EDUCACIÓN
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA

TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO

Tecnológico Nacional de México

Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico

Tesis de Maestría

Desarrollo de un quemador de biomasa para uso rural

presentada por

Ing. Ricardo Yhael García García

como requisito para la obtención del grado de

Maestro en Ciencias en Ingeniería

Directora de tesis

Dr. Alicia Martínez Rebollar

Codirector de tesis

Dr. Leonardo De Silva Muñoz

Cuernavaca, Morelos, México. 02 de octubre del 2026



Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico
Subdirección Académica

Cuernavaca Mor, 06/agosto/2026
Oficio No. SAC/236/2026
Asunto: Autorización de impresión de tesis

RICARDO YHAEL GARCÍA GARCÍA
CANDIDATO AL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA
P R E S E N T E

Por este conducto, tengo el agrado de comunicarle que el Comité Tutorial asignado a su trabajo de tesis titulado **"DESARROLLO DE UN QUEMADOR DE BIOMASA PARA USO RURAL"**, ha informado a esta Subdirección Académica, que están de acuerdo con el trabajo presentado. Por lo anterior, se le autoriza a que proceda con la impresión definitiva de su trabajo de tesis.

Esperando que el logro del mismo sea acorde con sus aspiraciones profesionales, reciba un cordial saludo.

A T E N T A M E N T E
Excelencia en Educación Tecnológica®
"Conocimiento y Tecnología al servicio de México"

EDUCACIÓN | TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO
CENTRO NACIONAL DE INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO TECNOLÓGICO
SUBDIRECCIÓN ACADÉMICA

CARLOS MANUEL ASTORGA ZARAGOZA
SUBDIRECTOR ACADÉMICO

c.c.p. Coordinación de Ciencias de la Ingeniería
Departamento de Servicios Escolares

CMAZ/lmz



2026 año de Margarita Maza

Educación
Secretaría de Educación Pública

TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO

Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico
Coordinación de Ciencias de la Ingeniería

Cuernavaca, Mor., 04/08/2026

CENIDET-AC-004-M14-OFICIO
Asunto: **Aceptación de documento de tesis**

DR. CARLOS MANUEL ASTORGA ZARAGOZA
SUBDIRECTOR ACADÉMICO
PRESENTE

Por este conducto, los integrantes de Comité Tutorial de la estudiante **RICARDO YHAEL GARCÍA GARCÍA**, con número de control M24CE053, de la Maestría en Ciencias de la Ingeniería, le informamos que hemos revisado el trabajo de tesis de grado titulado "**DESARROLLO DE UN QUEMADOR DE BIOMASA PARA USO RURAL**" y hemos encontrado que se han atendido todas las observaciones que se le indicaron, por lo que hemos acordado aceptar el documento de tesis y le solicitamos la autorización de impresión definitiva.

DRA. ALICIA MARTÍNEZ REBOLLAR
Director de tesis

DR. LEONARDO DE SILVA MUÑOZ
Codirector de Tesis

DR. HUGO ESTRADA ESQUIVEL
Revisor 1

DR. JOSÉ JASSÓN FLORES PRIETO
Revisor 2

C.c.p. Depto. Servicios Escolares.
Expediente / Estudiante
RAVM/ebn

06 AGO 2026

2026 año de Margarita Maza

cenidet
Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico
Interior internado S/N Col. Palmira
C.P. 62490, Cuernavaca, Morelos Tel. 01 (777) 3627770
e-mail: coord.ingenieria@cenidet.tecnm.mx| cenidet.tecnm.mx

Dedicatoria

A Dios por estar siempre conmigo.

A mi familia por su amor incondicional, su sacrificio constante y por haber sido el mayor impulso en mi formación profesional y personal.

A mi directora de tesis, Dra. Alicia Martínez Rebollar, y a mi codirector, Dr. Leonardo De Silva Muñoz, por confiar en mí y brindarme su valioso apoyo y orientación durante el desarrollo de esta tesis.

A las comunidades rurales de México, cuya realidad y necesidades inspiraron el desarrollo de este quemador de biomasa, con la esperanza de que este trabajo contribuya, aunque sea modestamente, a mejorar su calidad de vida.

Agradecimientos

A la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI), a través de la beca de posgrado otorgada, por el apoyo económico que permitió dedicarme de tiempo completo a esta investigación.

Al Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (CENIDET), por brindarme las instalaciones, el equipo especializado y el ambiente académico necesario para desarrollar este proyecto.

Deseo expresar mi más sincero agradecimiento a todas las personas e instituciones que hicieron posible la realización de esta tesis de maestría.

En primer lugar, agradezco a Dios por concederme la salud y la fortaleza para culminar esta importante etapa de mi vida.

A mi familia, especialmente a mis abuelos, padres y hermanos , por su comprensión, cariño y apoyo constante, incluso en los momentos en que este proyecto demandaba la mayor parte de mi tiempo.

A mi directora de tesis, Dra. Alicia Martínez Rebollar, y a mi codirector, Dr. Leonardo De Silva Muñoz, por su valiosa guía académica, sus consejos técnicos, su paciencia y el tiempo dedicado durante todo el proceso de diseño, construcción y evaluación del quemador de biomasa.

De manera especial, quiero agradecer al señor Mario Barbosa Márquez, el cual fue el responsable del taller donde se llevó a cabo el prototipo del quemador de biomasa, por su generosa ayuda en la construcción del prototipo. Sus ideas prácticas, su experiencia y los recursos que compartió fueron fundamentales para superar varios desafíos técnicos durante la fabricación del quemador de biomasa.

A los revisores Dr. José Jasson Flores Prieto y al Dr. Hugo Estrada Esquivel por sus valiosas observaciones y sugerencias que enriquecieron significativamente este trabajo.

A mis compañeros de maestría y amigos, por los momentos de colaboración, las discusiones técnicas y el apoyo mutuo en los periodos más exigentes.

Resumen

En México, muchas comunidades rurales dependen de la combustión ineficiente de leña y residuos orgánicos, lo que genera alto consumo de combustible, emisiones contaminantes y problemas de salud. El presente trabajo de maestría tuvo como objetivo desarrollar un quemador de biomasa semiautomatizado para uso rural, capaz de utilizar tanto carbón vegetal como pellets de madera.

Se realizó una primera propuesta de diseño de un quemador de biomasa en un software diseño asistido por computadora llamado SolidWorks considerando sus diseños, parámetros geométricos y de flujo de aire reportados en la literatura. La alimentación del combustible se realizó por un tornillo sin fin, con un control semiautomático con microcontrolador y el suministro de aire al quemador se realizó mediante un ventilador. Se realizaron seis pruebas experimentales de ebullición de agua (método de balance energético agua-combustible), variando el tipo de combustible (carbón y pellets de 400 g) y tres niveles de flujo de aire (5.4, 2.75 y 0.635 m^3/min).

Los resultados mostraron que los pellets de madera presentaron una mayor eficiencia térmica que el carbón vegetal, con valores promedio de 8.11 % y 3.80 %, respectivamente. La mayor eficiencia térmica se obtuvo fue de 10.88% se obtuvo con pellets a flujo de aire alto de 5.4 m^3/min. Aunque las eficiencias obtenidas son bajas en comparación con otros quemadores de biomasa reportados en la literatura.

El prototipo demostró ser funcional y permitió evaluar el comportamiento de ambos combustibles bajo diferentes condiciones de flujo de aire. El quemador desarrollado constituye una base experimental para el aprovechamiento de combustibles sólidos derivados de biomasa, aunque requiere mejoras en el aislamiento térmico y en el diseño de la cámara de combustión para incrementar su eficiencia.

Palabras clave: quemador de biomasa, pellets, eficiencia térmica, prototipo rural, control semiautomático.

Abstract

In Mexico, many rural communities rely on the inefficient combustion of firewood and organic waste, resulting in high fuel consumption, pollutant emissions, and health issues. This master's thesis aimed to develop a semi-automated biomass burner for rural use, capable of utilizing both charcoal and wood pellets.

An initial burner design was created using SolidWorks computer-aided design (CAD) software, incorporating design specifications, geometric parameters, and airflow characteristics found in the literature. Fuel was fed via an auger mechanism controlled by a microcontroller, while air was supplied to the burner by a fan. Six experimental water-boiling tests were conducted (using the water-fuel energy balance method), varying the fuel type (400 g of charcoal or pellets) and the airflow rate (5.4, 2.75, and 0.635 m^3/min).

The results indicated that wood pellets achieved higher thermal efficiency than charcoal, with average values of 8.11% and 3.80%, respectively. The highest thermal efficiency (10.88%) was achieved using pellets with a high airflow rate of 5.4 m^3/min, although these efficiency levels are low compared to other biomass burners reported in the literature.

The prototype proved functional and enabled the evaluation of both fuels' performance under varying airflow conditions. The developed burner serves as an experimental foundation for utilizing biomass-derived solid fuels, though improvements to thermal insulation and combustion chamber design are required to enhance its efficiency.

Keywords: biomass burner, pellets, thermal efficiency, rural prototype, semi-automatic control.

Contenido

Hojas oficiales i

Dedicatoria ii

Agradecimientos iii

Resumen iv

Abstract v

Capítulo 1. Introducción *1*

1.1. Motivación 2

1.2. Objetivos 2

1.3. Metodología de solución 3

1.4. Estructura de la tesis 3

Capítulo 2. Marco conceptual *5*

2.1. Biomasa 6

2.2. Quemador de biomasa 6

2.3. Componentes de un quemador de biomasa 7

Capítulo 3. Estado del Arte *9*

3.1. Panorama general del estado del arte 10

3.1.1. Primeros quemadores de biomasa 10

3.1.2. Innovaciones tecnológicas de los quemadores de biomasa 10

3.1.3. Nuevas aplicaciones y tecnologías en quemadores de biomasa 11

3.1.4. Estufas domésticas de biomasa: eficiencia y emisiones 12

3.1.5. Características técnicas y comparativas de eficiencia térmica 12

3.1.6. Limitaciones y desafíos en la comercialización de quemadores de biomasa 13

Capítulo 4. Desarrollo del quemador de biomasa *16*

4.1. Diseño del quemador de biomasa 17

4.1.1. Diseño del cuerpo principal del quemador de biomasa 17

4.1.2. Diseño de la base del quemador de biomasa 19

4.1.3. Diseño del sistema de alimentación del quemador de biomasa 20

4.1.4. Diseño del ducto de aire primario del quemador de biomasa 21

4.1.5. Análisis del flujo de aire en el quemador de biomasa 22

4.1.6. Ensamble final del diseño del quemador de biomasa en SolidWorks 22

4.2. Desarrollo del quemador de biomasa 23

4.2.1. Ensamble del quemador de biomasa 24

4.2.2. Construcción del prototipo del quemador de biomasa 25

4.2.3. Costos generales de construcción del quemador de biomasa 27

4.2.4. Desarrollo del cuerpo principal del quemador de biomasa 28

4.2.5. Integración del sistema de encendido y apagado del quemador de biomasa 29

4.2.6. Integración del sistema de control semiautomatizado del quemador de biomasa 30

4.2.7. Integración del sistema semiautomatizado de alimentación 32

4.2.8. Integración de la rejilla de la cámara de combustión del quemador de biomasa 35

4.2.9. Integración del sistema semiautomatizado de aire primario 35

Capítulo 5. Resultados *38*

5.1. Evaluación del quemador de biomasa 39

5.1.1. Método de balance energético agua-combustible 39
5.1.2. Prueba 1 Combustible carbón con un flujo máximo de aire 45
5.1.3. Prueba 2 Combustible carbón con un flujo medio de aire 45
5.1.4. Prueba 3 Combustible carbón con un flujo de aire bajo 46
5.1.5. Prueba 4 combustible pellets de madera con un flujo máximo de aire 47
5.1.6. Prueba 5 combustible pellets de madera con un flujo medio de aire 48
5.1.7. Prueba 6 Combustible pellets de madera con un flujo bajo de aire 49

5.2 Desempeño del quemador de biomasa 50

5.2.1. Potencia térmica vs flujo de aire 51
5.2.2. Potencia media carbón vs pellets 52
5.2.3. Eficiencia térmica vs flujo de aire 53
5.2.4. Eficiencia térmica promedio carbón vs pellets 54
5.2.5. Temperatura de gases vs tiempo con flujo de aire máximo 55
5.2.6. Temperatura de gases vs tiempo con flujo de aire medio 56
5.2.7. Temperatura de gases vs tiempo con flujo de aire bajo 57
5.2.8. Comparación de los combustibles y los distintos flujos de aire 58
5.2.9. Incertidumbre del sensor termopar tipo k y promedios de eficiencias térmicas 59
5.2.10. Resultados globales del desempeño térmico del quemador de biomasa 61

Capítulo 6. Conclusiones y trabajos futuros *62*

6.1. Conclusiones 63

6.2. Trabajos futuros 64

6.3. Logros obtenidos 64

Referencias *65*

Lista de figuras

Figura 1. Metodología de solución para el desarrollo de un quemador de biomasa. 3
Figura 2. Pellets de madera (Ruiz,2011). 6
Figura 3. Quemador de biomasa (Guevara, 2013). 7
Figura 4. Clasificación por el flujo de aire primario (Ruiz, 2011) 8
Figura 5. Altura y diámetro del quemador de biomasa. 18
Figura 6. Medidas de los diámetros laterales del quemador de biomasa. 18
Figura 7. Medidas del largo y ancho de la base del quemador de biomasa. 20
Figura 8. Base del quemador de biomasa 20
Figura 9. Diámetros y longitud del orificio superior del alimentador del quemador de biomasa. 21
Figura 10. Diámetro y medida del espesor del tubo de aire primario del quemador de biomasa 21
Figura 11. Tubo de ventilación de aire primario 22
Figura 12. Diseño del quemador de biomasa 23
Figura 13. Componentes del quemador de biomasa 24
Figura 14. Prototipo del quemador de biomasa para uso rural. 25
Figura 15. Cuerpo soldado del quemador de biomasa. 29
Figura 16. Diagrama DTI del quemador de biomasa 30
Figura 17. Tablero mecatrónico 31
Figura 18. Sistema de alimentación del quemador de biomasa. 33
Figura 19. Tornillo sin fin 34
Figura 20. Vista superior del tornillo sin fin ya implementado del quemador de biomasa. 35
Figura 21. Cámara de combustión y rejilla con orificios para la entrada de aire primario. 35
Figura 22.Sistema de ventilación de aire primario del quemador de biomasa. 36
Figura 23. Quemador de biomasa ya preparado para las pruebas 39
Figura 24. Temperatura inicial y máxima del agua de la prueba 1 45
Figura 25. Temperatura inicial y máxima del agua de la prueba 2 46
Figura 26. Temperatura inicial y máxima del agua de la prueba 3 47
Figura 27. Temperatura inicial y máxima del agua de la prueba 4 48
Figura 28. Temperatura inicial y máxima del agua de la prueba 5 49
Figura 29. Temperatura inicial y máxima del agua de la prueba 6 50
Figura 30. Potencia térmica vs flujo de aire 52
Figura 31. Potencia media de carbón vs pellets 53
Figura 32. Eficiencia térmica vs flujo de aire 54
Figura 33. Comparación de eficiencia térmica promedio 55
Figura 34. Comparación de la temperatura de gases vs tiempo a 5.4m³/min. 56
Figura 35. Comparación de la temperatura de gases vs tiempo a 2.75m³/min. 57
Figura 36. Comparación de la temperatura de gases vs tiempo a 0.635m³/min. 58
Figura 37. Comparación de la temperatura de los gases de salida 59

Lista de tablas

Tabla 1.Comparativa de algunos quemadores de biomasa y su implementación rural. 11
Tabla 2. Características y eficiencia de estufas y quemadores de biomasa para cocción. 12
Tabla 3. Limitaciones de producción a gran escala de quemadores de biomasa. 14
Tabla 4. Parámetros de diseño 17
Tabla 5. Material estructural para el cuerpo del quemador de biomasa. 25
Tabla 6. Material para el sistema de ventilación del quemador de biomasa. 26
Tabla 7. Material para el sistema de alimentación del quemador de biomasa. 26
Tabla 8. Material para el sistema electrónico y de control del quemador de biomasa 26
Tabla 9. Costos generales aproximados del desarrollo del quemador de biomasa 28
Tabla 10. Componentes y funciones del sistema de control del quemador de biomasa. 31
Tabla 11. Aporte de artículos que hablan del método de calentamiento de agua 40
Tabla 12. Variables ocupadas en las pruebas 42
Tabla 13. Constantes utilizadas en la prueba 1 45
Tabla 14. Constantes utilizadas en la prueba 2 46
Tabla 15. Constantes utilizadas en la prueba 3 47
Tabla 16. Constantes utilizadas en la prueba 4 48
Tabla 17. Constantes utilizadas en la prueba 5 49
Tabla 18. Constantes utilizadas en la prueba 6 50
Tabla 19. Resultados de las 6 pruebas del desempeño y eficiencia térmica. 51

Capítulo 1. Introducción

En este capítulo se contextualiza la problemática que enfrentan las comunidades rurales respecto al uso ineficiente de combustibles tradicionales y al desaprovechamiento de residuos orgánicos. Se describe la motivación del proyecto, los objetivos generales y específicos, así como la justificación de la investigación. Finalmente, se explica la estructura de la tesis, mostrando cómo se abordan progresivamente los temas desde la fundamentación teórica hasta los resultados y conclusiones.

1.1. Motivación

En muchas comunidades rurales, los residuos orgánicos generados por actividades agrícolas, ganaderas y domésticas son desaprovechados, siendo comúnmente desechados sin un tratamiento adecuado. Esta situación representa no solo una pérdida de recursos energéticos potenciales, sino también un problema ambiental, ya que dichos residuos contribuyen a la emisión de gases de efecto invernadero y a la contaminación del entorno.

Paralelamente, la cocción de alimentos en estas comunidades se realiza, en su mayoría, utilizando leña como fuente principal de energía. Este uso tradicional, mediante fogones o estufas rudimentarias, es altamente ineficiente y produce humo y partículas contaminantes que afectan la salud de las personas, especialmente de mujeres y niños que pasan más tiempo en espacios cerrados.

En este contexto, el presente proyecto propone el diseño y desarrollo de un quemador de biomasa eficiente, destinado específicamente a la cocción de alimentos. Este dispositivo permitirá aprovechar tanto los residuos orgánicos como la leña disponible en la zona, mejorando el rendimiento energético y reduciendo significativamente las emisiones contaminantes. De este modo, se busca no solo dar un uso productivo a materiales actualmente desaprovechados, sino también contribuir a mejorar la calidad de vida y la sostenibilidad en comunidades rurales.

