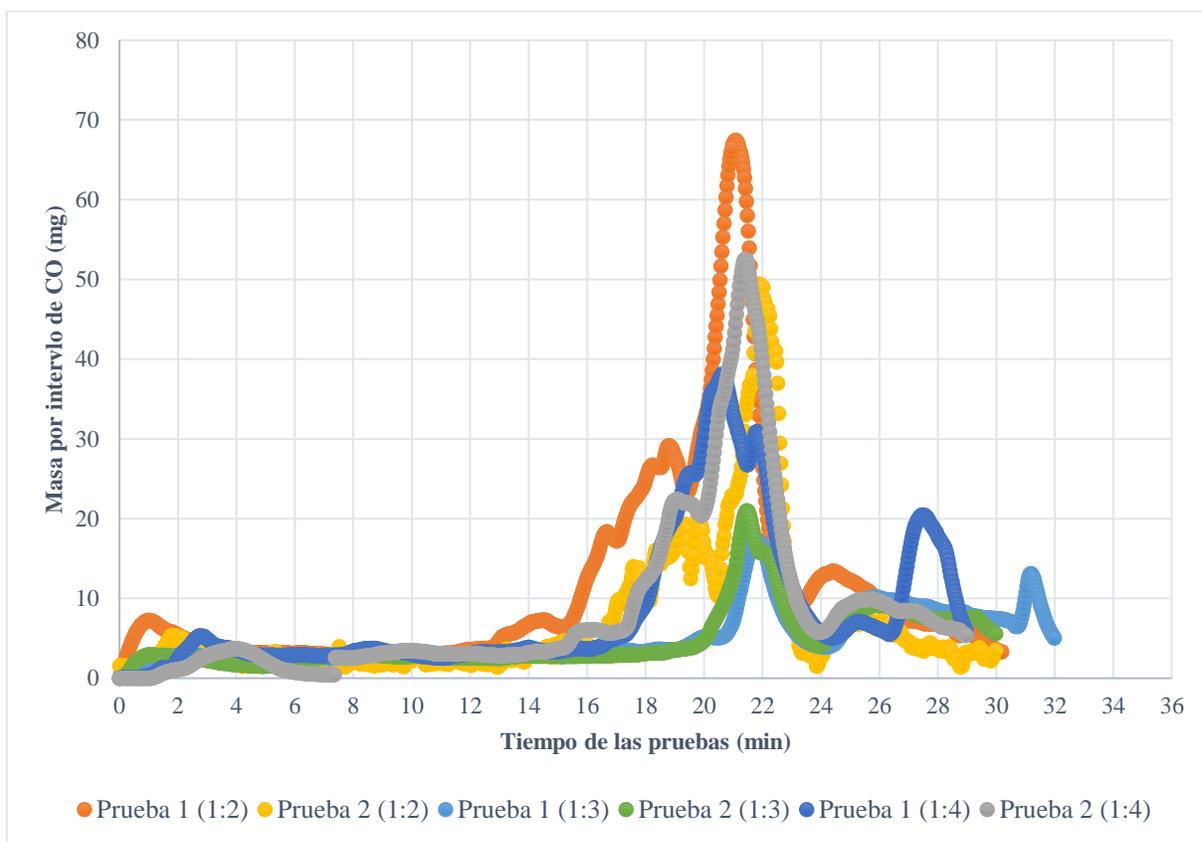
Los tres prototipos de MG-TLUD se construyeron utilizando materiales como el aluminio (reactor, cilindro exterior, conector) y el hierro (parrilla del reactor), que son resistentes a las altas temperaturas y la corrosión, para conformar cada componente de los dispositivos (ver Figura 18). En esta etapa preliminar se implementaron pruebas de evaluación WBT en laboratorio en el P1-Misiri para determinar experimentalmente las siguientes variables de la metodología de diseño indicadas en la Tabla 7, la cuales son las siguientes: caudal del gas en la chimenea (Q_g), tasa de consumo de pellets (M_s), diámetro del reactor/prototipo (D_m), área del reactor/prototipo (A_m), tiempo de operación promedio en que alcanza a hervir el agua en la olla (T_m). Asimismo, se consideró desarrollar otro prototipo MG-TLUD nombrado P2-Jimbani, para tener una referencia comparativa del desempeño respecto al P1-Misiri, modificando la relación geométrica de orificios de entrada de AP:AS y las dimensiones del reactor (diámetro y altura).



Dispositivo		
P1-Misiri	P2-Jimbani	P3-Chupiri
Dimensiones del reactor (cm)		
D:14	D:15	D:15
H:16	H:18	H:18
Relación geométrica de orificios de entrada de AP:AS		
1:2	1:7	1:3

Figura 18. Prototipos de MG-TLUD desarrollados

Se ha demostrado que las estufas de biomasa con mayores índices de MCE consumen menos combustible y generan menos emisiones contaminantes (Jetter et al., 2012; Johnson et al., 2010). La relación geométrica de orificios de entrada de AP:AS en el P3-Chupiri se evaluó en términos de la eficiencia de combustión modificada ($MCE = \text{moles } CO_2 / (\text{moles } CO_2 + CO)$). Se modificaron los orificios del P2-Jimbani (relación 1:7) para medir las emisiones de CO y CO_2 en tiempo real, utilizando un sistema portátil de medición de emisiones (PEMS) mientras se ejecutaban pruebas WBT con la misma cantidad de combustible y caudal de aire. En la evaluación se consideró realizar dos pruebas para tres relaciones geométricas de orificios de AP:AS diferentes: 1:2, 1:3 y 1:4 (ver Figura 19).



Nota: para cada relación geométrica de orificios de entrada de PA:SA se realizaron dos repeticiones.

Figura 19. Masa por intervalo de CO emitido durante las pruebas WBT en el P3-Chupiri

Se puede observar en la Figura 19 que en la relación 1:3 las emisiones de CO disminuyeron y resultaron ser más homogéneas, respecto a las otras relaciones exploradas. Por otro lado, la variación de los resultados entre las relaciones 1:2 y 1:4 se puede deber a las condiciones de operación en cada prueba, principalmente en el tiempo de encendido o apagado del ventilador. Asimismo, las emisiones de CO resultaron ser mayores en las relaciones 1:2 y 1:4, debido a que no se presentó una relación óptima entre la relación geométrica de orificios de AP:AS para el aire suministrado.

En la Tabla 8 se muestran los resultados de los principales parámetros de desempeño energético para las tres relaciones de AP:AS, considerando una tasa de flujo de aire total suministrado de 25 m³/hora. La relación 1:3 alcanzó el valor más alto de la eficiencia modificada de combustión (MCE). Sin embargo, presentó la menor potencia de fuego (F_p) y eficiencia térmica (TE).

Tabla 8. Resultados de desempeño energético del P3-Chupiri implementando WBT con tres relaciones geométricas de orificios de entrada de AP:AS

Combustible	Tasa de flujo de aire total suministrado (m ³ /h)	Relación (AP:AS)	MCE (%)	TE (%)	F _p (kW)
Pellets MAPPAV	25	1:2	99.33 ± 0.22	50 ± 0.05	8.81 ± 0.36
		1:3	99.61 ± 0.01	45 ± 0.00	8.77 ± 0.41
		1:4	99.29 ± 0.03	46 ± 0.01	9.39 ± 0.00

Nota: para cada relación geométrica de orificios de entrada de PA:SA se realizaron dos repeticiones.

3.7 Pruebas de evaluación y comparativa con las normas voluntarias de rendimiento

3.7.1 Desempeño energético

El rendimiento energético y las emisiones de los prototipos de MG-TLUD adaptados a la estufa Patsari nixtamalera fueron comparados con un TSF y la estufa Patsari nixtamalera con la CCR. La Tabla 9 muestra los principales parámetros de desempeño energético que se midieron durante las pruebas WBT, nombrados: equivalente de combustible seco consumido (F_d), consumo específico de combustible (SFC), eficiencia térmica (TE), potencia de fuego (F_p), potencia de fuego nominal (NF_p), tasa de consumo de combustible (FCR) y tiempo de ebullición (TB). De acuerdo con los criterios señalados en la ISO/TR 19867-3 (2018), los prototipos P1-Misiri y P3-Chupiri alcanzaron el nivel mayor de desempeño en TE (>50% y ahorro de combustible (>75%), la CCR alcanzó un desempeño Tier-3 para TE (≥30%), valor similar al determinado en campo (ver Figura 15); y el TSF se desempeñó a nivel más bajo (Tier-1) de desempeño energético para TE (≥10%). Este valor es similar a lo que reporta (Ruiz-García et al., 2021), que informaron una TE del 16% para un TSF al realizar pruebas WBT con 5 litros.

Se ha demostrado que la FCR tiene una relación directa con F_p: cuando se quema una mayor cantidad de BCS, la olla recibe una mayor cantidad de energía térmica, reduciendo el tiempo que tarda en alcanzar el punto de ebullición del agua y aumentando el valor de F_p (De La Hoz C. & González, 2020). Sin embargo, cuando se aumentó el diámetro del reactor y el suministro de AS en el P2-Jimbani (1:7) con respecto al P1-Misiri (1:2), se produjo un aumento en F_p y FCR, pero TE disminuyó de 50% a 43%. Esto podría atribuirse a una distribución irregular del fuego a lo largo de la circunferencia de la

olla, a una alta potencia de fuego y una mayor entrada de aire en la cámara del reactor a través de los orificios de entrada de AS, lo que resulta en un consumo de combustible más rápido.

Por otro lado, el P3-Chupiri disponía de un reactor de igual tamaño que el del P2-Jimbani, pero el suministro de AS se redujo a 1:3 para disminuir las emisiones de CO (ver Figura 17). Esto mejoró TE de 42.7% a 51.4%, pero disminuyó los valores de F_p y FCR. Como han demostrado (Mehta & Richards, 2020), un suministro constante de AP y el aumento del AS resulta en un incremento más lento del calor que se transfiere al agua con respecto al calor liberado por el combustible, disminuyendo el valor de TE. En la Tabla 9 se puede analizar que el P1-Misiri y P3-Chupiri tuvieron valores iguales para F_d y SFC, esto se puede atribuir a la similitud de las relaciones geométricas de orificios de entrada de AP:AS, que fue 1:2 y 1:3, respectivamente.

Tabla 9. Parámetros de desempeño energético de los prototipos de MG-TLUD, CCR y TSF.

Parámetros de entrada		Parámetros de desempeño						
Dispositivo	BCS	TB (min)	F_d (g)	SFC (g/litro)	FCR (g/min)	F_p (kW)	NFp (kW _{th})	TE (%)
P1-Misiri	MAPPV pellets	45 ± 1.5	886 ± 0.02	45 ± 1.5	22 ± 3.9	6.0 ± 1.1	3.0 ± 0.5	50.6 ± 1.3
P2-Jimbani*	MAPPV pellets	25 ± 0.7	966 ± 1.6	49 ± 0.1	39 ± 1.1	12 ± 0.3	5.1 ± 0.1	42.7 ± 0.6
P3-Chupiri	PSOSS pellets	29 ± 2.2	886 ± 0.01	44 ± 0.1	31 ± 2.2	8.5 ± 0.6	4.4 ± 0.3	51.4 ± 0.7
CCR	LEB	47 ± 8.0	1223 ± 84	63 ± 4.8	26 ± 4.1	7.6 ± 1.2	2.5 ± 0.5	33.2 ± 1.5
TSF*	LEB	52 ± 3.5	2662 ± 199	139 ± 13	51 ± 2.5	13.8 ± 0.7	2.1 ± 0.2	15.5 ± 1.4

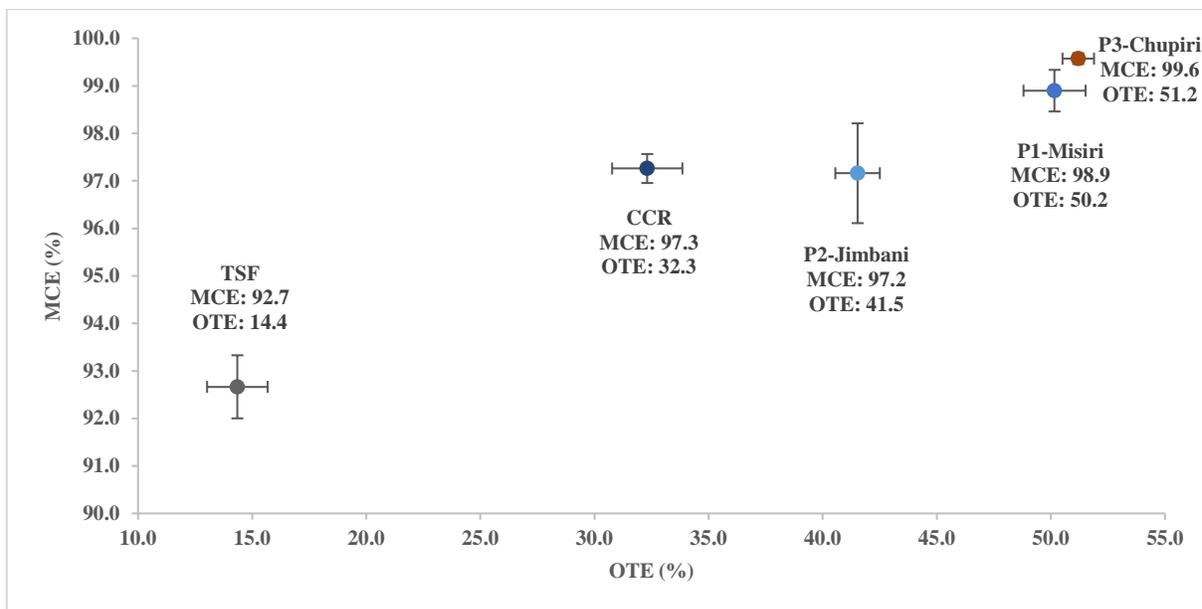
Nota: cada prueba se repitió cinco veces. Las barras de error representan la desviación estándar.

