

VALIDACIÓN EXPERIMENTAL DE UNA METODOLOGÍA DE MEDICIÓN DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA Y DE LOS ÍNDICES DE EMISIÓN PARA ESTUFAS DE BIOMASA

Proyecto: Estrategias de mejoramiento del rendimiento energético de estufas de biomasa para el uso doméstico en comunidades vulnerables del departamento de Antioquia

Elaborado por:

Julián Alejandro Cano Robayo

Tutor:

Andrés David Morales Rojas

Institución Universitaria Pascual Bravo

Medellín, Colombia

2023

Tabla de Contenidos

Resumen	1
Introducción	2
Contextualización.....	4
Estado del arte.....	6
Metodología	12
Descripción del montaje experimental.....	13
Paso a paso para la realización de las pruebas	17
Cálculos	18
Resultados.....	28
Selección de las biomásas.....	28
Diseño y modificación de la estufa	32
Medición de rampa de calentamiento en estufa a gas.....	36
Pruebas de arranque en frío.....	36
Variables medidas	37
Pruebas y Análisis Termográficos Realizados.....	38
Estufa Larga Sin Aislamiento (E.L.S) – Madera de pino	38
Análisis Termográfico.....	38
Estufa Corta Sin Aislamiento (E.C.S) – Madera de Pino.....	39
Análisis Termográfico.....	40
Estufa Corta Aislada (E.C.A) – Madera de Pino	40
Análisis Termográfico.....	41
Estufa Corta Aislada con Cubierta (E.C.A.C) – Madera de Pino	42
Análisis Termográfico.....	42
Cálculos	43
Conclusiones	47
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	48

Tabla de Figuras

Figura 1. Porcentaje de hogares por departamento que utilizaron leña y otros combustibles de uso ineficiente y altamente contaminantes para cocinar en 2021. (Fuente: www1.upme.gov.co).....	3
Figura 2. Temperatura durante las tres fases de la prueba de ebullición del agua.	13
Figura 3. Diagrama de conexión experimental.	16
Figura 4. Montaje experimental I.U. Pascual Bravo.	17
Figura 5. Poder calorífico efectivo en función del porcentaje de humedad de la biomasa (base húmeda).....	23
Figura 6. Estufa tipo cohete.....	33
Figura 7. Estufa tipo cohete con modificaciones iniciales	34
Figura 8. Imágenes reales de las modificaciones realizadas.	35
Figura 9. Prueba experimental ebullición de agua en parrilla de gas natural residencial. ...	36

Tabla de Tablas

Tabla 1. Elementos o equipos utilizados en las pruebas realizadas.....	14
Tabla 2. Glosario de variables	20
Tabla 3. Área de plantaciones forestales comerciales por departamento a diciembre 2022.	29
Tabla 4. Distribución de especies por Zona de aptitud.....	30
Tabla 5. Propiedades termoquímicas de las cinco especies con potencial energético en Colombia.....	31
Tabla 6. Volúmenes de comercialización mensual de maderas en el Valle de Aburrá.....	32
Tabla 7. Caracterización de las maderas usadas.	32
Tabla 8. Resumen de pruebas con variables principales medidas.....	44
Tabla 9. Resultados de la WBT 4.2.3, 2014 (Arranque en frío), obtenidos en pruebas (P) y réplicas (R)	44
Tabla 10. Resultados registrados de emisiones de gases.	46

Tabla de Ilustraciones

Ilustración 1. Paso a paso para la ejecución de la fase de arranque en frío.	17
Ilustración 2. Soporte de sonda o termocupla. Adaptada de [WBT 4.2.3, 2014]	18
Ilustración 3. Propuesta estufa de biomasa con modificaciones señaladas.....	47

Tabla de Gráficas

Gráfica 1. Prueba en estufa larga sin aislamiento	38
Gráfica 2. Prueba en estufa corta sin aislamiento.	39
Gráfica 3. Prueba en estufa corta aislada.....	40
Gráfica 4. Prueba en estufa larga aislada con cubierta.	42
Gráfica 5. Comparativo de pruebas realizadas.....	43
Gráfica 6. Desempeño de la eficiencia térmica obtenido en pruebas y réplicas.....	46

Tabla de Fotografías

Fotografía 1. Termografía de la prueba en estufa larga sin aislamiento.....	38
Fotografía 2. Termografía de la prueba en estufa corta sin aislamiento.....	40
Fotografía 3. Termografía de la prueba en estufa corta aislada.	41
Fotografía 4. Termografía de la prueba en estufa larga aislada con cubierta.....	42

Resumen

El presente proyecto tuvo como objetivo analizar el rendimiento energético de una estufa de biomasa tipo cohete, modelo comúnmente utilizado en el departamento de Antioquia. Se realizaron pruebas utilizando madera de pino y madera de eucalipto, las cuales son especies forestales muy abundantes en esta región del país. A partir de los resultados obtenidos en estas pruebas, se plantearon diferentes estrategias para mejorar el rendimiento energético de la estufa.

Para evaluar el desempeño energético de la estufa se propuso una adaptación de la prueba Water Boiling Test 4.2.3 (WBT). Esta modificación consideró solamente el calentamiento del agua hasta alcanzar la temperatura de ebullición, lo que se conoce como la prueba de arranque en frío, se ignoraron las pruebas de arranque en caliente y de sostenimiento dado que este tipo de estufas monopuerto son normalmente usadas para una sola cocción, también se modificó la forma en la que se midieron algunas variables de interés, principalmente el material particulado. Además de esto, se llevaron a cabo mediciones de la composición de los gases de escape, lo que permitió determinar la eficiencia de la combustión y calcular los niveles de producción de gases contaminantes y de efecto invernadero, como el monóxido de carbono (CO) y el dióxido de carbono (CO₂). También se tomaron mediciones de los perfiles de temperatura en las paredes de la estufa con el fin de identificar las posibles fuentes de pérdida de energía.

Con base en los datos y mediciones recopilados durante la adaptación de la prueba WBT 4.2.3, 2014, se realizaron cálculos que validaron experimentalmente la metodología empleada para medir la eficiencia térmica de la estufa tipo cohete. A través de diversas pruebas y réplicas, se determinó que la mejor eficiencia térmica se alcanzó en la estufa modificada (estufa corta, aislada y con cubierta – E.C.A.C) con ambas maderas evaluadas, pino y eucalipto. En cuanto a las emisiones contaminantes, las pruebas con madera de pino y eucalipto revelaron fluctuaciones en las emisiones de CO (ppm) debido a la sensibilidad del equipo y los momentos específicos de toma de medidas. No obstante, las modificaciones de aislamiento y cubierta lograron dirigir los gases hacia la campana de extracción, reduciendo la acumulación en el entorno del laboratorio.

Introducción

Uno de los tipos más ampliamente aprovechados de energía renovable es la biomasa, su uso con fines energéticos se atribuye principalmente al aumento de la población en naciones en desarrollo y al crecimiento del consumo en países industrializados. El 90% del uso de biomasa como fuente de energía se da en países en desarrollo, siendo la principal fuente para actividades domésticas y para satisfacer las necesidades energéticas de diversas industrias tradicionales y agrícolas. En contraste, el 10% restante del consumo de biomasa ocurre en el mundo industrializado [1]. La biomasa, gracias a su abundancia y disponibilidad, se presenta como una fuente prometedora de energía, respaldada además por una diversidad de tecnologías diseñadas para su aprovechamiento [2]. En Colombia, en el año 2021, el 3% de la población, equivalente a 500 000 usuarios, carecía de acceso a electricidad, y un millón de familias dependían de la madera para cubrir sus necesidades de calefacción y cocción [3].

El Plan Nacional de Sustitución de Leña – UPME 2022 [4] señala que en un rango del 0 al 20% de los hogares en las zonas rurales de Antioquia, se identifica una carencia de sistemas de cocción eficientes y respetuosos con el medio ambiente desde un punto de vista técnico. (Ver **Figura 1**). Estas áreas, generalmente distantes de los centros urbanos y habitadas mayormente por familias de bajos recursos económicos, enfrentan dificultades para acceder a la electricidad y llevar a cabo actividades diarias. En las zonas urbanas, es común el uso de estufas alimentadas por gas natural y GLP. Aunque en las zonas rurales también se utilizan estos gasodomésticos, su disponibilidad se ve limitada. Además, en las áreas rurales, es frecuente el uso de estufas de leña o carbón, según UPME 2022c, lo que conlleva problemas asociados con la contaminación del aire en los hogares. Los habitantes de estas viviendas sufren de enfermedades respiratorias debido a los factores contribuyentes de emisiones concentradas de material particulado y contaminantes de vida corta [5].

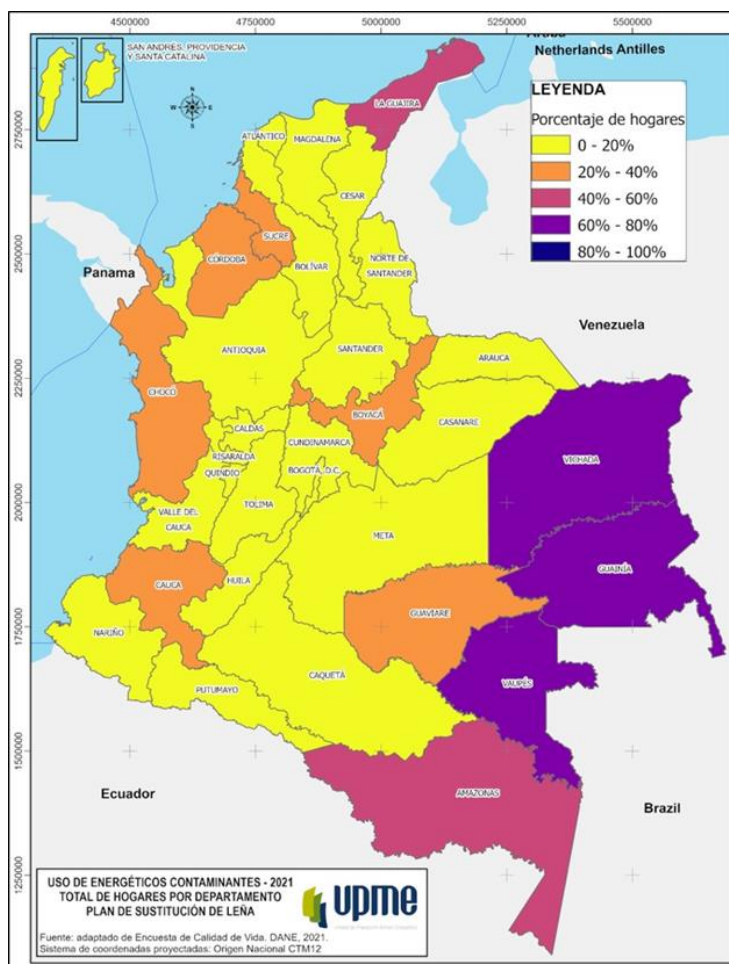


Figura 1. Porcentaje de hogares por departamento que utilizaron leña y otros combustibles de uso ineficiente y altamente contaminantes para cocinar en 2021. (Fuente: www1.upme.gov.co)

En el mercado nacional hay numerosos modelos de estufas, la mayoría basados en la experiencia empírica más que en el desarrollo técnico. En Colombia, se está trabajando en la implementación de estufas eficientes siguiendo los lineamientos del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. Antioquia lidera con un 75%, contando con 28 238 estufas instaladas a través de 14 iniciativas identificadas. El prototipo más difundido es el Huellas, derivado del modelo ICA plano 1791. Sin embargo, un estudio revela que la eficiencia de estas estufas varía según la altitud, indicando la necesidad de prototipos adaptados geográficamente para optimizar el proceso de cocción [6]. El Programa Nacional de Estufas Mejoradas para Cocción con Leña se posiciona como el principal plan en el país, concentrándose en áreas rurales y periurbanas con un período de ejecución de 16 años a partir de 2015. En sus directrices, respalda y promueve diversas actividades, entre las que se incluyen la evaluación de experiencias con estufas mejoradas en Colombia, el impulso de proyectos piloto para incrementar su uso y optimizar la eficiencia en la cocción. Además, aborda la selección del tipo de madera para llevar a cabo el Water Boiling Test (WBT), proponiendo el empleo de

eucalipto a nivel nacional o la opción de maderas autóctonas, como el pino en el caso de Antioquia, siempre asegurando un conocimiento previo de su poder calorífico [7].

En este contexto, la adopción de tecnologías de cocción más eficientes y ecológicas se presenta como el primer paso para superar obstáculos económicos, recursos físicos y ambientales. A nivel mundial, se han difundido numerosos modelos de estufas con el propósito de atenuar los impactos del uso de leña en las comunidades rurales. La estufa mejorada, también conocida como estufa cohete, optimiza la eficiencia en el uso de leña al asegurar una combustión completa y maximizar la utilización del calor generado. En comparación con los calentadores convencionales, reduce de manera significativa la cantidad de leña necesaria y disminuye las emisiones de gases nocivos. Su diseño distintivo incorpora una cámara de combustión simple a alta temperatura con una chimenea vertical aislada, lo que garantiza una combustión efectiva al 100%. Este enfoque innovador fue propuesto por el Dr. Larry Winiarski del centro de investigación Aprovecho en 1982. La estufa, al reducir las emisiones prácticamente a cero y requerir una cantidad mínima de leña, contribuye directamente a la preservación de los bosques [8]. A partir de lo mencionado, se derivan las siguientes preguntas:

- ¿Cuán eficiente energéticamente es el modelo de estufa tipo “cohete”?
- ¿Cuáles son los tipos de biomasa más adecuados desde una perspectiva energética para ser utilizados en estufas en el departamento de Antioquia?
- ¿Qué estrategias de mejora pueden aplicarse al modelo de estufa estudiado para aumentar su eficiencia energética y reducir la emisión de gases contaminantes?

Además de lo mencionado anteriormente, es importante destacar que Colombia carece de un centro de pruebas para estufas de biomasa. Por lo tanto, para llevar a cabo pruebas y realizar el proyecto de acuerdo con los estándares internacionales, se hace necesario diseñar y construir un sistema de monitoreo de emisiones para estufas. Esto contribuirá a fortalecer la colaboración de la Universidad Pascual Bravo con organizaciones a nivel mundial que se dedican a mejorar y dignificar los procesos de cocción en hogares de comunidades vulnerables, como la Clean Cooking Alliance. [9]

Contextualización

Este proyecto se enfoca en analizar el rendimiento energético de un modelo de estufa de biomasa disponible en el mercado en el departamento de Antioquia. Se llevaron a cabo pruebas con dos tipos de biomasa disponibles en la región para evaluar la eficiencia de la

estufa y proponer mejoras en su diseño con el objetivo de aumentar la eficiencia energética y optimizar su operación. Para determinar cuál de las dos biomásas es más efectiva en el funcionamiento de la estufa, se realizó una prueba de ebullición de agua (WBT), donde se comparó la temperatura y el tiempo necesarios para llevar dos litros y medio de agua al punto de ebullición. Además, se tomaron medidas directas de la composición de los gases de escape para evaluar la eficiencia de la combustión y la producción de gases contaminantes. Se midió la concentración de material particulado en el aire circundante a la estufa y se midieron los perfiles de temperatura de las paredes de la estufa para identificar los principales focos en las pérdidas de energía.

Para llevar a cabo estas pruebas, se diseñó y construyó un sistema de monitoreo de emisiones que ahora sirve como un laboratorio de investigación para este tipo de estufas, lo que, en caso de obtener una certificación, podría servir para acreditarlas en estándares internacionales como "The Water Boiling Test (WBT)" y "Controlled Cooking Test (CCT)" en estufas de biomasa.

El proyecto se lleva a cabo mediante un enfoque cuantitativo y se divide en cuatro fases principales:

Fase 1: *Construcción de un Modelo de Estufa de Biomasa*

Se busca ofrecer una propuesta de diseño de estufa de biomasa mono hornilla que aproveche las biomásas residuales y reduzca las emisiones de humo, al mismo tiempo que garantice la salud de los usuarios y aumente la velocidad de cocción. Como se dijo anteriormente, las estufas de biomasa son especialmente relevantes en las zonas rurales de Antioquia, donde el acceso a otras fuentes de energía es limitado. El proceso de concepción para la construcción de la estufa de biomasa mono hornilla se guio por la revisión exhaustiva de la literatura, resultando en la presentación de un diseño destacado. Tras un análisis minucioso, se decidió adoptar el enfoque del diseño tipo cohete. Este diseño innovador presenta una cámara de combustión en forma de L, estratégicamente aislada, con el objetivo de potenciar la eficiencia en la combustión y, al mismo tiempo, mitigar las emisiones. La elección del diseño tipo cohete refleja el compromiso con la excelencia funcional y ambiental, fusionando la sabiduría acumulada de la literatura con una visión vanguardista para la construcción de estufas de biomasa más eficientes y sostenibles.