Este enfoque está alineado con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), en particular con el ODS 7, que promueve el acceso a energía asequible, segura y moderna, y con el ODS 13, que impulsa acciones concretas para combatir el cambio climático. A través de una solución tecnológica accesible y adaptada al contexto rural, este proyecto pretende aportar al desarrollo sostenible mediante la promoción de energías limpias y el aprovechamiento responsable de recursos locales.

1.2. Objetivos

El objetivo general es desarrollar un quemador de biomasa para el aprovechamiento de residuos orgánicos en zonas rurales, a partir de la comparación de algunas tecnologías existentes.

Para alcanzar este propósito general, se establecieron los siguientes objetivos específicos:

- Diseñar un quemador de biomasa para la combustión de distintos combustibles mediante un modelo geométrico utilizando software CAD.
- Implementar un sistema semiautomatizado para el sistema alimentación y el sistema de aire primario para regular la combustión utilizando sensores, actuadores y un microcontrolador.
- Evaluar el desempeño térmico del quemador para determinar su eficiencia, potencia y consumo específico mediante pruebas de ebullición y medición de temperaturas.

- Comparar el desempeño del quemador utilizando diferentes combustibles para identificar la alternativa más eficiente para uso rural mediante experimentación con carbón y pellets.

1.3. Metodología de solución

La metodología del presente trabajo se desarrolló en tres fases principales: diseño, desarrollo y evaluación del quemador de biomasa. En la primera fase se establecieron los parámetros de diseño y se realizó el modelado del sistema mediante herramientas de diseño asistido por computadora, definiendo los componentes principales del quemador. En la segunda fase se llevó a cabo la construcción del prototipo y la integración de los distintos sistemas que permiten su funcionamiento. Finalmente, en la tercera fase se realizaron pruebas de operación y evaluaciones de desempeño con el fin de verificar la funcionalidad y eficiencia del prototipo desarrollado.

La metodología de solución del diseño y desarrollo del quemador de biomasa se presenta en la Figura 1.

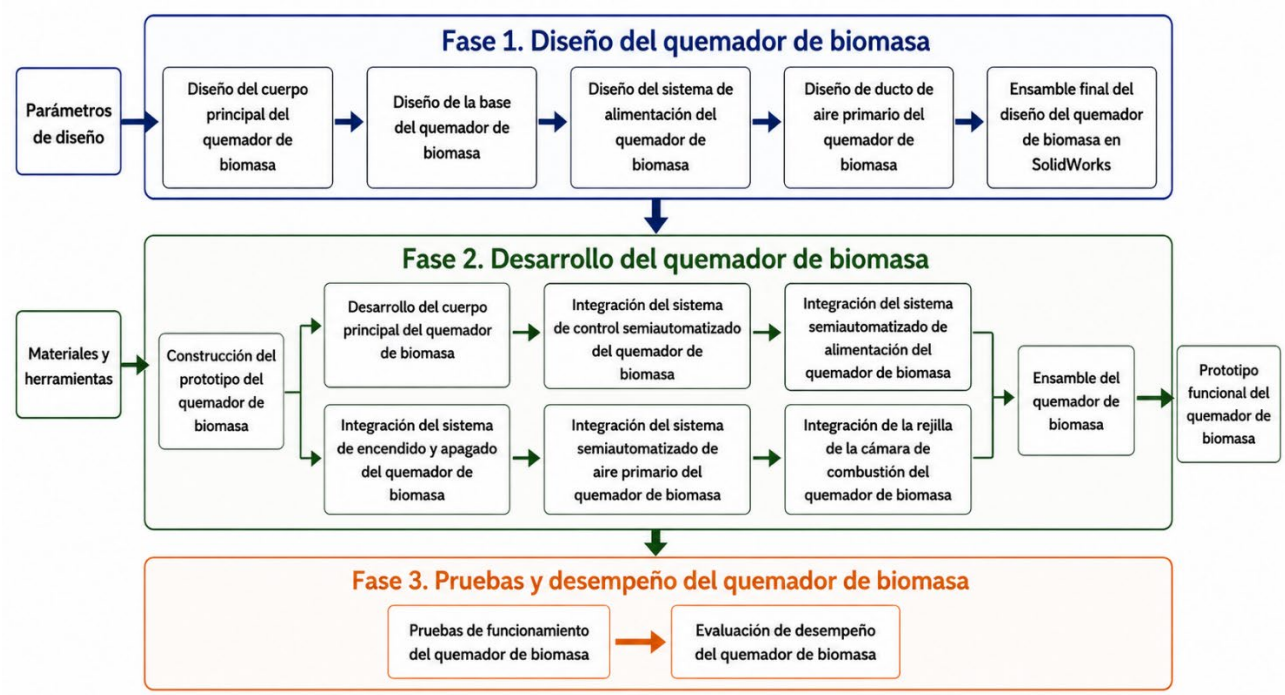

Figura 1. Metodología de solución para el desarrollo de un quemador de biomasa.

1.4. Estructura de la tesis

El presente documento de tesis se encuentra dividido en seis capítulos empezando por el capítulo 1 que fue la introducción:

- El capítulo 2 desarrolla el marco conceptual, exponiendo los conceptos fundamentales de biomasa, quemadores de biomasa y sus principales componentes.
- El capítulo 3 aborda el estado del arte, donde se realiza una revisión de la literatura nacional e internacional sobre innovaciones tecnológicas en quemadores de biomasa, su

eficiencia, emisiones y limitaciones para aplicaciones rurales.

- El capítulo 4 describe la metodología y experimentación desarrollada en tres fases principales: el diseño del quemador, la construcción del prototipo y las pruebas de desempeño térmico.
- El capítulo 5 expone los resultados obtenidos de las seis pruebas experimentales realizadas, así como el análisis de la potencia térmica, eficiencia térmica y temperatura de los gases con diferentes combustibles y flujos de aire.
- Capítulo 6 presenta las conclusiones generales, las recomendaciones de trabajos futuros y los logros alcanzados.

Capítulo 2. Marco conceptual

Este capítulo expone los conceptos fundamentales que sustentan el desarrollo del quemador de biomasa. Se definen que es la biomasa y los tipos de biomasa, su clasificación y principales características como recurso energético renovable. Asimismo, se explica que es un quemador de biomasa y funcionamiento, además se detallan sus componentes más relevantes, estableciendo la base técnica para comprender los diseños propuestos en capítulos posteriores.

2.1. Biomasa

La biomasa es la materia orgánica de origen animal o vegetal, los desechos orgánicos y residuos. Existen biomasas contaminadas: textiles, cartón, restos de animales. La biomasa se clasifica en dos grandes grupos: la biomasa residual y la natural. Se pueden encontrar en estado solidos que son los más comunes, los líquidos y gaseosos. Además, también se pueden encontrar en forma de pellets, huesos de aceituna, la cascara de aceituna y piñón y astillas.

Los pellets (ver Figura 2) son unos cilindros de madera, que sirven como combustible ecológico. Estos cilindros se hacen con los restos de madera que sobran al cortar los árboles; muestran la apariencia característica de los pellets de madera: cilindros homogéneos de diversos tamaños y tonalidades. Estos biocombustibles, obtenidos a partir de los restos de la industria maderera, constituyen una fuente de energía renovable y sostenible.



Figura 2. Pellets de madera (Ruiz,2011).

2.2. Quemador de biomasa

La combustión puede ser provocada por un quemador de biomasa, que es una herramienta muy eficaz. Los diseños de los quemadores están sujetos a variaciones según el tipo de combustible empleado. Es necesario disolver el combustible para mejorar su combustión y, ocasionalmente, es necesario calentarlo para mejorar su eficiencia. El combustible se atomiza mediante espacios que se llenan mediante un proceso que implica el uso de aire o gas comprimido. Los componentes principales de un quemador se agrupan según sus respectivas funciones.

El suministro de aire se realiza mediante turbina ventilador y difusor Artículos relacionados con el combustible: líneas de combustible, líneas de combustible, boquillas, válvulas solenoides El

transformador de encendido y el detector de llama son dos componentes del encendido de un quemador.

El quemador de biomasa (ver Figura 3) consta de elementos fundamentales como la cámara de combustión, donde se produce la reacción química. Otros componentes clave incluyen el ventilador, que suministra el aire necesario para la combustión, y la rejilla, que soporta el combustible.

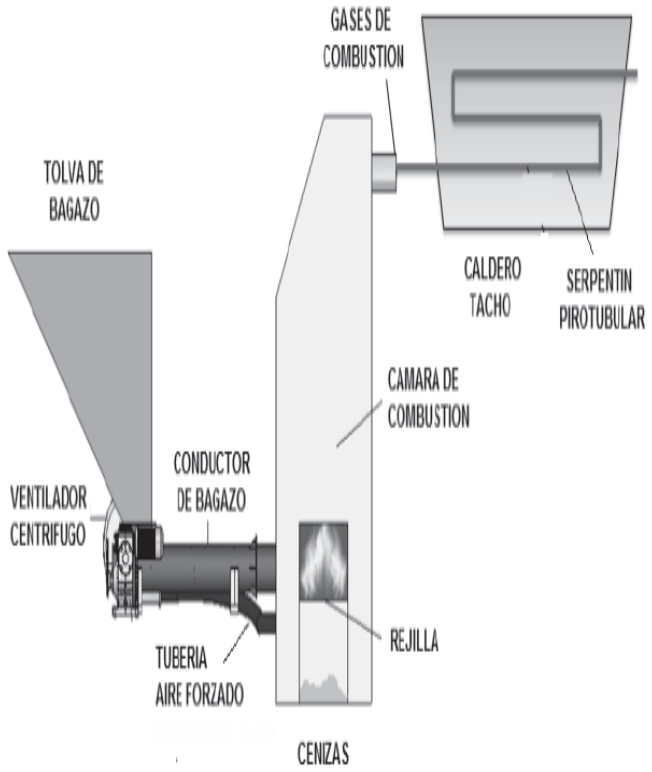

Figura 3. Quemador de biomasa (Guevara, 2013).

2.3. Componentes de un quemador de biomasa

Los componentes de un quemador de biomasa son las partes que integran el sistema en general y que son esenciales para el correcto funcionamiento del quemador, en las partes más importantes se encuentran: la cámara de combustión, ventilador, boquilla de aire primario, ducto de combustible, sensores y transportadores de combustible.

- **Cámara de combustión:** Es el lugar donde descansa el combustible y por lo general donde se produce la combustión
- **Boquilla de aire primario:** fue diseñado para subestimar la caída de presión, facilita una mayor uniformidad en la llama, mayor capacidad y una excelente relación en bajo y alto fuego.
- **Ducto de combustible:** Es el ducto donde pasa el combustible que hará combustión comúnmente con un transportador de combustible.
- **Ventilador:** El flujo de aire es donde se produce la combustión. El ventilador suministra el aire necesario para la combustión al implicar el ambiente en la cámara de combustión,

extrayéndolo del entorno y aumentando su presión dentro de la unidad de combustión. El ventilador es una parte muy importante por ejemplo la Figura 4 presenta una clasificación de los quemadores de biomasa basada en el flujo de aire primario. Esta clasificación es útil para entender cómo se distribuye el aire dentro del quemador y cómo influye esto en la eficiencia de la combustión.

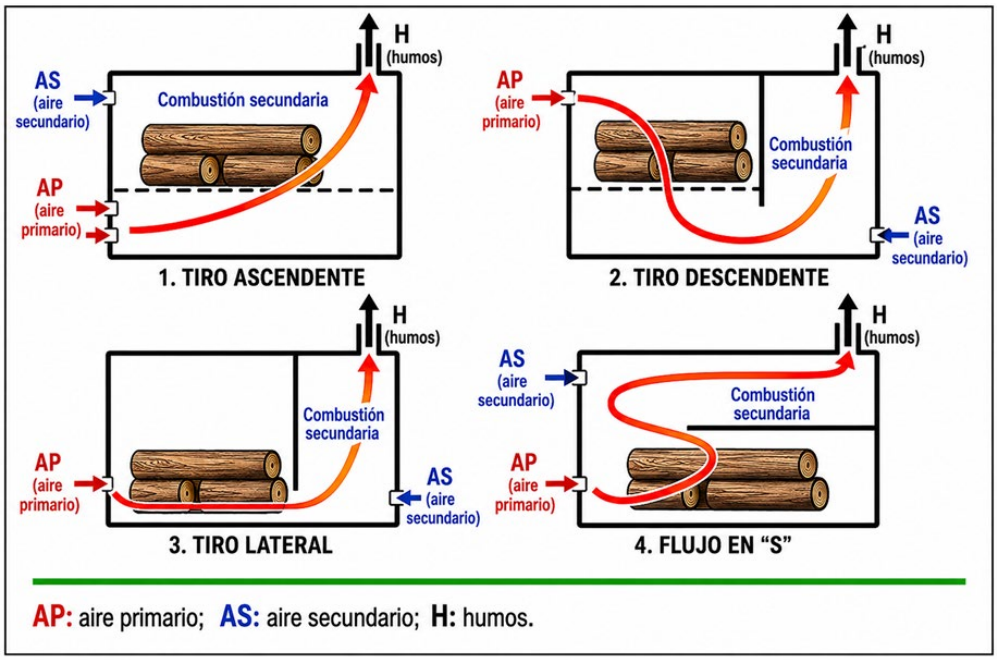

Figura 4. Clasificación por el flujo de aire primario (Ruiz, 2011).

- **Sensores:** Los sensores son herramientas fundamentales en la automatización y control de procesos. Se clasifican en analógicos y digitales, según el tipo de señal que producen. Los sensores analógicos miden magnitudes físicas de forma continua, mientras que los digitales detectan la presencia o ausencia de una condición.
- **Transportadores de combustible:** por lo general los quemadores de biomasa utilizan válvulas, vibradores o tornillo sin fin para transportar el combustible a la cámara de combustión de los quemadores de biomasa y son reguladas por un microcontrolador o controlador.

Capítulo 3. Estado del Arte

En este capítulo nos pone al tanto de la información que ya existía y lo más actual, en fuentes de investigación nacionales e internacionales, que nos servirá como punto de partida para el desarrollo del quemador de biomasa para uso rural. Primeramente se revisa la evolución de los quemadores de biomasa desde los primeros quemadores de biomasa y tendencias actuales en el diseño y operación de quemadores de biomasa a nivel nacional e internacional. Se presentan las innovaciones tecnológicas, avances en la reducción de emisiones y mejoras en eficiencia térmica. También se analizan estufas domésticas, sistemas híbridos, tecnologías emergentes y los principales retos para su comercialización.

3.1. Panorama general del estado del arte

El estudio de los quemadores de biomasa ha sido objeto de numerosas investigaciones en las últimas décadas, centradas en mejorar la eficiencia energética, reducir las emisiones contaminantes y adaptar los sistemas a las características locales de los recursos disponibles. A continuación, se presenta por secciones; los primeros quemadores de biomasa, las innovaciones tecnológicas de los quemadores de biomasa, las nuevas aplicaciones y tecnologías de los quemadores de biomasa , estufas domésticas de biomasa y sus eficiencias térmicas y contaminación, las características técnicas y comparativas de eficiencia térmica de los quemadores de biomasa además de las limitaciones y desafíos para la comercialización de los quemadores de biomasa.

3.1.1. Primeros quemadores de biomasa

Los primeros desarrollos en quemadores de biomasa se enfocaron en satisfacer necesidades rurales básicas. Investigaciones como las de Iriarte, García y Rodríguez (1995), Sheinbaum Pardo (1988) e Iriarte, Luque y Rodríguez (1999), marcaron un punto de partida importante al considerar tanto la eficiencia como la adaptabilidad del diseño.

Por ejemplo, el quemador propuesto por Iriarte et al. (1995) mostró buena adaptabilidad y eficiencia, aunque presentó limitaciones en su sistema de alimentación y el diseño del cenicero. Sheinbaum (1988), por su parte, documentó una reducción del 34% en el consumo de leña y un aumento del 10% en eficiencia en estufas adaptadas a comunidades purépechas, demostrando el impacto directo de estas tecnologías en la calidad de vida rural. Posteriormente, Iriarte et al. (1999) integraron el uso de energía solar con quemadores de aire indirecto, logrando un rendimiento del 67% en invernaderos.

En un enfoque más industrial, Basu, Cen y Jestin (2000) exploraron tecnologías como lechos fluidizados y rejillas móviles que no solo aumentaron la eficiencia, sino que también contribuyeron a la reducción de emisiones contaminantes.

3.1.2. Innovaciones tecnológicas de los quemadores de biomasa

Con el tiempo, el desarrollo tecnológico avanzó hacia el uso de modelado numérico y automatización. Yin et al. (2004) destacaron cómo la forma de las partículas de biomasa influye directamente en la eficiencia y emisiones, utilizando simulaciones para optimizar el proceso de combustión.

Míguez et al. (2012) analizaron sistemas europeos a pequeña escala, resaltando el rol de tecnologías como las sondas lambda y sistemas de control avanzado para mejorar el desempeño

de quemadores domésticos. A nivel regional, Guevara (2013) desarrolló un quemador para trapiches paneleros, mejorando la eficiencia del proceso de producción de panela, aunque enfrentó retos como el alto costo inicial y mantenimiento.

Estudios como el de Mirza, Ahmad y Majeed (2008) en Pakistán mostraron que la digestión anaeróbica y el uso de estufas eficientes pueden reducir la dependencia de combustibles fósiles. Manrique et al. (2020) identificaron barreras tecnológicas y logísticas en Argentina, proponiendo estrategias para fortalecer el desarrollo local.

Mathiesen, Lund y Connolly (2012) propusieron la integración de biomasa residual en sistemas 100% renovables. Tucki et al. (2019) demostraron mejoras significativas al emplear pellets y paja en sistemas de secado.

3.1.3. Nuevas aplicaciones y tecnologías en quemadores de biomasa

El desarrollo reciente ha explorado tecnologías como los quemadores tipo ciclón (Choe, 2021) y sistemas de trigeneración (Figaj, 2021), los cuales ofrecen alta eficiencia, pero enfrentan barreras económicas. Suyitno et al. (2022) desarrollaron un quemador multipropósito con intercambiador de calor, alcanzando eficiencias superiores al 50%, lo cual es prometedor para aplicaciones domésticas rurales.

La comparación de algunos los quemadores de biomasa con implementaciones exitosas por su uso rural y clasificación por el tipo de aplicación se muestran en la Tabla 1, la revisión de literatura muestra que los quemadores de biomasa han evolucionado hacia sistemas con mayor eficiencia y sostenibilidad, siendo adaptados para diferentes aplicaciones rurales.

Tabla 1.Comparativa de algunos quemadores de biomasa y su implementación rural.