MAPPV: mezcla de aserrín de pino, paja de avena y virutas de madera; LEB: leña de encino blanco.

* La potencia de fuego del P2-Jimbani y TSF es superior a 10 kW. Debido a esto, podrían emitir sustancialmente más contaminantes generales en el entorno doméstico que las de menos de 10 kW. Por lo tanto, las tasas de emisión fugitivas también deben ser comparadas y cumplir con los factores de emisión basados en gramos emitidos por mega julio de energía útil entregada.

La eficiencia térmica total (OTE), es un indicador de la eficiencia energética de la estufa. Se calculó como el producto de la energía útil entregada por el combustible (TE) y la energía liberada por el combustible (MCE) (Jetter et al., 2012). Como se puede observar en la Figura 20, cuando se reduce la relación geométrica de los orificios de entrada de AS en el P3-chupiri (1:3), en comparación con la del P2-Jimbani (1:7), MCE aumentó del 97.2% a 99.6%. Esto respalda los resultados previos de las pruebas WBT implementadas (ver Figura 19), según los cuales la relación de AP:AS 1:3 es la óptima en términos de los valores de MCE.

Los valores de MCE fueron similares para la CCR y P2-Jimbani, pero fueron mayores a los del TSF. Además, el P3-Chupiri alcanzó resultados significativamente mayores para OTE (51.2%) a diferencia del TSF (14.4%) y CCR (32.3%). Se observó también que el hecho de poder regular la intensidad del fuego en los prototipos de MG-TLUD puede resultar en un mejor desempeño, menores tiempos de cocción y un mayor ahorro de combustible en tareas de cocción domésticas que tienen diferentes requerimientos energéticos en comparación con CCR y TSF.

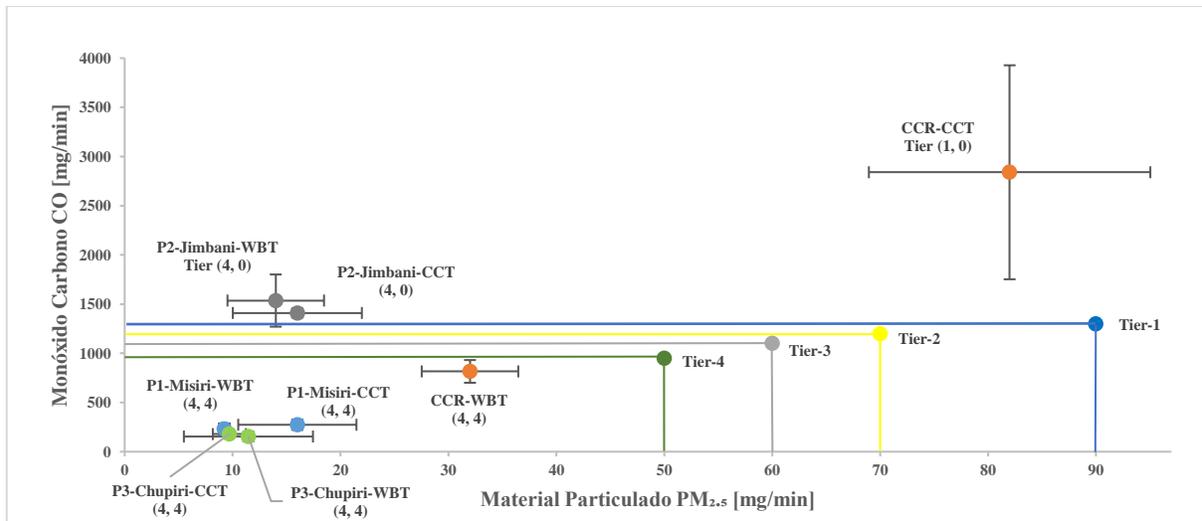


Nota: Las barras de error representan la desviación estándar de cinco repeticiones para las pruebas WBT implementadas en cada dispositivo.

Figura 20. Valores de la eficiencia modificada de combustión y la eficiencia térmica total para los tres prototipos de MG-TLUD, CCR y TSF

3.7.2 Emisiones totales

Las emisiones totales y fugitivas se midieron utilizando pruebas experimentales WBT y CCT. Las tasas de emisión totales se compararon con las puntuaciones de rendimiento indicadas en la (NMX-Q-001-NORMEX, 2018). En la Figura 21 los Tier se indican para cada tasa de emisión total a través del paréntesis (TierPM, TierCO). También se observa en la Figura 21, que la RCC-CCT y el P2-Jimbani (para ambos tipos de prueba) obtuvieron las puntuaciones más bajas para las emisiones totales de CO (>1300 mg/min), mientras la RCC-WBT, y el P1-Misiri y el P3-Chupiri (en ambas pruebas) alcanzaron los puntajes más altos (≤ 950 mg/min). En cuanto a las emisiones de PM_{2.5}, la CCR-CCT obtuvo la puntuación más baja (≤ 90 mg/min), mientras la CCR-WBT y el P1-Misiri; P2-jimbani y P3-Chupiri (en ambas pruebas) alcanzaron los puntajes más altos (≤ 50 mg/min).



Nota: Las barras de error representan la desviación estándar de cinco repeticiones para las pruebas WBT y CCT implementadas en cada dispositivo.

Figura 21. Promedio de las tasas de emisión totales de PM_{2.5} y CO para los prototipos de MG-TLUD y RCC, conforme a los niveles de desempeño señalados en la NMX-Q-001-NORMEX 2018

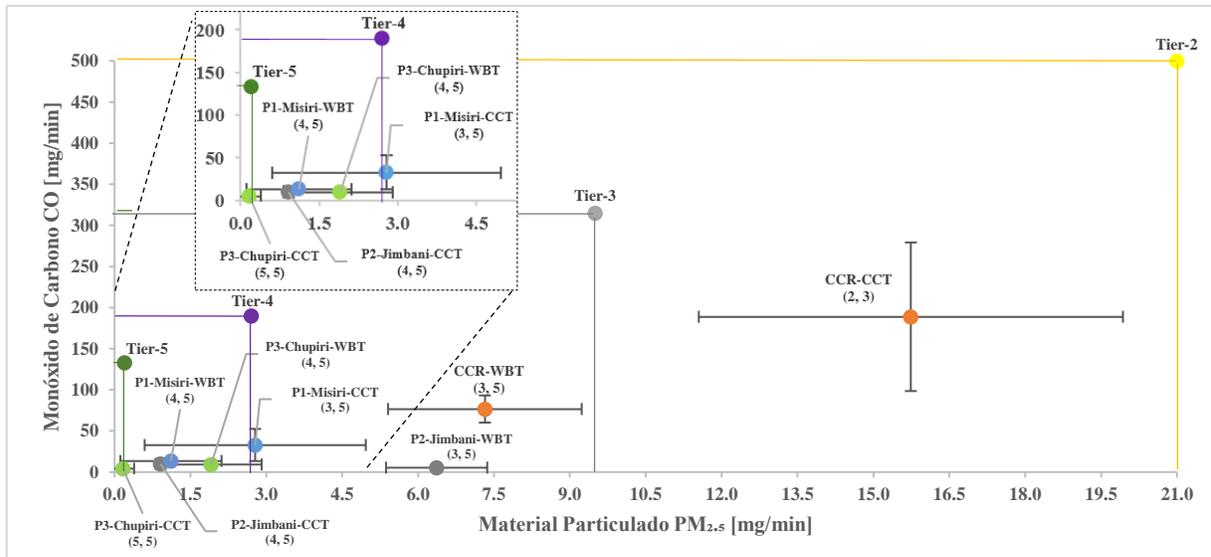
La diferencia en las tasas de emisión de la CCR al realizar las pruebas WBT y CCT puede atribuirse a las condiciones de funcionamiento, tiempos de las pruebas, tareas de cocción, control de la estufa, etc. Además, el P2-Jimbani mostró los mayores niveles de emisiones de CO. La altura del reactor de este prototipo fue mayor que la del P1-Misiri, y su relación de orificios de entrada de AS fue mayor que la del P3-Chupiri, lo que demuestra que la distancia desde la parte superior de la cama de combustible a la entrada de los orificios de AS y la relación geométrica AP:AS puede tener una influencia en las emisiones totales de CO generadas por los prototipos.

Se ha analizado que las emisiones por la combustión incompleta pueden ser reducidas significativamente haciendo que la parte superior de la cama de combustible esté lo más cerca posible de los orificios de entrada de AS (Kirch et al., 2018). Además, en el estudio realizado por (Kirch et al., 2016) se propone que tener un mayor flujo de AS hace que parte del mismo fluya hacia abajo, a través de la cama de combustible, lo que ayuda a la gasificación del carbón, reduciendo las emisiones de CO. El P2-Jimbani y P3-Chupiri tienen la misma distancia desde la parte superior de la cama de combustible hasta los orificios de entrada de AS. Sin embargo, el P2-Jimbani tiene un mayor suministro de AS, debido a su relación geométrica de orificios de entrada de AP:AS (1:7), lo que demuestra que, a pesar de la distancia del combustible a los orificios de entrada de AS, una relación AP:AS, donde la entrada de orificios de AS sea considerablemente mayor puede dar lugar a temperaturas reducidas en el área de combustión, y, por lo tanto, a una mayor generación de emisiones de CO.

Por este motivo, la adaptación de un mecanismo que permita cambiar la altura de la parrilla de forma independientemente al reactor puede conducir una mayor versatilidad y mejorar el funcionamiento de la estufa. En promedio, el P3-Chupiri-WBT alcanzó una reducción de las emisiones totales de CO del 81% con respecto a la CCR, y en relación con el P1-Misiri una reducción de las emisiones totales de PM_{2.5} del 70%. En las pruebas CCT, el P3-Chupiri redujo las emisiones totales de CO en un 94% y las de PM_{2.5} en un 89%. Por lo tanto, se observó que al sustituir la CCR por los prototipos de MG-TLUD se reducen las tasas de emisión totales de CO y PM_{2.5} de manera significativa ($P < 0.05$, $\alpha = 0.05$).

3.7.3 Emisiones fugitivas

La Figura 22 muestra los resultados para las tasas de emisión fugitivas y la comparativa respecto a los niveles Tier alcanzados por los tres prototipos de MG-TLUD y CCR. Los Tier se indican para cada tasa de emisión fugitiva a través del paréntesis (TierPM, TierCO). La CCR-CCT tiene el nivel de desempeño más bajo en términos de las emisiones de CO (≤ 190 mg/min). La CCR-WBT, y todos los prototipos de MG-TLUD (en ambas pruebas) alcanzaron niveles similares de alto rendimiento en términos de emisiones de CO (≤ 133 mg/min), donde todos los prototipos de MG-TLUD alcanzaron un Tier-5 tanto en pruebas WBT y CCT, así como la CCR en las pruebas WBT. Sin embargo, los datos relativos a los índices de emisión de PM_{2.5} presentaron una mayor variabilidad. La CCR-CCT presentó el nivel más bajo de rendimiento (≤ 21 mg/min), seguido de la CCR-WBT, el P2-Jimbani-CCT y el P1-Misiri-CCT (≤ 9.5 mg/min); seguido del P3-Chupiri-WBT, el P1-Misiri-WBT y el P2-Jimbani-CCT (≤ 2.7 mg/min); sólo el P3-Chupiri-CCT alcanzó el nivel más alto de desempeño (≤ 0.2 mg/min). Esta variabilidad en las tasas de emisión de PM_{2.5} se puede atribuir a la calidad del combustible y a la eficacia del sellado de la carcasa de aislamiento en la estufa Patsari Nixtamalera, y no necesariamente al tipo de prueba implementada. Las tasas de emisión fugitivas de CO y PM_{2.5} se reducen significativamente ($P < 0.05$, $\alpha = 0.05$), al sustituir y adaptar los prototipos de MG-TLUD comparado con el uso de la CCR. En promedio, el P2-Jimbani-WBT alcanzó una reducción de emisiones fugitivas de CO del 93%; el P1-Misiri-WBT una reducción de las emisiones fugitivas de PM_{2.5} del 85%; y el P3-Chupiri-CCT una reducción de emisiones fugitivas de CO y PM_{2.5} del 98% y 99%, respectivamente.



Nota: Las barras de error representan la desviación estándar de cinco repeticiones para las pruebas WBT y CCT implementadas en cada dispositivo.