Fase 2: *Diseño de Metodología para la Determinación de Eficiencia*

En esta fase, y después de revisar la literatura disponible, se decidió proponer una modificación a la prueba W.B.T 4.2.3 en la cual solo se consideró la fase de calentamiento en

caliente. Se midieron los perfiles de calentamiento de la carga, los perfiles de temperatura de las paredes para identificar pérdidas de energía, la composición de los gases de combustión y el material particulado suspendido. Para esto se construyó un sistema de monitoreo basado en las especificaciones de “Aprovecho Research Center”. [10]

Fase 3: Evaluación del rendimiento energético con diferentes tipos de biomasa

En la tercera fase, se evaluó el rendimiento energético de la estufa utilizando dos tipos diferentes de biomasa disponibles en el departamento de Antioquia, luego de hacer una revisión del potencial energético de la biomasa forestal residual se establecieron dos tipos de biomasa forestal de fácil acceso para ser utilizadas en el desarrollo del proyecto: la madera de pino y el eucalipto.

Fase 4: Propuestas de Mejora

Finalmente, se analizaron los resultados obtenidos y se propusieron algunas mejoras para aumentar la eficiencia energética y reducir las emisiones contaminantes de la estufa.

Estado del arte

En el documento: “**Lineamientos para un programa nacional de Estufas Eficientes para cocción con leña**” [11], emitido por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible en 2015, se establecen las pautas fundamentales para un programa a nivel nacional cuyo propósito es la mejora de las estufas utilizadas en la cocción con leña. El objetivo principal de este programa es promover el uso sostenible y responsable de la leña, con el fin de elevar la calidad de vida de la población, abordar la pobreza energética que enfrentan y reducir los impactos negativos en la salud y el medio ambiente.

Este programa se fundamenta en el Decreto 3570 de 2011, que establece los objetivos y la estructura del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, incorporando el Sector Administrativo de Ambiente y Desarrollo Sostenible. El mencionado decreto también establece las responsabilidades de la Dirección de Asuntos Ambientales Sectorial y Urbana, que incluyen el respaldo a la innovación, desarrollo y adaptación de tecnologías para un uso sostenible de los recursos ambientales, así como la gestión de inversiones necesarias para prevenir, mitigar o corregir los impactos ambientales de las actividades socioeconómicas.

El informe también presenta las entidades nacionales encargadas de abordar asuntos relacionados con el medio ambiente, la biodiversidad y la interacción con las comunidades. Estas entidades incluyen la Dirección de Cambio Climático, que tiene la responsabilidad de

brindar orientación técnica y promover acciones en mitigación y adaptación al cambio climático para los sectores público, privado y las comunidades. La Dirección de Bosque, Biodiversidad y Servicios Ecosistémicos contribuye al diseño de estrategias que fomenten la incorporación del concepto de desarrollo sostenible en los procesos productivos que afectan la biodiversidad y los servicios ecosistémicos.

Además, se destaca que en el marco del Plan Nacional de Desarrollo 2014-2018 "Todos por un nuevo país" se hace hincapié en la importancia de integrar y armonizar las políticas ambientales y sectoriales para fortalecer la gestión ambiental sectorial. Esto implica participar activamente en la formulación e implementación de una política de eficiencia energética, la creación de regulaciones técnicas que promuevan un uso más seguro, limpio y eficiente de la energía eléctrica, y la ejecución del Plan de Acción Sectorial de Mitigación – Energía Eléctrica y del Programa de Uso Racional y Eficiente de Energía (PROURE).

Las directrices de este programa se basaron en una revisión de iniciativas internacionales y experiencias de proyectos implementados en diversas partes del mundo. Además, se tomaron en cuenta las recomendaciones resultantes de la evaluación del mercado de cocinas y combustibles limpios realizada por la Global Alliance for Clean Cookstoves en colaboración con Accenture Development Partnerships.

La Fundación Natura llevó a cabo un proyecto titulado "***Estufas eficientes de leña como contribución a la calidad de vida, al uso eficiente de la energía y la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero en áreas rurales de Antioquia y Santander, Colombia***" [12]. En su informe de sistematización y suplemento técnico (2015), se detalla el desarrollo de este proyecto, el cual tiene como objetivo aprovechar un mecanismo específico mediante el diseño y registro de un programa de actividades (PoA) que permita la inclusión de futuras iniciativas relacionadas con estufas eficientes en el país.

Este proyecto surge en el contexto de que la Fundación Natura ha adoptado un enfoque integral en la promoción de la conservación ambiental. Este enfoque se inició de manera modesta en 2008 con una experiencia piloto y cobró impulso con la creación del Corredor de Conservación Guantiva – La Rusia – Iguaque, donde se reconoció la necesidad urgente de proteger los últimos remanentes de bosques de roble. Estos bosques han sido una fuente fundamental de leña durante mucho tiempo para las comunidades rurales cercanas. La alta demanda de leña en esta región se debe, en gran medida, a las prácticas ineficientes de cocción utilizadas por los habitantes locales, quienes prefieren la madera de roble debido a sus propiedades térmicas y su amplia disponibilidad.

Como respuesta a esta situación, se planteó abordar el problema desde una perspectiva de eficiencia energética, con el propósito de reducir el consumo de leña de esta especie en peligro. Se llevó a cabo una evaluación de un innovador prototipo de estufa que se desarrolló y perfeccionó a lo largo de varios años. Durante la fase de investigación y desarrollo, se fabricaron 50 unidades de estas estufas de tipo FN, las cuales fueron sometidas a rigurosas pruebas y análisis antes de iniciar una producción a gran escala. La difusión masiva de este modelo comenzó en 2014 y, para finales de ese año, se habían producido alrededor de 2.000 unidades de estas estufas.

En el 2015, la Corporación Autónoma Regional del Centro de Antioquia (CORANTIOQUIA) comenzó a diseñar y evaluar una estufa denominada SCE (sistema de cocción ecoeficiente). Hasta la fecha, se han fabricado 22 unidades de este prototipo en tres municipios de la jurisdicción, y actualmente se encuentra en proceso de validación. Se espera que el SCE se difunda ampliamente en los próximos años en la misma región.

Sin embargo, para lograr la amplia adopción de los modelos mencionados anteriormente, se necesita una estrategia de financiamiento sólida que garantice la sostenibilidad a largo plazo del proceso. Dado el impacto de la cocción doméstica en el problema del cambio climático, existe un gran potencial para utilizar el financiamiento basado en carbono, lo que podría estimular la producción y distribución a gran escala de estufas eficientes, reduciendo su costo de adquisición y haciéndolas más accesibles para los usuarios.

El proyecto de grado: “**Diseño y Construcción de una estufa ecoeficiente para la Fundación Kyrios**” [13], llevado a cabo por estudiantes de la Universidad Tecnológica de Pereira en colaboración con la Fundación Kyrios se centró en la creación de una estufa eficiente dentro de la fundación. Este proyecto es parte de un esfuerzo continuo de seis años por parte de un grupo de investigación en energía renovable, que ha trabajado en la construcción de viviendas a partir de botellas plásticas y sistemas de recolección de agua de lluvia para mejorar las condiciones de vida en la fundación.

Actualmente, las personas que residen en la fundación utilizan una estufa ineficiente que quema madera, lo que no solo desperdicia este recurso, sino que también emite humo que afecta la salud de quienes cocinan, causando problemas oculares y respiratorios. El excesivo uso de madera como combustible ha contribuido a la deforestación, una de las principales causas del calentamiento global. Además, las estufas a gas y la instalación de una red de gas

domiciliario son opciones costosas y poco accesibles para la comunidad rural de bajos recursos.

El proyecto busca diseñar, construir y adaptar una estufa eficiente que permita cocinar alimentos de manera efectiva sin emitir contaminantes. La estufa diseñada para la Fundación Kyrios utiliza madera como combustible, en contraste con las estufas convencionales que funcionan con gas propano o gas natural. Este enfoque reduce significativamente los costos de energía en comparación con el gas propano. En el año 2016, la fundación consumía un promedio de 30 kg de madera al día, equivalente a aproximadamente cinco guaduas. El objetivo del proyecto de desarrollo era mejorar el diseño de la estufa para reducir aún más el consumo de madera.

El propósito fundamental del proyecto era proporcionar una solución económica y respetuosa con el medio ambiente que mejorara la calidad de vida de las personas en la fundación, permitiéndoles cocinar de manera eficiente. Además, se buscaba minimizar las emisiones de contaminantes durante la combustión para garantizar la salud de quienes estaban involucrados en la preparación de alimentos.

En resumen, se logró construir una estufa ecoeficiente que superó en eficiencia a la estufa en uso en la fundación. El proyecto abordó el problema de la deforestación y garantizó un proceso de cocción de alimentos más rápido y saludable para una comunidad de más de 50 personas, incluyendo niños y jóvenes. Este diseño se centró en la salubridad y en la reducción de emisiones contaminantes durante la preparación de alimentos.

Durante los últimos 20 años, **la Corporación Autónoma Regional de las Cuencas de los Ríos Negro y Nare– CORNARE** ha llevado a cabo la construcción de 23 000 estufas en su jurisdicción en el Oriente del departamento de Antioquia. Este esfuerzo condujo a la creación del **“programa HUELLAS (Huertos y Estufas Leñeras Limpias y Ambientalmente Sostenibles)”** [14], que se centra en reemplazar las estufas tradicionales por estufas eficientes y promover la creación de huertos para la siembra de árboles. El objetivo principal de este programa es reducir la deforestación provocada por la extracción de leña para cocinar, disminuir las emisiones de partículas y gases de efecto invernadero originados en las cocinas tradicionales de los campesinos, así como mejorar la salud y las condiciones de vida de las familias campesinas.

Hasta 2010, se habían construido 6 000 estufas eficientes, y se estaban llevando a cabo la construcción de otras 3 070, cada una con su propio huerto de leña. Los beneficiarios deben

ser familias de economía campesina que residen en zonas rurales y están clasificadas en los niveles 0, 1, 2 y 3 del SISBEN. Deben utilizar principalmente la leña como fuente de energía para cocinar y disponer de un terreno de al menos 500 metros cuadrados para crear un huerto de leña, de acuerdo con el criterio del municipio. Además, deben ser propietarios o poseedores legales de los terrenos donde se llevará a cabo el proyecto. Se da prioridad a mujeres y/o hombres que son jefes de familia y se selecciona a los beneficiarios en núcleos veredales para facilitar el acceso y brindar apoyo técnico. También se da prioridad a aquellas veredas que carecen de otros servicios de energía.

En colaboración con el gobierno local y entidades como el gobierno de Finlandia, Isagen, EPM, Argos, Viva, CORNARE ha trabajado para proporcionar estufas eficientes con un costo que oscila entre \$800 000 y \$2 millones de pesos por estufa. Dado que estos costos no pueden ser asumidos por los usuarios finales, las estufas se entregan de forma gratuita.

Las viviendas que reciben estas estufas reciben capacitación previa sobre la construcción y el mantenimiento del proyecto después de la instalación de las estufas. Además, se considera la provisión de cultivos de leña para la producción de combustibles, lo que se estima que tarda aproximadamente 3 años en crecer. Esta medida tendrá un impacto a mediano plazo.

En el año 2014, **Ecopetrol y Cormacarena** se asociaron para desarrollar en el departamento del Meta un programa que se planteó como objetivo la ***“Implementación de estufas ecoeficientes y el establecimiento de bancos dendroenergéticos de Yopo para 70 familias campesinas en áreas rurales de los municipios priorizados del departamento del Meta, para el caso Mapiripán”*** [15]. El propósito de este programa era reducir la presión humana sobre los bosques nativos al establecer cultivos comerciales de Yopo como fuentes de energía. Esta iniciativa se originó debido a que, entre 2002 y 2007, el departamento del Meta experimentó una deforestación de 2 093,36 km², con una tasa media anual de deforestación de 342,4 km² por año, lo que lo convirtió en el segundo departamento con esta problemática en el país, solo superado por Caquetá. Mapiripán fue uno de los municipios afectados que no tenía una fuente de energía alternativa a la leña para cocinar, lo que resultaba en la tala de bosques para obtener leña. Esto tenía consecuencias negativas, como la pérdida de cobertura forestal, daño a las fuentes de agua y pérdida de biodiversidad.

Tras llevar a cabo una evaluación funcional, el proyecto concluyó que los sistemas ahorradores de leña implementados entre 2013 y 2014 tuvieron un funcionamiento adecuado en el 90% de las estufas instaladas. Estas estufas no solo satisficieron las expectativas de los usuarios, sino que también ofrecieron múltiples ventajas, como la reducción del humo en

el interior de las viviendas, la aceleración en el proceso de cocción de alimentos y una considerable disminución en el consumo de leña y en el tiempo necesario para su recolección. Además, la introducción de bancos dendroenergéticos contribuyó al incremento de alrededor de 35 hectáreas de cobertura vegetal.

Como un valor adicional, se llevaron a cabo cinco sesiones de capacitación enfocadas en el mantenimiento y uso de los bancos dendroenergéticos, así como en la construcción de estufas. Estas capacitaciones se dirigieron tanto a maestros constructores como a la comunidad en general, con el propósito de estandarizar el proceso de construcción de las estufas y proporcionar conocimientos a la comunidad. Se estima que la estrategia de gestión y desarrollo pecuario sostenible promueva la participación continua de los propietarios de los terrenos beneficiarios y de la autoridad ambiental para asegurar la persistencia de los bancos dendroenergéticos. Esto, a su vez, conducirá a una reducción estimada de aproximadamente 2 801,21 toneladas de CO₂. Esta estimación se basa en las experiencias de proyectos similares en municipios vecinos, como Puerto Rico y Puerto Concordia.

Además, gracias a su diseño y materiales de construcción, las estufas consumen significativamente menos leña en comparación con los fogones tradicionales. Esto se logra a través de una combustión más eficiente que permite una mejor quema de la madera, lo que resulta en una menor pérdida de energía, una mayor retención del calor y tiempos de cocción más cortos.

El proyecto de estufas eficientes desempeña un papel fundamental en la disminución de las enfermedades respiratorias que afectan a las familias campesinas. Además, promueve el uso responsable de la leña como fuente de combustible y fomenta el cultivo de árboles destinados a alimentar cocinas ecoeficientes. Como resultado, se logra un beneficio significativo al preservar la salud de los campesinos al evitar la inhalación de humo, lo que reduce el riesgo de enfermedades respiratorias y problemas oculares.

Este proyecto ha sido implementado en Mapiripán, Puerto Rico, Puerto Gaitán y Puerto Concordia, beneficiando a 402 familias campesinas desde 2011.

En resumen, el programa nacional de Estufas Eficientes en Colombia, respaldado por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, busca mejorar las condiciones de vida y abordar la pobreza energética mediante el uso sostenible de la leña. Se apoya en el Decreto 3570 de 2011 y colabora con entidades como la Dirección de Cambio Climático y la Dirección de Bosque, Biodiversidad y Servicios Ecosistémicos. Varios proyectos, como el de la

Fundación Natura y CORNARE, han desarrollado estufas eficientes para reducir la deforestación y mejorar la salud en comunidades rurales.

Además, iniciativas como el proyecto de la Fundación Kyrios y el programa HUELLAS buscan soluciones ecoeficientes adaptadas a comunidades específicas. Destaca la importancia del financiamiento sostenible para garantizar la adopción generalizada de estas tecnologías. Proyectos en Meta, liderados por Ecopetrol y Cormacarena, buscan alternativas a la leña, reduciendo la deforestación y mejorando la calidad de vida en áreas rurales. En conjunto, estos esfuerzos demuestran éxito en la reducción de emisiones, mejora de la salud y promoción del uso responsable de la leña en Colombia. De este modo, el semillero de investigación S-GIIEN del Pascual Bravo I.U identificó la necesidad de emprender un proyecto orientado a proporcionar estrategias que impulsen la mejora energética en estufas de biomasa. La iniciativa busca lograr este avance mediante la implementación de una prueba estandarizada, como la Water Boiling Test 4.2.3 (WBT), diseñada específicamente para evaluar y perfeccionar el rendimiento de estas estufas.