Nombre del artículo	Descripción del trabajo	Ventajas	Desventajas	Principales Resultados	Clasificación
Quemador de residuos para la provisión de energía térmica al medio rural (Iriarte, A., García, V., & Rodríguez, C., 1995)	Proveer energía térmica al medio rural mediante un quemador de residuos.	Alta adaptabilidad ; enfoque en comunidades rurales.	Requiere optimización en alimentación y cierre de cenicero; limitada autonomía.	Funcionamiento adecuado con áreas de mejora en alimentación, cenicero, diseño del quemador y autonomía.	Estufa
Quemador de biomasa con flujo de aire indirecto (Iriarte, Luque y Rodríguez, 1999)	Diseñar quemador de biomasa con flujo de aire indirecto para invernaderos, integrando energía solar.	Alta eficiencia; bajo costo; integración amigable con el medio ambiente.	Limitaciones en diseño y geometría de aletas; uso específico para invernaderos.	Rendimiento del 67%; distribución uniforme del calor; bajo costo operativo.	Estufa
Diseño de quemador de biomasa para trapiches paneleros (Guevara, 2013)	Sistema de generación de calor para cada etapa de la producción de panela.	Mayor flexibilidad y eficiencia; adaptable a diferentes procesos.	Alta inversión inicial; complejidad en diseño y mantenimiento.	Mayor eficiencia y control de temperatura; reducción de emisiones; sistema modular	Caldero
Panorama de Tecnologías de bioenergía en Argentina (Manrique, 2020)	Superar barreras para quemadores de biomasa en Argentina;	Reducción de dependencia fósil; generación de empleo;	Baja industrialización; deficiente	Identificación de desafíos logísticos y de mercado; propuestas para	Híbrido

	fomentar tecnología local y reducir dependencia de importaciones.	mejora de eficiencia energética.	infraestructura logística	fomentar mercado local y mejorar logística.	
Diseño de un quemador de combustibles sólidos para estudios físicos y térmicos en la escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica (Lizana y Velasco, 2020)	Desarrollar quemador de biomasa sólida adaptable para intercambiadores de calor.	Adaptabilidad a intercambiadores de calor; eficiente y sostenible.	Costos de prototipo y selección adecuada de materiales.	Alta eficiencia y sostenibilidad; aprovechamiento de residuos orgánicos; sistema adaptable a diferentes biomasas.	Estufa

La clasificación refleja el tipo de aplicación principal del quemador (estufa para calor directo, caldero para procesos industriales, híbrido para combinaciones de sistemas).

3.1.4. Estufas domésticas de biomasa: eficiencia y emisiones

Kashyap et al. (2024) clasifican las estufas domésticas en tiro natural, tiro forzado y gasificación (TLUD). Las estufas tradicionales de tres piedras tienen una eficiencia baja (~13%) y emisiones elevadas. En contraste, las estufas TLUD alcanzan entre 26 y 37% de eficiencia y reducen notablemente las emisiones. Otros estudios como los de Panwar y Rathore (2008), y Obi et al. (2016), destacan la versatilidad de estas tecnologías frente a diferentes biocombustibles.

Rocket stoves y estufas plancha-type

Las estufas tipo "rocket" logran entre 14 y 28% de eficiencia, según Suresh et al. (2017), con menores emisiones de CO que estufas tradicionales. Las plancha-type permiten cocinar con varios recipientes y reducen significativamente las emisiones de PM2.5 (Medina et al., 2017; Kashyap et al., 2024).

Sistemas híbridos y cocinas con aire forzado

Estudios recientes como los de Kshirsagar y Kalamkar (2021), y Bentson et al. (2022), han mostrado que las cocinas híbridas mejoran la eficiencia y reducen emisiones, aunque a mayor costo. Caubel et al. (2018) y Deng et al. (2023) demostraron que ajustar el aire secundario puede reducir hasta un 90% las emisiones de partículas y CO.

3.1.5. Características técnicas y comparativas de eficiencia térmica

La siguiente Tabla 2 resume las principales características y resultados de estas estufas y quemadores, destacando su eficiencia térmica, ventajas y desventajas.

Tabla 2. Características y eficiencia de estufas y quemadores de biomasa para cocción.

Tipo	Eficiencia (%)	Ventajas	Desventajas principales	Fuente
Tres piedras	~13	Bajo costo inicial	Alta emisión de CO y PM; baja eficiencia	Kashyap et al.(2024); Sheinbaum(1988)
Rocket stove natural draft	14–28	Mejor mezcla aire-combustible	Limitada potencia y control	Pundle et al. (2019); Kashyap et al.(2024)

Rocket stove híbrido	~30–35	Mayor eficiencia; menores emisiones	Necesita ventilador para aire secundario	Kshirsagar y Kalamkar (2021)
Plancha-type	~25–30	Cocción multipot; bajas emisiones	Pesadas y menos portátiles	Medina et al. (2017); Kashyap et al. (2024)
TLUD (gasificación)	26–37	Combustión más limpia; menor PM2.5	Complejidad en la operación	Panwar y Rathore (2008); Obi et al. (2016)
Forced draft TLUD	~35	Preciso control de aire; menor CO y PM	Mayor costo por ventilador	Suresh et al. (2017); Kashyap et al. (2024)

3.1.6. Limitaciones y desafíos en la comercialización de quemadores de biomasa

El desarrollo de tecnologías para quemadores de biomasa ha enfrentado diversos obstáculos que han limitado su comercialización y adopción a gran escala. Aunque numerosos estudios han demostrado la viabilidad técnica de estos sistemas para el aprovechamiento energético de residuos agrícolas, forestales y agroindustriales, su transición desde el ámbito experimental hacia aplicaciones comerciales continúa siendo un desafío. Entre los principales factores identificados se encuentran las limitaciones asociadas al diseño de los equipos, los costos de fabricación, la variabilidad de los combustibles utilizados, el control de emisiones contaminantes y la necesidad de sistemas de control más robustos que garanticen una operación estable y segura.

Adicionalmente, la implementación de estas tecnologías suele verse afectada por factores económicos y sociales, tales como la disponibilidad de financiamiento para el escalamiento industrial, la falta de infraestructura productiva, la limitada aceptación por parte de los usuarios finales y la ausencia de estrategias efectivas de transferencia tecnológica. En muchos casos, los prototipos desarrollados alcanzan resultados prometedores a nivel de laboratorio; sin embargo, requieren procesos adicionales de validación y optimización antes de poder competir con tecnologías convencionales presentes en el mercado.

Por otra parte, las normativas ambientales y los estándares de calidad energética representan un reto adicional para los desarrolladores de quemadores de biomasa. El cumplimiento de requisitos relacionados con eficiencia térmica, seguridad operativa y reducción de emisiones implica la incorporación de mejoras tecnológicas que incrementan la complejidad y el costo de los sistemas. Como consecuencia, numerosos proyectos permanecen en etapas experimentales o de demostración, sin alcanzar niveles de producción comercial sostenibles.

Una comparación de los problemas abordados, objetivos planteados, resultados obtenidos, lugares de estudio y las razones que han dificultado su comercialización o utilización en aplicaciones prácticas se muestran en la Tabla 3. Esta información permite identificar tanto avances significativos como limitaciones técnicas, económicas y operativas que requieren atención en futuras investigaciones, así como áreas de oportunidad para el desarrollo de tecnologías de combustión de biomasa más eficientes, accesibles y competitivas.

Tabla 3. Limitaciones de producción a gran escala de quemadores de biomasa.

Referencia	Problema/Objetivo	Resultados Principales	Lugar del Estudio	Razón por la cual no se comercializó
Sheibum(1988)	Mejorar estufas de leña rurales para reducir humo y consumo.	Reducción de leña en 34%; incorporación de chimeneas.	Cheranástico, Michoacán, México.	Diseño con margen de mejora y limitada difusión comunitaria.
Rodríguez et al. (1999)	Crear quemador de biomasa para invernaderos con energía solar.	Eficiencia promedio de 67%; 306 MJ generados en 1h 20m.	Catamarca, Argentina.	Escala experimental y falta de infraestructura industrial.
Yin et al. (2004)	Mejorar diseño para combustión de biomasa en quemadores de pared.	Impacto de partículas no esféricas en eficiencia y mezcla de gases.	Universidad de Aalborg, Dinamarca.	Complejidad en adaptación y combustión incompleta de partículas grandes.
Guevara (2013)	Diseñar quemador eficiente para trapiches paneleros.	Reducción en consumo de bagazo y mayor eficiencia térmica.	Departamento de Nariño, Colombia.	Requiere una planta completa y ajustes técnicos a gran escala.
Zhang et al. (2014)	Determinar emisiones de metales en combustión de biomasa.	Mayor emisión de metales en pellets; factores como humedad afectan emisiones.	Afueras de Beijing, China.	Variabilidad en condiciones de combustión y control de emisiones.
Buchmayr et al. (2016)	Crear modelo CFD para quemadores pequeños de biomasa.	Reducción significativa en tiempo de cálculo con alta precisión.	Graz University of Technology, Austria.	Dependencia de condiciones experimentales específicas.
Patil et al. (2017)	Evaluar fogón con briquetas en áreas rurales.	Eficiencia térmica de 37.54%; recuperación de inversión en 2 años.	Akola, India.	Necesita validación comunitaria y escalamiento comercial.
Huscio & Kowalewski (2017)	Diseñar quemador moderno para calefacción central con biomasa.	Cumple normas PN-EN 303- 5:2012, bajas emisiones de CO y PM.	Universidad Tecnológica de Bialystok, Polonia.	En fase de pruebas precomerciales y validación a escala industrial.
Barroso et al. (2019)	Optimizar diseño de quemador de biomasa con modelo numérico	Compatible con combustibles agrícolas, bajas emisiones de NOx y partículas	Lucerne University, Suiza.	En fase de validación experimental y ajustes en escenarios reales.
Suyitno et al. (2022)	Desarrollar quemador multipropósito doméstico	Eficiencia global >50%; salida máxima de calor de 62.2 °C	Universidad Pancasila, Yakarta, Indonesia.	Falta de financiamiento externo para desarrollo completo del prototipo.

La falta de infraestructura logística y los altos costos iniciales son las razones más recurrentes que limitan la comercialización de estos quemadores.

A pesar de los avances significativos en diseño y tecnología, los quemadores de biomasa actuales presentan oportunidades de mejora, particularmente en eficiencia térmica, adaptabilidad y reducción de costos. Estos hallazgos respaldan la necesidad de desarrollar soluciones específicas para comunidades rurales, como el diseño propuesto en esta investigación.

Capítulo 4. Desarrollo del quemador de biomasa

En este capítulo lleva a cabo el desarrollo del quemador de biomasa siguiendo las fases de la metodología de solución (ver Figura 1) donde se empieza con el diseño del quemador de biomasa, el armado del quemador de biomasa y las pruebas de desempeño del quemador de biomasa.

4.1. Diseño del quemador de biomasa

En esta fase se realizó el diseño conceptual y estructural del quemador de biomasa a partir de los parámetros de diseño establecidos. Se desarrolló el modelado del cuerpo principal, la base del quemador, el sistema de alimentación de biomasa y el ducto de aire primario. Posteriormente, todos los componentes fueron integrados mediante software de diseño asistido por computadora para obtener el ensamblaje final del quemador, permitiendo visualizar la configuración completa del sistema antes de su construcción.

4.1.1. Diseño del cuerpo principal del quemador de biomasa

Se realizó el modelo tridimensional del cuerpo principal del quemador de biomasa, elaborado en SolidWorks. Se empezó a realizar por el cuerpo principal del quemador de biomasa.

Parámetros de diseño del quemador de biomasa basados en el estado del arte se puede observar en la siguiente Tabla 4:

Tabla 4. Parámetros de diseño

Característica	Diseño Seleccionado	Indicadores del Artículo	Justificación Comparativa
Forma y dimensiones	Cilíndrico con 220 mm de diámetro y longitud de 760mm	Dimensiones óptimas según la eficiencia térmica y el espacio disponible.	El diseño propuesto cumple con las dimensiones óptimas y la estabilidad térmica.
Cámara de combustión	Con rejilla para sostener material	Cama o placa que sostenga el material	Esta alineado a cámaras de combustión de quemadores eficientes descritos en artículos.
Material principal	Acero al carbón cédula 80, con opción de aislamiento térmico externo	Materiales resistentes a la temperatura para evitar deformaciones y mejorar la durabilidad.	El acero al carbón es una elección adecuada según las recomendaciones de artículos
Zona de cenizas	Debajo de la cámara de combustión	Un sistema de limpieza de cenizas mejora la eficiencia y la vida útil del quemador.	El diseño incluye un lugar para guardar cenizas, como sugieren los estudios.
Combustible	Madera triturada y carbón	El uso de biomasa triturada mejora la combustión y reduce residuos contaminantes.	Se prioriza la biomasa triturada para mejorar la combustión y reducir emisiones.
Control del aire	Tiro forzado en el aire primario con ventilador de 12VDC y aire secundario con tiro natural	La combinación de tiro forzado y natural es recomendada para una combustión más completa.	Se aplica la combinación de tiro forzado y natural para maximizar la eficiencia.
Sistema de encendido	No definido (manual o resistencias eléctricas)	El encendido automatizado mejora la eficiencia, pero el manual reduce costos.	Se evaluará la opción de encendido automático para equilibrar costos y eficiencia.

Cuerpo principal del quemador de biomasa

El cuerpo principal del quemador de biomasa es un componente que está construido a partir de un tubo de acero al carbón cédula 80 con un diámetro exterior de 220 mm, que funciona como cámara primaria de combustión. Este diseño CAD se utilizó como base para el corte de piezas,

la fabricación del prototipo en acero cédula 80 y la verificación de interferencias antes del ensamble final. La altura y diámetro del cuerpo del quemador se muestran en la Figura 5 y el quemador sin las medidas en la Figura 6:

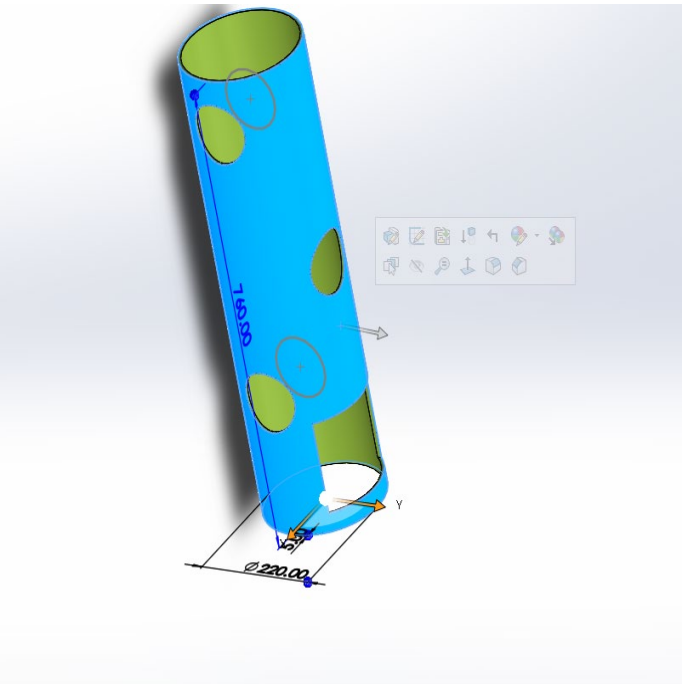

Figura 5. Altura y diámetro del quemador de biomasa.

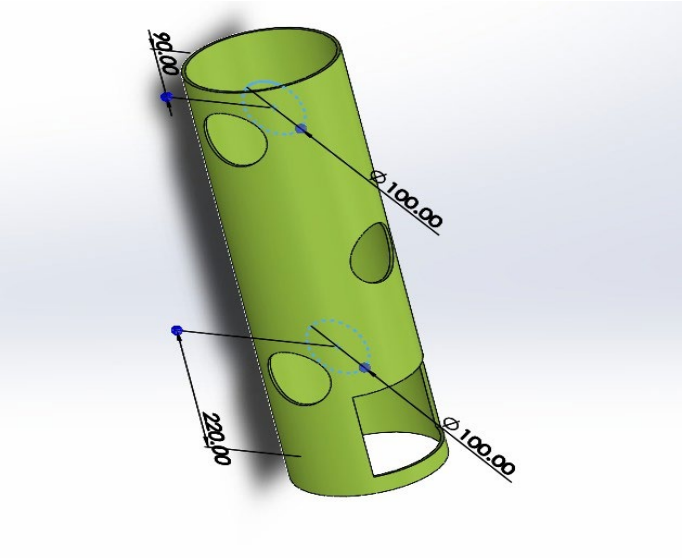

Figura 6. Medidas de los diámetros laterales del quemador de biomasa.

El modelo presenta una longitud total de 760 mm, sobre la cual se distribuyen diversas perforaciones funcionales que permiten la integración de los subsistemas del quemador. Las aberturas están dimensionadas y posicionadas en función de los requerimientos de combustión, ventilación y alimentación de biomasa. Las principales perforaciones son:

1. Perforación superior para salida de gases (Ø 100 mm)

Ubicada cerca del extremo superior del cilindro, con un diámetro de 100 mm. Su función es permitir la salida de gases calientes hacia un ducto secundario o un intercambiador térmico. La posición elevada favorece el flujo natural ascendente creado por la combustión.

2. Perforación media lateral (Ø 100 mm)

Con un diámetro de 100 mm, ubicada aproximadamente en la zona media del cuerpo.

Esta abertura está diseñada para la alimentación automatizada del quemador de biomasa.

3. Perforación inferior lateral (Ø 100 mm)

Situada en la parte baja del cilindro y alineada con el sistema de alimentación. Esta abertura permite la entrada de aire primario o la acoplación del sistema de alimentación de biomasa, dependiendo de la etapa operativa. Su ubicación a baja altura favorece el encendido y la estabilización de la combustión.

4. Ventana rectangular inferior

En la zona más baja del cilindro se integra una ventana rectangular utilizada como puerto de limpieza, acceso para mantenimiento o integración directa con el conducto donde se ubica el ventilador. Esta ventana también facilita el encendido inicial al permitir el flujo directo de aire y la eliminación de cenizas acumuladas.

5. Distribución geométrica y función del diseño

Todas las perforaciones están alineadas y distribuidas de acuerdo con el análisis previo del flujo de aire y del comportamiento térmico del quemador. El diámetro uniforme de 100 mm utilizado en las entradas laterales permite el uso de tubería estandarizada para las conexiones.