Figura 22. Promedio de las tasas de emisión fugitivas de PM_{2.5} y CO para los prototipos de MG-TLUD y CCR en cumplimiento de los niveles de desempeño de la ISO/TR 19867-3

De acuerdo con la ISO/TR 19867-3, los objetivos voluntarios de emisiones pueden utilizarse para evaluar estufas con una F_p de hasta 10 kW. En el caso del TSF, las emisiones fugitivas son iguales a las emisiones totales, ya que esta estufa no tiene chimenea. Por lo tanto, los factores de emisión fugitiva de PM_{2.5} (mg/MJ_d) y CO (g/MJ_d) de la estufa Patsari nixtamalera adaptando los prototipos de MG-TLUD y la CCR se compararon con los factores de emisión por energía útil entregada del TSF (ver Tabla 10). Para convertir las tasas de emisión fugitivas en factores de emisión (masa por megajulio de energía útil entregada), se multiplicaron las tasas de emisión por el tiempo de cocción promedio asumido y se dividieron por la energía útil entregada y requerida para las necesidades diarias de cocción (11 MJ), establecida en la ISO/TR 19867-3.

En la Tabla 10, se puede observar que el TSF obtuvo los resultados más bajos para desempeño energético y emisiones (Tier-1). Por otro lado, el P2-Jimbani obtuvo los valores mínimos para los factores de emisión de CO y PM_{2.5}. Esto comprueba que las estufas que presentan una potencia superior a 10 kW emiten más contaminantes generales en el entorno doméstico que las de menos de 10 kW y deben ser evaluadas y cumplir con los factores de emisión basados en gramos emitidos por mega julio de energía útil entregada. Además, en el P2-Jimbani, los factores de emisión de CO (g/MJ_d) mejoraron considerablemente (Tier-5) respecto a las tasas de emisión totales de CO (mg/min) donde presentaron los valores más bajos de desempeño (Tier-0) (ver Figura 21). Un trabajo previo desarrollado por (Scharler et al., 2021), sobre la mejora de la combustión de CO en estufas gasificadoras tipo TLUD, muestra la gran importancia de una cámara de combustión suficientemente grande para aumentar el tiempo de residencia y reducir la caída de temperatura del gas para evitar altas emisiones de la combustión incompleta.

Tabla 10. Factores de emisión por energía útil entregada y eficiencia térmica comparados con los niveles de rendimiento Tier de la ISO/TR 19867-3

Dispositivo	Categoría	Parámetro de desempeño	Unidad	Comparativa	
				Resultados	Tier
P1-Misiri	Energía	Eficiencia térmica	%	50.60 ± 1.3	5
	Emisiones fugitivas	Factores de emisión al interior de CO	g/MJ _d	0.05 ± 0.02	5
		Factores de emisión al interior de PM _{2.5}	mg/MJ _d	4.69 ± 2.85	5
P2-Jimbani	Energía	Eficiencia térmica	%	42.70 ± 0.6	4
	Emisiones fugitivas	Factores de emisión al interior de CO	g/MJ _d	0.01 ± 0.007	5
		Factores de emisión al interior de PM _{2.5}	mg/MJ _d	3.12 ± 0.78	5
P3-Chupiri	Energía	Eficiencia térmica	%	51.40 ± 0.7	5
	Emisiones fugitivas	Factores de emisión al interior de CO	g/MJ _d	0.02 ± 0.002	5
		Factores de emisión al interior de PM _{2.5}	mg/MJ _d	4.99 ± 3.09	5
CCR	Energía	Eficiencia térmica	%	33.20 ± 1.5	3
	Emisiones fugitivas	Factores de emisión al interior de CO	g/MJ _d	0.32 ± 0.06	5
		Factores de emisión al interior de PM _{2.5}	mg/MJ _d	31.05 ± 8.15	4
TSF	Energía	Eficiencia térmica	%	15.50 ± 1.4	1
	Emisiones fugitivas	Factores de emisión al interior de CO	g/MJ _d	13.73 ± 2.09	1
		Factores de emisión al interior de PM _{2.5}	mg/MJ _d	969.17 ± 77.54	1

Nota: Las barras de error representan la desviación estándar de cinco repeticiones para las pruebas WBT implementadas en cada dispositivo.

Los tres prototipos de MG-TLUD mostraron un factor promedio de emisión fugitiva para PM_{2.5} de 4.27 mg/MJ_d (Tier-5), que es, 227 veces menor que el TSF, y siete veces menor que la CCR. Asimismo, los tres prototipos de MG-TLUD tuvieron un factor promedio de emisión fugitiva para CO de 0.03 g/MJ_d (Tier-5), que es 458 veces menor que el TSF y 11 veces menor que la CCR. La diferencia de los factores de emisión fugitiva entre la estufa Patsari nixtamalera con los prototipos de MG-TLUD y CCR, comparada con el TSF fue estadísticamente significativa (P<0.05, α=0.05).

Además, la comparativa de la generación de emisiones de los tres prototipos de MG-TLUD respecto a trabajos previos de la literatura mostraron una mejora en la eficiencia térmica y la reducción de los factores de emisión al interior de CO y PM_{2.5} (ver Figura 23), al implementar pruebas WBT en laboratorio para la evaluación de los dispositivos. Por ejemplo, en el estudio realizado por (Himanshu et al., 2022b), evaluaron el rendimiento de una estufa gasificadora de tiro forzado que funciona con pellets de biomasa (FD 2.2), la cual alcanzó una TE (43.7%) y emisiones de CO (0.91 g/MJ_d) y PM_{2.5} (28.85 mg/MJ_d). Por otro lado, en el trabajo desarrollado por (Tryner et al., 2014), se evaluaron los efectos del diseño y el tipo de combustible (pellets de madera) en cinco estufas semi-gasificadoras tipo TLUD, resultando la mayor TE (42%) y las emisiones más bajas para CO y PM_{2.5} de 0.6 g/MJ_d y 48 mg/MJ_d, respectivamente en la estufa Peko Pe. Por otro lado, en un estudio realizado por (Shan et al., 2017), desarrollaron cinco prototipos de estufas semi gasificadoras de biomasa, el prototipo (Prototype-V) que consta de una chimenea y funciona con pellets logró el mejor rendimiento en eficiencia térmica (41%) y emisiones de CO (2.2 g/MJ_d) y PM_{2.5} (38 mg/MJ_d). Finalmente, en el estudio realizado por (Mawusi et al., 2023a) evaluaron los factores de emisión de cinco ICS que utilizan leña, carbón vegetal y pellets para cubrir las necesidades energéticas de cocción en Asia y África. Comparando con las otras ICS, la estufa gasificadora de tiro forzado que utiliza pellets (F-18) redujo las emisiones significativamente para CO (0.51 g/MJ_d) y PM_{2.5} (23 mg/MJ_d).

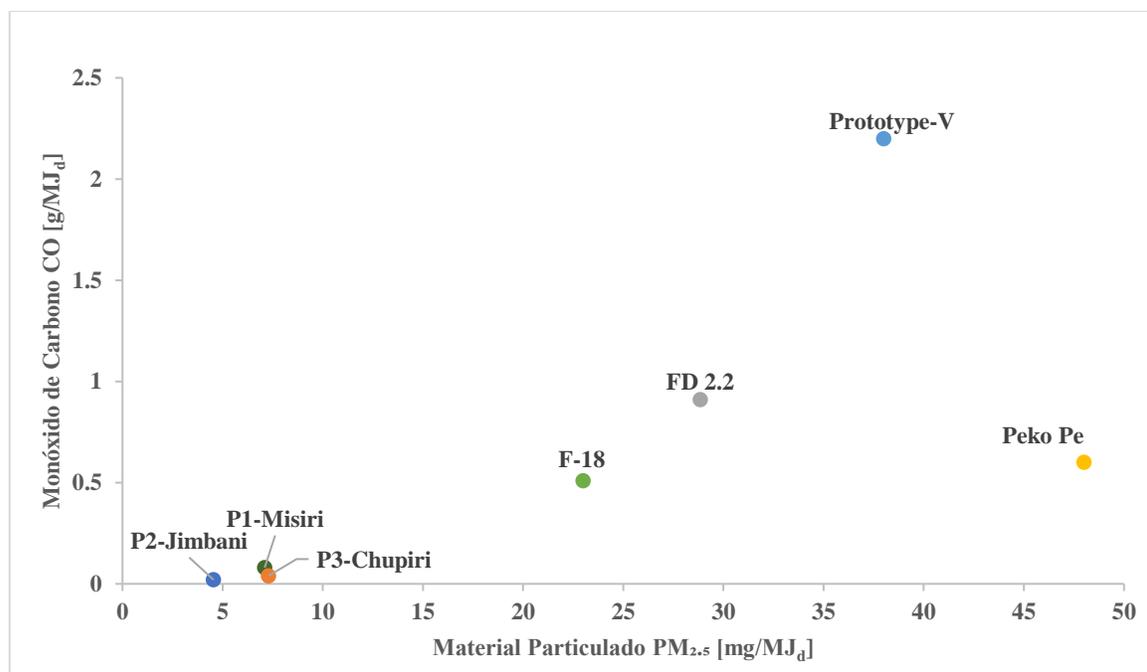


Figura 23. Comparación de los factores de emisión de CO y PM_{2.5} de los prototipos de MG-TLUD desarrollados con otras estufas gasificadoras de pellets reportadas en la literatura.

Fuente: Adaptado de (Himanshu et al., 2022a; Mawusi et al., 2023b; Shan et al., 2017; Tryner et al., 2014)

Los objetivos de rendimiento voluntarios y niveles asociados (Tier), son directrices sobre el desempeño energético y reducción de las emisiones contaminantes que las estufas de biomasa deben aspirar para asegurar un desempeño óptimo. Además, tienen un papel clave como criterio integral que permite mostrar a los diseñadores/fabricantes y usuarios los beneficios de un determinado dispositivo en términos del consumo de combustible y reducción del riesgo debido a la exposición a emisiones nocivas para la salud. Desarrollar el diseño de MG-TLUD como dispositivos que realizan tareas de cocción con requerimientos energéticos específicos, en lugar de realizar una variedad amplia de tareas, permite que cumplan las normas energéticas y de funcionamiento para las que fueron diseñados, mejorando así la eficiencia térmica, el ahorro de combustible, la regulación de la potencia de fuego requerida y la disminución de las emisiones nocivas en procesos que demandan cantidades intensivas de energía.

3.7.4 Métricas de desempeño general

La Tabla 11 muestra los resultados de los parámetros de desempeño para las principales categorías que se evaluaron implementando pruebas WBT en la estufa Patsari Nixtamalera adaptando los prototipos de MG-TLUD y la CCR, así como el rendimiento del TSF.

Tabla 11. Resultados de los prototipos de MG-TLUD comparados con los Tier de la ISO/TR 19867-3 y la NMX-Q-001-NORMEX para cada categoría de desempeño.

Dispositivo/Nivel de desempeño	Categoría							
	Energía ¹		Factores de emisión fugitivas por energía útil entregada (FEF) ¹		Tasas de emisión fugitivas (TEF) ²		Tasas de emisión totales (TET) ²	
	TE (%)	APT* (%)	CO g/MJ _d	PM _{2.5} mg/MJ _d	CO mg/min	PM _{2.5} mg/min	CO mg/min	PM _{2.5} mg/min
P1-Misiri	51 ± 1.3	4 ± 1.5	0.05 ± 0.02	4.69 ± 2.85	13.4 ± 6.2	1.1 ± 0.6	232 ± 55	9.2 ± 0.5
Tier	5		5	5	5	4	4	4
P2-Jimbani	42 ± 0.6	46 ± 0.7	0.01 ± 0.007	3.12 ± 0.78	5.3 ± 3.1	6.3 ± 0.3	1536 ± 265	14 ± 5.5
Tier	4		5	5	5	3	5	3
P3-Chupiri	51 ± 0.7	38 ± 2.2	0.02 ± 0.002	4.99 ± 3.09	9.2 ± 0.8	1.9 ± 1.2	154 ± 47	11.5 ± 6
Tier	5		5	5	5	4	4	4

Notas:

NA: No aplica

* APT: Ahorro potencial de tiempo, es igual a la diferencia entre el tiempo de ebullición (TB) de cada prototipo de MG-TUD respecto a la CCR

¹La comparativa se realizó en cumplimiento de los niveles de desempeño de la ISO/TR 19867-3

²La comparativa se realizó en cumplimiento de los niveles de desempeño de la NMX-Q-001-NORMEX 2018

A partir de estos resultados se propusieron métricas de desempeño general para determinar el prototipo de MG-TLUD que presenta el mejor rendimiento, considerando las categorías de energía, emisiones totales y fugitivas. A continuación, se describen las 2 métricas generales de desempeño:

- 1) Métrica de desempeño para maximizar (energía): eficiencia térmica y ahorro potencial de tiempo.

$$MD (+) = [TE + APT] * Tier$$

- 2) Métrica de desempeño para minimizar (emisiones): factores de emisión fugitivas y tasas de emisión totales:

$$MD (-) = [FE CO + FE PM_{2.5}] + [TEF CO + TEF PM_{2.5}] + [TET CO + TET PM_{2.5}]$$

Los resultados de las métricas de desempeño general de energía, emisiones fugitivas y emisiones totales para cada prototipo se muestran en la Tabla 12. Se puede observar que la MD de energía y emisiones resulta ser la mayor y la menor respectivamente en el P3-Chupiri.