Metodología

A continuación, se proporciona una visión general de la prueba internacional estandarizada, conocida como el Water Boiling Test 4.2.3 (WBT), que se adaptó en el desarrollo del proyecto: *“Estrategias de mejoramiento del rendimiento energético de estufas de biomasa para el uso doméstico en comunidades vulnerables del departamento de Antioquia”*. La prueba, originalmente, se divide en tres fases consecutivas, las cuales se examinarán a continuación y se representarán visualmente en la **Figura 2**.

1. Para la **fase de alta potencia de arranque en frío**, el probador comienza con la estufa a temperatura ambiente y utiliza combustible de un paquete de combustible previamente pesado para hervir una cantidad medida de agua en una olla estándar. Luego, el probador reemplaza el agua hervida con una olla nueva de agua a temperatura ambiente para realizar la segunda fase.
2. La **fase de alta potencia de arranque en caliente** se realiza después de la primera fase mientras la estufa aún está caliente. Nuevamente, el probador usa combustible de un paquete de combustible previamente pesado para hervir una cantidad medida de agua en una olla estándar. Repetir la prueba con una estufa caliente ayuda a identificar las diferencias de rendimiento entre una estufa cuando está fría y cuando está caliente. Esto es particularmente importante para estufas con alta masa térmica, ya que estas estufas

pueden mantenerse calientes en la práctica. Una prueba de estufa completa siempre debe incluir las tres fases de prueba.

3. La **fase de cocción a fuego lento** proporciona la cantidad de combustible necesaria para cocinar a fuego lento una cantidad medida de agua justo por debajo del punto de ebullición durante 45 minutos. Este paso simula la larga cocción de legumbres común en gran parte del mundo.

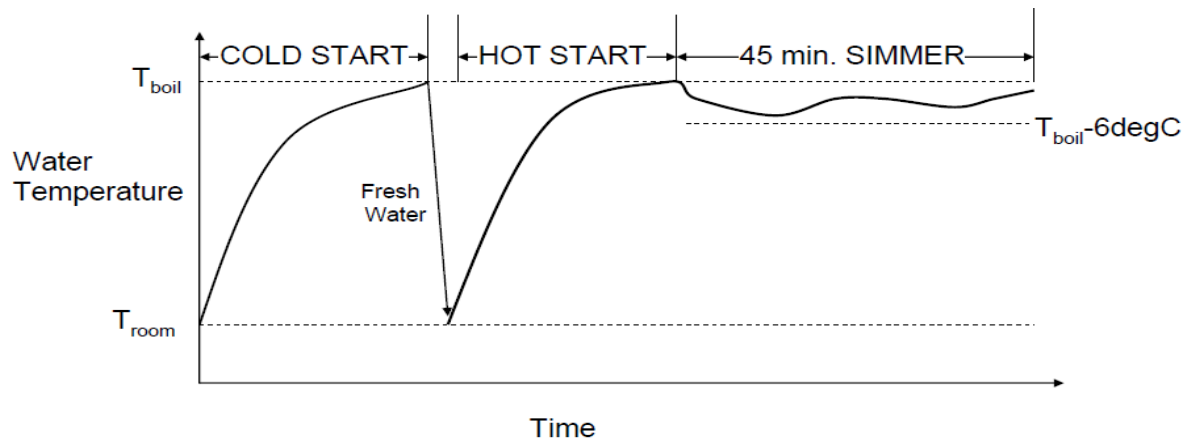


Figura 2. Temperatura durante las tres fases de la prueba de ebullición del agua.

Fuente. WBT.

Como ya se ha explicado, una de las diferencias principales en relación con la prueba original es que este proyecto se centró exclusivamente en la evaluación del arranque en frío. Esta elección se basa en la función básica que la comunidad asigna a este tipo de estufas, las cuales suelen utilizarse para la preparación de alimentos que no requieren un proceso muy complicado.


Descripción del montaje experimental

Para realizar la adaptación de la prueba Water Boiling Test 4.2.3 (WBT) se emplearon una serie de equipos y herramientas disponibles en el laboratorio LIDA de la Institución Universitaria Pascual Bravo. A continuación, se detallan estos equipos:

Tabla 1. Elementos o equipos utilizados en las pruebas realizadas.

Nombre	Variable de medición	Características técnicas	Imagen de referencia
<p>Termómetro infrarrojo con doble laser - (UNIT- T UT 301A)</p>	<p>Temperatura de la superficie de la estufa</p>	<ul style="list-style-type: none"> · Rango temperatura °C: -32 hasta 600. · Repetibilidad: 0,7 °C o 0,7% cualquiera que sea mayor. · D:S relación: 12:1(95%). · Emisividad: 0,1~1,0 	
<p>Medidor de presión diferencial con tubo Pitot</p>	<p>Presión dinámica y estática</p>	<ul style="list-style-type: none"> · Sobrepresión permitida: 250 mbar · Alimentación eléctrica: 4 baterías AAA LR03 1.5V · Condiciones de uso: De 0 a +50°C en condiciones sin condensación 0 a 2 000 m · Especificaciones de presión: De -1 000 a +1 000 Pa Precisión: +/-0,5% de la lectura +/-2 Pa 	
<p>Termómetro Digital - (UT325)</p>	<p>Temperatura del agua</p>	<ul style="list-style-type: none"> · Rango de temperatura °C: - 200 a 1 372°C. · Cantidad admisible de sensores: Tiene entrada doble (T1, T2). · Velocidad de muestreo: 50 veces por segundo. · Escalas de temperatura: Permite seleccionar entre °C, °F y K. 	
<p>Contador de partículas y medidor de monóxido - (DT- 9881)</p>	<p>Medición de temperatura y humedad del aire, contador de partículas.</p>	<ul style="list-style-type: none"> · Cantidad y régimen de medición: Simultáneamente puede medir y mostrar 6 canales de tamaños de partícula, canales 0,3; 0,5; 1,0; 2,5; 5,0; 10µm. · Tasa de flujo: 0,1ft3(2,83L/min) · Pérdida de coincidencia: 5%, 2 000 000 partículas por pie cúbico. · Rango HCHO (metanal): 0,01~5,00ppm; Precisión Básica: ±5%± 0,01ppm. · Rango CO (monóxido de carbono): 0~1 000ppm; 	

Nombre	Variable de medición	Características técnicas	Imagen de referencia
Cámara de imágenes térmicas - (FLIR E4)	Imagen térmica de las paredes de la estufa	<p>Precisión Básica: $\pm 5\% \pm 10\text{ppm}$.</p> <ul style="list-style-type: none"> · Resolución de IR: 80*60 pixeles. · MSX térmica: Imagen en imagen, combinación térmica, cámara digital. · Distancia focal mínima: 0,5 m (1,6 ft). · Frecuencia de la imagen: 9 Hz. · Imagen dinámica · Número F: 1,5. · Rango espectral: 7,5 - 13 μm. · Resolución espacial (IFOV): 10,3 mrad. · Sensibilidad térmica/NETD: $<0,15 \text{ }^\circ\text{C}$ (0,27 $^\circ\text{F}$) / $<150 \text{ mK}$. 	
Analizador de gases de combustión - (KIGAZ 210)	Concentración de O ₂ , CO, NO, NO ₂ , temperatura de humos, presión diferencial.	<ul style="list-style-type: none"> · Entradas: 2 entradas de termopar K y longitudes de onda intercambiables. · Tipo de célula y dilución: Célula de O₂ de larga vida y dilución de CO hasta 5%. · Tipo de calibración: Auto cero en el conducto. · Combustibles: 15 combustibles preprogramados y software LIGAZ-2 (LOGAZ-2 opcional). 	
Bascula - (VI 500)	Indicador de masa.	<ul style="list-style-type: none"> · Manejo: Auto cero programable. · Tipo de calibración: Calibración por teclado. · Rango de temperatura: Temperatura de trabajo entre 10 a 40 $^\circ\text{C}$. 	
Medidor de Humedad - (CED DT-123)	Humedad de la biomasa	<ul style="list-style-type: none"> · Longitud del electrodo: 8mm. · Electrodo: Integrado, reemplazable. · Rango de medición: Madera: 6-44%, otro material: 0,2-2,0%. · Precisión de indicación: Madera: $\pm 1\%$, otro material: $\pm 5\%$. · Rango de medición de temperatura: 0-60 $^\circ\text{C}$, temperatura ambiente 0-40 $^\circ\text{C}$. 	

Nombre	Variante de medición	Características técnicas	Imagen de referencia
		<ul style="list-style-type: none"> · Humedad ambiental: 0-85% de humedad relativa. 	
Manómetro digital	Diferencial de presión al interior del ducto	<ul style="list-style-type: none"> · Manómetro digital que mide la presión del aire y gas para puertos P1, P2 y diferenciales · Rango de ± 60 escala completa con precisión de $\pm 1,5\%$ · Unidades medidas: bar, psi, kPa, mmHg, kg/cm² y cmH₂O 	

La **Figura 3** muestra el diagrama que ilustra el montaje experimental de la estufa y los dispositivos de medición empleados en las distintas pruebas llevadas a cabo, mientras que la **Figura 4** presenta la representación visual de la estufa tal como se encuentra en el laboratorio de la Institución.

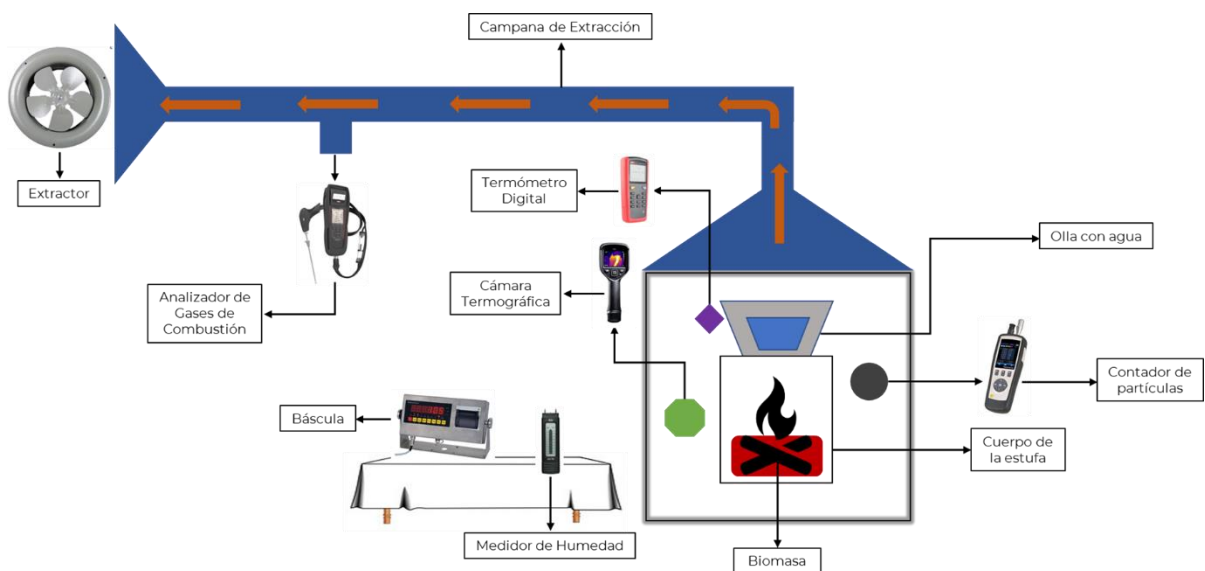


Figura 3. Diagrama de conexión experimental.

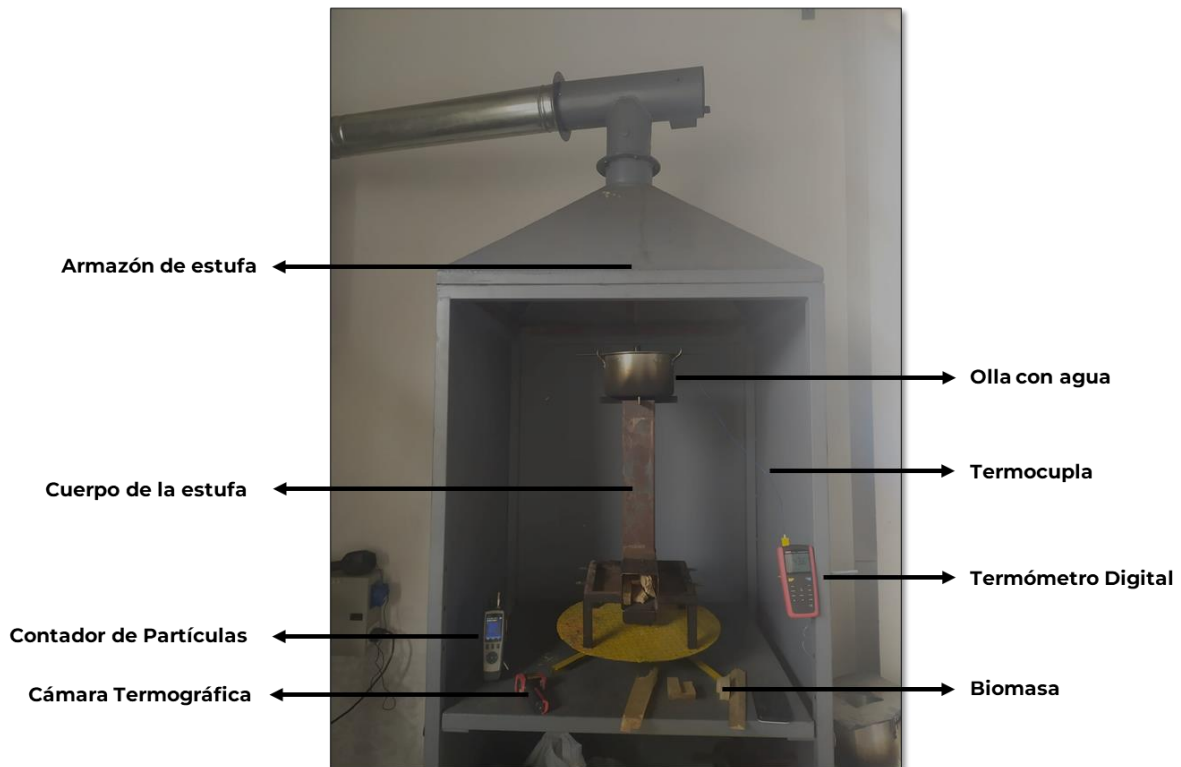


Figura 4. Montaje experimental I.U. Pascual Bravo.

Paso a paso para la realización de las pruebas

Fase de alta potencia de arranque en frío: A continuación, en la **Ilustración 1** se presenta la secuencia ejecutada en la primera fase basada en la WBT 4.2.3 que ilustra el proceso paso a paso utilizado para llevar a cabo la fase experimental del proyecto, incluyendo las mediciones correspondientes.

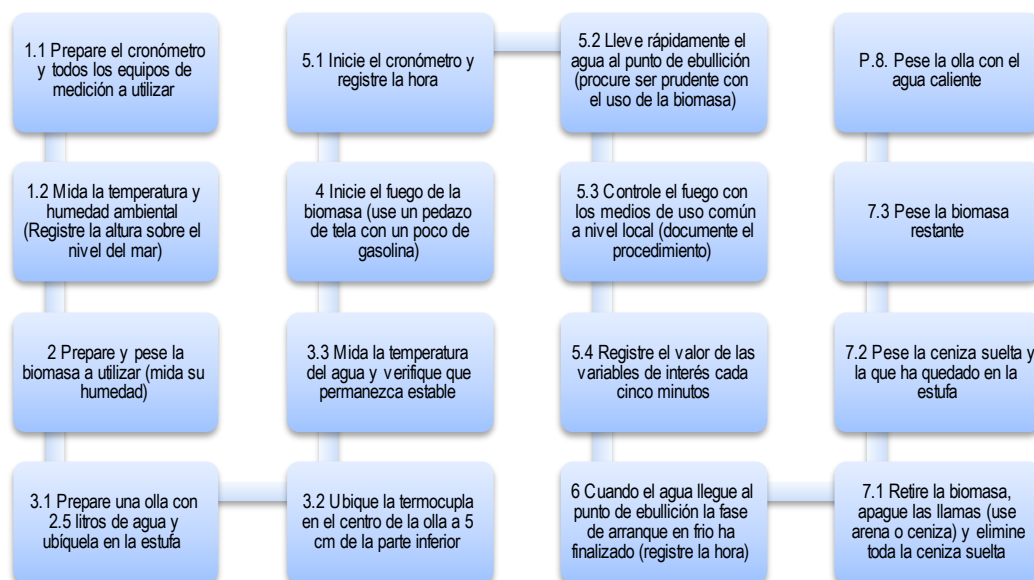


Ilustración 1. Paso a paso para la ejecución de la fase de arranque en frío.