4.1.2. Diseño de la base del quemador de biomasa

El diseño de la base estructural del quemador de biomasa que sostiene y retiene las cenizas. Sus características principales se muestran en las Figuras 7 y 8:

- Placa cuadrada de acero al carbón
- Dimensiones: 280 mm × 280 mm
- Espesor recomendado: 3 mm o 4.5 mm (dependiendo de la carga)

Función: Soporte de todo el quemador y fijación a patas o estructura

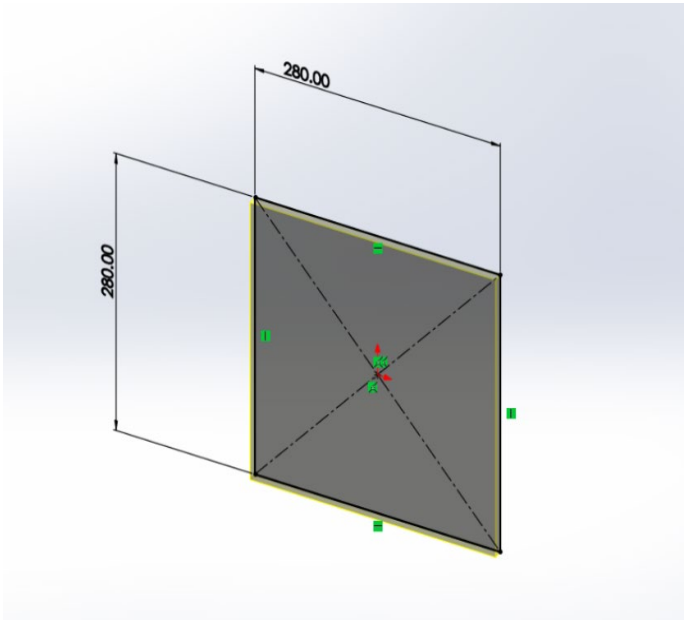

Figura 7. Medidas del largo y ancho de la base del quemador de biomasa.

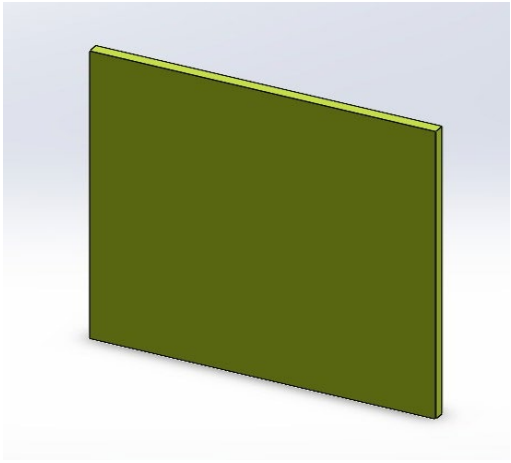

Figura 8. Base del quemador de biomasa

4.1.3. Diseño del sistema de alimentación del quemador de biomasa

El sistema de alimentación está compuesto por un ducto cilíndrico de acero al carbón cédula 80, encargado de alojar el tornillo sinfín que transporta la biomasa desde el depósito hasta la cámara de combustión. El ducto posee un diámetro interior de 100 mm y una longitud total de 210 mm, como se observan en la Figura 9

El tubo inclinado, también de 100 mm de diámetro y 5mm de grosor, se une al conducto principal mediante una intersección cilíndrica con un ángulo aproximado de 45°. Este tipo de unión genera una geometría elíptica (resaltada en azul en la imagen) que garantiza un adecuado acoplamiento mecánico y una transición suave para el flujo de biomasa.

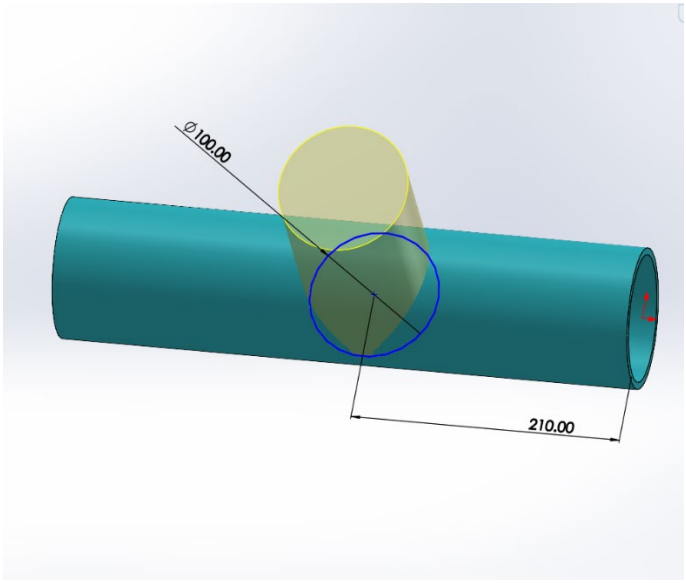

Figura 9. Diámetros y longitud del orificio superior del alimentador del quemador de biomasa.

Función:

- Permitir la entrada del tornillo sinfín (hélice) hacia la cámara de combustión.
- Evita reflujo de flama hacia el motor por el ángulo.
- Facilita el suministro continuo de biomasa granulada o astillas pequeñas.

4.1.4. Diseño del ducto de aire primario del quemador de biomasa

El ducto de aire primario es esencial para la combustión de la biomasa en la cámara de combustión y sus medidas son:

- El tubo grande (diámetro 100 mm) es el conducto principal.
- El tubo que aparece intersectando lateralmente es la entrada de aire primario.
- La cota de 10 mm es el espesor del tubo

Los diámetros y medidas del espesor se encuentran en la Figura 10, además del tubo sin la señalización de las medidas se encuentra en la Figura 11.

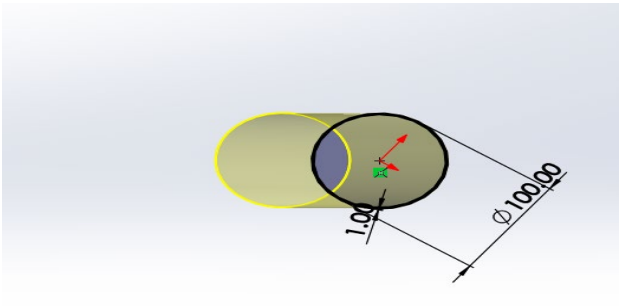

Figura 10. Diámetro y medida del espesor del tubo de aire primario del quemador de biomasa

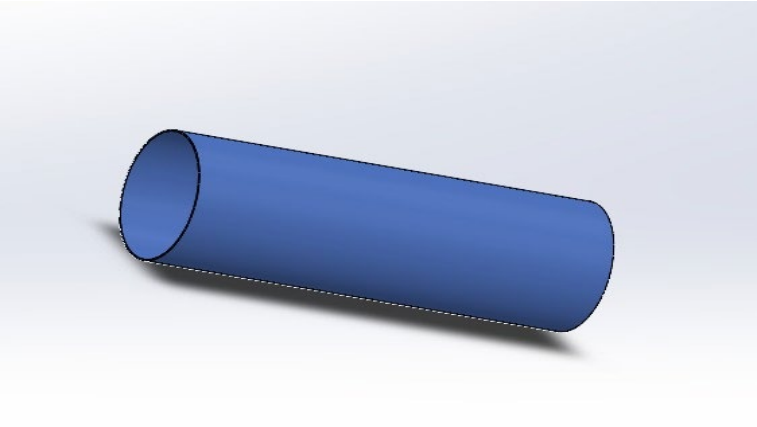

Figura 11. Tubo de ventilación de aire primario

4.1.5. Análisis del flujo de aire en el quemador de biomasa

El flujo de aire dentro del quemador de biomasa se desarrolla mediante la interacción entre el aire primario impulsado por el ventilador y el aire secundario generado por tiro natural. El aire primario ingresa por la parte inferior del sistema a través del ducto de ventilación conectado al ventilador centrífugo, proporcionando el oxígeno necesario para iniciar y mantener la combustión del combustible sólido.

El flujo de aire impulsado atraviesa la parrilla perforada de la cámara de combustión y entra en contacto directo con la biomasa depositada sobre ella. Este proceso favorece la oxidación del combustible y permite una combustión más homogénea. Además, el movimiento ascendente de los gases calientes genera un efecto de tiro natural dentro del cilindro principal, lo que facilita la entrada de aire secundario desde las zonas laterales y superiores del quemador.

La combinación del aire primario forzado y el aire secundario natural mejora la mezcla aire-combustible, incrementando la eficiencia térmica y reduciendo la presencia de humo durante la operación del sistema. Asimismo, el diseño geométrico del quemador favorece un flujo ascendente continuo de gases calientes hacia la salida superior, permitiendo una evacuación adecuada de los productos de combustión.

El comportamiento del flujo de aire también contribuye al presecado parcial de la biomasa antes de entrar completamente en combustión, debido al contacto con los gases calientes presentes en la cámara interna. Esto mejora la estabilidad de la flama y reduce las pérdidas energéticas asociadas a combustibles con humedad residual.

4.1.6. Ensamble final del diseño del quemador de biomasa en SolidWorks

El ensamblaje final del diseño en SolidWorks del quemador de biomasa se muestra en la Figura 12, además une todos los módulos del sistema:



Figura 12. Diseño del quemador de biomasa

1. Tubo verde — Cuerpo principal del quemador
    - Diámetro grande.
    - Ventana inferior para entrada de combustible
2. Entrada de aire primario (tubo azul a la izquierda)
    - Entra abajo**,** nivel zona de combustión.
    - Forma perpendicular correcta.
    - Tendrá control mediante ventilador.
3. Sistema de alimentación (tubo en “T” color turqués)
4. Tapones circulares (los círculos en el tubo verde)

Son útiles para:

- Inspección
- Roscar sensores
- Limpieza o añadir boquillas adicionales

4.2. Desarrollo del quemador de biomasa

Durante esta fase se llevó a cabo la construcción del prototipo del quemador de biomasa utilizando los materiales y herramientas previamente definidos. Se desarrolló el cuerpo principal del quemador y se integraron los distintos subsistemas necesarios para su funcionamiento, incluyendo el sistema de encendido y apagado, el sistema de control semiautomatizado, el sistema de alimentación de biomasa y el sistema de suministro de aire primario. Asimismo, se integró la rejilla de la cámara de combustión y se realizó el ensamblaje completo del equipo, obteniendo como resultado un prototipo funcional del quemador de biomasa.

4.2.1. Ensamble del quemador de biomasa

Una vez integrados el sistema de alimentación mediante tornillo sinfín, el sistema de suministro de aire primario y la cámara de combustión, se procedió a realizar el ensamblaje completo del quemador de biomasa. Se puede visualizar en la Figura 13 sus componentes:



Figura 13. Componentes del quemador de biomasa

Componentes visibles en el ensamble final.

- Cuerpo principal del quemador: tubo vertical donde se desarrolla la combustión.
- Módulo de aire primario: ubicado en la parte inferior, equipado con un ventilador axial con capacidad medida de 5.4 m³/min, encargado de introducir el aire necesario para la oxidación.
- Sistema de alimentación automática: instalado en el costado del quemador; el tornillo sinfín transporta los pellets desde el contenedor hasta la cámara de combustión.
- Tapa regulable de acceso superior: utilizada para encendido y supervisión interna.
- Cámara de combustión interna con parrilla perforada: donde se sostiene el pellet y se facilita el paso del flujo de aire.
- Superficie superior plana: diseñada para soportar recipientes de cocción o intercambiadores térmicos.

La Figura 14 muestra el equipo totalmente armado y en funcionamiento:



Figura 14. Prototipo del quemador de biomasa para uso rural.

Durante las pruebas se confirmó que:

- La alimentación de biomasa es continua y estable.
- El aire primario es suficiente para mantener la combustión sin producir humo excesivo.
- La estructura soporta adecuadamente las temperaturas generadas.
- El sistema es funcional y seguro para operación prolongada.

4.2.2. Construcción del prototipo del quemador de biomasa

En la fabricación y ensamble del prototipo del quemador de biomasa se debe tener el diseño del cuerpo principal del quemador, los módulos del sistema de alimentación y el sistema de aire primario.

Lista de materiales para el desarrollo del quemador de biomasa

Se presenta el listado completo de materiales utilizados para la fabricación del prototipo del quemador de biomasa para uso rural. Los componentes se dividen en materiales estructurales, elementos funcionales, sistema de ventilación, sistema de alimentación y sistema de control electrónico.

Material estructural (cuerpo del quemador)

El material estructural o también llamado cuerpo del quemador son los materiales que se ocuparon en el desarrollo del quemador de biomasa y se muestran en la Tabla 5.

Tabla 5. Material estructural para el cuerpo del quemador de biomasa.

N.º	Componente	Material	Dimensiones / Especificación
1	Tubo principal cédula 80	Acero al carbón	Ø 220 mm, espesor 8.18 mm, longitud 780 mm
2	Tubería secundaria lateral	Acero al carbón	Ø 100 mm, espesor 4–5 mm, longitud 250 mm
3	Tubería superior de salida	Acero al carbón	Ø 100 mm, espesor 4–5 mm, longitud 200 mm
4	Ventana inferior rectangular	Acero al carbón	140 × 100 mm (corte en placa)
5	Placa para tapa superior	Acero al carbón	Espesor 3 mm

6	Base de soporte	Acero al carbón	2” × 1/4”, longitud 450 mm
7	Tapa circular	Acero al carbón	Ø 130 mm, espesor 3 mm
8	Codos / uniones (si se requieren)	Acero al carbón	Ø 100 mm

Sistema de ventilación

El sistema de ventilación permite una correcta combustión de la biomasa y el material necesario para este sistema se muestran en la siguiente Tabla 6:

Tabla 6. Material para el sistema de ventilación del quemador de biomasa.

N.º	Componente	Especificación
9	Ventilador centrífugo	12 V o 24 V, flujo de 150–300 m³/h
10	Ducto de acoplamiento al ventilador	Ø 100 mm, acero o lámina galvanizada
11	Rejilla protectora	Metálica, Ø 100 mm

Sistema de alimentación de biomasa

El sistema de alimentación de biomasa sirve para que se pueda suministrar el combustible deseado para la correcta combustión y el material se muestra en la Tabla 7:

Tabla 7. Material para el sistema de alimentación del quemador de biomasa.

N.º	Componente	Especificación
12	Tolva de alimentación	Acero al carbón, capacidad 3–5 kg
13	Tubo de alimentación hacia la cámara	Ø 100 mm, longitud 300 mm
14	Sinfín (si usas sistema automático)	Paso 20–30 mm, barra 3/4”
15	Motorreductor para sinfín	12–24 V, 10–30 RPM
16	Soporte de motor	Acero al carbón

Sistema electrónico y de control

El sistema electrónico y control sirve para gestionar el sistema de ventilación, sensores y alimentación, los materiales se muestran en la Tabla 8:

Tabla 8. Material para el sistema electrónico y de control del quemador de biomasa

N.º	Componente	Especificación
17	Fuente de poder	12 V / 10 A o 24 V / 5 A
18	Controlador / microcontrolador	Arduino, ESP32 o similar
19	Relés de estado sólido o mecánicos	10–30 A
20	Sensores de temperatura	Termopar tipo K con módulo MAX6675 / MAX31856
21	Cables de conexión	AWG 16, 18 y 22
22	Protoboard o tarjeta de montaje	Estándar 830 puntos
23	Caja de control	Plástico o metal, 20 × 15 × 10 cm

Lista de herramientas para el desarrollo del quemador de biomasa

Las herramientas para el desarrollo de un quemador de biomasa es esencial ya que necesitamos distintos tipos de herramienta y acoplamiento. A continuación, se presenta la lista de herramientas necesarias para la fabricación del prototipo:

Herramientas de corte:

- Esmeriladora angular (pulidora) con disco de corte.
- Corte de plasma TIG

- Broca de corona Ø 100 mm

Herramientas de soldadura:

- Máquina de soldar (SMAW).
- Electrodos 6011 y 7018.
- Cepillo de alambre.
- Martillo para escoria
- Herramientas de medición
- Flexómetro de 5 m.
- Calibrador Vernier.
- Escuadra de acero.
- Nivel.

Herramientas de ensamble:

- Taladro.
- Juego de brocas (3–12 mm).
- Llaves combinadas M6–M10.
- Pinzas y desarmadores.
- Remachadora.
- Herramientas para sistema eléctrico
- Pelacables.
- Multímetro.
- Cautín para soldar.
- Pasta y estaño.
- Cinta de aislar

4.2.3. Costos generales de construcción del quemador de biomasa

El costo estimado para la construcción del quemador de biomasa fue de aproximadamente $4730 MXN, considerando materiales estructurales, componentes electrónicos, sistema de alimentación. Este costo puede variar dependiendo de la disponibilidad de materiales, tipo de biomasa utilizada y nivel de automatización implementado. La tabla de costos generales aproximados se puede ver a continuación en la Tabla 9.

Tabla 9. Costos generales aproximados del desarrollo del quemador de biomasa

Componentes	Cantidad	Costo aproximado (MXN)
Tubo cédula 80 Ø220 mm	1	$1000
Tubo secundario	1	$500
Ventilador centrífugo	1	$330
Motorreductor	1	$600
Tornillo sin fin	1	$500
Kit Arduino UNO	1	$250
Sensor termopar tipo K	3	$450
Fuente de poder	1	$500
Material de soldadura	1	$300
Cableado y conexiones	1	$200
Tapa o hornilla	1	$100
Costo total	13	$4730

En comparación con sistemas comerciales de combustión de biomasa, el prototipo desarrollado presenta una alternativa de menor costo y adaptable a aplicaciones rurales, permitiendo aprovechar residuos agrícolas y biomasa disponible localmente

4.2.4. Desarrollo del cuerpo principal del quemador de biomasa

Cuerpo principal del quemador de biomasa que es la estructura base; antes de integrar los sistemas de alimentación de biomasa y de suministro de aire, se construyó el cuerpo principal del quemador.

Este componente constituye la estructura base donde se llevará a cabo el proceso de combustión, y sobre la cual se ensamblan los demás módulos.

En esta fase pueden identificarse:

- El cilindro principal, que funciona como cámara contenedora del sistema.
- La conexión lateral para el aire primario, destinada a recibir el ducto del ventilador.
- La conexión lateral para el sistema de alimentación, donde posteriormente se instala el tubo del tornillo sinfín.
- La abertura inferior, que corresponde al acceso al cenicero o cavidad de depósito de residuos.

Esta imagen permite apreciar la forma en que el quemador fue fabricado y preparado para la instalación de los subsistemas. También sirve como evidencia del proceso de manufactura previo al ensamblaje final. A continuación, se muestra en la Figura 15 la estructura cilíndrica antes del montaje:



Figura 15. Cuerpo soldado del quemador de biomasa.

4.2.5. Integración del sistema de encendido y apagado del quemador de biomasa

Para la integración del sistema de encendido y apagado de los sistemas es necesario tener un diagrama de Tuberías e Instrumentación para poder visualizar que aparatos se controlan el encendido y apagado con electricidad de corriente directa de las diferentes salidas de la fuente de poder. Además de la implementación del sistema de control.