Tabla 12. Resultados de las métricas de desempeño general para el desempeño energético y emisiones de los MG-TLUD

Dispositivo	MD Energía (+)	MD FEF (-)	MD TEF (-)	MD TET (-)	MD Emisiones (-)
P1-Misiri	2.8	4.7	14.5	241.4	260.6
P2-Jimbani	3.5	3.1	11.6	1550	1564.7
P3-Chupiri	4.5	5.0	11.1	165.7	181.8

Notas: MD: Métrica de desempeño; FEF: Factores de emisión Fugitivas; TEF: Tasas de emisión fugitivas; TET: Tasas de emisión totales.

El costo de inversión para el desarrollo de cada prototipo de MG-TLUD no se consideró incluirlo como factor en las métricas debido a que los componentes (ventilador) fue el mismo para cada prototipo. Por otro lado, la variación en la cantidad de materiales utilizados en la construcción de cada dispositivo fue mínima.

3.8 Evaluación preliminar del uso del P3-Chupiri en campo

En la Tabla 13 se muestran las tareas de cocinado que realizan usualmente las usuarias de las comunidades de Uricho y Tzurumútaró en la estufa Patsari nixtamalera con la adaptación del P1-Misiri y la CCR respectivamente, antes de evaluar el uso de la estufa Patsari nixtamalera con el P3-Chupiri.

Tabla 13. Tareas de cocinado realizadas en la Estufa Patsari nixtamalera con el uso del P1-Misiri y CCR

Usuaría	Comunidad	Estufa	Tarea de cocción	Cantidad de alimento preparado (kg)	Tiempo para realizar la tarea (minutos)	Frecuencia de uso por mes
Doña Cristina	San Francisco Uricho	Patsari nixtamalera/P1-Misiri	Nixtamal (maíz)	10	40	4
			Frijoles	3	120	2
Doña Helodia	Tzurumútaró	Patsari nixtamalera/CCR	Nixtamal (maíz)	8	45	7
			Calentar agua para bañarse	15	15	7
			Pozole (maíz)	6	-	1

En el caso de la estufa Patsari nixtamalera/P1-Misiri la tarea que lleva más tiempo para su elaboración es la cocción de frijoles a comparación de la cocción del nixtamal, a pesar de que en este último se prepara una mayor cantidad de alimento y es la tarea que se realiza con más frecuencia. Por otro lado, en la Patsari nixtamalera/CCR la elaboración del nixtamal es la tarea que requiere más tiempo, seguida del calentamiento de agua para bañarse, siendo ambas tareas las que se realizan con mayor frecuencia, la elaboración de pozole no es tan frecuente ya que solo la realiza una vez al mes., en ocasiones especiales como fiestas de la comunidad o celebraciones familiares.

Los resultados de las encuestas tipo Likert realizadas a las usuarias para evaluar la interacción preliminar al usar la estufa Patsari nixtamalera con el P3-Chupiri se muestran en la Figura 24 y 25. Se observa que ambas usuarias tienen una mayor disposición (totalmente de acuerdo) para reemplazar el uso de fogones abiertos al realizar la tarea de cocción del nixtamal, así como la sustitución del P1-Misiri y CCR por el P3-Chupiri en la estufa Patsari nixtamalera. Principalmente porque se reducen las emisiones en el área de cocinado, existe un ahorro de combustible y reducción en la duración de los tiempos de cocción del nixtamal. Además, una de las ventajas principales del P3-Chupiri, respecto al P1-Misiri fue que al incrementar las dimensiones de la cámara del reactor permite una carga de pellets superior para cocinar una mayor cantidad de maíz. Por lo tanto, es importante asegurar y respaldar el suministro asequible de combustible y la reparación/mantenimiento de componentes eléctricos básicos del P3-Chupiri (por ejemplo: el ventilador), considerando que sufran alguna falla. Sin embargo, se puede tener un montaje estándar que haga que el reemplazo no requiera personal especializado.



Figura 24. Encuestas tipo Likert para evaluar la interacción del uso del P3-Chupiri por doña Cristina de la comunidad de San Francisco Uricho, Michoacán

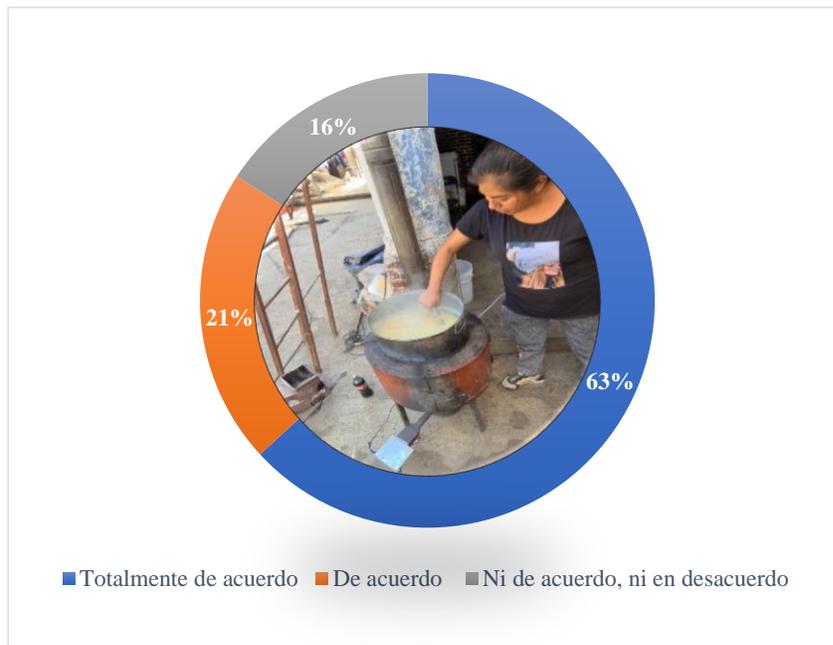


Figura 25. Encuestas tipo Likert para evaluar la interacción del uso del P3-Chupiri por doña Helodia de la comunidad de Tzurumútaro, Michoacán

Los resultados de la evaluación preliminar de la usabilidad del P3-Chupiri en campo, permiten analizar que ambas usuarias muestran un interés positivo en seguir utilizando el MG-TLUD para realizar tareas intensivas de energía, como la cocción del nixtamal. Sin embargo, es necesario desarrollar una evaluación práctica que sea más completa y que integre diversos parámetros de usabilidad que pueda ser útil a los usuarios y la validación del funcionamiento óptimo por parte de los diseñadores. Asimismo, que pueda fortalecer la toma de decisiones para elegir el dispositivo más adecuado para un proyecto o programa determinado.

4. CONCLUSIONES

El estudio presentó el desarrollo y evaluación de tres prototipos de MG-TLUD, adaptados como cámaras de combustión indirecta para una estufa de chimenea, que originalmente contaba con una cámara de combustión directa tipo rocket. La variación de los parámetros geométricos de diseño considerando el dimensionamiento del reactor y la relación de orificios de entrada de aire primario y secundario, fueron la base para implementar un marco sistemático que permitió evaluar y mejorar el desempeño de tres prototipos de MG-TLUD para tareas de cocción doméstica con altos requerimientos energéticos en México. Se observó una mejora significativa en el desempeño energético y la reducción en las emisiones contaminantes cuando se sustituyó la CCR por los MG-TLUD en la estufa Patsari Nixtamalera y se comparó su rendimiento con un TSF.

El prototipo P3-Chupiri alcanzó los niveles más altos definidos en las normas ISO/TR 19867-3 (Tier-5) y NMX-Q-001-NORMEX-2018 (Tier-4) para los objetivos voluntarios de desempeño energético y emisiones. Su rendimiento fue un 37% mejor que el de la CCR y un 72% mejor que del TSF en términos de la eficiencia térmica total. En general, los tres prototipos de MG-TLUD tuvieron tasas de emisión totales y fugitivas significativamente más bajas que la CCR, así como factores de emisión considerablemente menores que el TSF ($P < 0.05$, $\alpha = 0.05$). Además, se comparó el rendimiento de los prototipos de MG-TLUD con otros estudios que han evaluado estufas gasificadoras que utilizan pellets como combustible, se analizó que los MG-TLUD presentan una mayor eficiencia térmica y valores menores de los factores de emisión por energía útil suministrada de CO y $PM_{2.5}$.

Este estudio permitió validar la importancia que tienen el uso de chimeneas y estructuras de aislamiento que rodean las ollas de cocción para disminuir las emisiones fugitivas de $PM_{2.5}$ y aumentar la eficiencia térmica al adaptar MG-TLUD en estufas de biomasa con el objetivo de alcanzar los niveles de rendimiento más altos establecidos en la normativa nacional e internacional.

5. RECOMENDACIONES

Los MG-TLUD que utilizan pellets de biomasa residual pueden ser una alternativa de cocción eficiente y limpia para los hogares rurales en tareas de cocción que requieren un alto consumo energético, contribuyendo a resolver los problemas que se enfrentan en México en términos de contaminación del aire interior y exterior. Sin embargo, es necesario evaluar cómo afectan otros parámetros de diseño el funcionamiento de los MG-TLUD, por ejemplo, la variación de la cantidad de aire suministrada en cada una de las etapas del proceso de micro-gasificación, incluyendo las etapas de encendido, pirólisis, gasificación y combustión.

Asimismo, estudios futuros deben evaluar el desempeño de estos prototipos en condiciones reales para verificar sus beneficios ambientales y de salud en campo, así como sus tasas de adopción y uso sostenido. Se debe priorizar que el enfoque y el diálogo sea a través de talleres participativos comunitarios donde se pueda sensibilizar y capacitar a las usuarias en el uso y mantenimiento de los prototipos de MG-TLUD. Además, esto puede permitir la validación en los datos que se obtienen, evaluar los parámetros de usabilidad de una manera más robusta y fortalecer la toma de decisiones para elegir el prototipo que mejor se adapte a sus necesidades.

6. REFERENCIAS

- Adedayo, K., Owoola, E., & Ogunjo, S. (2018). *The Development of an Enhanced Biomass Gasifier Stove*. 7.
- Ahmed, F., Hossain, S., Hossain, S., Fakhruddin, A. N. M., Abdullah, A. T. M., Chowdhury, M. A. Z., & Gan, S. H. (2019). Impact of household air pollution on human health: Source identification and systematic management approach. *SN Applied Sciences*, *1*(5), 418. <https://doi.org/10.1007/s42452-019-0405-8>
- Anderson, P. S., & Schoner, J. S. (2016). *Origins, History, and Future of TLUD Micro-gasification and Cookstove Advancement*. 39.
- Andreatta, D. (2007). *A Report on Some Experiments with the Top-Lit Up Draft (TLUD) Stove*. 26.
- Antolini, D., Ail, S. S., Patuzzi, F., Grigiante, M., & Baratieri, M. (2019). Experimental investigations of air-CO₂ biomass gasification in reversed downdraft gasifier. *Fuel*, *253*, 1473–1481. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.05.116>
- Anukam, A., Mamphweli, S., Meyer, E., & Okoh, O. (2014). Computer Simulation of the Mass and Energy Balance during Gasification of Sugarcane Bagasse. *Journal of Energy*, *2014*, 1–9. <https://doi.org/10.1155/2014/713054>
- Arora, P., Das, P., Jain, S., & Kishore, V. V. N. (2014). A laboratory based comparative study of Indian biomass cookstove testing protocol and Water Boiling Test. *Energy for Sustainable Development*, *21*, 81–88. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2014.06.001>
- Arora, P., & Jain, S. (2016). A review of chronological development in cookstove assessment methods: Challenges and way forward. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *55*, 203–220. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.142>
- Arriaga, R. (2021). *Evaluación del perfil de emisiones de un microgasificador a base de pellets para satisfacer la tarea de realizar tortillas de comal en el contexto mexicano_Retos, limitantes y beneficios.pdf*.
- Bailis, P. R., Ogle, D., MacCarty, N., Smith, K. R., & Edwards, R. (2007). *The Water Boiling Test (WBT)*. 38.
- Baldwin, S. F. (1987). *Biomass stoves: Engineering design, development, and dissemination*. Volunteers in Technical Assistance ; Center for Energy and Environmental Studies, Princeton University.
- Belonio, A. T. (2005). *RICE HUSK GAS STOVE HANDBOOK*. 155.
- Berrueta, V. M., Edwards, R. D., & Masera, O. R. (2008). Energy performance of wood-burning cookstoves in Michoacan, Mexico. *Renewable Energy*, *33*(5), 859–870. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2007.04.016>
- Betina, C. M., Atlánxochitl, M. G. M., Victor, B., & Omar, M. (2022). Longitudinal analysis and expected evolution of household fuel and stove stacking patterns in rural Mexico. *Energy for Sustainable Development*, *70*, 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2022.06.011>
- Bhattacharya, S. C., Albina, D. O., & Khaing, A. M. (2002). Effects of selected parameters on performance and emission of biomass-fired cookstoves. *Biomass and Bioenergy*, *9*.
- Boafo-Mensah, G., Neba, F. A., Tornyeviadzi, H. M., Seidu, R., Darkwa, K. M., & Kemausuor, F. (2021). Modelling the performance potential of forced and natural-draft biomass cookstoves using a hybrid Entropy-TOPSIS approach. *Biomass and Bioenergy*, *150*, 106106. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2021.106106>
- Brand, M. A., Mariano Rodrigues, T., Peretti da Silva, J., & de Oliveira, J. (2021). Recovery of agricultural and wood wastes: The effect of biomass blends on the quality of pellets. *Fuel*, *284*, 118881. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.118881>