La termocupla se monta en el interior de la olla o recipiente que se utiliza para el proceso de ebullición del agua, como se muestra en la siguiente **Ilustración 2**. Esta termocupla tiene la capacidad de medir las temperaturas en grados Celsius (°C) a las que llega el agua durante su proceso de ebullición. Está conectada a un termómetro digital. Es importante destacar que la termocupla no debe estar completamente sumergida ni debe tocar el fondo de la olla, ya que hacerlo podría resultar en mediciones incorrectas.

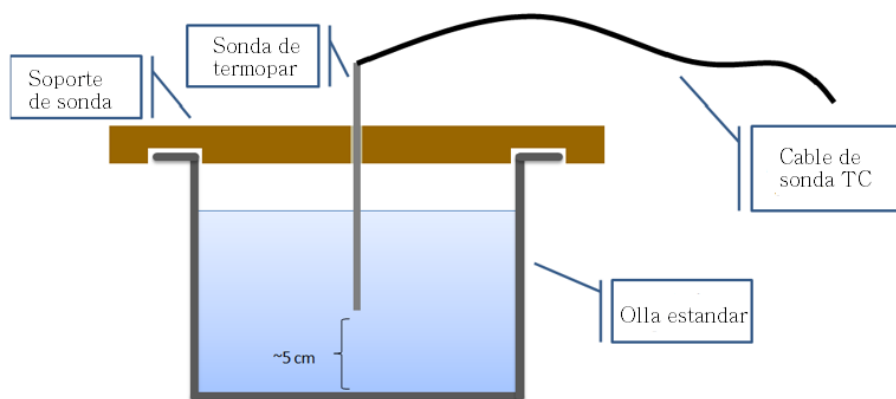


Ilustración 2. Soporte de sonda o termocupla. Adaptada de [WBT 4.2.3, 2014]

Es crucial destacar que, en la adaptación de la prueba WBT 4.2.3, en particular en lo que concierne al punto de ebullición local, se requiere registrar la temperatura durante cinco (5) minutos mientras el agua hierve por completo, y luego calcular la temperatura promedio a partir de las temperaturas máximas y mínimas registradas en ese período. Sin embargo, en el contexto de este proyecto, se optó por determinar el punto de ebullición local midiendo la temperatura del agua en el momento preciso de su ebullición, sin llevar a cabo mediciones prolongadas en el tiempo.

Cálculos

Determinación del punto de ebullición local

El punto de ebullición local del agua es el punto en el que la temperatura ya no aumenta, sin importar cuánto calor se aplique. La temperatura de ebullición local está influenciada por varios factores, entre ellos la altitud, pequeñas imprecisiones en el termómetro y las condiciones climáticas (WBT 4.2.3, 2014). Por estas razones, no se puede suponer que la temperatura de ebullición local sea de 100 °C. Para una altitud dada h (en metros), el punto de ebullición del agua se puede estimar mediante la siguiente fórmula:

$$T_b = \left(100 - \frac{h}{300}\right) ^\circ C$$

Para aplicarlo en la I.U Pascual Bravo utilizaremos la altura promedio de Medellín la cual es 1 495 m.s.n.m para así obtener la temperatura de ebullición local en Medellín y así poder utilizarlas para analizar las estufas en el módulo de la institución.

$$T_b = \left(100 - \frac{1\,495}{300}\right)^\circ\text{C} \approx 95,02^\circ\text{C}$$

De esta manera obtenemos que el punto de ebullición local en Medellín se encuentra a una temperatura cercana a los 95 °C.

Determinación del contenido de humedad del combustible

El combustible bien seco contiene entre un 10 y un 20 % de agua, mientras que la madera recién cortada puede contener más del 50 % de agua en masa (base húmeda). Idealmente, el combustible utilizado tanto para probar estufas como para cocinar debe secarse tanto como lo permitan las condiciones ambientales locales. Sin embargo, el combustible seco no siempre está disponible y tanto los probadores de estufas como los cocineros domésticos deben usar lo que pueden conseguir (WBT 4.2.3, 2014).

En nuestro caso, como vamos a utilizar un medidor de humedad de combustible, este funciona midiendo la conductividad entre dos sondas afiladas que se insertan en la madera, dando así un porcentaje de humedad en base seca, para la realización de las pruebas siempre se utilizan en base húmeda.

Los dos porcentajes de humedad están relacionados de esta manera:

$$H_{f,h} = \frac{H_{f,s}}{100 + H_{f,s}} * 100$$

La humedad de la madera puede variar en una determinada pieza de madera, así como entre diferentes piezas de un mismo paquete. Cuando se usa el medidor, tome tres piezas de madera al azar del paquete y mida cada pieza en tres lugares. Esto produce nueve mediciones en total. La humedad del paquete debe informarse como el promedio de estas nueve mediciones.

Cálculo de las métricas de rendimiento WBT

La adaptación de la prueba Water Boiling Test 4.2.3 propuesta por la Institución Universitaria Pascual Bravo optó por llevar a cabo únicamente la primera fase. A continuación, en la **Tabla 2** se detallarán los cálculos necesarios y las variables correspondientes.

Tabla 2. Glosario de variables

Variable	Descripción	Unidades
PCS	Poder calorífico superior (base seca)	kJ/kg
PCI	Poder calorífico inferior (base seca)	kJ/kg
$H_{f,h}$	Porcentaje de humedad del combustible en base húmeda	%
$H_{f,s}$	Porcentaje de humedad del combustible en base seca	%
$m_{f,h}$	Masa del combustible húmedo	kg
$m_{f,s}$	Masa del combustible seco	kg
PC_e	Poder calorífico efectivo	kJ/kg
Δh_w	Cambio en la entalpía sensible del agua	kJ/kg
$\Delta h_{w,fg}$	Entalpía de vaporización del agua	kJ/kg
$C_{p,w}$	Calor específico del agua a temperatura de ebullición	kJ/kg K
PC_n	Poder calorífico neto del carbón (residual)	kJ/kg
m_p	Masa de la olla vacía antes de la prueba	kg
$m_{p,i}$	Masa de la olla + agua antes de la prueba	kg
$m_{p,o}$	Masa de la olla + agua después de la prueba	kg
m_{cp}	Masa del plato de carbón	kg
T_a	Temperatura ambiente	°C
T_b	Temperatura local de ebullición del agua	°C
T_g	Temperatura de gases de escape	°C
$T_{f,i}$	Temperatura inicial del combustible	°C
y_c	Fracción másica de carbón	%
y_{ash}	Fracción másica de ceniza	%
p_a	Presión atmosférica	kPa
\dot{V}_g	Flujo de humos	m ³ /s
cCO_2	Concentración base* de dióxido de carbono	ppm
cCO	Concentración base* de monóxido de carbono	ppm
cPM	Concentración base* de material particulado	g/m ³
$m_{f,i}$	Masa de combustible inicial**	kg
$m_{f,o}$	Masa de combustible final**	kg
$m_{f,q}$	Masa de combustible consumido**	kg
$T_{w,i}$	Temperatura del agua inicial	°C
$T_{w,o}$	Temperatura del agua final	°C
t_i	Tiempo de inicio de la prueba	min
t_o	Tiempo del final de la prueba	min
m_c	Masa de carbón + plato después de la prueba	kg
m_{cr}	Masa de carbón recogido durante la fase de arranque en frío	kg
$m_{f,e}$	Masa de combustible seco consumido	kg

Variable	Descripción	Unidades
$m_{w,v}$	Masa de agua vaporizada	kg
t_b	Tiempo de duración de la prueba	min
t_b^T	Tiempo corregido por temperatura para llevar el agua a ebullición	min
$\Delta E_{f,w}$	Energía que se necesitaba para eliminar la humedad del combustible	kJ
$m_{w,f}$	Masa de agua en el combustible	kg
$m_{f,w}$	Masa equivalente de combustible necesaria para eliminar la humedad del combustible	kg
ΔE_{cr}	Energía del combustible almacenada en el carbón restante	kJ
$m_{w,fq}$	Masa de agua en el combustible quemado	kg
$m_{f,c}$	Cantidad equivalente de combustible sin quemar que queda en forma de carbón	kg
$m_{f,s,e}$	Masa equivalente de combustible seco consumido	kg
e_t	Eficiencia térmica	%
$\Delta E_{w,cal}$	Energía para calentar el agua	kJ
$\Delta E_{w,eva}$	Energía para evaporar el agua	kJ
$E_{r,f}$	Energía liberada por el combustible	kJ
m_w	Masa de agua calentada	kg
ΔT_w	Cambio de temperatura del agua	°C
r_{cb}	tasa de combustión	kg/min
sC_f	Consumo específico de combustible	kgf/kgw
sC_c^T	Consumo específico de combustible corregido por temperatura	kgf/kgw
sE_c^T	Consumo específico de energía corregido por temperatura	kJ/kg
fP_f	Potencia de fuego	kJ/min

*Tomada antes de la prueba

**Base húmeda

Métricas de eficiencia

Tiempo de ebullición – Es el tiempo que toma para alcanzar la temperatura de ebullición desde la temperatura inicial del agua.

Eficiencia térmica – Es la medida de la fracción de calor producido por la combustión del combustible que se usa para calentar el agua. La energía restante se pierde en el ambiente.

Consumo específico de combustible – Es la medida de la cantidad de combustible requerido para calentar 1 litro de agua. Depende de la cantidad de combustible seco menos la energía en la ceniza residual, dividido por los litros de agua remanentes al final de la prueba.

Consumo específico de combustible corregido – Es similar al consumo específico de combustible, solo que se corrige para el tiempo que le toma al agua calentarse hasta una temperatura de 75 °C.

Consumo específico de energía corregido – Similar al consumo específico de combustible corregido, la diferencia es que se reporta en kJ y no en kg.

Métricas de emisión

Emisiones por MJ entregado (CO y PM) – Es la cantidad de emisiones producidas por cantidad de energía entregada al agua.

Tasa de emisión (CO y PM) – Cantidad de contaminantes emitidos a lo largo de la prueba.

Tasa de emisión específica (CO y PM) – Cantidad de contaminantes emitidos por tiempo y por litros de agua.

Emisiones por cantidad de combustible quemado (CO y PM) – Es la cantidad de emisiones producidas por cantidad de combustible quemado.

Poder calorífico inferior

$$PCI = PCS - \frac{m_{w,f} * \Delta h_{w,fg}}{m_{f,h}}$$

La masa de agua en el combustible es:

$$m_{w,f} = m_{f,h} - m_{f,s}$$

El **porcentaje de humedad del combustible en base húmeda** se determina como sigue:

$$H_{f,h} = \frac{m_{f,h} - m_{f,s}}{m_{f,h}} * 100$$

El **poder calorífico efectivo** toma en cuenta la energía requerida para calentar y evaporar la humedad presente en el combustible.

$$PC_e = PCI * \left(1 - \frac{H_{f,h}}{100}\right) - \frac{H_{f,h}}{100} * \Delta h_w$$

dónde

$$\Delta h_w = \Delta h_{w,fg} + C_{p,w} * (T_b - T_{f,i})$$

o

$$\Delta h_w = 2260 + 4,186 * (T_b - T_{f,i})$$

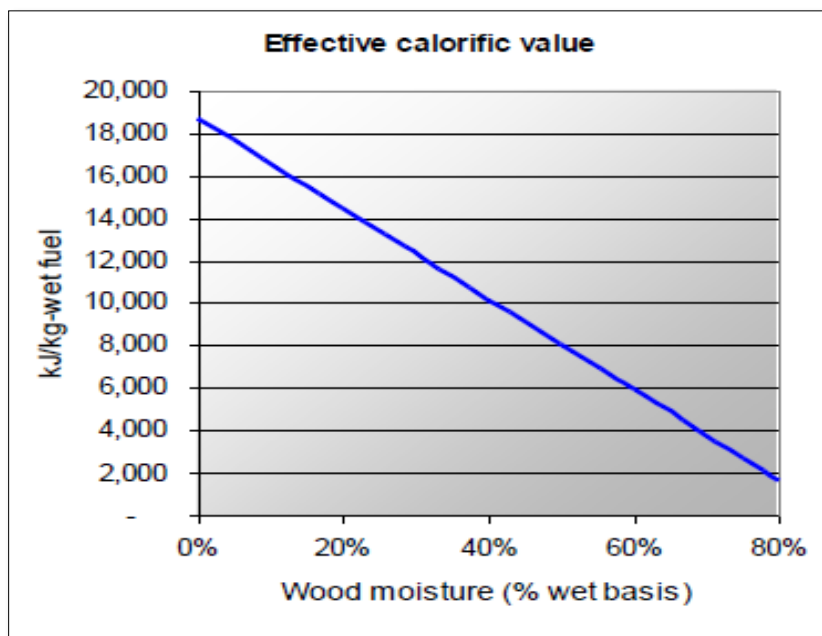


Figura 5. Poder calorífico efectivo en función del porcentaje de humedad de la biomasa (base húmeda).

La **masa de combustible húmedo** se estima de dos formas, la primera mediante la siguiente fórmula:

$$MC_{wet} = \frac{MC_{dry}}{1 + MC_{dry}}$$

la segunda forma se hace mediante el uso del medidor de humedad.

La **masa de combustible consumido** se estima de la siguiente manera:

$$m_{f,q} = m_{f,i} - m_{f,o}$$

La **masa de carbón recogido durante la fase de arranque en frío** es:

$$m_{cr} = m_c - m_{cp}$$

La **masa de combustible seco equivalente consumido** ajusta la cantidad de combustible seco que se quemó para tener en cuenta dos factores: (1) la energía necesaria para eliminar la humedad del combustible y (2) la cantidad de carbón que queda sin quemar. La masa de

combustible seco consumido es el combustible húmedo consumido menos la masa de agua en el combustible:

$$m_{f,e} = m_{f,q} * \left(1 - \frac{H_{f,h}}{100}\right)$$

La masa de agua vaporizada es:

$$m_{w,v} = m_{p,i} - m_{p,o}$$

La masa de agua llevada a la temperatura de ebullición es:

$$m_{w,e} = m_{p,o} - m_p$$

El tiempo de duración de la prueba es:

$$t_b = t_o - t_i$$

El tiempo corregido por temperatura para llevar el agua a ebullición: es el mismo que el anterior, pero ajusta el resultado a un cambio de temperatura estándar de 75 °C.

$$t_b^T = t_b * \frac{75}{T_{w,o} - T_{w,i}}$$

La energía que se necesitaba para eliminar la humedad del combustible es la masa de agua en el combustible multiplicado por el cambio en la entalpía específica del agua.

$$\Delta E_{f,w} = m_{w,f} * [C_{p,w} * (T_b - T_{f,i}) + \Delta h_{w,fg}]$$

Donde:

$$C_{p,w} \approx 4,186 \left(\frac{kJ}{kgK}\right)$$

$$\Delta h_{w,fg} \approx 2260 \left(\frac{kJ}{kg}\right)$$

$$T_{f,i} \approx T_a$$

La masa de agua en el combustible es:

$$m_{w,fq} = m_{f,q} * \frac{H_{f,h}}{100}$$

Por lo tanto,

$$\Delta E_{f,w} = m_{w,fq} * [4,186 * (T_b - T_a) + 2260]$$

Esta cantidad de energía se divide por el contenido de energía del combustible para determinar la **masa equivalente de combustible necesaria para eliminar la humedad del combustible:**

$$m_{f,w} = \frac{\Delta E_{f,w}}{PCI}$$

La **energía del combustible almacenada en el carbón restante** es la masa del carbón multiplicada por el contenido de energía del carbón:

$$\Delta E_{cr} = m_{cr} * PC_n$$

Esta cantidad de energía se divide por el contenido energético del combustible para determinar la **cantidad equivalente de combustible sin quemar que queda en forma de carbón:**

$$m_{f,c} = \frac{\Delta E_{cr}}{PCI}$$

Masa equivalente de combustible seco consumido:

$$m_{f,s,e} = m_{f,e} - m_{f,w} - m_{f,c}$$

Juntando todo tenemos:

$$m_{f,s,e} = m_{f,q} * \left(1 - \frac{H_{f,h}}{100}\right) - \frac{m_{f,q} * \frac{H_{f,h}}{100} * [4,186 * (T_b - T_a) + 2260]}{PCI} - \frac{m_{cr} * PC_n}{PCI}$$

$$m_{f,s,e} = \frac{m_{f,q} * \left(PCI * \left(1 - \frac{H_{f,h}}{100}\right) - \frac{H_{f,h}}{100} * [4,186 * (T_b - T_a) + 2260]\right) - m_{cr} * PC_n}{PCI}$$