Diagrama de tuberías e instrumentación del quemador de biomasa

Un Diagrama de Tuberías e Instrumentación es una representación esquemática que muestra, de manera organizada, cómo se interconectan los componentes mecánicos, eléctricos y de control dentro de un sistema. En el caso del quemador de biomasa, el DTI permite visualizar con precisión las rutas de flujo del aire y del combustible, así como la ubicación de sensores, actuadores y dispositivos encargados del control del equipo.

Además, facilita la comprensión general del funcionamiento del quemador, ya que integra en un solo esquema los elementos mecánicos, el tornillo sin fin y la cámara de combustión junto con los elementos eléctricos y electrónicos, como el motor, el ventilador, la fuente de poder, el termopar y el sistema de control basado en microcontrolador.

El diagrama de tuberías e instrumentación incluye los siguientes elementos:

- **Alimentación:** alimentada por tolva o manualmente, según versión del prototipo.
- **Fuente de poder:** Convierte la energía alterna en energía directa de 5V,12V y 24 V
- **Cámara de combustión:** Es donde se produce la combustión del combustible
- **Motor DC NEMA:** Es un motor a pasos que permite que el tornillo sin fin se mueva adecuadamente.
- **Tornillo sin fin:** Es un dispositivo que transmite el movimiento entre ejes que son perpendiculares entre sí, mediante un sistema de dos piezas: el tornillo (con dentado helicoidal), y un engranaje circular denominado corona.

- **Ventilador:** Es la entrada de aire primario conectado a un módulo Arduino.
- **Sensor de temperatura termopar tipo K(TT):** ubicado en la parte superior del quemador.
- **Sistema de control (TC):** microcontrolador Arduino que regula el ventilador con base en la lectura del termopar.
- **Salida de gases:** por chimenea superior(opcional) con conexión en roscable.
- **Relay:** es un interruptor electromagnético que se activa con una señal eléctrica para controlar otro circuito eléctrico de mayor o menor potencia

El diagrama de tuberías e instrumentación de un quemador de biomasa que se muestra en la Figura 16 sirve como base para el cableado, la instalación de sensores, y el control de operación durante las pruebas experimentales. Su elaboración permite anticipar posibles interferencias físicas y facilita la fabricación del prototipo.

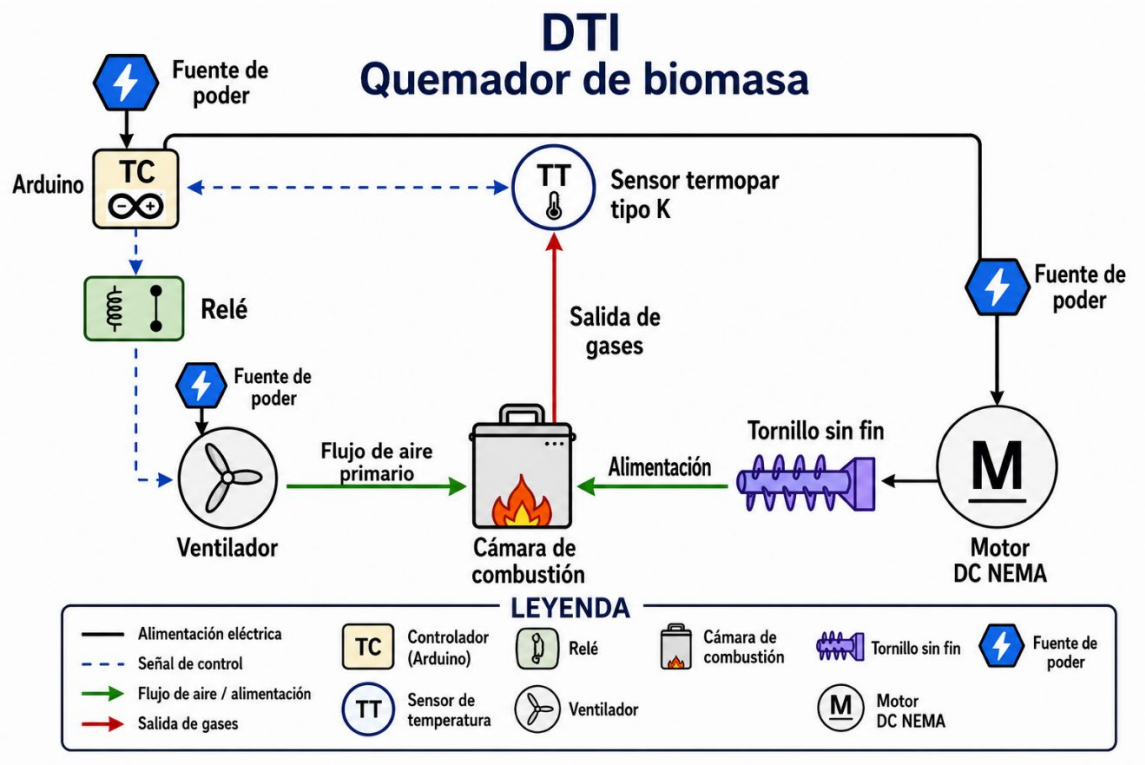

Figura 16. Diagrama DTI del quemador de biomasa

4.2.6. Integración del sistema de control semiautomatizado del quemador de biomasa

Para la implementación del sistema de control semiautomatizado se diseñó y construyó un tablero mecatrónico que integra la fuente de alimentación, el Arduino uno, los módulos de relevadores y los elementos de conexión necesarios para el accionamiento de los dispositivos del quemador. La función principal del tablero es centralizar el procesamiento de señales de control y la distribución de energía eléctrica hacia los distintos componentes del sistema.

La arquitectura desarrollada permitió establecer una plataforma flexible para la automatización parcial del proceso de combustión, facilitando la regulación del suministro de combustible y del flujo de aire durante las pruebas experimentales. Además, la disposición ordenada de los componentes contribuye a mejorar la seguridad operativa y la confiabilidad del sistema.

La Figura 17 presenta el tablero mecatrónico construido e integrado al prototipo del quemador de biomasa.



Figura 17. Tablero mecatrónico

El sistema de control electrónico desarrollado se basa en una arquitectura modular que permite la medición, procesamiento y actuación sobre los elementos del quemador. La Tabla 10 muestra los componentes y su función para el sistema de control del quemador de biomasa.

Tabla 10. Componentes y funciones del sistema de control del quemador de biomasa.

Componente	Función
Arduino UNO R3	Unidad central de procesamiento que ejecuta el algoritmo de control PID.
Driver DM542T	Controla el motor paso a paso NEMA 23 para la alimentación de biomasa.
Motor paso a paso NEMA 23	Acciona el tornillo sin fin, garantizando flujo constante de combustible.
Sensor termopar tipo K + módulo MAX6675	Mide la temperatura en la cámara de combustión.
Fuente de poder de 24 V DC	Alimenta los ventiladores y el motor paso a paso.
Módulo de relevadores y transistores MOSFET	Regula la velocidad de los ventiladores de aire primario y secundario.

4.2.7. Integración del sistema semiautomatizado de alimentación

El sistema de alimentación es el encargado de introducir el combustible al interior del reactor de manera constante y controlada. En este prototipo se implementó un alimentador por caída asistida, construido a partir de un ducto metálico de sección circular soldado sobre una cámara secundaria horizontal, donde el aire primario es impulsado hacia el reactor.

Descripción del sistema:

El sistema de alimentación del quemador de biomasa como se ve en la Figura 18 muestra el componente final fabricado: un tubo vertical de acero, soldado a 90° sobre el ducto horizontal principal.

Elementos principales:

- Tubo vertical (tolva)
- Material: acero al carbón calibre 16.
- Diámetro: 100 mm.

Función:

- Servir como depósito temporal y canal de caída para la biomasa.

Ducto horizontal:

- Material: acero al carbón.
- Diámetro: 100 mm.
- Función: transportar el aire primario y mezclarlo con la biomasa que cae desde la tolva.

Unión soldada en ángulo recto:

- Tipo de preparación: unión a tope con tubo perforado según intersección cilíndrica.
- Proceso usado: soldadura SMAW (electrodo 6011/6013).
- Asegura estanqueidad de aire y soporte mecánico.
- Entrada secundaria (ventilador)
- Ubicada al extremo derecho del ducto horizontal.
- Función: proveer flujo de aire que arrastra parcialmente la biomasa hacia el reactor.

Funcionamiento:

- La biomasa se introduce por la parte superior del tubo vertical.
- La gravedad hace descender el combustible hasta el punto de unión con el ducto horizontal.
- El flujo de aire primario generado por el ventilador (5.4 m^3/min) ayuda a:
- Mantener el combustible en movimiento,
- Mejorar la mezcla aire-combustible,

- Alimentar la zona de combustión de forma continua.
- El diseño evita obturaciones gracias al diámetro amplio y ángulo vertical apropiado.
- La biomasa cae directamente sobre el flujo de aire, lo que acelera su pre-secado y favorece la ignición.

Ventajas del diseño:

- Simplicidad mecánica: No requiere tornillos sinfín ni mecanismos motorizados.
- Baja probabilidad de atascos: gracias al tubo vertical de Ø100 mm.
- Integración directa con el aire primario: el mismo ducto sirve como precalentamiento y arrastre.
- Bajo costo: utiliza tubos comerciales fáciles de soldar.
- Adaptabilidad: se puede modificar altura y ángulo sin rediseñar todo el sistema.

El diámetro se seleccionó considerando:

- Flujo apropiado de biomasa (trozos pequeños, pellets, astillas)
- Necesidad de evitar puentes de material,
- Coincidencia con el diámetro del ducto de aire primario para uniones más limpias
- Facilidad de fabricación (tubería estándar).
- El diámetro también evita restricciones que podrían reducir el flujo másico de aire, ya que la intersección genera una zona crítica donde la pérdida de carga debe ser mínima.



Figura 18. Sistema de alimentación del quemador de biomasa.

Sistema de alimentación utilizando tornillo sin fin.

El sistema de alimentación es el encargado de transportar los pellets de biomasa desde la tolva de almacenamiento hasta la cámara de combustión. Para este prototipo se utilizó un tornillo sinfín accionado mediante un motor eléctrico, alojado dentro de un tubo metálico que permite un flujo controlado y seguro del material.

Descripción del sistema:

El tornillo sin fin como se ve en la Figura 19 se encuentra instalado longitudinalmente del tubo de acero el cual se conecta

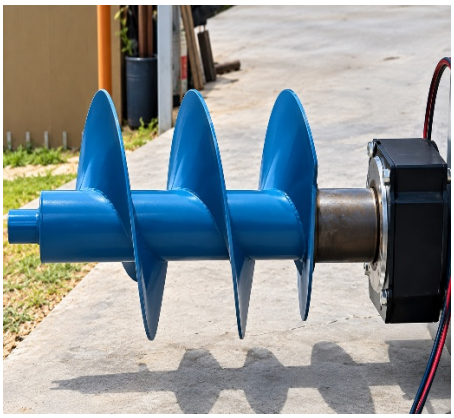

Figura 19. Tornillo sin fin

El tornillo sinfín tiene las siguientes funciones principales:

- Dosificar de manera controlada el suministro de biomasa.
- Evitar atascamientos manteniendo un flujo constante.
- Impedir el retroceso de la llama hacia la tolva actuando como sello mecánico.
- Transportar el pellet sin que se rompa excesivamente ni se genere polvo.

Operación del sistema:

El motor de accionamiento del sinfín opera en ciclos programados, permitiendo ajustar:

- Frecuencia de alimentación (tiempo encendido / tiempo apagado)
- Caudal de biomasa (kg/h) según las necesidades térmicas
- Estabilidad de la combustión

Gracias al diseño del tubo y la cercanía al ducto de aire primario, los pellets caen directamente sobre la parrilla perforada, favoreciendo el encendido homogéneo.

Relación con el sistema de aire primario:

El sinfín deposita la biomasa exactamente sobre la zona donde entra el aire primario (5.4 m^3/min). Esta interacción permite:

- Un encendido rápido de cada lote de pellet alimentado.
- Mantener constante el frente de combustión.
- Reducir emisiones por combustión incompleta.

La sinergia entre aire primario y flujo controlado de biomasa es fundamental para el rendimiento del reactor.

La siguiente Figura 20 corresponde a la vista interna del tubo, donde se observa la hélice del tornillo sinfín encargada de impulsar los pellets hacia la zona de combustión:



Figura 20. Vista superior del tornillo sin fin ya implementado del quemador de biomasa.

4.2.8. Integración de la rejilla de la cámara de combustión del quemador de biomasa

La integración de la rejilla de la cámara de combustión del quemador de biomasa es esencial. El aire primario entra por debajo de la base perforada donde se acumulan los pellets provenientes del sistema de alimentación.

Este diseño permite que el aire se distribuya a través de las perforaciones de la parrilla, elevando la velocidad del flujo y facilitando el encendido rápido del pellet. La Figura 21 muestra la rejilla con orificios para la entrada del aire primario y base para los pellets en la cámara de combustión.



Figura 21. Cámara de combustión y rejilla con orificios para la entrada de aire primario.

4.2.9. Integración del sistema semiautomatizado de aire primario

Descripción general del sistema:

El sistema de aire primario tiene como función suministrar el flujo de aire necesario para iniciar y mantener la combustión dentro de la cámara inferior del quemador. Este aire permite el encendido del combustible, la formación del lecho de brasas y el sostenimiento de la reacción de combustión

de manera estable.

El aire primario ingresa a través de un conducto lateral soldado a la base del cuerpo del quemador, y es impulsado por un ventilador eléctrico. El diseño está orientado a garantizar un suministro de aire constante, controlado y uniforme hacia la zona donde se deposita la biomasa. El sistema de aire primario se muestra en la Figura 22.



Figura 22.Sistema de ventilación de aire primario del quemador de biomasa.

Componentes del sistema:

Ventilador eléctrico:

- Tipo: ventilador axial tipo “cooler”
- Material: plástico ABS
- Voltaje de operación: 12 V
- Función: impulsar aire hacia el quemador mediante flujo forzado
- Montaje: sujeto en la entrada del tubo con tornillería y sellado contra fugas
- El ventilador utilizado es adecuado para caudales moderados y funciona correctamente en aplicaciones donde no se requiere alta presión estática.

Conducto de aire primario:

- Diámetro: 90 mm
- Material: acero al carbono
- Grosor de pared: 2–3 mm
- Longitud: según el diseño del cuerpo del quemador

- Unión: soldadura perimetral alrededor de la entrada

Este tubo se encuentra montado de forma perpendicular a la sección baja del quemador y dirige el flujo de aire directamente hacia la zona de combustión primaria.

Entrada a la cámara de combustión:

La unión entre el tubo de aire primario y la cámara principal está soldada y permite que el aire ingrese de manera directa al depósito de combustión inferior.

Este diseño asegura que:

- El aire entre sin restricciones
- se distribuya bajo el lecho del combustible,
- se mejore la mezcla aire–combustible,
- se aumente la eficiencia general del quemador.

Funcionamiento del sistema:

- El ventilador se enciende y genera un flujo de aire dirigido hacia el tubo primario.
- El aire es forzado dentro de la cámara inferior del quemador.
- El flujo llega directamente al combustible, acelerando el encendido.
- Durante la operación, el aire sostiene la combustión y estabiliza la llama.
- El flujo va variando la velocidad del ventilador mediante un regulador PWM

Capítulo 5.
Resultados

5.1. Evaluación del quemador de biomasa

En la tercera fase se realizaron pruebas experimentales para verificar el funcionamiento del prototipo del quemador de biomasa. Estas pruebas permitieron evaluar el comportamiento del sistema durante su operación, considerando la variación del suministro de aire. Finalmente, se efectuó una evaluación del desempeño del quemador con el propósito de analizar su eficiencia y determinar su viabilidad para aplicaciones rurales. Los procedimientos de prueba y la evaluación del desempeño se describen con mayor detalle a continuación.

Del prototipo del quemador de biomasa para uso rural que se muestra en la Figura 23.Se hicieron 6 pruebas; 3 pruebas utilizando como combustible carbón y 3 pruebas utilizando pellets de madera, cada combustible estuvieron bajo tres configuraciones de flujo de aire distintos que suministra un ventilador que funciona como aire primario del quemador de biomasa y corresponden a valores de flujos de aire de: 5.4m³/min(máximo),2.75 m³/min(medio),0.635 m³/min(medio),0.635m³/min(bajo) .Los datos obtenidos del sensor termopar en tiempo real fueron capturados en la base de datos así como la temperatura inicial y máxima del agua.



Figura 23. Quemador de biomasa ya preparado para las pruebas

5.1.1. Método de balance energético agua-combustible

La eficiencia térmica del quemador de biomasa fue utilizando carbón vegetal promedio de 3.80% y de 8.11 % utilizando pellets de madera y se determinó mediante el método de calentamiento de agua que se encuentra en algunos artículos que son resumidos en la siguiente Tabla 11:

Tabla 11. Aporte de artículos que hablan del método de calentamiento de agua

No.	Aporte al trabajo	Referencia APA
1	Aplicación directa del Water Boiling Test (WBT) para medir eficiencia térmica en quemadores de biomasa	Mengesha, T. T., & Ramayya, A. V. (2017). *Performance evaluation of pyrolysis cookstove using water boiling test*. American Journal of Modern Physics, 6(5), 108–116. https://doi.org/10.11648/j.ajmp.20170605.15
2	Validación experimental del método WBT en estufas de biomasa para uso rural.	Aristizábal Hernández, J. D. (2014). *Validación y evaluación comparativa de la eficiencia de una estufa de leña mejorada bajo condiciones controladas y prueba de campo*. Informador Técnico, 78(2), 79–89. https://doi.org/10.23850/22565035.65
3	Análisis de los parámetros que influyen en la medición de eficiencia térmica en protocolos tipo WBT.	Ding, H. Y., Zhao, J., Zhang, C., & Wang, X. (2013). *Key factors of thermal efficiency test protocols for household biomass cookstoves*. Advanced Materials Research, 724–725, 268–273. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.724-725.268
4	Protocolo estándar internacional para evaluar eficiencia térmica de cocinas y quemadores de biomasa.	Global Alliance for Clean Cookstoves. (2014). *The water boiling test (WBT) protocol version 4.2.3*. https://cleancooking.org/wp-content/uploads/2020/02/WBT-Protocol-4.2.3.pdf
5	Relación entre eficiencia térmica y desempeño energético bajo condiciones controladas.	Jetter, J., Zhao, Y., Smith, K. R., Khan, B., Yelverton, T., DeCarlo, P., & Hays, M. D. (2012). *Pollutant emissions and energy efficiency under controlled conditions for household biomass cookstoves*. Environmental Science & Technology, 46(19), 10827–10834. https://doi.org/10.1021/es301693f

Se colocó un recipiente con un litro de agua sobre el quemador y se midió la temperatura inicial y final con una pistola térmica configurada a una emisividad de valor 1 durante el tiempo en el que se consumió completamente el combustible. La energía útil transferida al agua se calculó como la suma del calor sensible del agua y el calor asociado a la evaporación parcial. Todo esto para poder determinar la eficiencia térmica obtenida en cada prueba

Método de balance energético agua–combustible

En este método tiene ciertas características que nos permiten determinar la eficiencia térmica en este caso del quemador de biomasa y a continuación se explica resumidamente algunas de sus características y el procedimiento que se llevó a cabo con este método.