- Bukar, A. A., Oumarou, M. B., Tela, B. M., & Eljummah, A. M. (2019). Assessment of Biomass Gasification: A Review of Basic Design Considerations. *American Journal of Energy Research*, 15.
- Carvalho, R. L., Yadav, P., García-López, N., Lindgren, R., Nyberg, G., Diaz-Chavez, R., Krishna Kumar Upadhyayula, V., Boman, C., & Athanassiadis, D. (2020). Environmental Sustainability of Bioenergy Strategies in Western Kenya to Address Household Air Pollution. *Energies*, 13(3), 719. <https://doi.org/10.3390/en13030719>
- Caubel, J. J., Rapp, V. H., Chen, S. S., & Gadgil, A. J. (2020). Practical design considerations for secondary air injection in wood-burning cookstoves: An experimental study. *Development Engineering*, 5, 100049. <https://doi.org/10.1016/j.deveng.2020.100049>
- Controlled Cooking Test, CCT. (2021). *Version 2.0 Available from: Partnership for Clean Indoor Air. Http://www.pciaonline.org/files/CCT_Version_2.0_0.pdf (accessed 2021 June).*
- Dalena, F., Basile, A., & Rossi, C. (2017). *Bioenergy Systems for the Future*. 630.
- De La Hoz C., K., & González, W. A. (2020). Energy performance and variability of an improved top-lit updraft biomass cookstove under a water boiling test protocol. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 1–20. <https://doi.org/10.1080/15567036.2020.1819473>
- Deng, M., Li, P., Shan, M., & Yang, X. (2020). Optimizing supply airflow and its distribution between primary and secondary air in a forced-draft biomass pellet stove. *Environmental Research*, 184, 109301. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.109301>
- Deng, M., Zhang, P., Yang, H., & Ma, R. (2023). Directions to improve the thermal efficiency of household biomass cookstoves: A review. *Energy and Buildings*, 278, 112625. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.112625>
- Díez, H. E., Gómez, I. N., & Pérez, J. F. (2018). Mass, energy, and exergy analysis of the microgasification process in a top-lit updraft reactor: Effects of firewood type and forced primary airflow. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 29, 82–91. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2018.07.003>
- EN 14961-2. (2011). *Solid biofuels. Fuel specification and classes. Part 2: Wood pellets for non-industrial use.*
- Erlich, C., & Fransson, T. H. (2011). Downdraft gasification of pellets made of wood, palm-oil residues respective bagasse: Experimental study. *Applied Energy*, 88(3), 899–908. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2010.08.028>
- Fedak, K. M., Good, N., Walker, E., Clark, M. L., L'Orange, C., Volekens, J., & Peel, J. L. (2019). An expert survey on the material types used to start cookstoves. *Energy for Sustainable Development*, 48, 59–66. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2018.11.001>
- GACC. (2015). *The state of the global clean and improved cooking sector*. Global Alliance for Clean Cookstoves.
- García, Gil, M. V., Rubiera, F., & Pevida, C. (2019). Pelletization of wood and alternative residual biomass blends for producing industrial quality pellets. *Fuel*, 251, 739–753. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.03.141>
- García, & Maserá. (2016). *Estado del arte de la bioenergía en México. Red Temática de Bioenergía (RTB) del CONACYT.*
- García, R., Pizarro, C., Lavín, A. G., & Bueno, J. L. (2013). Biomass proximate analysis using thermogravimetry. *Bioresource Technology*, 139, 1–4. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.03.197>
- García-Maraver, A., Zamorano, M., Fernandes, U., Rabaçal, M., & Costa, M. (2014). Relationship between fuel quality and gaseous and particulate matter emissions in a domestic pellet-fired boiler. *Fuel*, 119, 141–152. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2013.11.037>

- Getahun, E., Tessema, D., & Gabbiye, N. (2019). Design and Development of Household Gasifier Cooking Stoves: Natural Versus Forced Draft. En F. A. Zimale, T. Enku Nigussie, & S. W. Fanta (Eds.), *Advances of Science and Technology* (Vol. 274, pp. 298–314). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-15357-1_25
- Gupta, A., Mulukutla, A. N. V., Gautam, S., TaneKhan, W., Waghmare, S. S., & Labhasetwar, N. K. (2020). Development of a practical evaluation approach of a typical biomass cookstove. *Environmental Technology & Innovation*, 17, 100613. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2020.100613>
- Gutiérrez, J., Riegelhaupt, E., & Catana, A. (2015). *Quemadores de biomasa residual tipo TLUD*.
- Helbig, F., & Roth, C. (2017). *Solid biomass fuels for cooking-beyond firewood and charcoal*. Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH.
- Himanshu, Kurmi, O. P., Jain, S., & Tyagi, S. K. (2022a). Performance assessment of an improved gasifier stove using biomass pellets: An experimental and numerical investigation. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 53, 102432. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2022.102432>
- Himanshu, Kurmi, O. P., Jain, S., & Tyagi, S. K. (2022b). Performance assessment of an improved gasifier stove using biomass pellets: An experimental and numerical investigation. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 53, 102432. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2022.102432>
- Honorato-Salazar, J. A., & Sadhukhan, J. (2020). Annual biomass variation of agriculture crops and forestry residues, and seasonality of crop residues for energy production in Mexico. *Food and Bioproducts Processing*, 119, 1–19. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2019.10.005>
- Huangfu, Y., Li, H., Chen, X., Xue, C., Chen, C., & Liu, G. (2014). Effects of moisture content in fuel on thermal performance and emission of biomass semi-gasified cookstove. *Energy for Sustainable Development*, 21, 60–65. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2014.05.007>
- IEA. (2018). *Renewables. Analysis and forecasts to 2023*. International Energy Agency.
- IEA. (2019). *World Energy Outlook*. International Energy Agency.
- IEA, & FAO. (2017). *How2Guide for Bioenergy. Roadmap Development and Implementation*. International Energy Agency. Food and Agriculture Organization.
- IEA, IRENA, UNSD, World Bank, & WHO. (2020). *Tracking SDG7: The Energy Progress Report 2018*. World Bank, Washington, DC. <https://doi.org/10.1596/29812>
- INEGI. (2018). *Primera encuesta nacional sobre consumo de energéticos en viviendas particulares (ENCEVI)*. Instituto Nacional de Estadística y Geografía, México.
- Islam, M. M., Wathore, R., Zerriffi, H., Marshall, J. D., Bailis, R., & Grieshop, A. P. (2022). Assessing the Effects of Stove Use Patterns and Kitchen Chimneys on Indoor Air Quality during a Multiyear Cookstove Randomized Control Trial in Rural India. *Environmental Science & Technology*, acs.est.1c07571. <https://doi.org/10.1021/acs.est.1c07571>
- Ismail, O., Urbanus, M., Murage, H., & Francis, O. (2013). *Conversion of Rice Husks into an Energy Source through Gasification Technology*. 5(9), 5.
- ISO 17225-6. (2014). *Solid Biofuels. Fuel Specifications and Classes, Part. 6: Graded Non-woody Pellets*.
- ISO 19867-1. (2018). *Clean cookstoves and clean cooking solutions—Harmonized laboratory test protocols—Part 1: Standard test sequence for emissions and performance, safety and durability*.
- ISO/TR 19867-3. (2018). *Clean cookstoves and clean cooking solutions—Harmonized laboratory test protocols—Part 3: Voluntary performance targets for cookstoves based on laboratory testing*.

- Jetter, J., Zhao, Y., Smith, K. R., Khan, B., Yelverton, T., DeCarlo, P., & Hays, M. D. (2012). Pollutant Emissions and Energy Efficiency under Controlled Conditions for Household Biomass Cookstoves and Implications for Metrics Useful in Setting International Test Standards. *Environmental Science & Technology*, 46(19), 10827–10834. <https://doi.org/10.1021/es301693f>
- Johnson, M., Edwards, R., Berrueta, V., & Masera, O. (2010). New Approaches to Performance Testing of Improved Cookstoves. *Environmental Science & Technology*, 44(1), 368–374. <https://doi.org/10.1021/es9013294>
- Kaliyan, N., & Morey, R. V. (2009). Factors affecting strength and durability of densified biomass products. *Biomass and Bioenergy*, 23.
- Kaltschmitt, M. (Ed.). (2019). *Energy from Organic Materials (Biomass): A Volume in the Encyclopedia of Sustainability Science and Technology, Second Edition*. Springer New York. <https://doi.org/10.1007/978-1-4939-7813-7>
- Kar, A., Rehman, I. H., Burney, J., Puppala, S. P., Suresh, R., Singh, L., Singh, V. K., Ahmed, T., Ramanathan, N., & Ramanathan, V. (2012). Real-Time Assessment of Black Carbon Pollution in Indian Households Due to Traditional and Improved Biomass Cookstoves. *Environmental Science & Technology*, 46(5), 2993–3000. <https://doi.org/10.1021/es203388g>
- Kirch, T., Birzer, C. H., van Eyk, P. J., & Medwell, P. R. (2018). Influence of Primary and Secondary Air Supply on Gaseous Emissions from a Small-Scale Staged Solid Biomass Fuel Combustor. *Energy & Fuels*, 32(4), 4212–4220. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.7b03152>
- Kirch, T., Medwell, P. R., & Birzer, C. H. (2016). Natural draft and forced primary air combustion properties of a top-lit up-draft research furnace. *Biomass and Bioenergy*, 91, 108–115. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2016.05.003>
- Kirch, T., Medwell, P. R., Birzer, C. H., & van Eyk, P. J. (2020). Feedstock Dependence of Emissions from a Reverse-Downdraft Gasifier Cookstove. *Energy for Sustainable Development*, 56, 42–50. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2020.02.008>
- Kshirsagar, M. P., & Kalamkar, V. R. (2014). A comprehensive review on biomass cookstoves and a systematic approach for modern cookstove design. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 30, 580–603. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.10.039>
- Kumar, M., Sachin Kumar, & Tyagi, S. K. (2013). Design, development and technological advancement in the biomass cookstoves: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 26, 265–285. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.05.010>
- Kumar, & Panwar, N. L. (2019). Experimental investigation on energy-efficient twin-mode biomass improved cookstove. *SN Applied Sciences*, 1(7), 760. <https://doi.org/10.1007/s42452-019-0804-x>
- Kumar, Sathish, S., Prabu, D., Renita, A. A., Saravanan, A., Deivayanai, V. C., Anish, M., Jayaprabakar, J., Baigenzhenov, O., & Hosseini-Bandegharai, A. (2023). Agricultural waste biomass for sustainable bioenergy production: Feedstock, characterization and pre-treatment methodologies. *Chemosphere*, 331, 138680. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.138680>
- Lask, K., Booker, K., Han, T., Granderson, J., Yang, N., Ceballos, C., & Gadgil, A. (2015). Performance comparison of charcoal cookstoves for Haiti: Laboratory testing with Water Boiling and Controlled Cooking Tests. *Energy for Sustainable Development*, 26, 79–86. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2015.02.002>
- Lombardi, F., Colombo, L., & Colombo, E. (2017). Design and validation of a Cooking Stoves Thermal Performance Simulator (Cook-STePS) to simulate water heating procedures in selected conditions. *Energy*, 141, 1384–1392. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.11.045>