La **eficiencia térmica** es una relación entre la cantidad de energía necesaria para calentar y evaporar el agua y la energía consumida al quemar el combustible. Se calcula de la siguiente forma:

$$e_t = \frac{\Delta E_{w,cal} + \Delta E_{w,eva}}{E_{r,f}} * 100$$

La **energía para calentar el agua** es la masa de agua multiplicada por el calor específico multiplicada por el cambio en la temperatura:

$$\Delta E_{w,cal} = m_w * C_p * \Delta T_w$$

$$m_w = m_{p,i} - m_p$$

$$\Delta T_w = T_{w,o} - T_{w,i}$$

$$\Delta E_{w,cal} = (m_{p,i} - m_p) * 4,186 * (T_{w,o} - T_{w,i})$$

La **energía para evaporar el agua** es la masa de agua evaporada multiplicada por la entalpía específica de vaporización del agua:

$$\Delta E_{w,eva} = m_{w,v} * \Delta h_{w,fg}$$

$$\Delta E_{w,eva} = (m_{p,i} - m_{p,o}) * 2260$$

La **energía consumida** es la masa equivalente de combustible seco consumido multiplicada por el poder calorífico:

$$E_{r,f} = m_{f,s,e} * PCI$$

Juntando todo tenemos:

$$e_t = \frac{(m_{p,i} - m_p) * 4,186 * (T_{w,o} - T_{w,i}) + (m_{p,i} - m_{p,o}) * 2260}{m_{f,s,e} * PCI} * 100$$

La **tasa de combustión** es una medida de la tasa de consumo de combustible mientras hierve el agua. Se calcula dividiendo el combustible seco equivalente consumido por el tiempo de la prueba.

$$r_{cb} = \frac{m_{fs,e}}{t_b}$$

El **consumo específico de combustible** es una medida de la cantidad de leña necesaria para producir un litro (o kilo) de agua hirviendo partiendo con estufa fría. Se calcula como:

$$sC_f = \frac{m_{fs,e}}{m_w}$$

Consumo específico de combustible corregido por temperatura corrige el consumo específico para tener en cuenta las diferencias en las temperaturas iniciales del agua. Esto facilita la comparación de estufas probadas en diferentes días o en diferentes condiciones ambientales. La corrección es un factor simple que “normaliza” el cambio de temperatura observado en las condiciones de prueba a un cambio de temperatura “estándar” de 75 °C (de 25 a 100). Se calcula de la siguiente manera:

$$sC_c^T = sC_f * \frac{75}{T_{w,o} - T_{w,i}}$$

Consumo específico de energía corregido por temperatura: Mide la cantidad de energía requerida para producir un litro de agua hirviendo empezando con una estufa fría.

$$sE_c^T = sC_c^T * PCI$$

Potencia de fuego: Esta es la energía del combustible consumida para hervir el agua dividida por el tiempo de ebullición. Indica la potencia media de salida de la estufa (en Watts) durante la prueba de alta potencia:

$$fP_f = \frac{m_{fs,e} * PCI}{t_b * 60}$$

Tenga en cuenta que al usar $m_{fs,e}$ en este cálculo, hemos tenido en cuenta tanto el carbón restante como la humedad del combustible.

Medición de emisiones

La utilización de analizadores de gases calibrados permite la medición de diversos compuestos gaseosos presentes en la corriente de gases que circulan a través del conducto de escape. Entre estos compuestos se encuentran el monóxido de carbono (CO) y el dióxido de carbono (CO₂). En este documento se presentan las concentraciones de CO y oxígeno (O₂) promedios medidos a lo largo de cada una de las pruebas.

Resultados

El objetivo de este trabajo es validar experimentalmente una metodología para medir la eficiencia energética y los índices de emisión en estufas de biomasa, mediante el desarrollo de cálculos basados en la adaptación de la prueba estandarizada WBT 4.2.3, 2014. Los datos recopilados durante las pruebas realizadas en esta adaptación constituyen los insumos esenciales para los cálculos que se presentarán a continuación.

Selección de las biomasas

Los eucaliptos, árboles perennes de gran envergadura que pueden alcanzar alturas impresionantes de hasta 60 metros. Estos árboles se caracterizan por su corteza exterior de tono marrón claro con un aspecto similar a la piel, que se desprende en tiras, dejando manchas grises en el tronco. No obstante, su gran altura y su propensión a arder fácilmente los hacen vulnerables a incendios incontrolables en bosques densos, con llamas que pueden alcanzar alturas asombrosas de más de 300 metros.

En cuanto a la madera de eucalipto, se considera semidura, con una densidad que varía entre 800 y 900 kg por metro cúbico. Para aprovecharla eficazmente como combustible en estufas o chimeneas, es necesario cortarla cuando aún está verde, ya que se vuelve aún más dura y difícil de partir una vez que se seca. Además, presenta un alto poder calorífico, lo que la convierte en una opción adecuada para la calefacción.

Por otro lado, los pinos, que pertenecen al género "podocarpus", son árboles de gran tamaño con una altura máxima de 40 metros y un diámetro máximo del tronco de 180 centímetros. Esta familia de árboles es abundante en Colombia y cuenta con más de 100 especies registradas en todo el mundo, con una distribución en Centroamérica, Suramérica y África.

La madera de pino se clasifica como blanda, con una densidad de alrededor de 440 kg por metro cúbico. A diferencia del eucalipto, es difícil de quemar cuando se corta recién, pero una vez que se seca, se enciende rápidamente y produce una llama grande con pocas brasas.

Sin embargo, debido a su contenido de aceite, genera mucho hollín, lo que requiere un deshollinado frecuente de las estufas o chimeneas que utilizan esta madera como combustible. Un rasgo distintivo que facilita su identificación son las hojas más grandes de los pinos nativos colombianos.

Según el 7° Boletín Estadístico Forestal de marzo de 2023 [16], la distribución porcentual del área sembrada con plantaciones forestales comerciales varía por departamento. Los tres primeros lugares en esta clasificación corresponden a los departamentos de Antioquia, Vichada y Meta, que registran porcentajes de 21,4%, 20,0% y 12,2% respectivamente.

Tabla 3. Área de plantaciones forestales comerciales por departamento a diciembre 2022.

Área de Planeaciones Forestales Comerciales por Departamento a diciembre 2022		
Departamento	Área Sembrada (ha)	%
Antioquia	115 942	21,4%
Vichada	108 254	20,0%
Meta	66 186	12,2%
Córdoba	35 434	6,5%
Caldas	29 030	5,4%
Valle del Cauca	27 617	5,1%
Cauca	26 142	4,8%
Santander	20 490	3,8%
Magdalena	15 215	2,8%
Huila	12 125	2,2%
Bolívar	11 890	2,2%
Risaralda	10 159	1,9%
Cundinamarca	9 843	1,8%
Cesar	10 226	1,9%
Tolima	9 171	1,7%
Casanare	8 296	1,5%
Boyacá	6 073	1,1%
Quindío	5 880	1,1%
Sucre	5 782	1,1%
Atlántico	1 872	0,3%
Norte de Santander	1 493	0,3%
Nariño	1 138	0,2%
Chocó	1 126	0,2%
Guajira	703	0,1%
Arauca	605	0,1%
Caquetá	611	0,1%
Guaviare	397	0,1%
Putumayo	193	0,0%

Área de Planeaciones Forestales Comerciales por Departamento a diciembre 2022		
Departamento	Área Sembrada (ha)	%
Guanía	4	0,0%
Vaupés	1	0,0%
Amazonas	0	0,0%
Total	541 899	100%

Fuente: ICA-SPV-DTEVF-2022 – DCAF-MADR. (7° Boletín Estadístico Forestal de marzo de 2023)

En la **Tabla 4** se presenta la clasificación de especies forestales utilizadas en la reforestación comercial apoyadas con el Certificado de Incentivo Forestal CIF. Esta clasificación se basa en lo establecido en las Resoluciones 80 y 474 del año 2013 expedidas por el Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural. Además, se muestra su distribución en los diferentes núcleos de desarrollo para las plantaciones forestales comerciales, según lo definido en los lineamientos de política del sector forestal.

Tabla 4. Distribución de especies por Zona de aptitud.

Especie	Hectáreas (ha)	%
Acacia mangium	67 581	12,5%
Pino pátula	59 336	10,9%
Pinus caribaea	51 174	9,4%
Eucalipto grandis	42 378	7,8%
Teca	40 295	7,4%
Eucalipto Pellita	37 168	6,9%
Caucho	36 732	6,8%
Pino tecunumanii	32 622	6,0%
Otras Nativas	20 924	3,9%
Melina	17 866	3,3%
Eucalipto urophylla	17 639	3,3%
Pino maximinoi	17 168	3,2%
Pino oocarpa	16 344	3,0%
Nogal	16 290	3,0%
Eucalipto tereticornis	10 581	2,0%
Roble	10 395	1,9%
Ceiba	10 027	1,9%
Cipres	9 729	1,8%
Eucalipto globulus	8 641	1,6%
Cedro	6 452	1,2%
Otros Pinos	3 394	0,6%
Otros Eucaliptos	2 849	0,5%
Eucalipto camaldulensis	2 734	0,5%

Especie	Hectáreas (ha)	%
n.d.	2 118	0,4%
Balso	1 260	0,2%
Otras Introducidas	203	0,0%
Total	541 899	100%

Fuente: MADR-DCAF. (7° Boletín Estadístico Forestal de marzo de 2023)

Una característica muy importante en la valorización energética de las biomásas es su poder calorífico, el cual se refiere a la cantidad total de energía liberada cuando se quema 1 kg de combustible, se expresa en kilojulios por kilogramo (kJ/kg).

El poder calorífico varía dependiendo del tipo de madera utilizada. En general, la mayoría de las maderas tienen un poder calorífico promedio que oscila entre 16 736 kJ/kg y 33 472 kJ/kg. Las maderas duras, por lo general, presentan poderes caloríficos cercanos a las 33 472 kJ/kg, lo que significa que son muy eficientes desde el punto de vista energético. Estas maderas producen mucho más calor que las maderas blandas al utilizar la misma cantidad de material. Por otro lado, las maderas blandas suelen tener poderes caloríficos inferiores, más cercanos a las 16 736 kJ/kg. Esto las hace menos eficientes, ya que requieren mayores cantidades de madera para producir la misma cantidad de calor que las maderas duras.

En resumen, el poder calorífico de la leña es un factor importante para considerar en las pruebas del proyecto, ya que influye en la eficiencia energética de los diferentes tipos de madera utilizados. En la **Tabla 5** se encuentran las propiedades termoquímicas de las cinco especies con mayor potencial energético en Colombia. Estas especies son cultivadas en gran proporción, lo que incrementa las oportunidades de obtener beneficios energéticos a partir de ellas [17].

Tabla 5. Propiedades termoquímicas de las cinco especies con potencial energético en Colombia.

Característica	Acacia	Eucalipto	Gmelina arborea	Pino pátula	Pino maximinoi
C	53,02	53,31	52,73	55,01	54,45
H	6,71	6,74	6,96	7,21	7,04
O	39,65	39,26	39,12	36,72	37,79
N	0,33	0,39	0,47	0,81	0,52
S	0,02	0,02	0,02	0,01	0,00
Cenizas	0,27	0,28	0,70	0,24	0,20
PCI (kJ/kg)	18 759,44	19 083,08	18 896,09	19 154,45	19 031,26

Fuente: Pérez, Osorio (2014)

En el Valle de Aburrá, varias empresas se dedican a la comercialización de diversos tipos de madera para la fabricación de una amplia gama de productos destinados a diferentes mercados e industrias. Este proceso de transformación de la materia prima genera una cantidad significativa de residuos, lo que requiere la implementación de estrategias adecuadas para gestionar eficientemente este recurso maderero. Los residuos principales incluyen leña, retal, viruta y aserrín. Se ha encontrado una aplicación efectiva para la viruta y el aserrín en actividades agropecuarias, como en avícolas y en el transporte de semovientes [18]. La siguiente **Tabla 6** muestra cuatro especies de recursos maderables, incluyendo los dos tipos de biomasa utilizados en las pruebas del proyecto.

Tabla 6. Volúmenes de comercialización mensual de maderas en el Valle de Aburrá

Nombre común	Volumen entra (m ³ /mes)	Volumen utilizado (m ³ /mes)	Residuo (m ³ /mes)
Acacia	264,8	209,8	55,0
Eucalipto	307,5	240,0	67,5
Pino pátula	5 444,3	3 798,2	1 646,1
Roble	1 084,1	824,5	259,6

Fuente: Pérez, Osorio (2014)

Tabla 7. Caracterización de las maderas usadas.

Tipo de madera	Poder calorífico	Humedad	Densidad	Composición química	Referencia de búsqueda
Pino	19 154,45	13 – 15%	520 kg/m ³	<ul style="list-style-type: none"> · Celulosa: 50% del peso total · Lignina: 23 – 33% del peso · Hemicelulosa: 15 – 30% del peso · Extractos: 5 – 30% e incluyen: tanino, colorantes, aceites esenciales, resinas, ceras, gomas, almidones, etc. · Minerales productores de ceniza: 0,1 – 3% del peso 	https://www.tmol-duras-fbermejo.es
Eucalipto	19 083,08	15,5 – 17%	780 kg/m ³		https://maderame.com/enciclopedia-madera/eucalipto/

Diseño y modificación de la estufa

En la Institución Universitaria Pascual Bravo se construyó una estufa tomando como punto de partida un modelo preexistente en el mercado. Este nuevo diseño se inspira en la

concepción de una estufa tipo cohete, que se caracteriza por su capacidad de lograr una combustión más eficaz del combustible en comparación con las hogueras al aire libre y las estufas artesanales.



Figura 6. Estufa tipo cohete.

La estufa construida se probó en el contexto de un de los proyectos de aula realizados en el curso de Diseño de sistemas térmicos por los estudiantes Charly Daniel Areiza Correa, Sergio Bernal Isaza y Andrés Emilio Zapata Valencia usando madera de pino, y siguiendo un procedimiento de medición muy poco tecnificado. Se logró una eficiencia de 2,40%.

Luego de esta primera experiencia y con el objetivo de cumplir con los objetivos del proyecto, se planteó la idea de realizar modificaciones en la estufa inicial. Estas modificaciones fueron llevadas a cabo por los estudiantes Juan Diego García Duque, Juan Pablo Guiral Zuluaga y Juan José Ortiz Palacios como parte de su trabajo de grado titulado "Propuesta de diseño de una estufa de biomasa para uso doméstico en comunidades vulnerables en el Departamento de Antioquia". Para llevar a cabo estas modificaciones, se utilizaron láminas galvanizadas de calibre 14 y acero de bajo carbono. En la **Figura 7** a continuación, se puede apreciar el resultado de estas modificaciones.



Figura 7. Estufa tipo cohete con modificaciones iniciales

Al considerar esta estufa y aplicar la metodología propuesta para medir las variables de rendimiento y emisión, procedimos a estimar su eficiencia. Sin embargo, la prueba inicial con madera de pino no logró llegar al punto de ebullición. Los resultados obtenidos durante esta prueba fueron altamente insatisfactorios, con un tiempo de desarrollo de una hora y treinta y seis minutos y un consumo completo de la madera de pino, totalizando 1,083 kg. La eficiencia térmica podría considerarse nula, ya que no se alcanzó el punto de ebullición. Esta prueba fallida nos planteó la necesidad imperante de realizar modificaciones en la estufa, comenzando con el recorte de la chimenea.

Una vez se alcanzó el punto de ebullición durante la segunda prueba, se dio inicio al proceso de realizar ajustes adicionales en el diseño con el objetivo de mejorar la eficiencia térmica y reducir las emisiones de sustancias contaminantes. Estas modificaciones (ver **Figura 8**) incluyeron la incorporación de un material aislante y la instalación de un armazón en la estufa, con el fin de reducir las pérdidas de calor al ambiente. Asimismo, se diseñó una cubierta para direccionar los gases de combustión alrededor de la olla y aumentar la transferencia de calor. Ver **Anexo 1**. Planos de la estufa modificada en el proyecto.



Figura 8. Imágenes reales de las modificaciones realizadas.