Este método se usa para:

- Estufas rurales
- Quemadores de biomasa
- Fogones mejorados
- Cocinas eficientes

- Calentadores artesanales

Materiales:

- Quemador de biomasa
- Combustible(pellets) o (carbón)
- Agua
- Olla metálica
- Pistola térmica configurada a una emisividad de 1
- Termopar tipo K
- Laptop conectada al Arduino y conectada al termopar para guardar las temperaturas en tiempo real

Condiciones experimentales

Se realizaron pruebas para tres niveles de flujo de aire (0.635, 2.75 y 5.4 m^3/min) y dos tipos de combustible (carbón y pellets de madera). En cada prueba se registró la temperatura del agua, la temperatura de los gases de salida además de ocupar 400 gramos de carbón.

Estas pruebas se enfocan en la eficiencia térmica global del sistema, por lo que las pérdidas térmicas se consideran implícitas dentro del balance energético.

- pérdidas térmicas no cuantificadas
- evaporación promedio
- combustión cuasi-estacionaria

Variables ocupadas en las pruebas

Se ocuparon las variables vistas en la tabla Se realizó un programa en lenguaje en un entorno de programación Python 3 en Google Colab donde se ingresaba nuestra base de datos y se programaban las variables y constantes ocupadas en cada prueba y nos daba los resultados en graficas. En la tabla 12 se muestran las variables que no cambiaron en el código ni en las pruebas.

Variable	Unidad	Descripción física
Minutos	min	Tiempo transcurrido durante la prueba
tempagua	°C	Temperatura del agua calentada por el quemador
TemperaturaGasesSalida	°C	Temperatura de los gases de combustión a la salida
gramoscombustible	g	Consumo de biomasa durante la prueba
tiempo_total	min	Duración total del experimento
temps	°C	Vector de temperaturas del agua
tiempos	min	Vector de tiempos
dT	°C	Incremento de temperatura del agua
dt	min	Incremento de tiempo

potencia_kw	kW	Potencia térmica instantánea del quemador
energia_acum	kJ	Energía acumulada absorbida por el agua
tasa_calentamiento	°C/min	Velocidad de calentamiento del agua
tasa_evap	kg/min	Tasa promedio de evaporación
eficiencia	adimensional (%)	Eficiencia térmica del quemador
potencia_total_kw	kW	Potencia térmica promedio del quemador

Tabla 12. Variables ocupadas en las pruebas

Ecuaciones ocupadas para el modelo termo energético

La utilización de ecuaciones térmicas facilita el análisis cuantitativo del desempeño del quemador, permitiendo comparar los resultados obtenidos con estudios reportados en la literatura. Asimismo, dichas ecuaciones permiten validar experimentalmente el comportamiento del sistema y determinar si las condiciones de operación favorecen una combustión eficiente.

Las variables consideradas incluyen temperatura, flujo de aire, masa de biomasa consumida y transferencia de calor generada durante la combustión. Cada parámetro fue medido mediante sensores y equipos descritos previamente en el sistema experimental.

Las ecuaciones presentadas corresponden al método de balance energético, ampliamente utilizado para evaluar el desempeño térmico de sistemas de combustión y equipos de conversión de biomasa. Dichas expresiones fueron obtenidas de la literatura científica especializada, como se muestra en los artículos revisados y resumidos previamente en la Tabla 11.

Calor sensible absorbido por el agua:

$$Q_{cal=M_{agua}.c_i.(t_f-t_i)} \qquad \text{(EC. 1)}$$

Donde:

- $Q_{cal:\text{calor sensible (kJ)}}$
- M_{agua}: masa de agua (kg)
- c_i: calor específico del agua $(kJ \cdot kg^{-1} \cdot °C^{-1})$
- t_f: temperatura final
- t_i: $temperatura\ inicial$

Esta ecuación calcula la energía necesaria para elevar la temperatura del agua desde la temperatura inicial hasta la final.

Es el calor que el quemador transfiere directamente al agua sin cambio de fase.

Calor latente por evaporación:

$$Q_{evap=M_{evap}.lv} \qquad \text{(EC. 2)}$$

Donde:

- $Q_{evap:\text{calor de evaporación (kJ))}}$

- M_{evap}:masa de agua evaporada (kg)
- lv: calor latente de vaporización $(kJ \cdot kg^{-1})$

Es la energía necesaria para evaporar una cierta cantidad de agua.

Energía útil total absorbida por el agua:

$$Q_{agua:Q_{cal}+Q_{evap}} \quad \text{(EC. 3)}$$

Donde:

- $Q_{cal:calor\ sensible\ (kJ)}$
- $Q_{evap:calor\ de\ evaporación\ (kJ))}$
- $Q_{agua:energía\ útil\ absorbida\ por\ el\ agua\ (kJ)}$

Suma del calor sensible y el calor latente.
Corresponde a la energía térmica aprovechada por el sistema, es decir, la salida útil del quemador.

Eficiencia térmica del quemador

$$\eta = \frac{Q_{agua}}{Q_{comb}} x100 \quad \text{(EC. 4)}$$

Donde:

- Q_{comb}: energía química del combustible (kJ)
- $Q_{agua:energía\ útil\ absorbida\ por\ el\ agua\ (kJ)}$
- η:eficiencia térmica (%)

Mide qué fracción de la energía química del combustible se transforma en energía térmica útil. Es el principal indicador de desempeño del quemador de biomasa.

Potencia térmica del quemador

$$P=\frac{Q_{agua}}{t(60)} \quad \text{(EC. 5)}$$

Donde:

- $Q_{agua:energía\ útil\ absorbida\ por\ el\ agua\ (kJ)}$
- t : tiempo (min)
- P: potencia térmica promedio (kW)

Indica la rapidez con la que el quemador entrega energía térmica.

Potencia térmica instantánea

$$P_{inst}=\frac{M_{agua} \cdot C_i \cdot \frac{dT}{dt}}{60} \quad \text{(EC. 6)}$$

Donde:

- M_{agua}: masa de agua (kg)
- c_i: calor específico del agua ($kJ \cdot kg^{-1} \cdot °C^{-1}$)
- $\frac{dT}{dt}$: tasa de calentamiento ($°C \cdot min^{-1}$)
- P_{inst}: potencia térmica instantánea (kW)

Permite analizar fluctuaciones del desempeño térmico del quemador a lo largo del tiempo, útil para estudiar estabilidad de la combustión.

Energía química del combustible

$$Q_{comb=M_{comb}.PCI} \quad \text{(EC. 7)}$$

Donde:

- PCI: poder calorífico inferior ($kJ \cdot kg^{-1}$)
- Q_{comb}: energía química del combustible (kJ)
- M_{comb}: masa de combustible consumida (kg)

Calcula la energía total disponible en el combustible de la biomasa.

Tasa de calentamiento

$$\frac{dT}{dt} \quad \text{(EC. 8)}$$

Donde:

- $\frac{dT}{dt}$: tasa de calentamiento ($°C \cdot min^{-1}$)

Refleja la capacidad de calentamiento del sistema y facilita la comparación entre distintos diseños o combustibles.

Tasa de evaporación:

$$\dot{m}_{evap} = \frac{M_{evap}}{t} \quad \text{(EC. 9)}$$

Donde:

- M_{evap}: masa de agua evaporada (kg)
- $\dot{m}_{evap}$: tasa de evaporación ($kg \cdot min^{-1}$)
- t : tiempo (min)

Permite estimar la pérdida de agua por evaporación durante el proceso térmico.

Para el procesamiento de los datos experimentales, las ecuaciones fueron implementadas mediante un script desarrollado en Python en la plataforma Google Colab, el cual permite aplicar automáticamente el modelo de balance energético a la base de datos obtenida durante las

pruebas experimentales del quemador de biomasa.

5.1.2. Prueba 1 Combustible carbón con un flujo máximo de aire

Con el fin de caracterizar el desempeño térmico del prototipo bajo condiciones de combustión forzada, se realizó una prueba experimental utilizando carbón y un flujo máximo de aire. Esta condición permitió evaluar el efecto del suministro de aire sobre la combustión del combustible, la generación de calor y el aprovechamiento energético del sistema. A partir de las variables medidas durante el experimento se calcularon la energía útil y la eficiencia térmica del quemador.

La Tabla 13 presenta las constantes empleadas en los cálculos, incluyendo propiedades termodinámicas del agua y parámetros experimentales necesarios para la aplicación de las ecuaciones de eficiencia térmica.

Tabla 13. Constantes utilizadas en la prueba 1

Constante	Valor	Unidad	Significado
ci	4.186	kJ/kg·°C	Calor específico del agua
m_agua	1.0	kg	Masa de agua calentada
Tm	67.9	°C	Temperatura final del agua
Lv	2257	kJ/kg	Calor latente de evaporación del agua
m_evap	0.130	kg	Masa de agua evaporada
m_carbon	0.4	kg	Masa de biomasa consumida
PCI	29000	kJ/kg	Poder calorífico inferior del combustible

Se tomo la medición de la temperatura inicial del agua que fue del 24.3 °C y la máxima que fue de 67.9 °C se muestra en la siguiente Figura 24:



Figura 24. Temperatura inicial y máxima del agua de la prueba 1

5.1.3. Prueba 2 Combustible carbón con un flujo medio de aire

Con el fin de caracterizar el desempeño térmico del prototipo bajo condiciones de combustión forzada, se realizó una prueba experimental utilizando carbón y un flujo medio de aire. Esta condición permitió evaluar el efecto del suministro de aire sobre la combustión del combustible,

la generación de calor y el aprovechamiento energético del sistema. A partir de las variables medidas durante el experimento se calcularon la energía útil y la eficiencia térmica del quemador.

La Tabla 14 presenta las constantes empleadas en los cálculos, incluyendo propiedades termodinámicas del agua y parámetros experimentales necesarios para la aplicación de las ecuaciones de eficiencia térmica.

Tabla 14. Constantes utilizadas en la prueba 2

Constante	Valor	Unidad	Significado
ci	4.186	kJ/kg·°C	Calor específico del agua
m_agua	1.0	kg	Masa de agua calentada
Tm	59.1	°C	Temperatura final del agua
Lv	2257	kJ/kg	Calor latente de evaporación del agua
m_evap	0.125	kg	Masa de agua evaporada
m_carbon	0.4	kg	Masa de biomasa consumida
PCI	29000	kJ/kg	Poder calorífico inferior del combustible

Se tomo la medición de la temperatura inicial del agua que fue del 24.6 °C y la máxima que fue de 59.1 °C se muestra en la siguiente Figura 25:



Figura 25. Temperatura inicial y máxima del agua de la prueba 2

5.1.4. Prueba 3 Combustible carbón con un flujo de aire bajo

Con el fin de caracterizar el desempeño térmico del prototipo bajo condiciones de combustión forzada, se realizó una prueba experimental utilizando carbón y un flujo bajo de aire. Esta condición permitió evaluar el efecto del suministro de aire sobre la combustión del combustible, la generación de calor y el aprovechamiento energético del sistema. A partir de las variables medidas durante el experimento se calcularon la energía útil y la eficiencia térmica del quemador.

La Tabla 15 presenta las constantes empleadas en los cálculos, incluyendo propiedades termodinámicas del agua y parámetros experimentales necesarios para la aplicación de las ecuaciones de eficiencia térmica.

Tabla 15. Constantes utilizadas en la prueba 3

Constante	Valor	Unidad	Significado
ci	4.186	kJ/kg·°C	Calor específico del agua
m_agua	1.0	kg	Masa de agua calentada
Tm	56.6	°C	Temperatura final del agua
Lv	2257	kJ/kg	Calor latente de evaporación del agua
m_evap	0.125	kg	Masa de agua evaporada
m_carbon	0.4	kg	Masa de biomasa consumida
PCI	29000	kJ/kg	Poder calorífico inferior del combustible

Se tomo la medición de la temperatura inicial del agua que fue del 24 °C y la máxima del agua que fue de 56.6 °C se muestra en la siguiente Figura 26:



Figura 26. Temperatura inicial y máxima del agua de la prueba 3

5.1.5. Prueba 4 combustible pellets de madera con un flujo máximo de aire

Con el fin de caracterizar el desempeño térmico del prototipo bajo condiciones de combustión forzada, se realizó una prueba experimental utilizando pellets de madera y un flujo máximo de aire. Esta condición permitió evaluar el efecto del suministro de aire sobre la combustión del combustible, la generación de calor y el aprovechamiento energético del sistema. A partir de las variables medidas durante el experimento se calcularon la energía útil y la eficiencia térmica del quemador.

La Tabla 16 presenta las constantes empleadas en los cálculos, incluyendo propiedades termodinámicas del agua y parámetros experimentales necesarios para la aplicación de las ecuaciones de eficiencia térmica.

Tabla 16. Constantes utilizadas en la prueba 4

Constante	Valor	Unidad	Significado
ci	4.186	kJ/kg·°C	Calor específico del agua
m_agua	1.0	kg	Masa de agua calentada
Tm	74.3	°C	Temperatura final del agua
Lv	2257	kJ/kg	Calor latente de evaporación del agua
m_evap	0.250	kg	Masa de agua evaporada
m_pellet	0.4	kg	Masa de biomasa consumida
PCI	18000	kJ/kg	Poder calorífico inferior del combustible

Se tomo la medición de la temperatura inicial del agua que fue del 21.8 °C y la máxima del agua que de 74.3 °C se muestra en la siguiente Figura 27:



Figura 27. Temperatura inicial y máxima del agua de la prueba 4

5.1.6. Prueba 5 combustible pellets de madera con un flujo medio de aire

Con el fin de caracterizar el desempeño térmico del prototipo bajo condiciones de combustión forzada, se realizó una prueba experimental utilizando pellets de madera y un flujo medio de aire. Esta condición permitió evaluar el efecto del suministro de aire sobre la combustión del combustible, la generación de calor y el aprovechamiento energético del sistema. A partir de las variables medidas durante el experimento se calcularon la energía útil y la eficiencia térmica del quemador.

La Tabla 17 presenta las constantes empleadas en los cálculos, incluyendo propiedades termodinámicas del agua y parámetros experimentales necesarios para la aplicación de las ecuaciones de eficiencia térmica.

Tabla 17. Constantes utilizadas en la prueba 5

Constante	Valor	Unidad	Significado
ci	4.186	kJ/kg·°C	Calor específico del agua
m_agua	1.0	kg	Masa de agua calentada
Tm	73.6	°C	Temperatura final del agua
Lv	2257	kJ/kg	Calor latente de evaporación del agua
m_evap	0.1375	kg	Masa de agua evaporada
m_pellet	0.4	kg	Masa de biomasa consumida
PCI	18000	kJ/kg	Poder calorífico inferior del combustible

Se tomo la medición de la temperatura inicial del agua que fue del 26.8 °C y la máxima del agua que fue del 73.6 °C se muestra en la siguiente Figura 28:



Figura 28. Temperatura inicial y máxima del agua de la prueba 5

5.1.7. Prueba 6 Combustible pellets de madera con un flujo bajo de aire

Con el fin de caracterizar el desempeño térmico del prototipo bajo condiciones de combustión forzada, se realizó una prueba experimental utilizando pellets de madera y un flujo bajo de aire. Esta condición permitió evaluar el efecto del suministro de aire sobre la combustión del combustible, la generación de calor y el aprovechamiento energético del sistema. A partir de las variables medidas durante el experimento se calcularon la energía útil y la eficiencia térmica del quemador.

La Tabla 18 presenta las constantes empleadas en los cálculos, incluyendo propiedades termodinámicas del agua y parámetros experimentales necesarios para la aplicación de las ecuaciones de eficiencia térmica.

Tabla 18. Constantes utilizadas en la prueba 6

Constante	Valor	Unidad	Significado
ci	4.186	kJ/kg·°C	Calor específico del agua
m_agua	1.0	kg	Masa de agua calentada
Tm	69	°C	Temperatura final del agua
Lv	2257	kJ/kg	Calor latente de evaporación del agua
m_evap	0.125	kg	Masa de agua evaporada
m_pellet	0.4	kg	Masa de biomasa consumida
PCI	18000	kJ/kg	Poder calorífico inferior del combustible

Se tomo la medición de la temperatura inicial del agua que fue del 26.2 °C y la máxima del agua que fue de 69 °C se muestra en la siguiente Figura 29:



Figura 29. Temperatura inicial y máxima del agua de la prueba 6

5.2 Desempeño del quemador de biomasa

En este capítulo se presentan y analizan los resultados obtenidos de las seis pruebas experimentales realizadas con el quemador de biomasa semiautomatizado. Se evaluaron dos tipos de combustible (carbón y pellets de madera de 400 g) bajo tres niveles de flujo de aire primario (5.4, 2.75 y 0.635 m³/min). Los parámetros medidos incluyeron potencia térmica, eficiencia térmica y temperatura de los gases de escape.

Los resultados muestran que los pellets de madera ofrecieron un mejor desempeño general en comparación con el carbón. La eficiencia térmica promedio alcanzada con pellets fue del 8.11 %, mientras que con carbón fue del 3.80 %.

En la Tabla 19 se presentan los resultados obtenidos durante las seis pruebas experimentales realizadas con el quemador de biomasa. En estas pruebas se evaluó el desempeño térmico utilizando dos tipos de combustible: carbón y pellets de madera. Se analizaron parámetros como el flujo de aire, la duración de combustión, la temperatura alcanzada, la energía transferida al agua, la tasa de evaporación, la potencia térmica y la eficiencia térmica del sistema.

Tabla 19. Resultados de las 6 pruebas del desempeño y eficiencia térmica.