- Lozano-García, D. F., Santibañez-Aguilar, J. E., Lozano, F. J., & Flores-Tlacuahuac, A. (2020). GIS-based modeling of residual biomass availability for energy and production in Mexico. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *120*, 109610. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109610>
- MacCarty, N., & Bryden, K. M. (2015). A unified set of experimental data for cylindrical, natural draft, shielded, single pot, wood-fired cookstoves. *Energy for Sustainable Development*, *26*, 62–71. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2015.03.004>
- MacCarty, N., Still, D., & Ogle, D. (2010). Fuel use and emissions performance of fifty cooking stoves in the laboratory and related benchmarks of performance. *Energy for Sustainable Development*, *14*(3), 161–171. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2010.06.002>
- Magaña-Cerino, J. M., Tiessen, A., Soto-Luna, I. C., Peniche-Pavía, H. A., Vargas-Guerrero, B., Domínguez-Rosales, J. A., García-López, P. M., & Gurrola-Díaz, C. M. (2020). Consumption of nixtamal from a new variety of hybrid blue maize ameliorates liver oxidative stress and inflammation in a high-fat diet rat model. *Journal of Functional Foods*, *72*, 104075. <https://doi.org/10.1016/j.jff.2020.104075>
- Marchese, A., DeFoort, M., Gao, X., Tryner, J., Dryer, F. L., Haas, F., & Lorenz, N. (2018). *Achieving Tier 4 Emissions in Biomass Cookstoves* (DOE-CSU--6086-1, 1425656; p. DOE-CSU--6086-1, 1425656). <https://doi.org/10.2172/1425656>
- Masera, O. R., Bailis, R., Drigo, R., Ghilardi, A., & Ruiz-Mercado, I. (2015). Environmental Burden of Traditional Bioenergy Use. *Annual Review of Environment and Resources*, *40*(1), 121–150. <https://doi.org/10.1146/annurev-environ-102014-021318>
- Mawusi, S., Shrestha, P., Gao, T., Liu, M., Li, Z., Jiao, M., Li, Y., Yan, M., Li, C., Xue, C., & Liu, G. (2023a). A laboratory assessment of how biomass pellets could reduce indoor air pollution, mitigate climate change and benefit health compared to other solid fuels used in Ghana. *Energy for Sustainable Development*, *72*, 127–138. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2022.12.011>
- Mawusi, S., Shrestha, P., Gao, T., Liu, M., Li, Z., Jiao, M., Li, Y., Yan, M., Li, C., Xue, C., & Liu, G. (2023b). A laboratory assessment of how biomass pellets could reduce indoor air pollution, mitigate climate change and benefit health compared to other solid fuels used in Ghana. *Energy for Sustainable Development*, *72*, 127–138. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2022.12.011>
- Medina, P., Berrueta, V., Martínez, M., Ruiz, V., Edwards, R. D., & Masera, O. (2017). Comparative performance of five Mexican plancha-type cookstoves using water boiling tests. *Development Engineering*, *2*, 20–28. <https://doi.org/10.1016/j.deveng.2016.06.001>
- Medina, P., Berrueta, V., Martínez, M., Ruiz, V., Ruiz-Mercado, I., & Masera, O. R. (2017b). Closing the gap between lab and field cookstove tests: Benefits of multi-pot and sequencing cooking tasks through controlled burning cycles. *Energy for Sustainable Development*, *41*, 106–111. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2017.08.009>
- Mehetre, S. A., Panwar, N. L., Sharma, D., & Kumar, H. (2017). Improved biomass cookstoves for sustainable development: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *73*, 672–687. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.01.150>
- Mehta, Y., & Richards, C. (2020). Effect of air flow rate and secondary air jets on the operation of TLUD gasifier cookstove. *International Journal of Sustainable Energy*, *39*(3), 207–217. <https://doi.org/10.1080/14786451.2019.1671388>
- Memon, S. A., Jaiswal, M. S., Jain, Y., Acharya, V., & Upadhyay, D. S. (2020). A comprehensive review and a systematic approach to enhance the performance of improved cookstove (ICS). *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, *141*(6), 2253–2263. <https://doi.org/10.1007/s10973-020-09736-2>
- Micuta, W. (1985). *Modern Stoves For All*.

- Miranda, T., Arranz, J. I., Montero, I., Román, S., Rojas, C. V., & Nogales, S. (2012). Characterization and combustion of olive pomace and forest residue pellets. *Fuel Processing Technology*, *103*, 91–96. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2011.10.016>
- Moses, N. D., Pakravan, M. H., & MacCarty, N. A. (2019). Development of a practical evaluation for cookstove usability. *Energy for Sustainable Development*, *48*, 154–163. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2018.12.003>
- Mukunda, H. S., Dasappa, S., Paul, P. J., Rajan, N. K. S., & Yagnaraman, M. (2010). *Gasifier stoves—Science, technology and field outreach*. 19.
- Murillo, H. A., Díaz-Robles, L. A., Santander, R. E., & Cubillos, F. A. (2021). Conversion of residual oat husk and pine sawdust by co-hydrothermal carbonization towards biofuel production for pellet stoves. *Industrial Crops and Products*, *174*, 114219. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2021.114219>
- NMX-Q-001-NORMEX. (2018). *Cooking stoves-Evaluation of functionality, safety, durability, thermal efficiency and levels of emissions-Specifications, test methods and minimum requirements*.
- Obi, O. F., Ezeoha, S. L., & Okorie, I. C. (2016). Energetic performance of a top-lit updraft (TLUD) cookstove. *Renewable Energy*, *99*, 730–737. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.07.060>
- Osei, I., Kemausuor, F., Commeh, M. K., Akowuah, J. O., & Owusu-Takyi, L. (2020). Design, Fabrication and Evaluation of Non-Continuous Inverted Downdraft Gasifier Stove Utilizing Rice husk as feedstock. *Scientific African*, *8*, e00414. <https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2020.e00414>
- Pal, K., Jha, M. K., Gera, P., & Tyagi, S. K. (2016). Experimental study on the performance evaluation and emission reduction potential of different cookstove models using standard design parameters and testing protocols. *Biofuels*, *7*(4), 313–335. <https://doi.org/10.1080/17597269.2015.1135373>
- Palacios-Rojas, N., Vázquez, G., & Rodriguez, M. (2016). *Lime cooking process: Nixtamalization from Mexico to the world*.
- Panwar, N. L., & Rathore, N. S. (2008). Design and performance evaluation of a 5kW producer gas stove. *Biomass and Bioenergy*, *32*(12), 1349–1352. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2008.04.007>
- Patel, S., Leavey, A., He, S., Fang, J., O'Malley, K., & Biswas, P. (2016). Characterization of gaseous and particulate pollutants from gasification-based improved cookstoves. *Energy for Sustainable Development*, *32*, 130–139. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2016.02.005>
- Paul, A., Thomas, Reed, & Paul, Wever. (2007). *Micro-gasification_what it is and why it works.pdf*.
- Pérez, J. F., Melgar, A., & Benjumea, P. N. (2012). Effect of operating and design parameters on the gasification/combustion process of waste biomass in fixed bed downdraft reactors: An experimental study. *Fuel*, *96*, 487–496. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2012.01.064>
- Pine, K., Edwards, R., Masera, O., Schilman, A., Marrón-Mares, A., & Riojas-Rodríguez, H. (2011). Adoption and use of improved biomass stoves in Rural Mexico. *Energy for Sustainable Development*, *15*(2), 176–183. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2011.04.001>
- Pradhan, P., Mahajani, S. M., & Arora, A. (2018). Production and utilization of fuel pellets from biomass: A review. *Fuel Processing Technology*, *181*, 215–232. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2018.09.021>
- Pratiti, R., Vadala, D., Kalynych, Z., & Sud, P. (2020). Health effects of household air pollution related to biomass cook stoves in resource limited countries and its mitigation by improved cookstoves. *Environmental Research*, *186*, 109574. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.109574>
- Quiñones-Reveles, M. A., Ruiz-García, V. M., Ramos-Vargas, S., Vargas-Larreta, B., Masera-Cerutti, O., Ngangyo-Heya, M., & Carrillo-Parra, A. (2021). Assessment of Pellets from Three Forest Species: From Raw Material to End Use. *Forests*, *12*(4), 447. <https://doi.org/10.3390/f12040447>

- Raman, P., Ram, N. K., & Murali, J. (2014). Improved test method for evaluation of bio-mass cook-stoves. *Energy*, *71*, 479–495. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.04.101>
- Rapp, V. H., Caubel, J. J., Wilson, D. L., & Gadgil, A. J. (2016). Reducing Ultrafine Particle Emissions Using Air Injection in Wood- Burning Cookstoves. *Environ. Sci. Technol.*, *7*.
- Reed, T. B., Anselmo, E., & Kirchef, K. (2001). Testing & Modeling the Wood-Gas Turbo Stove. En A. V. Bridgwater (Ed.), *Progress in Thermochemical Biomass Conversion* (pp. 693–704). Blackwell Science Ltd. <https://doi.org/10.1002/9780470694954.ch55>
- Reed, T. B., & Larson, R. (1996). *A wood-gas stove for developing countries*. 2, 4.
- REN21. (2022). *Renewables 2022. Global status report*.
- Reyes, L. G. (2020). *Colapso del capitalismo global y transiciones hacia sociedades ecomunitarias*.
- Ríos-Badrán, I. M., Luzardo-Ocampo, I., García-Trejo, J. F., Santos-Cruz, J., & Gutiérrez-Antonio, C. (2020). Production and characterization of fuel pellets from rice husk and wheat straw. *Renewable Energy*, *145*, 500–507. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.06.048>
- Rivera, J., Barrientos, T., & Oropeza, C. (2021). *220118_Sintesis_sobre_politicas_de_salud.pdf*.
- Robinson, B. L., Clifford, M. J., Hewitt, J., & Jewitt, S. (2022). Cooking for communities, children and cows: Lessons learned from institutional cookstoves in Nepal. *Energy for Sustainable Development*, *66*, 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2021.10.012>
- Roth, C. (2011). *Micro Gasification: Cooking with gas from biomass*. 100.
- Roth, C. (2014). *Micro-gasification: Cooking with gas from dry biomass*. Internationale Zusammenarbeit GmbH (GIZ).
- Ruiz-García, Edwards, R. D., Ghasemian, M., Berrueta, V. M., Princevac, M., Vázquez, J. C., Johnson, M., & Masera, O. R. (2018). Fugitive Emissions and Health Implications of Plancha-Type Stoves. *Environmental Science & Technology*, *52*(18), 10848–10855. <https://doi.org/10.1021/acs.est.8b01704>
- Ruiz-García, Medina, P., Vázquez, J., Villanueva, D., Ramos, S., & Masera, O. (2021). Bioenergy Devices: Energy and Emissions Performance for the Residential and Industrial Sectors in Mexico. *BioEnergy Research*. <https://doi.org/10.1007/s12155-021-10362-5>
- Ruiz-Mercado, I., & Masera, O. (2015). Patterns of Stove Use in the Context of Fuel–Device Stacking: Rationale and Implications. *EcoHealth*, *12*(1), 42–56. <https://doi.org/10.1007/s10393-015-1009-4>
- Sabán, C., Orozco, Q., & Astier, M. (2016). *Análisis ambiental, social y económico del abasto de maíz y transformación en tortillas artesanales en la cuenca del lago Pátzcuaro, estado de Michoacán, México*.
- Sakthivadivel, D., & Iniyar, S. (2017). Combustion characteristics of biomass fuels in a fixed bed micro-gasifier cook stove. *Journal of Mechanical Science and Technology*, *31*(2), 995–1002. <https://doi.org/10.1007/s12206-017-0152-y>
- San Miguel, G., & Gutiérrez, F. (2015). *Tecnologías para el uso y transformación de biomasa energética* (Mundi-Prensa). Cimpress.
- Scharler, R., Archan, G., Rakos, C., von Berg, L., Lello, D., Hochenauer, C., & Anca-Couce, A. (2021). Emission minimization of a top-lit updraft gasifier cookstove based on experiments and detailed CFD analyses. *Energy Conversion and Management*, *247*, 114755. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.114755>
- Sedighi, M., & Salarian, H. (2017). A comprehensive review of technical aspects of biomass cookstoves. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *70*, 656–665. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.175>

- Serna-Saldivar, S. O. (2021). Understanding the functionality and manufacturing of nixtamalized maize products. *Journal of Cereal Science*, 99, 103205. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2021.103205>
- Serna-Saldivar, S. O., & Chuck-Hernandez, C. (2019). Food Uses of Lime-Cooked Corn With Emphasis in Tortillas and Snacks. En *Corn* (pp. 469–500). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811971-6.00017-6>
- Serrano-Medrano, M., Arias-Chalico, T., Ghilardi, A., & Masera, O. (2014). Spatial and temporal projection of fuelwood and charcoal consumption in Mexico. *Energy for Sustainable Development*, 19, 39–46. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2013.11.007>
- Serrano-Medrano, M., García-Bustamante, C., Berrueta, V. M., Martínez-Bravo, R., Ruiz-García, V. M., Ghilardi, A., & Masera, O. (2018). Promoting LPG, clean woodburning cookstoves or both? Climate change mitigation implications of integrated household energy transition scenarios in rural Mexico. *Environmental Research Letters*, 13(11), 115004. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aad5b8>
- Shan, M., Carter, E., Baumgartner, J., Deng, M., Clark, S., Schauer, J. J., Ezzati, M., Li, J., Fu, Y., & Yang, X. (2017). A user-centered, iterative engineering approach for advanced biomass cookstove design and development. *Environmental Research Letters*, 12(9), 095009. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aa804f>
- Shen, J., Zhu, S., Liu, X., Zhang, H., & Tan, J. (2010). The prediction of elemental composition of biomass based on proximate analysis. *Energy Conversion and Management*, 51(5), 983–987. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2009.11.039>
- Shupler, M., Menya, D., & Sang, E. (2022). Widening inequities in clean cooking fuel use and food security: Compounding effects of COVID-19 restrictions and VAT on LPG in a Kenyan informal urban settlement. *Environ. Res. Lett.*, 15.
- Siddhartha Bhatt, M. (1990). Towards the design of high efficiency woodstoves. *International Journal of Energy Research*, 14(6), 629–649. <https://doi.org/10.1002/er.4440140606>
- Sonarkar, P. R., & Chaurasia, A. S. (2019). Thermal performance of three improved biomass-fired cookstoves using fuel wood, wood pellets and coconut shell. *Environment, Development and Sustainability*, 21(3), 1429–1449. <https://doi.org/10.1007/s10668-018-0096-0>
- Sutar, K. B., Kohli, S., Ravi, M. R., & Ray, A. (2015). Biomass cookstoves: A review of technical aspects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 41, 1128–1166. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.09.003>
- Tauro, R., García, C. A., Skutsch, M., & Masera, O. (2018b). The potential for sustainable biomass pellets in Mexico: An analysis of energy potential, logistic costs and market demand. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82, 380–389. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.09.036>
- Tauro, R., Serrano-Medrano, M., & Masera, O. (2018a). Solid biofuels in Mexico: A sustainable alternative to satisfy the increasing demand for heat and power. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 20(7), 1527–1539. <https://doi.org/10.1007/s10098-018-1529-z>
- Troncoso, K., Castillo, A., Merino, L., Lazos, E., & Masera, O. R. (2011). Understanding an improved cookstove program in rural Mexico: An analysis from the implementers' perspective. *Energy Policy*, 39(12), 7600–7608. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2011.04.070>
- Troncoso, K., Segurado, P., Aguilar, M., & Soares da Silva, A. (2019). Adoption of LPG for cooking in two rural communities of Chiapas, Mexico. *Energy Policy*, 133, 110925. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2019.110925>
- Tryner, J., Tillotson, J. W., Baumgardner, M. E., Mohr, J. T., DeFoort, M. W., & Marchese, A. J. (2016). The Effects of Air Flow Rates, Secondary Air Inlet Geometry, Fuel Type, and Operating Mode on the Performance of Gasifier Cookstoves. *Environmental Science & Technology*, 50(17), 9754–9763. <https://doi.org/10.1021/acs.est.6b00440>