Las modificaciones realizadas han tenido un impacto positivo al reducir las pérdidas de calor por convección en la estufa. Se llevaron a cabo cálculos detallados para evaluar específicamente estas pérdidas, teniendo en cuenta tanto las dimensiones originales como las modificaciones en altura. Los resultados revelaron una diferencia de 70,8 W, lo que se traduce en una reducción significativa del 26,25% en las pérdidas de calor por convección [19].

Este hallazgo no solo apunta a una disminución en las pérdidas de calor, sino que también sugiere una mejora sustancial en la eficiencia general de la estufa con las nuevas medidas adoptadas. Esta eficiencia mejorada no solo beneficia la conservación de energía, sino que también tiene un impacto positivo en el rendimiento de la estufa, acelerando el tiempo de cocción. En resumen, las modificaciones han demostrado ser una solución eficaz para optimizar tanto la eficiencia como la velocidad de la estufa.

Medición de rampa de calentamiento en estufa a gas

A continuación, en la **Figura 9** se presenta el resultado de una prueba experimental en la que se llevó a cabo la ebullición de un litro de agua utilizando utensilios de cocina convencionales. Esta prueba se llevó a cabo con el propósito de obtener información sobre el tiempo que tarda el agua en alcanzar el punto de ebullición en una estufa de gas natural ubicada en la ciudad de Medellín. Se registraron las variaciones en la temperatura en grados Celsius cada dos minutos. Es importante destacar que los utensilios y el instrumento de medición empleados en estas pruebas pueden no proporcionar datos tan precisos como los obtenidos en un entorno de laboratorio equipado con instrumentos certificados.

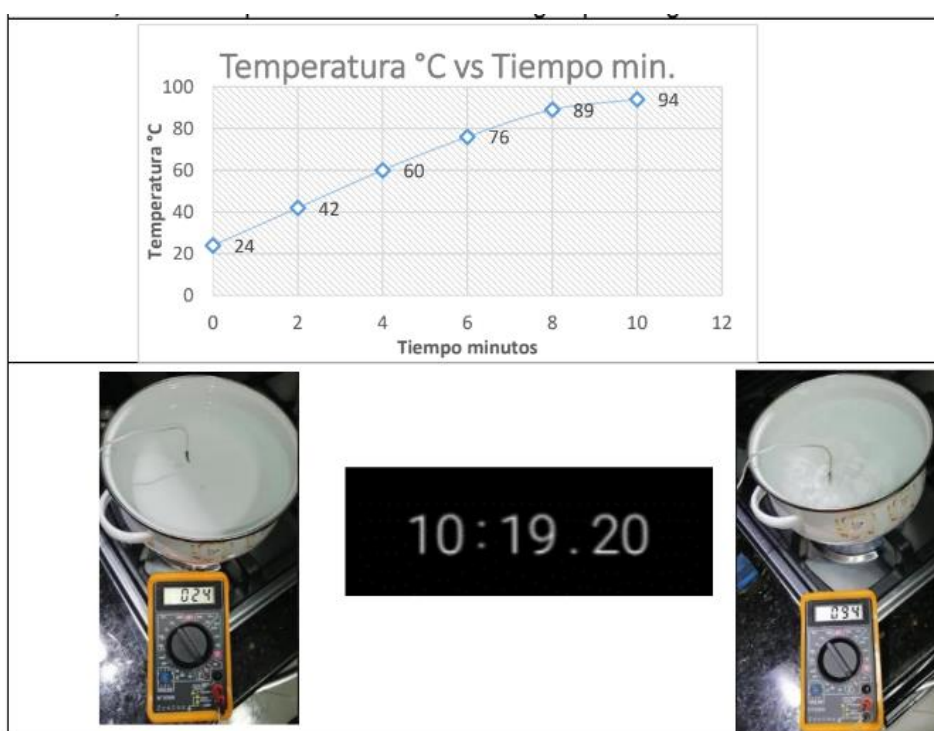


Figura 9. Prueba experimental ebullición de agua en parrilla de gas natural residencial.

Pruebas de arranque en frío

Se llevaron a cabo diversas mediciones y análisis para evaluar la eficiencia térmica de la estufa, así como para determinar la producción de gases contaminantes, como el monóxido de carbono (CO) y el material particulado (MP), y de gases de efecto invernadero, como el dióxido de carbono (CO₂). Además, se registraron los perfiles de temperatura en las paredes de la estufa para identificar posibles fuentes de pérdida de energía. A partir de esta información, se propusieron mejoras en el diseño y la operación de la estufa de biomasa, con el objetivo de aumentar la eficiencia energética, reducir las emisiones contaminantes y optimizar su funcionamiento. En la sección dedicada a la metodología del proyecto, se

presenta un esquema simplificado que ilustra el montaje experimental y los equipos empleados en la adaptación de la prueba W.B.T 4.2.3.

Durante las pruebas, se realizaron algunas modificaciones físicas en la estufa, y estas variaciones se pueden apreciar en las figuras que se muestran a continuación. Además, en las pruebas se emplearon dos tipos de biomasa que son comunes en las zonas rurales del departamento de Antioquia, el pino y el eucalipto.

Variables medidas

El proceso de preparación de los elementos utilizados en las pruebas inicia con la organización de la biomasa, clasificándola por tipo, como madera de eucalipto y pino. A continuación, se determina la masa inicial mediante el uso de una báscula, además de medir su porcentaje de humedad. Para esto, se toman muestras de tres trozos diferentes de la biomasa seleccionada y se utiliza un medidor de humedad para obtener un promedio basado en las medidas obtenidas.

En relación con la variable 'ambiente', se registran cuatro variables diferentes: la temperatura ambiente, la temperatura del bulbo húmedo, la temperatura de rocío y la humedad relativa. Estos datos se obtuvieron mediante el uso de un contador de partículas.

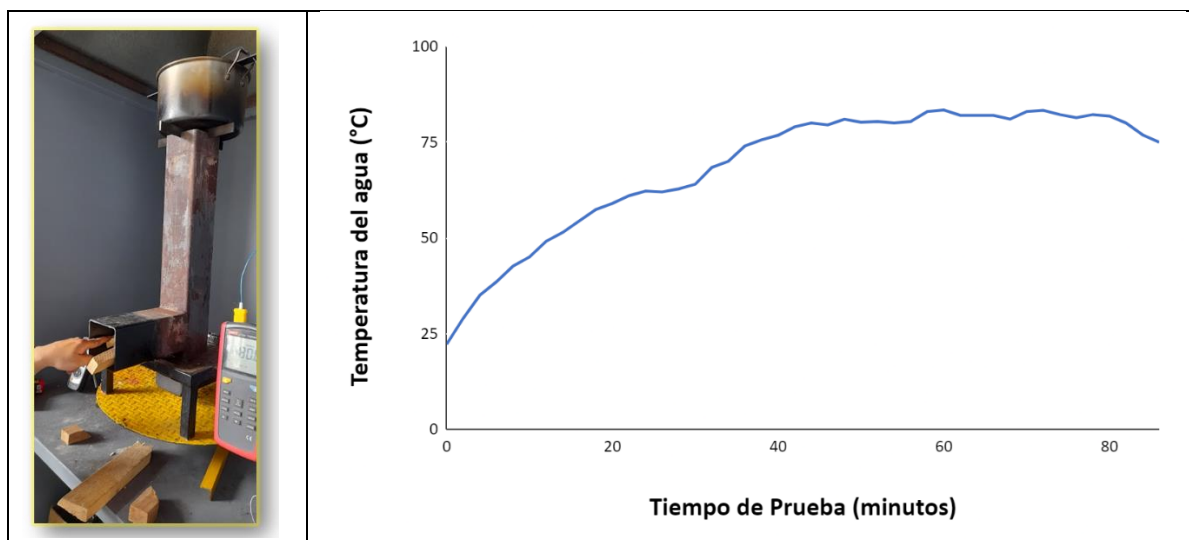
Otra de las variables identificadas y medidas al inicio de cada prueba son las relacionadas con la olla. Se registra el peso de la olla sola, de la olla con agua, de la olla con agua y del soporte de la termocupla. Después de realizar las pruebas correspondientes, se vuelve a pesar la olla con el agua para determinar la cantidad de agua evaporada, calculando la diferencia con la medida inicial.

A lo largo de las pruebas, se registra la temperatura del agua utilizando un termopar conectado a un termómetro digital. Además, se monitorea la temperatura de la pared de la estufa mediante un termómetro infrarrojo de doble láser. Adicionalmente, en el transcurso de las pruebas, se emplea un analizador de gases de combustión para medir el porcentaje de O₂, el material particulado y la temperatura de los humos.

En el **Anexo 2** – Datos experimentales, se presentan las hojas de cálculo con los datos diligenciados con todas las variables medidas a lo largo de cada una de las pruebas.

Pruebas y Análisis Termográficos Realizados

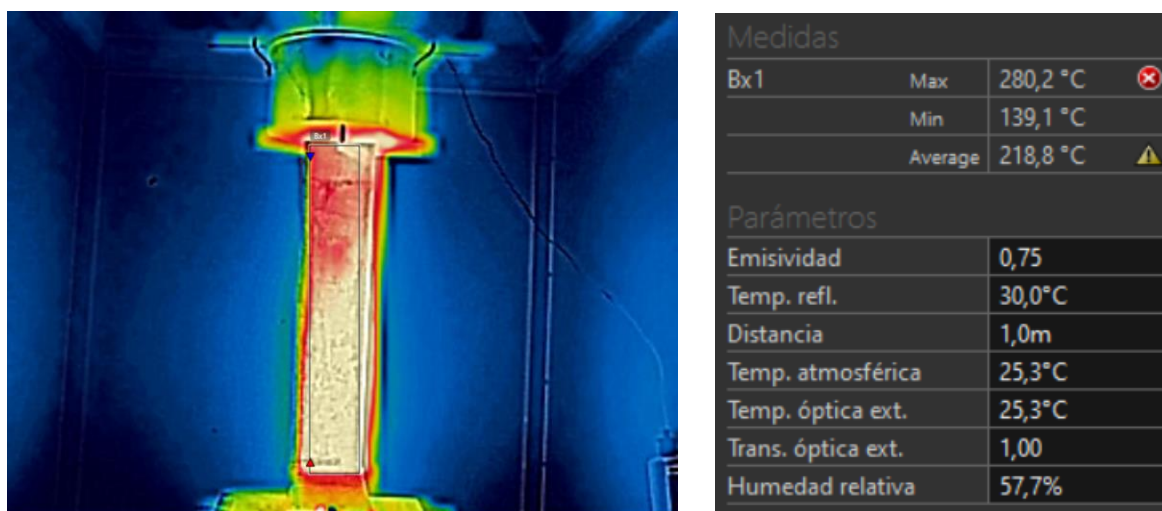
Estufa Larga Sin Aislamiento (E.L.S) – Madera de pino



Gráfica 1. Prueba en estufa larga sin aislamiento

Durante la prueba original, que tuvo una duración de 1 hora y 26 minutos, se consumió completamente la cantidad de biomasa asignada. Durante este periodo, la temperatura máxima alcanzada fue de 83,3°C. Al emplear una cámara termográfica, pudimos observar zonas de alta temperatura en la parte inferior de la estufa, mientras que en la parte superior de la pared de la chimenea hubo una presencia mínima de calor debido a su altura. Este factor resultó crucial, ya que impidió que la temperatura del agua alcanzara el punto de ebullición. Las pérdidas de calor por convección se explican por la dispersión del calor a lo largo del cuello de la estufa.

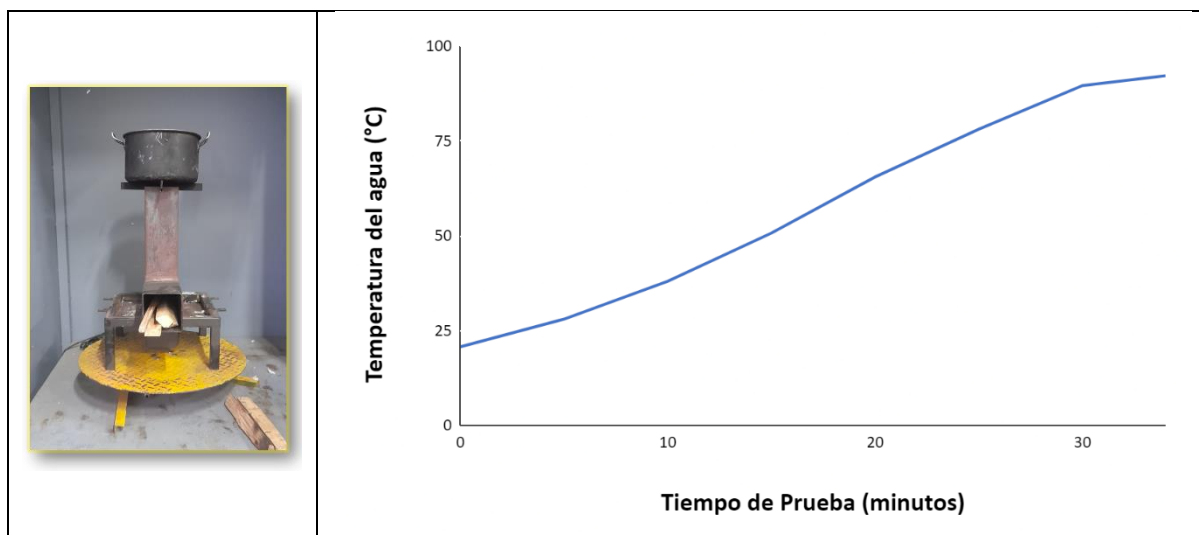
Análisis Termográfico



Fotografía 1. Termografía de la prueba en estufa larga sin aislamiento.

Al examinar las imágenes capturadas con la cámara termográfica, se aprecia que, en la sección marcada en la pared de la chimenea, la temperatura supera el rango de medición permitido por la cámara, establecido en $280,2^{\circ}\text{C}$. Esta temperatura máxima se registra en la zona más cercana a la quema de biomasa, mientras que la temperatura mínima, de $139,1^{\circ}\text{C}$, corresponde a la región de la chimenea más próxima a la olla. La significativa disparidad de temperaturas, influenciada por la altura del cuello de la chimenea, y el hecho de que la prueba no lograra alcanzar la temperatura de ebullición del agua, condujo a considerar una estrategia de mejora: acortar la longitud del cuello de la chimenea.

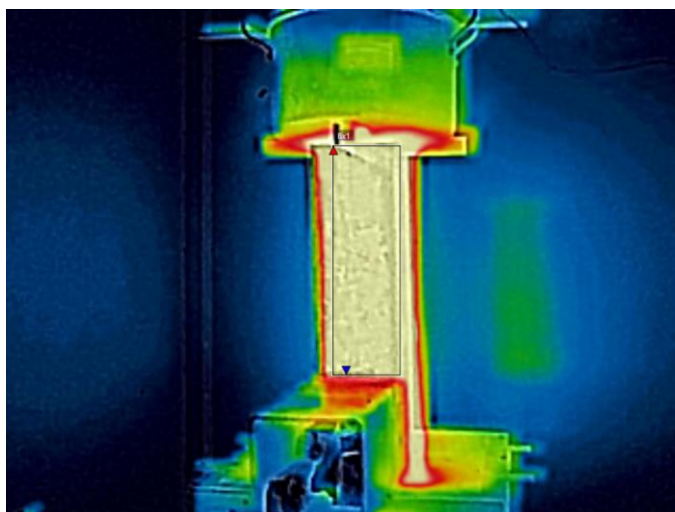
Estufa Corta Sin Aislamiento (E.C.S) – Madera de Pino



Gráfica 2. Prueba en estufa corta sin aislamiento.

Basándonos en los resultados obtenidos en la prueba previa, decidimos implementar una estrategia de mejora: reducir la altura del cuello de la chimenea. El objetivo era alcanzar la temperatura de ebullición del agua dentro de la olla. Durante la prueba con la estufa modificada, utilizamos la cámara termográfica y observamos una distribución leve de la temperatura superficial a lo largo de la pared del cuello de la estufa. La duración de la prueba fue de 34 minutos, y logramos exitosamente llevar el agua dentro de la olla a la temperatura de ebullición.