Combustible (400 gr)	Prueba	Flujo de aire	PCI (Poder Calorífico Inferior)	Duración del combustible	Temperatura inicial	Temperatura final	Energía para calentar el agua	Energía por evaporación	Energía total absorbida	Tasa de calentamiento promedio	Tasa de evaporación	Potencia térmica	Eficiencia térmica	Costo promedio
Carbón	1	5.4 m^3/min	29 MJ	38 min	24.3 °C	67.9 °C	0.18 MJ	0.29 MJ	**0.47 MJ**	0.70 °C/min	0.003 kg/min	0.20 kW	**4.10 %**	$40 – $100 MXN por kg
	2	2.75 m^3/min	29 MJ	49 min	24.6 °C	59.1 °C	0.14 MJ	0.28 MJ	**0.42 MJ**	0.69 °C/min	0.002 kg/min	0.14 kW	**3.67 %**	
	3	0.635 m^3/min	29 MJ	72 min	24.0 °C	56.6 °C	0.13 MJ	0.28 MJ	**0.41 MJ**	0.09 °C/min	0.001 kg/min	0.09 kW	**3.60 %**	
Pellets de madera	4	5.4 m^3/min	18 MJ	38 min	21.8 °C	74.3 °C	0.21 MJ	0.56 MJ	**0.78 MJ**	0.72 °C/min	0.006 kg/min	0.34 kW	**10.88 %**	$7 – $50 MXN por kg
	5	2.75 m^3/min	18 MJ	49 min	26.8 °C	73.6 °C	0.19 MJ	0.31 MJ	**0.50 MJ**	0.62 °C/min	0.002 kg/min	0.17 kW	**7.03 %**	$7 – $50 MXN por kg
	6	0.635 m^3/min	18 MJ	77 min	26.2 °C	69 °C	0.17 MJ	0.28 MJ	**0.46 MJ**	0.51 °C/min	0.001 kg/min	0.09 kW	**6.40 %**	$7 – $50 MXN por kg

Al tener la tabla ya con el resumen y la base de datos se pudo realizar las gráficas que nos permiten comparar los dos combustibles empleados

5.2.1. Potencia térmica vs flujo de aire

La gráfica de la potencia térmica vs flujo de aire como se observa en la Figura 30 muestra la relación entre el flujo de aire (m³/min) y la potencia térmica generada (kW) para dos combustibles: carbón y pellets de madera.

Se observa que a medida que aumenta el flujo de aire, la potencia térmica también se incrementa en ambos combustibles. Esto ocurre porque un mayor suministro de aire proporciona más oxígeno para la combustión, lo que mejora la eficiencia del proceso y permite liberar mayor cantidad de energía.

En el caso del carbón, la potencia térmica aumenta de aproximadamente 0.095 kW a 0.21 kW cuando el flujo de aire pasa de 0.7 m³/min a 5.3 m³/min. Este incremento es relativamente gradual y casi lineal, lo que indica que la combustión del carbón responde de manera estable al aumento del aire.

Por otro lado, los pellets de madera presentan un incremento más pronunciado, pasando de aproximadamente 0.10 kW a 0.34 kW en el mismo rango de flujo de aire. Esto sugiere que los

pellets aprovechan mejor el aumento del suministro de aire, posiblemente debido a su mayor uniformidad, menor humedad y mejor relación superficie-volumen, lo que facilita una combustión más eficiente.

Además, se observa que a bajos flujos de aire ambos combustibles presentan valores de potencia similares, pero a flujos más altos los pellets superan significativamente al carbón. Esto indica que el sistema de combustión utilizado favorece el desempeño energético de los pellets cuando existe un suministro suficiente de aire.

En términos generales, los resultados sugieren que los pellets de madera pueden generar mayor potencia térmica que el carbón bajo condiciones de mayor flujo de aire, lo cual los convierte en una alternativa eficiente en sistemas de combustión con control de ventilación.

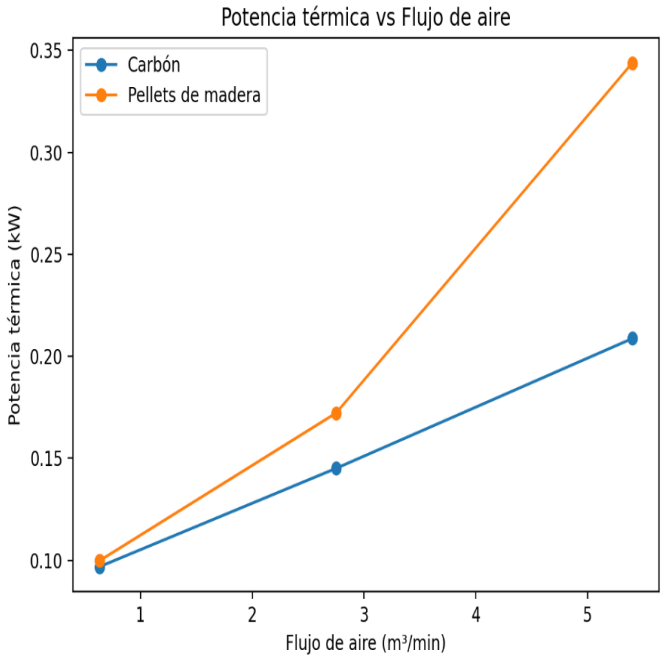

Figura 30. Potencia térmica vs flujo de aire

5.2.2. Potencia media carbón vs pellets

La gráfica de la potencia media carbón vs pellets como se observa en la Figura 31 se presenta una comparación de la potencia térmica media generada durante la combustión de carbón y pellets de madera. Este análisis permite identificar cuál de los dos combustibles proporciona un mayor rendimiento energético promedio bajo las condiciones de operación evaluadas.

A partir de los resultados obtenidos, se observa que los pellets de madera presentan una mayor potencia térmica media en comparación con el carbón. En particular, los pellets alcanzan aproximadamente 0.205 kW, mientras que el carbón presenta un valor cercano a 0.15 kW.

Esta diferencia sugiere que los pellets de madera permiten una liberación de energía más eficiente durante el proceso de combustión. Este comportamiento puede estar relacionado con las características físicas y químicas del combustible, tales como su mayor homogeneidad, menor contenido de humedad y mejor distribución del material, lo que favorece una combustión más uniforme.

Por otro lado, el carbón presenta una potencia térmica media menor, lo cual puede deberse a variaciones en su composición o a una combustión menos uniforme dentro del sistema evaluado.

En términos generales, los resultados indican que los pellets de madera ofrecen un mejor desempeño energético promedio en comparación con el carbón, lo que refuerza su potencial como combustible alternativo en sistemas de combustión con suministro controlado de aire.

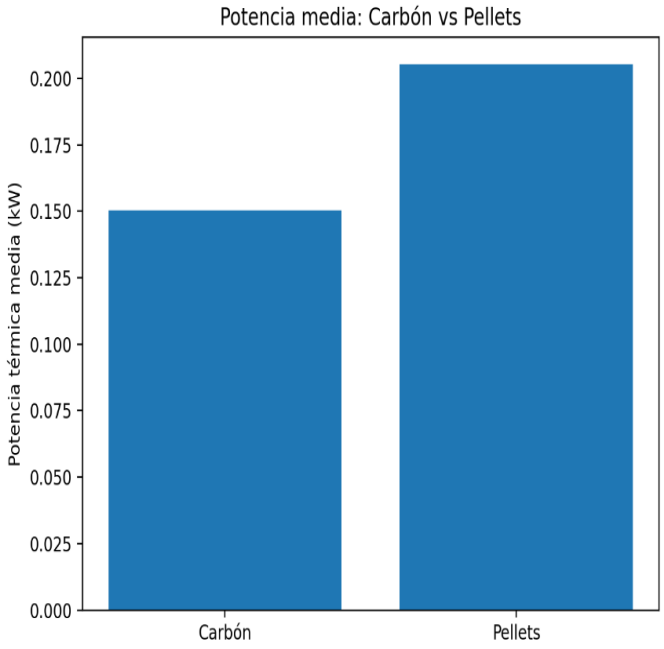

Figura 31. Potencia media de carbón vs pellets

5.2.3. Eficiencia térmica vs flujo de aire

La gráfica de la eficiencia térmica vs flujo de aire como se observa en la Figura 32 se muestra la relación entre el flujo de aire y la eficiencia térmica obtenida durante la combustión de carbón y pellets de madera. Esta comparación permite analizar el desempeño energético de ambos combustibles bajo diferentes condiciones de suministro de aire.

A partir de los resultados obtenidos, se observa que la eficiencia térmica aumenta conforme se incrementa el flujo de aire en ambos combustibles. Este comportamiento se debe a que un mayor flujo de aire favorece la disponibilidad de oxígeno en la cámara de combustión, lo que contribuye a mejorar la oxidación del combustible y, por lo tanto, el aprovechamiento de la energía liberada durante el proceso.

En el caso del carbón, el incremento de la eficiencia térmica es relativamente bajo, pasando aproximadamente de 3.6 % a 4.1 % conforme aumenta el flujo de aire. Este comportamiento sugiere que el carbón presenta una respuesta limitada al incremento del aire de combustión, posiblemente debido a características propias del combustible como su estructura o el proceso de combustión más lento.

Por otro lado, los pellets de madera presentan valores de eficiencia térmica significativamente mayores, aumentando aproximadamente de 6.4 % hasta 10.9 % conforme se incrementa el flujo de aire. Este comportamiento indica que los pellets aprovechan de manera más eficiente el

suministro adicional de aire, lo cual puede atribuirse a su mayor homogeneidad, menor contenido de humedad y mejores condiciones para una combustión más completa.

En términos generales, los resultados muestran que los pellets de madera presentan una eficiencia térmica superior al carbón en todo el rango de flujo de aire evaluado, lo que sugiere que este tipo de biomasa puede representar una alternativa más eficiente en sistemas de combustión con control de ventilación.

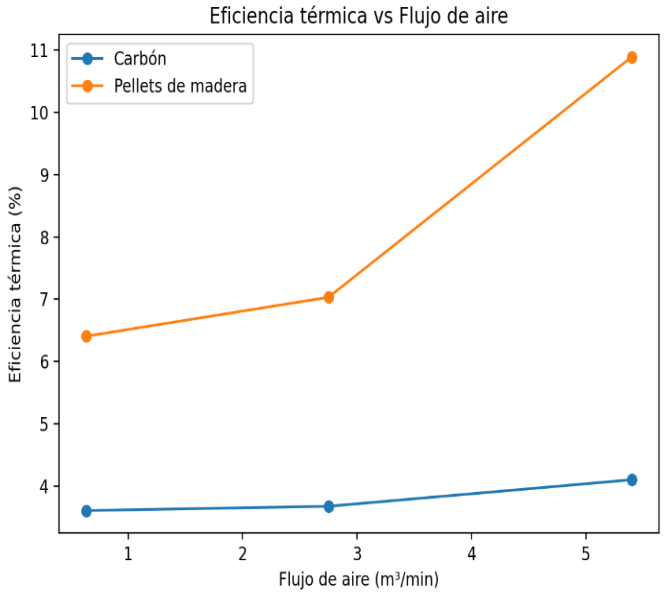

Figura 32. Eficiencia térmica vs flujo de aire

5.2.4. Eficiencia térmica promedio carbón vs pellets

La gráfica de la eficiencia térmica promedio carbón vs pellets como se observa en la Figura 33 muestra la comparación de la eficiencia térmica promedio obtenido al utilizar carbón y pellets como combustibles. Los resultados indican una diferencia significativa entre ambos, evidenciando un mejor desempeño energético cuando se emplean pellets.

En el caso del carbón, se obtuvo una eficiencia térmica promedio aproximada de 3,8 %, lo cual refleja un aprovechamiento relativamente bajo de la energía generada durante el proceso de combustión. Este resultado puede estar asociado a factores como pérdidas de calor, características propias del combustible o condiciones del sistema de combustión.

Por otro lado, el uso de pellets mostró una eficiencia térmica promedio cercana al 8,1 %, superando más del doble la eficiencia obtenida con carbón. Este incremento sugiere que los pellets presentan una combustión más eficiente y un mejor aprovechamiento de la energía térmica generada.

En términos comparativos, los resultados evidencian que el uso de pellets permite mejorar significativamente la eficiencia térmica del sistema, lo cual podría atribuirse a su menor contenido de humedad, mayor homogeneidad y mejores propiedades de combustión frente al carbón.

Por lo tanto, desde el punto de vista energético, los pellets representan una alternativa más eficiente como combustible, contribuyendo a un mejor rendimiento del sistema analizado.

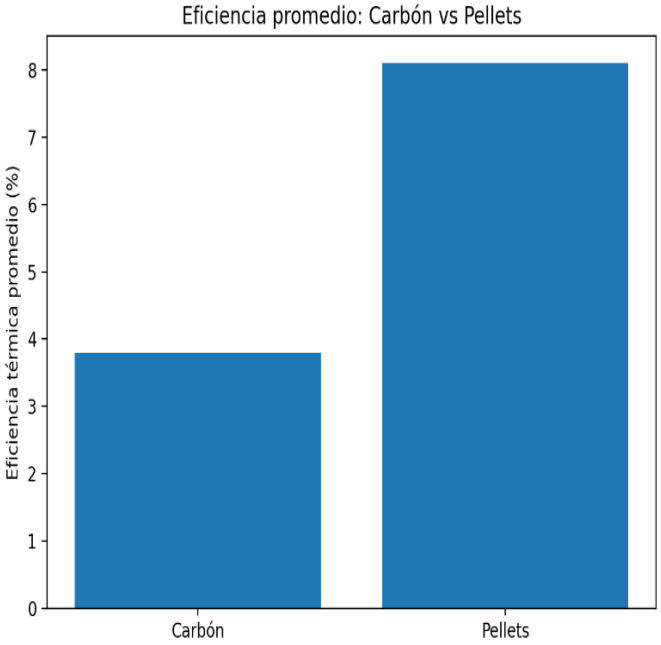

Figura 33. Comparación de eficiencia térmica promedio

5.2.5. Temperatura de gases vs tiempo con flujo de aire máximo

La gráfica de la temperatura de gases vs tiempo con flujo de aire máximo como se observa en la Figura 34 presenta la evolución de la temperatura de los gases de combustión en función del tiempo para los combustibles carbón y pellets, bajo una condición de operación de PWM 255, correspondiente a un caudal de aire aproximado de 5,4 m³/min.

En la etapa inicial del proceso (0–5 minutos), ambos combustibles muestran un incremento progresivo de la temperatura, asociado al inicio de la combustión y al calentamiento del sistema. Sin embargo, se observa que los pellets presentan un aumento de temperatura más rápido durante los primeros minutos, alcanzando aproximadamente 200 °C alrededor del minuto 4, mientras que el carbón presenta un incremento más gradual en esta fase.

Posteriormente, entre los 6 y 15 minutos, el carbón experimenta un aumento más pronunciado de la temperatura, alcanzando su valor máximo cercano a 480 °C aproximadamente en el minuto 14. En contraste, los pellets alcanzan su temperatura máxima alrededor de 310–320 °C aproximadamente en el minuto 12, evidenciando un pico de temperatura menor en comparación con el carbón.

A partir de los 15 minutos, ambos combustibles muestran una disminución progresiva de la temperatura de los gases, indicando la fase de agotamiento del combustible y la reducción de la intensidad de la combustión. Durante esta etapa, la temperatura del carbón se mantiene ligeramente por encima de la de los pellets hasta aproximadamente el minuto 30, momento en el cual ambas curvas tienden a converger.

En términos generales, los resultados evidencian que el carbón alcanza temperaturas máximas considerablemente más altas, lo que indica una combustión más intensa. Por otro lado, los pellets presentan una combustión más moderada y estable, con picos de temperatura menores, pero con un comportamiento térmico más uniforme durante el proceso.

Estos resultados permiten identificar diferencias en el comportamiento térmico de ambos combustibles, lo cual es relevante para evaluar su desempeño energético y su aplicación en sistemas de combustión controlada.

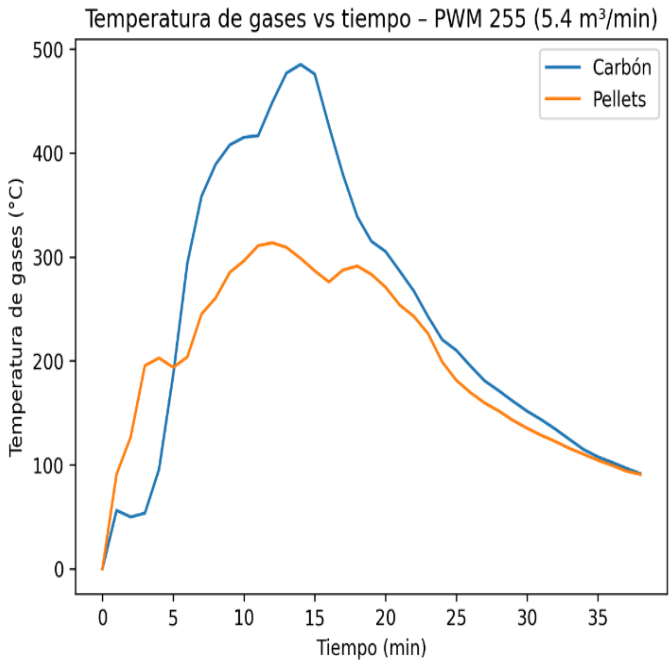

Figura 34. Comparación de la temperatura de gases vs tiempo a 5.4m³/min.

5.2.6. Temperatura de gases vs tiempo con flujo de aire medio

La gráfica de la temperatura de gases vs tiempo con flujo de aire medio como se observa en la Figura 35 muestra la variación de la temperatura de los gases de combustión en función del tiempo para los combustibles carbón y pellets bajo una condición de operación de PWM 130, equivalente a un caudal de aire aproximado de 2,75 m³/min.

En los primeros minutos del proceso (0–10 minutos), ambos combustibles presentan un incremento gradual de la temperatura de los gases. No obstante, los pellets muestran un aumento más rápido, alcanzando temperaturas cercanas a 230–240 °C alrededor del minuto 10, mientras que el carbón presenta un incremento más lento, con temperaturas cercanas a 60 °C en el mismo intervalo de tiempo.

Posteriormente, entre los 15 y 25 minutos, el carbón experimenta un aumento más pronunciado de la temperatura, alcanzando su valor máximo cercano a los 310 °C aproximadamente en el minuto 20. En comparación, los pellets alcanzan una temperatura máxima ligeramente superior, cercana a los 350 °C alrededor del minuto 24, lo que indica una combustión más intensa bajo esta condición de flujo de aire.

Después de alcanzar los valores máximos, ambos combustibles presentan una disminución progresiva de la temperatura de los gases, lo que sugiere la reducción de la intensidad de la combustión debido al consumo del combustible disponible. Durante esta fase, las temperaturas de ambos combustibles tienden a aproximarse gradualmente hasta estabilizarse en valores cercanos a 90–100 °C hacia el final del ensayo.