- Tryner, J., Willson, B. D., & Marchese, A. J. (2014). The effects of fuel type and stove design on emissions and efficiency of natural-draft semi-gasifier biomass cookstoves. *Energy for Sustainable Development*, 23, 99–109. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2014.07.009>
- Van Loo, S., & Koppejan, J. (Eds.). (2008). *The handbook of biomass combustion and co-firing*. Earthscan.
- Varunkumar, S., Rajan, N. K. S., & Mukunda, H. S. (2012). Experimental and computational studies on a gasifier based stove. *Energy Conversion and Management*, 53(1), 135–141. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2011.08.022>
- Vassilev, S. V., Baxter, D., Andersen, L. K., & Vassileva, C. G. (2010). An overview of the chemical composition of biomass. *Fuel*, 89(5), 913–933. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2009.10.022>
- Verhaart, P. (1982). On designing woodstoves. *Proceedings of the Indian Academy of Sciences Section C: Engineering Sciences*, 5(4), 287–326. <https://doi.org/10.1007/BF02904583>
- Verma, S., Dregulo, A. M., Kumar, V., Bhargava, P. C., Khan, N., Singh, A., Sun, X., Sindhu, R., Binod, P., Zhang, Z., Pandey, A., & Awasthi, M. K. (2023). Reaction engineering during biomass gasification and conversion to energy. *Energy*, 266, 126458. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.126458>
- Wang, J., Lou, H. H., Yang, F., & Cheng, F. (2016). Development and performance evaluation of a clean-burning stove. *Journal of Cleaner Production*, 134, 447–455. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.01.068>
- WEC. (2016). *World-Energy-Resources-Full-report-2016.10.03.pdf*. World Energy Council.
- Wijianto, Sarjito, Subroto, & Himawanto, D. A. (2018). The effect of variation number of holes on burner cap of TLUD gasification stove. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 403, 012097. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/403/1/012097>
- Yunusa, S. U., Mensah, E., Preko, K., Narra, S., Saleh, A., Sanfo, S., Isiaka, M., Dalha, I. B., & Abdulsalam, M. (2023). Biomass cookstoves: A review of technical aspects and recent advances. *Energy Nexus*, 11, 100225. <https://doi.org/10.1016/j.nexus.2023.100225>
- Zhang, Y., Ghaly, A. E., & Li, B. (2012). Availability and physical properties of residues from major agricultural crops for energy conversion through thermochemical processes. *American Journal of Agricultural and Biological Sciences*, 11.
- Zhou, Y., Zhang, Z., Zhang, Y., Wang, Y., Yu, Y., Ji, F., Ahmad, R., & Dong, R. (2016). A comprehensive review on densified solid biofuel industry in China. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 54, 1412–1428. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.09.096>

7. ANEXOS

ANEXO A. Análisis dimensional de las ecuaciones para determinar los parámetros geométricos de diseño de los prototipos de MG-TLUD.

Objetivo: Analizar las fórmulas y las variables que se utilizaron para determinar los parámetros geométricos de diseño del P3-Chupiri y que integran la metodología de diseño.

A continuación, se describe el análisis dimensional de las fórmulas matemáticas para calcular los parámetros geométricos principales: diámetro y altura del reactor:

Diámetro del reactor: determina la velocidad de combustión del combustible, la ecuación para calcularlo está basada en el principio de la ley de conservación de la masa. En un sistema cerrado, esta ley establece que la masa total m no cambia en el tiempo, es decir, $\frac{dm}{dt} = 0$. En un sistema abierto la tasa de cambio en la masa se debe a la diferencia neta del flujo de masa que entra y sale del sistema.

El flujo másico macroscópico a través de una sección transversal finita A resulta de la integración de todos los elementos de la superficie.

$$\dot{m} = \int \rho \mathcal{V}_{\perp} dA$$

Ecuación (1)

Para una sección transversal finita se esperan variaciones espaciales de la densidad ρ y la velocidad \mathcal{V}_{\perp} sobre la sección transversal que debería tenerse en cuenta en la integral. Sin embargo, para muchas aplicaciones de ingeniería no es necesario resolver el perfil de velocidad. Cuando se insertan los valores promedio en la ecuación (1), se pueden extraer de la integral, quedando de la siguiente manera:

$$\dot{m} = \rho \mathcal{V} A$$

Ecuación (2)

Donde \dot{m} representa el flujo másico, mientras que ρ , \mathcal{V} (*densidad, velocidad local*) son los promedios sobre la sección transversal A . La ecuación (2) se relaciona con la ecuación que se emplea para determinar el diámetro del reactor D , sustituyendo al área de la superficie de control por el área de un cilindro a partir de la geometría que presentan los MG-TLUD, el flujo másico es igual a:

$$\dot{m} = \rho \mathcal{V} \frac{\pi D^2}{4}$$

Ecuación (3)

Despejando el diámetro de la ecuación (3), tenemos:

$$D = \sqrt{\frac{4\dot{m}}{\pi\rho\mathcal{V}}}$$

$$D = \sqrt{1.27 \frac{\dot{m}}{\rho\mathcal{V}}}$$

Podemos observar en la ecuación (4) que \dot{m} representa la cantidad de combustible consumido por unidad de tiempo (FCR) y $\rho\mathcal{V}$ la tasa de gasificación específica (SGR), las cuales dependen de las tareas a realizar en la estufa y la eficiencia esperada:

$$D = \sqrt{\frac{1.27 * FCR}{SGR}}$$

Ecuación (4)

Realizando el análisis dimensional de la ecuación (4) tenemos que:

$$\sqrt{\frac{\dot{m}}{\rho\mathcal{V}}} = \sqrt{\frac{FCR}{SGR}} = \sqrt{\frac{kg/h}{kg/m^3 * m/h}} = \sqrt{\frac{kg/h}{kg/(m^2 * h)}} = \sqrt{m^2} = m$$

Altura del reactor: Esta es la distancia total desde el extremo superior e inferior del reactor (donde se ubica la parrilla) y determina cuanto tiempo el microgasificador será operado con una carga de combustible. Se determina a través de la ecuación (5):

$$H = \frac{SGR * T}{\rho}$$

Ecuación (5)

Donde SGR es la tasa específica de gasificación ($kg/(m^2 * h)$), T es el tiempo transcurrido para consumir el combustible (*minutos*) y ρ es la densidad del combustible (kg/m^3).

La altura (H) y el área (A) representan el volumen del reactor (Vr) en la ecuación (6).

$$T = \frac{\rho * Vr}{FCR}$$

$$T = \frac{\rho * HA}{FCR}$$

Ecuación (6)

Por lo tanto, se despeja la altura H de la ecuación (6):

$$H = \frac{FCR * T}{\rho A}$$

Ecuación (7)

Sustituyendo en el Área de la ecuación (7) el Diámetro resuelto en la ecuación (4):

$$H = \frac{FCR * T}{\rho \left(\frac{\pi D^2}{4} \right)} = \frac{FCR * T}{\rho \left(\frac{\pi \left(\sqrt{\frac{1.27 * FCR}{SGR}} \right)^2}{4} \right)}$$

$$H = \frac{FCR * T}{\rho \left(\frac{\pi \left(\frac{1.27 * FCR}{SGR} \right)}{4} \right)} = \frac{FCR * T}{\rho \left(0.79 \left(\frac{1.27 * FCR}{SGR} \right) \right)} = \frac{FCR * T}{\rho \left(\frac{1 * FCR}{SGR} \right)} = \left(\frac{SGR * T}{\rho} \right)$$

$$H = \left(\frac{SGR * T}{\rho} \right)$$

Ecuación (8)

Realizando el análisis dimensional de la ecuación (8):

$$H = \left(\frac{SGR * T}{\rho} \right) = \frac{\left(\frac{kg}{m^2 * h} \right) h}{kg/m^3} = \frac{kg/m^2}{kg/m^3} = m$$

ANEXO B. Procedimiento para evaluar la usabilidad/adopción preliminar al realizar tareas cocinado que requieren cantidades intensivas de energía con la Estufa Patsari Nixtamalera (EPN) adaptando los prototipos P1-Misiri y P3-Chupiri con dos usuarias que viven en comunidades rurales de Michoacán.

Objetivo: Determinar la viabilidad inicial en el uso del MG-TLUD P3-Chupiri a través de métricas cualitativas que incluyan colectivamente: encuestas de tipo Likert, entrevistas, mediciones en la estufa/combustible y la observación directa del proceso de cocción del Nixtamal por la usuaria.

A) Evaluación del uso de la EPN con el P3-Chupiri con la usuaria doña Helodia de la comunidad de Tzurumútar, Michoacán. La usuaria doña Cristina utilizó la EPN con la cámara de combustión tipo Rocket (CCR) antes de la sustitución con el MG-TLUD P3-Chupiri.

Entrevista

La entrevista sirvió de base para realizar el diagnóstico del uso de la EPN/CCR.

Tarea de cocinado	Frecuencia de uso por semana y mes	Tiempo para realizar cada tarea	Cantidad de alimento preparado
Nixtamal	7 veces a la semana	45 min	8 kg de maíz
Calentar agua para bañarse	7 veces a la semana	15 min y vuelve a recargar	Llena la olla
Pozole	1 vez a la semana		

1. ¿Como realiza el proceso de elaboración del nixtamal en la EPN/CCR?

El primer paso consiste en calentar el agua en de la olla hasta que empiece a sacar vapor (65°C), procede a vaciar primero la cal (una cuchara grande) y después le agrega el maíz. Finalmente, se deja reposar a fuego lento y se quita la olla.

2. ¿Alguna vez ha tenido alguna percepción de falta de seguridad o complicación al utilizar la EPN/CCR?

Todo bien, hasta el momento no ha sufrido alguna quemadura o accidente.

3. ¿Cuáles son las modificaciones que considera que pueden mejorar el funcionamiento y el uso de la EN/MG-TLUD?

Que la ceniza se cae y no se dispone adecuadamente.

4. ¿Cuál es el mantenimiento (limpiar de hollín la olla y área de cocinado, disponer correctamente las cenizas, etc.) que usted realiza o que considera que puede contribuir a un mejor funcionamiento y vida útil de la EN/CCR?

La chimenea la limpia para quitar el hollín

La parrilla se la quitó por que presentaba un significativo desgaste.

5. Cuál es la principal razón por la cual utiliza la EPN/CCR, por ejemplo: ¿facilidad de uso, ahorro de combustible, reducción de emisiones de humo?

Ahorro de leña y no hay presencia de humo.

Tiempo de cocción es menor.

Encuestas tipo Likert

1. Considera que la EPN/P3-Chupiri es adecuada para realizar la tarea de cocción del Nixtamal.

Totalmente en desacuerdo En desacuerdo Ni de acuerdo, ni en desacuerdo De acuerdo Totalmente de acuerdo

2. El consumo de combustible es menor en la EPN/P3-Chupiri, respecto a otras estufas.

Totalmente en desacuerdo En desacuerdo Ni de acuerdo, ni en desacuerdo De acuerdo Totalmente de acuerdo

3. La percepción/generación de humo en la cocina disminuye al utilizar la EPN/P3-Chupiri.

Totalmente en desacuerdo En desacuerdo Ni de acuerdo, ni en desacuerdo De acuerdo Totalmente de acuerdo

4. La consistencia del nixtamal cocinado es el adecuado.

Totalmente en desacuerdo En desacuerdo Ni de acuerdo, ni en desacuerdo De acuerdo Totalmente de acuerdo

5. Es más fácil y rápido realizar la cocción del Nixtamal en EPN/P3-Chupiri respecto al uso de otras estufas.

Totalmente en desacuerdo En desacuerdo Ni de acuerdo, ni en desacuerdo De acuerdo Totalmente de acuerdo

6. La EPN/P3-Chupiri tiene una mejor capacidad para cocinar una mayor cantidad de maíz respecto a otras estufas.

Totalmente en desacuerdo En desacuerdo Ni de acuerdo, ni en desacuerdo De acuerdo Totalmente de acuerdo

7. El uso de los pellets es mejor respecto al uso de otros tipos de combustibles como la leña.

Totalmente en desacuerdo En desacuerdo Ni de acuerdo, ni en desacuerdo De acuerdo Totalmente de acuerdo

8. Los miembros de su familia consideran que es mejor utilizar la EPN/P3-Chupiri que otras estufas que ha utilizado para hacer el nixtamal.