Análisis Termográfico

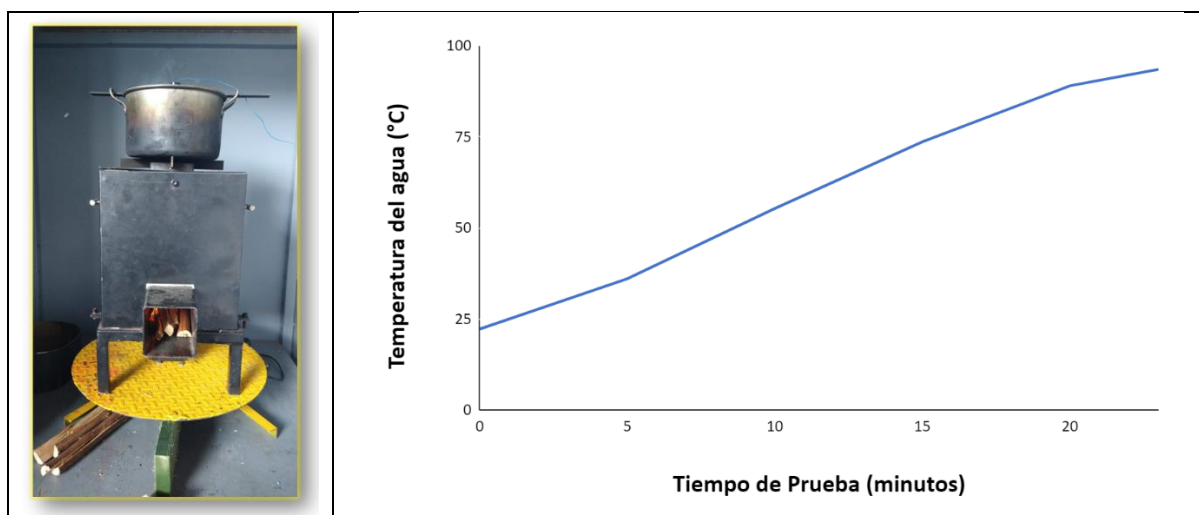


Medidas			
Bx1	Max	280,2 °C	⊗
	Min	257,3 °C	⚠
	Average	280,0 °C	⚠
Parámetros			
Emisividad	0,75		
Temp. refl.	30,0°C		
Distancia	1,0m		
Temp. atmosférica	24,6°C		
Temp. óptica ext.	24,6°C		
Trans. óptica ext.	1,00		
Humedad relativa	58,7%		

Fotografía 2. Termografía de la prueba en estufa corta sin aislamiento.

Al examinar las imágenes capturadas con la cámara termográfica, se aprecia una mejora significativa en la sección indicada en la pared de la chimenea, en relación con la diferencia entre las temperaturas máxima y mínima. Aunque la medición de la temperatura máxima continúa superando el rango permitido por la cámara, establecido en 280,2°C, la temperatura mínima aumentó a 257,3°C, indicando una mejor retención del calor y una disminución en las pérdidas a lo largo del cuerpo de la chimenea. Dado el riesgo potencialmente elevado para la integridad del operario debido a los niveles tan altos de temperatura, se propuso una nueva estrategia: incorporar algún tipo de aislamiento térmico para reducir el riesgo de quemaduras.

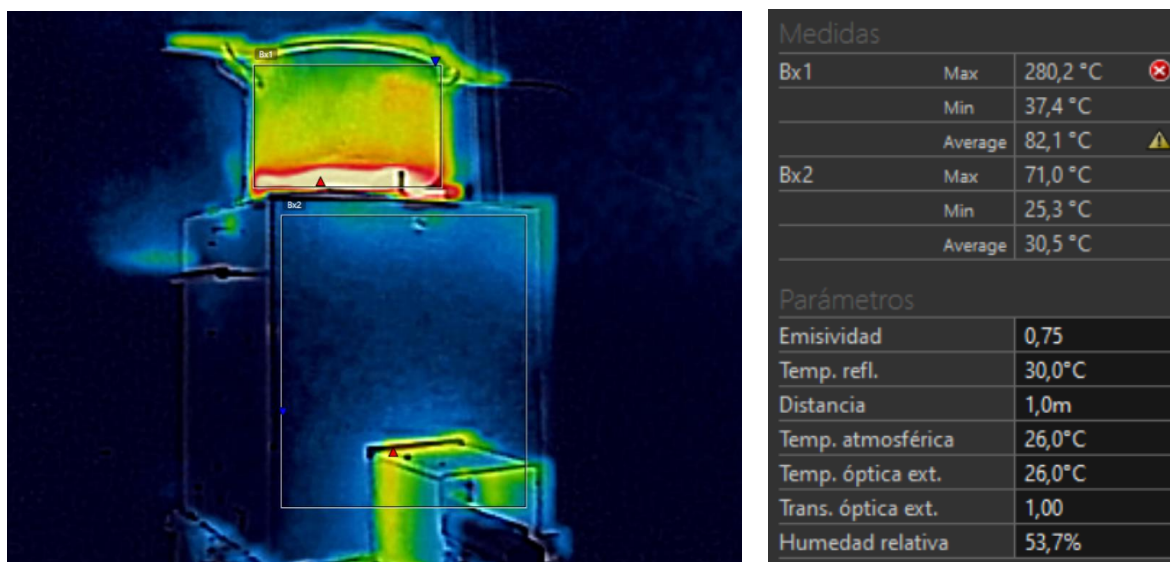
Estufa Corta Aislada (E.C.A) – Madera de Pino



Gráfica 3. Prueba en estufa corta aislada.

Como parte de una nueva estrategia de mejora, se propuso aislar la chimenea con el objetivo de reducir las pérdidas de temperatura por convección, que surgían al exponer la estufa al ambiente circundante. Para implementar esta mejora, se revistieron las paredes de la estufa con fibra mineral y se aplicó un armazón para asegurar la fijación de esta fibra, contribuyendo de manera efectiva al aislamiento de las condiciones ambientales. La prueba, realizada durante un periodo de 23 minutos, arrojó resultados exitosos al lograr elevar la temperatura del agua dentro de la olla hasta el punto de ebullición.

Análisis Termográfico

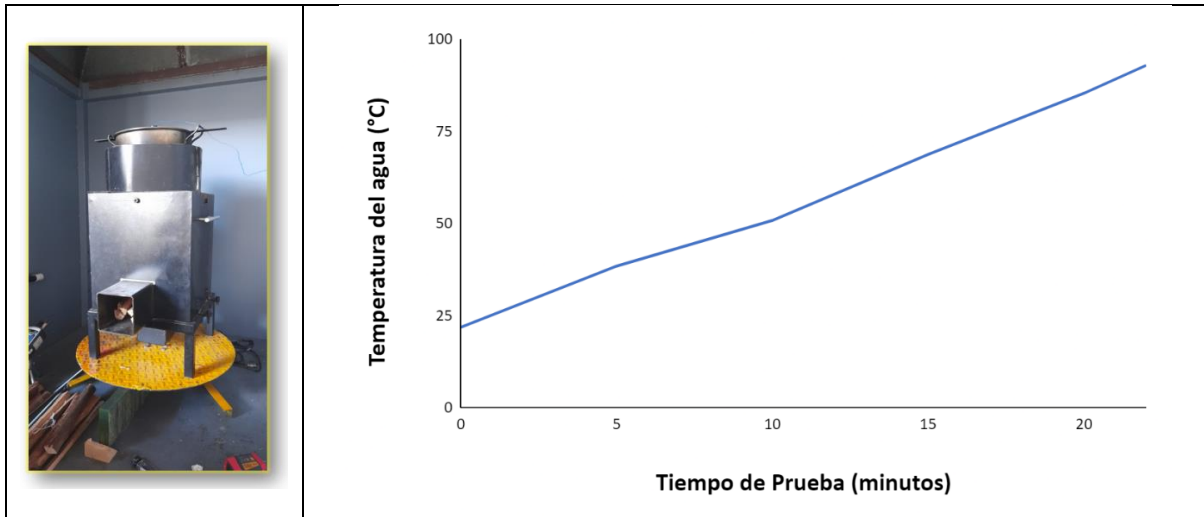


Fotografía 3. Termografía de la prueba en estufa corta aislada.

En el análisis de las imágenes capturadas con la cámara termográfica, se identificaron dos secciones clave: la olla y el armazón con el aislante térmico. En la sección de la olla, se observa una temperatura máxima que supera el rango permitido por la cámara, alcanzando los 280,2°C. Esta temperatura elevada se localiza en la parte inferior de la olla, donde está en contacto directo con los gases de combustión generados por la quema de biomasa, mientras que la temperatura mínima en la olla es de 37,4°C.

En la sección del armazón con el aislante térmico, la temperatura máxima registrada es de 71°C, ubicada en el área de alimentación y quema de la biomasa, mientras que la temperatura mínima, situada directamente en el armazón, es de 25,3°C. Esto representa una reducción significativa del riesgo de quemaduras para el operario en comparación con la situación anterior a la incorporación del aislante térmico. Como estrategia adicional de mejora, se propuso colocar una cubierta alrededor de la olla para potenciar la eficiencia térmica de la estufa mediante la captación de la temperatura de los humos generados durante la quema de biomasa.

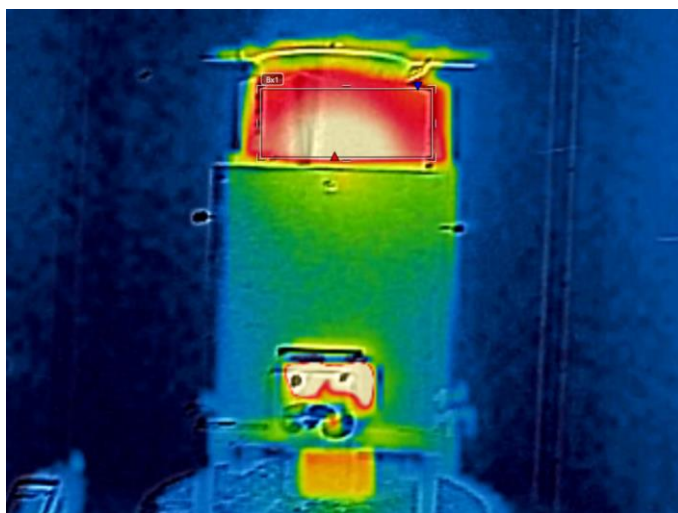
Estufa Corta Aislada con Cubierta (E.C.A.C) – Madera de Pino



Gráfica 4. Prueba en estufa larga aislada con cubierta.

Al observar que los gases de emisión durante las pruebas no se concentraban en una zona específica, sino que se dispersaban en diversas direcciones, se tomó la decisión de instalar una cubierta alrededor de la olla. El objetivo era controlar la dirección en la que los gases se emitían al ambiente. Al implementar esta medida, también se notó, a través de la cámara termográfica, que la cubierta contribuía a concentrar un poco más el calor dirigido hacia la olla. La prueba se llevó a cabo durante 22 minutos, logrando finalmente que el agua dentro de la olla alcanzara la temperatura de ebullición.

Análisis Termográfico

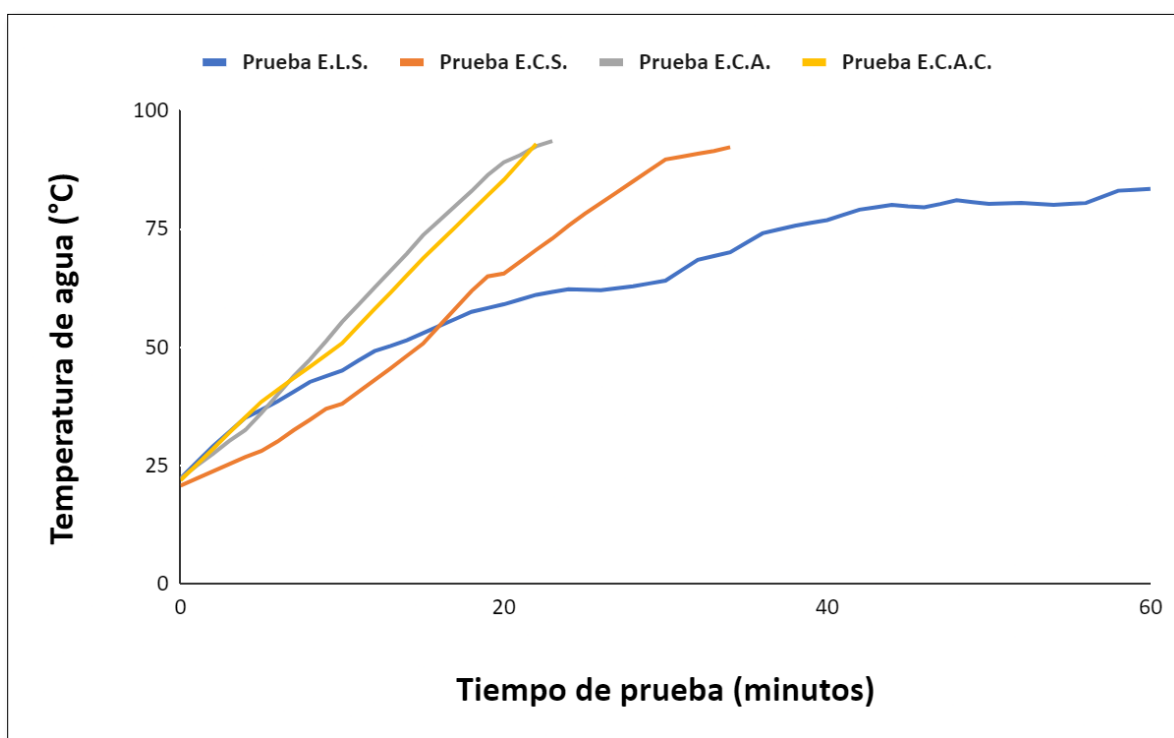


Medidas		
Bx1	Max	107,0 °C
	Min	73,4 °C
	Average	89,4 °C
Parámetros		
Emisividad	0,75	
Temp. refl.	20,0°C	
Distancia	1,0m	
Temp. atmosférica	27,7°C	
Temp. óptica ext.	27,7°C	
Trans. óptica ext.	1,00	
Humedad relativa	45,4%	

Fotografía 4. Termografía de la prueba en estufa larga aislada con cubierta.

Al analizar las imágenes capturadas con la cámara termográfica, se destaca la cubierta colocada alrededor de la olla. Se observa una temperatura máxima de 107°C en la zona más cercana al punto donde la olla entra en contacto con el calor generado por la quema de biomasa en la chimenea. Mientras tanto, la temperatura mínima, de 73,4°C, se registra en la parte superior de la cubierta, donde recibe menos transferencia de calor.

La **Gráfica 5** proporciona un comparativo de las cinco pruebas analizadas, mostrando la evolución del tiempo necesario para calentar el agua hasta el punto de ebullición. En cada prueba, se observa una reducción en el tiempo requerido para alcanzar la temperatura de ebullición, resultado de las diversas modificaciones implementadas en la estufa.



Gráfica 5. Comparativo de pruebas realizadas.

Cálculos

Los resultados de las pruebas realizadas en la estufa tipo cohete, tras las modificaciones efectuadas, revelan varios aspectos significativos: el recorte en la chimenea ha mejorado la distribución del calor generado por la quema del combustible (biomasa), evidenciando una mayor retención del calor y una disminución de las pérdidas a lo largo del cuerpo de la chimenea. La implementación del aislante ha contribuido a reducir las pérdidas de radiación al ambiente, y la instalación de una cubierta adicional ha potenciado la eficiencia térmica de manera notable. La afirmación anterior se respalda con los resultados derivados de los datos

recopilados durante diversas pruebas y replicaciones. En la **Tabla 8** se presentan los datos documentados de las variables principales seleccionadas para llevar a cabo los cálculos correspondientes.

Tabla 8. Resumen de pruebas con variables principales medidas.

Pruebas / Réplicas		Ambientales		Biomasa			Olla			Otra
		m.s.n.m. Ciudad	Temperatura ambiente [°C]	Masa inicial [g]	Masa final [g]	Humedad base seca [%]	Masa de la olla [g]	Masa inicial de la olla con agua [g]	Masa final de la olla con agua [g]	Emisividad
Pino	Estufa larga sin aislamiento – E.L.S	1 495	25,3	1 083	0	15,56	236	2 717	2 530	0,75
	Estufa corta sin aislamiento – E.C.S		24,6	1 028	556	13,44	237	2 723	2 483	0,75
	Estufa corta aislada – E.C.A		26	1 007	610	13,44	237	2 707	2 537	0,75
	Estufa corta aislada con cubierta – E.C.A.C		25	1 006	682	14,67	238	2 750	2 620	0,75
	Réplica E.C.A		23,5	1 007	624	14,44	238	2 803	2 638	0,75
	Réplica E.C.A.C		22,9	1 009	632	14,78	238	2 743	2 685	0,75
Eucalipto	Estufa corta aislada – E.C.A		24,1	1 004	333	16	238	2 636	2 320	0,75
	Estufa corta aislada con cubierta – E.C.A.C		27,7	1 010	564	15,78	238	2 773	2 571	0,75
	Réplica E.C.A		25,2	700	169	15,56	241	2 757	2 581	0,75
	Réplica E.C.A.C		24,2	1 024	566	15,56	241	2 787	2 617	0,75

Fuente: Construcción propia.