Totalmente en desacuerdo En desacuerdo Ni de acuerdo, ni en desacuerdo De acuerdo Totalmente de acuerdo

9. Considera que el diseño y funcionamiento de la estufa es el adecuado para satisfacer sus necesidades en la cocción del nixtamal.

Totalmente en desacuerdo En desacuerdo Ni de acuerdo, ni en desacuerdo De acuerdo Totalmente de acuerdo

10. Considera que utilizar la EPN/P3-Chupiri le permite pasar más tiempo con su familia o realizar otras actividades en el transcurso del día.

Totalmente en desacuerdo En desacuerdo Ni de acuerdo, ni en desacuerdo De acuerdo Totalmente de acuerdo

11. Tiene una experiencia satisfactoria al utilizar la EPN/P3-Chupiri.

Totalmente en desacuerdo En desacuerdo Ni de acuerdo, ni en desacuerdo De acuerdo Totalmente de acuerdo

12. La apariencia de la EPN/P3-Chupiri la ha motivado a utilizarla de manera más frecuente.

Totalmente en desacuerdo En desacuerdo Ni de acuerdo, ni en desacuerdo De acuerdo Totalmente de acuerdo

13. Considera que el cambio en el tipo de combustible no ha cambiado el sabor del Nixtamal.

Totalmente en desacuerdo En desacuerdo Ni de acuerdo, ni en desacuerdo De acuerdo Totalmente de acuerdo

14. Comparado a la cocción con estufas tradicionales, considera que utilizar la EPN/P3-Chupiri es más segura (que cierre bien la puerta y asegurar la estabilidad del soporte de la estufa).

Totalmente en desacuerdo En desacuerdo Ni de acuerdo, ni en desacuerdo De acuerdo Totalmente de acuerdo

15. Continuaría utilizando la EPN/P3-Chupiri para dejar de utilizar su estufa tradicional anterior.

Totalmente en desacuerdo

 En desacuerdo

 Ni de acuerdo, ni en desacuerdo

 De acuerdo

 Totalmente de acuerdo

16. Necesita la ayuda de alguien más para poder utilizar la EPN/P3-Chupiri (solo para bajar la olla).

Totalmente en desacuerdo

 En desacuerdo

 Ni de acuerdo, ni en desacuerdo

 De acuerdo

 Totalmente de acuerdo

17. Usted es la única persona que utiliza la EPN/P3-Chupiri.

Totalmente en desacuerdo

 En desacuerdo

 Ni de acuerdo, ni en desacuerdo

 De acuerdo

 Totalmente de acuerdo

18. Considera importante la percepción que tienen sus vecinos/conocidos al utiliza la EPN/P3-Chupiri para la cocción del nixtamal.

Totalmente en desacuerdo

 En desacuerdo

 Ni de acuerdo, ni en desacuerdo

 De acuerdo

 Totalmente de acuerdo

19. Estaría dispuesta a seguir utilizando la EPN/P3-Chupiri en los próximos meses y reemplazar su estufa que utilizaba antes para la cocción del nixtamal.

Totalmente en desacuerdo

 En desacuerdo

 Ni de acuerdo, ni en desacuerdo

 De acuerdo

 Totalmente de acuerdo

B) Evaluación del uso de la EPN con el P3-Chupiri con la usuaria doña Cristina de la comunidad de San Francisco Uricho, Michoacán. La usuaria doña Cristina utilizó la EPN con la adaptación del MG-TLUD P1-Misiri antes de la sustitución con el MG-TLUD P3-Chupiri.

Entrevista

La entrevista sirvió de base para realizar el diagnóstico del uso del MG-TLUD P1-Misiri.

1. ¿Cuáles son las principales tareas de cocción que realiza en la EPN con el P1-Chupiri?

Tarea de cocinado	Frecuencia de uso por mes	Tiempo para realizar cada tarea	Cantidad de alimento preparado
Nixtamal	4 veces por mes	40 min. Aprox.	10 kg
Calentar agua para bañarse	N/A	N/A	N/A
Elotes	N/A	N/A	N/A
Frijoles	2 veces por mes	120 min. Aprox.	1 kg

2. ¿Alguna vez ha tenido alguna percepción de falta de seguridad o complicación al utilizar la EPN respecto a la manipulación del P1-Chupiri y la olla de cocción?

Las percepciones de seguridad tienen que ver con asegurarse que la puerta de la estructura de aislamiento cierre bien, mejorar la estabilidad del soporte de la estructura donde se coloca la olla, ya que tiene que apoyarse de su rodilla para cerrar bien la compuerta y puede quemarse.

Al llenar el P1-Chupiri con pellets antes de colocarlo en la estructura de la estufa nixtamalera le costó más trabajo cargarlo y adaptarlo, pero nunca se le ha caído. Sin embargo, la olla se colocó vacía encima del MG-TLUD encendido, para después vaciar el agua, maíz y cal, este manejo es más fácil pues ya no tiene que cargar la olla desde el piso.

3. ¿Cuáles son las modificaciones que considera que pueden mejorar el funcionamiento y el uso de la estufa nixtamalera con el P1-Chupiri?

Externo su deseo que pueda tener una parrilla dentro de la estufa nixtamalera que le permita calentar o recalentar otro tipo de alimentos.

Considera importante que cuando exista un desgaste o deje de funcionar alguna pieza que forma parte del P1-Chupiri puede conseguir una refacción o reemplazo para continuar utilizándola.

No considera relevante el uso de un sistema de alimentación continua de combustible respecto a seguir usando la carga por cartuchos de combustible, debido a que el combustible que alimenta le ha servido para realizar adecuadamente la tarea de cocción del nixtamal.

4. ¿Cuál es el mantenimiento (limpiar de hollín la olla y área de cocinado, disponer correctamente las cenizas, etc.) que usted realiza o que considera que puede contribuir a un mejor funcionamiento y vida útil de la estufa?

Procura periódicamente limpiar la estufa, la olla y la chimenea del hollín que se va acumulando. La ceniza que queda después de la cocción del nixtamal la quita hasta cuando vuelve a utilizar la estufa, ya que menciona que el pellet quemado ya no sirve como combustible para volverlo a utilizar.

5. ¿Cuál es la principal razón por la cual utiliza la estufa Patsari nixtamalera con el P1-Chupiri, por ejemplo, facilidad de uso, ahorro de combustible, reducción de humo?

Fácil de encender, pero si no tiene alcohol (resulta en un precio elevado), no puede encender correctamente los pellets.

Fácil uso y manipulación durante todo el proceso ya que puede dejar funcionando la estufa Patsari nixtamalera sin atenderla como lo hacía con el fogón, solo la atiende para menear el nixtamal dentro de la olla. Los tiempos de cocinado se reducen considerablemente al utilizar el P1-Chupiri respecto a otras estufas.

Se percibe un ahorro de combustible. El uso de pellets es menor (1 kg) respecto al uso de leña (1.5- 2.0 kg) y GLP (3.75 kg)

El humo es casi imperceptible a través del olfato y visualmente en el área de cocinado. Sin embargo, se percibe que si sale humo por la chimenea. La cantidad de carbón y ceniza que se produce es menor comparada con la que se produce cuando utilizaba el fogón abierto.

En cuanto a la elaboración y consistencia del nixtamal, considera importante no dejarlo hervir, debido a que cuando muelen el maíz, la masa no tiene las características requeridas para hacer las tortillas.

El tiempo requerido para la cocción del nixtamal es menor al utilizar la estufa Patsari nixtamalera, en promedio tiene una duración de 35-40 minutos, desde el encendido hasta que apaga el ventilador, lo deja reposando toda la noche sobre la estufa y al otro día muele el maíz para obtener la masa que utiliza para hacer las tortillas. Además, la regulación del fuego es más práctica y confortable.

6. ¿Cuál prototipo de MG-TLUD considera que es el más adecuado y cumple con las necesidades que requiere para realizar la cocción del nixtamal?

La principal ventaja que percibió la usuaria del P3-Chupiri respecto al P1-Misiri, es que tiene una mayor capacidad para poder preparar una mayor cantidad de nixtamal, y no tiene que alimentar con más pellets el dispositivo en dado caso que la cocción del nixtamal no esté finalizada.

Encuestas tipo Likert

1. Considera que la EPN/P3-Chupiri es adecuada para realizar la tarea de cocción del Nixtamal.

Totalmente en desacuerdo En desacuerdo Ni de acuerdo, ni en desacuerdo De acuerdo Totalmente de acuerdo

2. El consumo de combustible es menor en la EPN/P3-Chupiri, respecto a otras estufas.

Totalmente en desacuerdo En desacuerdo Ni de acuerdo, ni en desacuerdo De acuerdo Totalmente de acuerdo

3. La percepción/generación de humo en la cocina disminuye al utilizar la EPN/P3-Chupiri.

Totalmente en desacuerdo En desacuerdo Ni de acuerdo, ni en desacuerdo De acuerdo Totalmente de acuerdo

4. La consistencia del nixtamal cocinado es el adecuado.

Totalmente en desacuerdo En desacuerdo Ni de acuerdo, ni en desacuerdo De acuerdo Totalmente de acuerdo

5. Es más fácil y rápido realizar la cocción del Nixtamal en EPN/P3-Chupiri respecto al uso de otras estufas.

Totalmente en desacuerdo	En desacuerdo	Ni de acuerdo, ni en desacuerdo	De acuerdo	Totalmente de acuerdo
<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>

6. La EPN/P3-Chupiri tiene una mejor capacidad para cocinar una mayor cantidad de maíz respecto a otras estufas.

Totalmente en desacuerdo	En desacuerdo	Ni de acuerdo, ni en desacuerdo	De acuerdo	Totalmente de acuerdo
<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>

7. El uso de los pellets es mejor respecto al uso de otros tipos de combustibles como la leña.

Totalmente en desacuerdo	En desacuerdo	Ni de acuerdo, ni en desacuerdo	De acuerdo	Totalmente de acuerdo
<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>

8. Los miembros de su familia consideran que es mejor utilizar la EPN/P3-Chupiri que otras estufas que ha utilizado para hacer el nixtamal.

Totalmente en desacuerdo	En desacuerdo	Ni de acuerdo, ni en desacuerdo	De acuerdo	Totalmente de acuerdo
<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>

9. Considera que el diseño y funcionamiento de la estufa es el adecuado para satisfacer sus necesidades en la cocción del nixtamal.

Totalmente en desacuerdo	En desacuerdo	Ni de acuerdo, ni en desacuerdo	De acuerdo	Totalmente de acuerdo
<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>

10. Considera que utilizar la EPN/P3-Chupiri le permite pasar más tiempo con su familia o realizar otras actividades en el transcurso del día.

Totalmente en desacuerdo	En desacuerdo	Ni de acuerdo, ni en desacuerdo	De acuerdo	Totalmente de acuerdo
<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>

11. Tiene una experiencia satisfactoria al utilizar la EPN/P3-Chupiri.

Totalmente en desacuerdo	En desacuerdo	Ni de acuerdo, ni en desacuerdo	De acuerdo	Totalmente de acuerdo
<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>

12. La apariencia de la EPN/P3-Chupiri la ha motivado a utilizarla de manera más frecuente.

Totalmente en desacuerdo	En desacuerdo	Ni de acuerdo, ni en desacuerdo	De acuerdo	Totalmente de acuerdo
<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>

13. Considera que el cambio en el tipo de combustible no ha cambiado el sabor del Nixtamal.

Totalmente en desacuerdo	En desacuerdo	Ni de acuerdo, ni en desacuerdo	De acuerdo	Totalmente de acuerdo
<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>

14. Comparado a la cocción con estufas tradicionales, considera que utilizar la EPN/P3-Chupiri es más segura (que cierre bien la puerta y asegurar la estabilidad del soporte de la estufa).

Totalmente en desacuerdo	En desacuerdo	Ni de acuerdo, ni en desacuerdo	De acuerdo	Totalmente de acuerdo
<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>

15. Continuaría utilizando la EPN/P3-Chupiri para dejar de utilizar su estufa tradicional anterior.

Totalmente en desacuerdo	En desacuerdo	Ni de acuerdo, ni en desacuerdo	De acuerdo	Totalmente de acuerdo
<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>

16. Necesita la ayuda de alguien más para poder utilizar la EPN/P3-Chupiri (solo para bajar la olla).

Totalmente en desacuerdo	En desacuerdo	Ni de acuerdo, ni en desacuerdo	De acuerdo	Totalmente de acuerdo
<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>

17. Usted es la única persona que utiliza la EPN/P3-Chupiri.

Totalmente en desacuerdo	En desacuerdo	Ni de acuerdo, ni en desacuerdo	De acuerdo	Totalmente de acuerdo
<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>

18. Considera importante la percepción que tienen sus vecinos/conocidos al utiliza la EPN/P3-Chupiri para la cocción del nixtamal.

Totalmente en desacuerdo	En desacuerdo	Ni de acuerdo, ni en desacuerdo	De acuerdo	Totalmente de acuerdo
<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>

19. Estaría dispuesta a seguir utilizando la EPN/P3-Chupiri en los próximos meses y reemplazar su estufa que utilizaba antes para la cocción del nixtamal.

Totalmente en desacuerdo	En desacuerdo	Ni de acuerdo, ni en desacuerdo	De acuerdo	Totalmente de acuerdo
<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>