Los principales indicadores de rendimiento considerados en el análisis fueron: tasa de combustión, consumo específico de combustible, consumo específico de combustible corregido por temperatura, consumo específico de energía corregido por temperatura, eficiencia térmica y potencia de fuego. La **Tabla 9** exhibe los resultados obtenidos mediante la adaptación de la prueba WBT 4.2.3, 2014, destacando los indicadores mencionados previamente. (**Anexo 3** – Cálculos desarrollados en el proyecto)

Tabla 9. Resultados de la WBT 4.2.3, 2014 (Arranque en frío), obtenidos en pruebas (P) y réplicas (R)

Resultados de la WBT (Arranque en frío)						
Métrica	Unidad	Pino				
		E.C.S (P)	E.C.A (P)	E.C.A.C (P)	E.C.A (R)	E.C.A.C (R)
Tasa de combustión	kg/min	0,011	0,014	0,012	0,014	0,012
Consumo específico de combustible	kgf/kgw	0,150	0,128	0,102	0,117	0,113
Consumo específico de combustible corregido por temperatura	kgf/kgw	0,158	0,135	0,107	0,123	0,120
Consumo específico de energía corregido por temperatura	kJ/kg	3,021	2,582	2,058	2,361	2,295
Eficiencia térmica	%	17,966	18,499	21,251	19,765	16,088

Potencia de fuego		200,776	250,554	211,173	240,482	224,010
Métrica	Unidad	Eucalipto				
		E.C.A (P)	E.C.A.C (P)	E.C.A (R)	E.C.A.C (R)	
Tasa de combustión	kg/min	0,011	0,009	0,017	0,012	
Consumo específico de combustible	kgf/kgw	0,189	0,127	0,160	0,127	
Consumo específico de combustible corregido por temperatura	kgf/kgw	0,195	0,140	0,169	0,135	
Consumo específico de energía corregido por temperatura	kJ/kg	3,724	2,669	3,222	2,582	
Eficiencia térmica	%	16,680	19,181	14,943	18,368	
Potencia de fuego	kJ/min	195,147	164,566	301,677	215,745	

Fuente: Construcción propia.

La tabla anterior revela que las pruebas con mejor eficiencia térmica, tanto utilizando madera de pino como de eucalipto, son aquellas llevadas a cabo en la estufa modificada (estufa corta, aislada y con cubierta – E.C.A.C). En la prueba con pino, se logra una eficiencia térmica destacada del 21,251%, con un consumo específico de combustible de 0,102 kgf/kgw y una tasa de combustión de 0,012 kg/min. En la misma prueba, pero utilizando madera de eucalipto, se alcanza una eficiencia térmica de 19,181%, con un consumo específico de combustible de 0,127 kgf/kgw y una tasa de combustión de 0,009 kg/min.

Curiosamente, los valores presentados en la tabla anterior revelan una paradoja: la réplica realizada con madera de pino en la estufa modificada (estufa corta, aislada y con cubierta – E.C.A.C) presenta la menor eficiencia térmica, alcanzando un 16,088%, con un consumo específico de combustible de 0,113 kgf/kgw y una tasa de combustión idéntica. En el caso de la madera de eucalipto, la prueba con la menor eficiencia térmica corresponde a la réplica realizada en la estufa corta aislada – E.C.A, alcanzando una eficiencia térmica de 14,943%, con un consumo específico de combustible de 0,160 kgf/kgw y una tasa de combustión de 0,012 kg/min.

La **Gráfica 6** siguiente ilustra el desempeño obtenido en las pruebas y réplicas realizadas con madera de pino y eucalipto en relación con la métrica de eficiencia térmica.

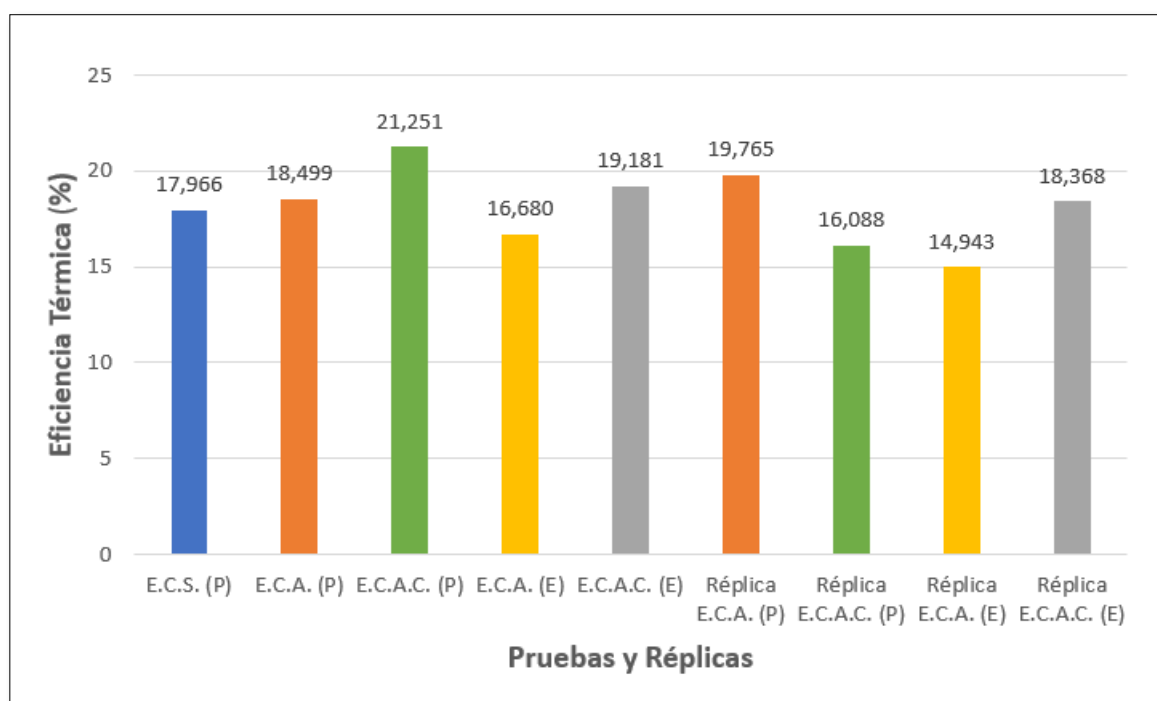


Gráfico 6. Desempeño de la eficiencia térmica obtenido en pruebas y réplicas

En cuanto a las emisiones contaminantes de la estufa, en la **Tabla 10** se presentan los datos obtenidos durante las pruebas realizadas con madera de pino y eucalipto. Se observan fluctuaciones en las emisiones de CO (ppm), atribuibles a la sensibilidad del equipo utilizado y a los momentos específicos de toma de medidas, ya que era necesario avivar la llama de la estufa y mantener el proceso de combustión. Es importante destacar que, con las modificaciones de aislamiento y cubierta, se logra dirigir los gases producidos hacia la campana de extracción, contribuyendo a minimizar la acumulación de gases en el entorno del laboratorio.

Tabla 10. Resultados registrados de emisiones de gases.

Madera	Prueba	CO [ppm]	O2 [% Vol.]
Pino	Estufa larga sin aislamiento – E.L.S	66,705	20,802
	Estufa corta sin aislamiento – E.C.S	64,625	20,575
	Estufa corta aislada – E.C.A	96,167	20,583
	Estufa corta aislada con cubierta – E.C.A.C	107	20,633
Eucalipto	Estufa corta aislada – E.C.A	137,6	20,63
	Estufa corta aislada con cubierta – E.C.A.C	81,375	20,675

Fuente: Construcción propia.

Conclusiones

- Los cálculos derivados de la adaptación de la prueba WBT 4.2.3, 2014 permitieron establecer mejoras porcentuales en la eficiencia térmica, resultado de las modificaciones implementadas en la estufa. Además, se observó un rendimiento mejorado en la tasa de combustión de la madera utilizada.
- La exposición directa de la estufa al exterior y la falta de aislamiento contribuyen significativamente a prolongar el proceso de ebullición del agua. Esta demora se debe a que gran parte del calor generado por la biomasa se disipa en pérdidas por convección y radiación al ambiente. Para mejorar la eficiencia, sería fundamental considerar medidas que minimicen estas pérdidas térmicas, optimizando así el aprovechamiento del calor en el proceso de ebullición.
- Los combustibles, especialmente aquellos con un contenido elevado de humedad, requieren un período prolongado para generar el calor esencial destinado a elevar la temperatura del agua hasta su punto de ebullición. Esta demora resulta de la necesidad de que la biomasa elimine primero la humedad presente en su composición antes de contribuir eficazmente con energía al sistema.
- Tras finalizar las pruebas y ajustar con éxito la prueba estándar WBT 4.2.3, se detectó una oportunidad de mejoramiento en el diseño de la estufa. Se propone modificar el ángulo del conducto de suministro de biomasa de 0° a 30° , con el objetivo de lograr una entrada de biomasa más eficiente y un mantenimiento constante del combustible. La modificación señalada se representa visualmente en la **Ilustración 3** siguiente. (**Anexo 4** – Propuesta con modificación final a la estufa).

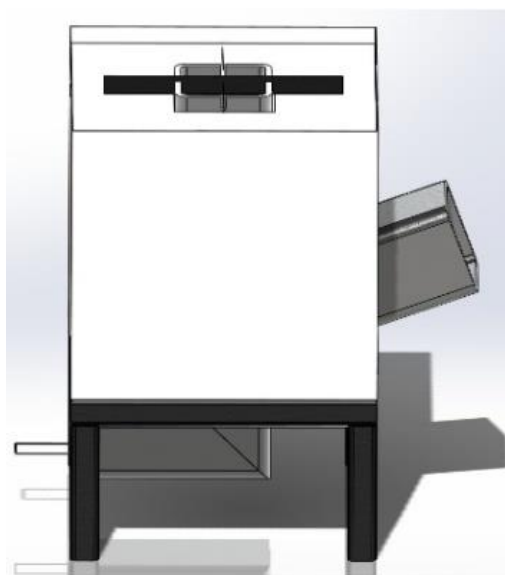


Ilustración 3. Propuesta estufa de biomasa con modificaciones señaladas.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1]. (2022). Balance de la Biomasa. Enciclopedia Medioambiental Ambientum. https://www.ambientum.com/enciclopedia_medioambiental/articulos-energia/balance_de_la_biomasa.asp
- [2]. Obi, Okey Francis; Okechukwu, Michael E.; Okongwu, Kingsley C. (2019). Energy and exergy efficiencies of four biomass cookstoves using wood chips. *Biofuels*, (), 1–10. doi:10.1080/17597269.2018.1554948
- [3]. Potencial energético subnacional y oportunidades de descarbonización en usos de energía final. Ministerio de Minas y Energía. Bogotá D.C – Colombia, 2023.
- [4]. Plan Nacional de sustitución de Leña y otros combustibles de uso ineficiente y altamente contaminantes para la cocción doméstica de alimentos. Tomo I Documento de formulación del plan. Subdirección de Hidrocarburos. Unidad de Planeación Minero Energética. Ministerio de Minas y Energía. Bogotá D.C – Colombia, Junio 2023.
- [5]. UPME. (2022c). Plan Nacional de Sustitución de Leña. Unidad de Planeación Mineroenergética.
- [6]. Diagnóstico base para la Transición Energética Justa. Colombia Potencia de la Vida. Ministerio de Minas y Energía. Bogotá D.C – Colombia, 2023.
- [7]. Estudio comparativo sobre la cocción rural en el sector residencial de Colombia, México y Perú. Coalición Clima y Aire Limpio. Elaborado por Microsol. Perú, 2018.
- [8]. Evans, Ianto., Jackson Leslie. Rocket mass heaters. Superefficient woodstoves you can build. Third edition. A Cob Cottage Company Publication, 2014. ISBN 0-9663738-4-7
- [9]. Clean Cooking Alliance. <https://cleancooking.org>
- [10]. Aprovecho Research Centre. <http://aprovecho.org>
- [11]. Lineamientos para un programa nacional de estufas eficientes para cocción con leña / Textos: Concha, María Cecilia; Pabón, Giovanni; Cerón Viviana. -- Bogotá, D.C.: Colombia. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2015. ISBN: 978-958-8901-08-4
- [12]. Fundación Natura. Estufas eficientes de leña como contribución a la calidad de vida, al uso eficiente de la energía y la reducción de emisiones de GEI en áreas rurales de Antioquia y Santander, Colombia: Documento de sistematización y Suplemento técnico /Gómez, Roberto León; Aristizábal, Javier Darío y Cárdenas, Luis Mario. Bogotá, D.C. Colombia, Fundación Natura. 2015. 130 p. ISBN: 978-958-8753-14-0.
- [13]. Delgado Buriticá, Gustavo A., Agudelo López, Antonio José. Diseño y construcción de una estufa ecoeficiente para la Fundación Kyrios. Universidad Tecnológica de Pereira. 2016.

- [14]. Corporación Autónoma Regional de las Cuencas de los Ríos Negro y Nare – CORNARE. Criterios Huertos y Estufas Leñeras Limpias, Ambiental y Socialmente Sostenibles – Huellas. 2014. [www.cornare.gov.co/sgj/misionales/Gestión proyectos/Anexos](http://www.cornare.gov.co/sgj/misionales/Gestión%20proyectos/Anexos)
- [15]. García Velásquez, Oscar Mauricio. Establecimiento de Bancos Endroenergéticos de la especie Yopo (*Anadenanthera Peregrina*) con el fin de mejorar la calidad de vida de 70 familias del Municipio de Mampiripan, Departamento del Meta. Universidad de los Llanos, Facultad de Ciencia Agrícolas y Recursos Naturales, Programa de Ingeniería Agronómica. Villavicencio, Meta. 2014
- [16]. 7° Boletín Estadístico Forestal. Colombia Potencia de la Vida. Marzo 2023.
- [17]. Pérez, J. F., & Osorio, L. F. (2014). Biomasa forestal como alternativa energética, análisis silvicultural, técnico y financiero de proyectos (Editorial). Medellín. 142 p. ISBN: 9789587146066
- [18]. Censo de industrias y empresas forestales ubicadas en los municipios de Medellín, Caldas, La Estrella, Sabaneta, Envigado, Itagüí, Bello, Girardota y Copacabana. Federación Antioqueña de la Madera. Corporación Autónoma Regional del Centro de Antioquia. Junio 2003.
- [19]. García Duque, Juan Diego. Guiral Zuluaga, Juan Pablo. Ortiz Palacio, Juan José. Propuesta de diseño de una estufa de biomasa para uso doméstico en comunidades vulnerables del Departamento de Antioquia. Trabajo de grado. Institución Universitaria Pascual Bravo. Facultad de Ingeniería. Departamento de Mecánica. 2021.

Otros documentos consultados:

- López Chalarca, Liliana Trinidad, et al. Aprovechamiento de residuos madereros: cuantificación, caracterización y valorización / Liliana Trinidad López Chalarca, Leidy Yaneth Vega Rodríguez, Carlos Daniel Rendón Colorado y Sebastián Tobón Rojas. 1.ª edición. Corporación Universitaria Remington, Medellín, Colombia. 2019. Servicio Nacional de Aprendizaje (Sena)
- Pérez, J., Barrera, R. & Ramírez, G. (2015). Integración de plantaciones forestales comerciales colombianas en conceptos de biorrefinería termoquímica: una revisión. *Colombia Forestal*, 18(2), 273-294.
- IEA (2023), Colombia 2023, IEA, Paris <https://www.iea.org/reports/colombia-2023>, License: CC BY 4.0
- Arias, J. V., Caydiid, M., & Omondi, P. A. (2018). Evaluación de la eficiencia térmica en estufas fabricadas y modificadas a biogás. *Red de Biodigestores para Latino América y el Caribe*, 8-13.

- Bosque, E. F. (Septiembre de 2018). Trabajo Fin de Grado. Empleo del Co-diseño para la mejora de la sostenibilidad en comunidades rurales: Desarrollo de cocinas mejoras en México. Madrid, Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales: Universidad Politécnica de Madrid.