En términos generales, los resultados muestran que, a un menor flujo de aire, los pellets alcanzan temperaturas máximas ligeramente superiores y presentan un incremento más rápido de la temperatura, mientras que el carbón presenta un aumento más tardío pero con un comportamiento térmico relativamente similar durante la fase de enfriamiento. Estos resultados permiten evidenciar la influencia del flujo de aire en el comportamiento térmico de los combustibles evaluados.

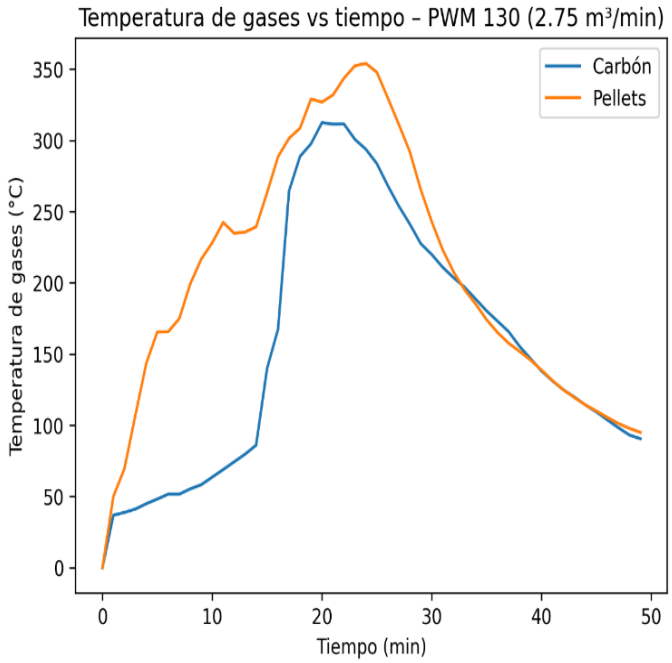

Figura 35. Comparación de la temperatura de gases vs tiempo a 2.75m³/min.

5.2.7. Temperatura de gases vs tiempo con flujo de aire bajo

La gráfica de la temperatura de gases vs tiempo con flujo de aire bajo como se observa en la Figura 36 presenta la evolución de la temperatura de los gases de combustión en función del tiempo para los combustibles carbón y pellets bajo una condición de operación de PWM 30, correspondiente a un caudal de aire aproximado de 0,635 m³/min.

Durante los primeros minutos del ensayo (0–10 minutos), ambos combustibles muestran un incremento inicial en la temperatura de los gases. Sin embargo, los pellets presentan un aumento más rápido, alcanzando temperaturas cercanas a 150 °C en aproximadamente 7 minutos, mientras que el carbón alcanza valores cercanos a 80 °C en el mismo intervalo, evidenciando una combustión inicial más lenta para este último.

A medida que avanza el proceso (10–35 minutos), se observa que los pellets continúan incrementando su temperatura de forma progresiva, alcanzando un valor máximo cercano a los 330 °C aproximadamente en el minuto 33. En contraste, el carbón presenta un aumento más moderado, alcanzando su temperatura máxima alrededor de 160 °C entre los minutos 22 y 25, manteniendo posteriormente un comportamiento relativamente estable durante algunos minutos. Posteriormente, a partir de aproximadamente 35 minutos, ambas curvas muestran una disminución gradual de la temperatura, indicando el inicio de la fase de agotamiento del

combustible. Durante esta etapa, las temperaturas de ambos combustibles tienden a converger progresivamente hasta alcanzar valores cercanos a 90–100 °C al final del ensayo.
En términos generales, los resultados indican que, a un flujo de aire bajo, los pellets alcanzan temperaturas significativamente más altas y presentan una combustión más intensa en comparación con el carbón. Por otro lado, el carbón muestra un comportamiento térmico más estable, pero con valores de temperatura considerablemente menores, lo que sugiere una menor intensidad de combustión bajo estas condiciones de suministro de aire.

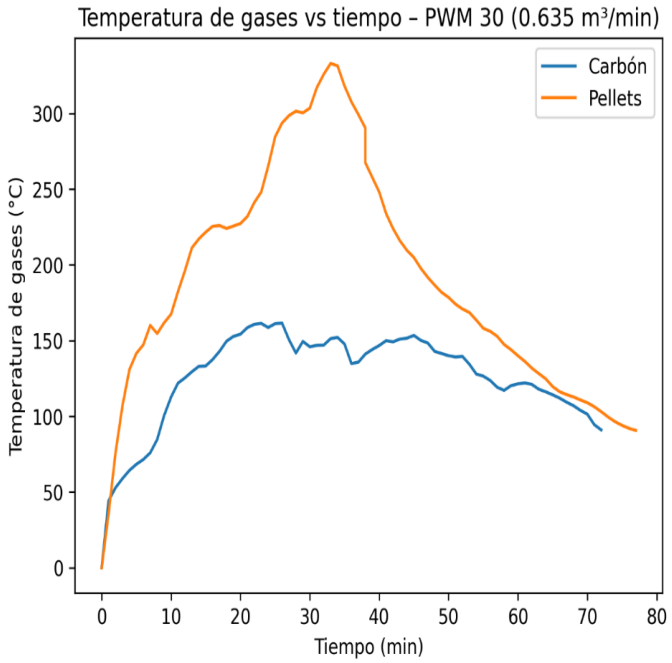

Figura 36. Comparación de la temperatura de gases vs tiempo a 0.635m³/min.

5.2.8. Comparación de los combustibles y los distintos flujos de aire

La gráfica de la comparación de los combustibles y los distintos flujos de aire como se observa en la Figura 37 presenta la comparación de la temperatura de los gases de combustión en función del tiempo para los combustibles carbón y pellets bajo tres condiciones de flujo de aire diferentes: PWM 30 (0,635 m³/min), PWM 130 (2,75 m³/min) y PWM 255 (5,4 m³/min). Esta comparación permite evaluar la influencia del suministro de aire en el comportamiento térmico de cada combustible durante el proceso de combustión.

En el caso del carbón, se observa que el incremento del flujo de aire tiene una influencia significativa en la temperatura alcanzada durante la combustión. Con PWM 255, el carbón alcanza la temperatura máxima más alta, cercana a 480 °C, aproximadamente en los primeros 15 minutos del ensayo, lo que indica una combustión más intensa bajo condiciones de mayor suministro de oxígeno. En contraste, con PWM 130 la temperatura máxima se reduce a aproximadamente 310 °C, mientras que con PWM 30 el valor máximo apenas alcanza 160 °C, evidenciando que una menor disponibilidad de aire limita significativamente la intensidad de la combustión.

Por otro lado, los pellets muestran un comportamiento diferente frente a la variación del flujo de aire. A PWM 30, los pellets alcanzan una temperatura máxima cercana a 330 °C, superior a la obtenida por el carbón bajo la misma condición. De manera similar, con PWM 130 los pellets

presentan un pico de temperatura alrededor de 350 °C, mientras que con PWM 255 la temperatura máxima se sitúa aproximadamente en 310 °C. Estos resultados sugieren que los pellets pueden mantener una combustión eficiente incluso a flujos de aire más bajos.

En general, la comparación muestra que el carbón requiere mayores flujos de aire para alcanzar temperaturas elevadas, mientras que los pellets presentan un comportamiento térmico más eficiente a flujos de aire bajos e intermedios. Además, se observa que las curvas correspondientes a pellets presentan incrementos de temperatura más rápidos durante las etapas iniciales de la combustión, lo que indica una mayor facilidad de ignición y un proceso de combustión más rápido en comparación con el carbón.

Estos resultados evidencian que el flujo de aire es un factor determinante en el desempeño térmico de los combustibles, y que la respuesta del sistema varía según el tipo de combustible utilizado. En este sentido, los pellets presentan ventajas operativas en condiciones de menor suministro de aire, mientras que el carbón alcanza su máximo potencial energético únicamente bajo condiciones de mayor flujo de aire.

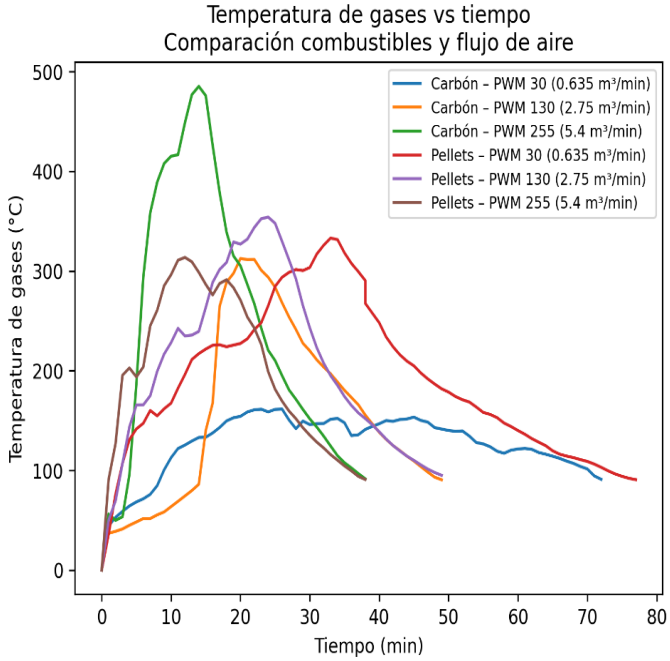

Figura 37. Comparación de la temperatura de los gases de salida

5.2.9. Incertidumbre del sensor termopar tipo k y promedios de eficiencias térmicas

Todo sistema experimental presenta cierto nivel de incertidumbre asociado a la medición de variables físicas. En el caso del quemador de biomasa desarrollado, las principales fuentes de incertidumbre se relacionan con la medición de temperatura, variación del flujo de aire, alimentación de biomasa y condiciones de combustión.

La temperatura fue medida mediante un termopar tipo K conectado a un módulo MAX6675, el cual presenta una incertidumbre aproximada de ±2 °C bajo condiciones normales de operación.

Esta variación puede afectar ligeramente los valores registrados durante las pruebas térmicas, especialmente en condiciones de combustión inestable.

Adicionalmente, se realizó un análisis de incertidumbre asociado a la eficiencia térmica obtenida durante las pruebas experimentales del quemador de biomasa.

La incertidumbre experimental se estimó a partir de la variación observada entre las diferentes pruebas realizadas para cada tipo de combustible, considerando las condiciones de operación del sistema y las variaciones inherentes al proceso de combustión.

Las mediciones de temperatura se realizaron mediante un termopar tipo K con una tolerancia de ±2 °C, constituyendo la principal fuente de incertidumbre instrumental del sistema experimental. No obstante, esta limitación no afecta la tendencia general observada ni las conclusiones obtenidas respecto al desempeño del quemador.

Promedio, desviación estándar e incertidumbre de las eficiencias térmicas del carbón:
Sumamos los tres valores de la muestra y dividimos el resultado entre 3 (n=3)

$$\bar{x}=\frac{\sum x_i}{n} \qquad \text{(EC. 10)}$$

$$\bar{x} = \frac{4.10 + 3.67 + 3.60}{3} = \frac{11.37}{3} = 3.79\%$$

Donde:

- n: Número de observaciones o tamaño de la muestra (Adimensional)
- x_i: $Valor\ individual\ de\ la\ muestra\%$
- $\bar{x}$: $Media\ aritmética\ o\ promedio\ de\ los\ valores\ medidos\ \%$

Promedio, desviación estándar e incertidumbre de las eficiencias térmicas de los pellets de madera:

Sumamos los tres valores de la muestra y dividimos el resultado entre 3 (n=3)

$$\bar{x}=\frac{\sum x_i}{n} \qquad \text{(EC. 10)}$$

$$\bar{x}= \frac{10.88+7.03+6.40}{3} = \frac{24.31}{3} = 8.10\%$$

Donde:

- n: Número de observaciones o tamaño de la muestra (Adimensional)
- x_i: $Valor\ individual\ de\ la\ muestra\%$
- $\bar{x}$: $Media\ aritmética\ o\ promedio\ de\ los\ valores\ medidos\ \%$

5.2.10. Resultados globales del desempeño térmico del quemador de biomasa

La eficiencia térmica promedio fue de 8.11 % con pellets y 3.80 % con carbón vegetal, lo que indica un aprovechamiento energético aproximadamente 2.1 veces mayor al utilizar pellets.

El quemador operando con pellets de madera alcanzó una potencia térmica media útil de 0.205 kW, mientras que con carbón se obtuvo 0.150 kW, lo que representa un incremento del 36.7 % en la transferencia de calor al agua al emplear biomasa densificada.

La mayor eficiencia térmica obtenida fue de 10.88 % utilizando pellets de madera con un flujo de aire de 5.4 m^3/min.

El consumo específico de combustible fue menor con pellets, evidenciando un mejor rendimiento energético por unidad de masa consumida. Asimismo, la potencia térmica aumentó con el flujo de aire primario hasta alcanzar un régimen óptimo de operación.

El flujo de 2.75 m^3/min mostró un compromiso favorable entre eficiencia térmica, potencia útil, estabilidad de la combustión y consumo de combustible.

El carbón alcanzó temperaturas máximas más elevadas a altos flujos de aire; sin embargo, los pellets presentaron una entrega de potencia más estable en el tiempo, condición favorable para aplicaciones domésticas. Además, la temperatura de los gases de combustión aumentó con el flujo de aire, confirmando una combustión más intensa, aunque asociada a mayores pérdidas térmicas en los gases de salida.

Se observó que la máxima eficiencia térmica alcanzada por el quemador fue de 10.88 %, obtenida utilizando pellets de madera y un flujo de aire de 5.4 m^3/min. Este comportamiento sugiere que el incremento en el suministro de aire favoreció una combustión más completa del combustible.

Se observó que, al aumentar el flujo de aire, la potencia térmica tiende a incrementarse en ambos combustibles, aunque de forma más notable con pellets. Sin embargo, la eficiencia térmica no siempre mejora con mayor flujo de aire. En flujos elevados (5.4 m^3/min) se presentaron mayores pérdidas de calor por los gases de escape y un posible enfriamiento de la zona de combustión. Por el contrario, con flujos muy bajos (0.635 m^3/min) se favoreció una combustión incompleta, reduciendo la eficiencia.

Aunque los valores de eficiencia térmica son relativamente bajos, esto se explica principalmente por las pérdidas significativas de calor por radiación y convección en las paredes de la cámara de combustión, la ausencia de un aislamiento térmico adecuado y las pérdidas por los gases de escape a alta temperatura. Adicionalmente, el prototipo no cuenta aún con un intercambiador de calor para aprovechar mejor la energía generada. Estos resultados son consistentes con prototipos iniciales de quemadores de biomasa sin optimización térmica y sirven como base para mejoras futuras.

Los pellets de madera mostraron una combustión más estable y uniforme en el tiempo, entregando potencia de manera más constante que el carbón. Esto se atribuye a su mayor densidad, menor contenido de humedad y al mejor control en la alimentación mediante el tornillo sinfín.

Capítulo 6. Conclusiones y trabajos futuros

6.1. Conclusiones

La investigación tuvo como objetivo general el desarrollo de un quemador de biomasa para uso rural. A lo largo de la investigación se logró cumplir satisfactoriamente con los objetivos específicos planteados.

Entre los principales logros se destacan los siguientes:

- Se diseñó en SolidWorks un quemador de biomasa con sistema de alimentación automática mediante tornillo sinfín y control de flujo de aire primario.
- Se construyó exitosamente el prototipo integrando componentes mecánicos, electrónicos y de control.
- Se implementó un sistema semiautomático que permite regular la alimentación de combustible y el flujo de aire mediante un microcontrolador.
- Se realizaron seis pruebas experimentales con dos tipos de combustible (carbón y pellets de madera de 400 g) y tres diferentes flujos de aire (5.4, 2.75 y 0.635 m^3/min).
- Se evaluó el desempeño térmico mediante el método de calentamiento de agua, determinando la potencia térmica y la eficiencia térmica.
- La máxima eficiencia térmica obtenida fue de 10.88 % utilizando pellets de madera y un flujo de aire de 5.4 m^3/min.
- No obstante, el flujo de aire de 2.75 m^3/min mostró el mejor compromiso entre eficiencia térmica, estabilidad de la combustión y consumo de combustible, por lo que se considera la condición operativa más adecuada para el prototipo desarrollado.

Asimismo, los resultados obtenidos mostraron que el prototipo es funcional. Los pellets de madera presentaron un mejor comportamiento que el carbón, alcanzando una eficiencia térmica promedio de 8.11 %, mientras que con carbón se obtuvo un promedio de 3.80 %. Aunque los valores de eficiencia son modestos, resultan aceptables para un primer prototipo sin aislamiento térmico ni recuperador de calor. Las principales causas de las pérdidas de energía fueron: radiación y convección en las paredes de la cámara, altas temperaturas de los gases de escape y combustión incompleta en algunos regímenes.

La principal limitación identificada es la baja eficiencia térmica del prototipo, derivada principalmente de la ausencia de aislamiento térmico y de un intercambiador de calor. Además, no se realizaron mediciones de emisiones contaminantes ni pruebas de operación continua de larga duración.

Los resultados obtenidos durante las pruebas experimentales demostraron que el quemador de biomasa desarrollado es capaz de mantener una combustión estable mediante la integración del sistema de alimentación y suministro de aire primario. El prototipo construido permitió validar el funcionamiento general del sistema, así como la viabilidad del diseño propuesto para aplicaciones rurales.

Aunque existen variables experimentales asociadas al comportamiento térmico y a las características físicas de la biomasa utilizada, el sistema presentó estabilidad operativa durante

las pruebas realizadas. Además, la implementación del sistema de control y alimentación automática permitió mejorar la continuidad de combustión y reducir interrupciones durante la operación.

Este trabajo demuestra que es posible desarrollar un quemador de biomasa funcional semiautomatizado con tecnología accesible.

6.2. Trabajos futuros

Como trabajos futuros se propone optimizar el diseño del quemador de biomasa con el fin de incrementar su eficiencia térmica y reducir las pérdidas de calor durante la combustión.

Se sugiere incorporar aislamiento térmico en la cámara de combustión y en los ductos de salida de gases, permitiendo conservar una mayor cantidad de energía útil.

También se propone evaluar el desempeño del quemador utilizando otros tipos de biomasa residual disponibles en zonas rurales, como cáscara de coco, bagazo, astillas, residuos agrícolas y briquetas, con el propósito de analizar su comportamiento térmico y viabilidad energética.

De igual manera, sería importante realizar pruebas para confirmar eficiencia térmica de los dos combustibles y que estén también orientadas a la medición de emisiones contaminantes, como monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO_2) y material particulado, con el objetivo de comparar el impacto ambiental del sistema respecto a estufas tradicionales de leña.

Finalmente, se recomienda desarrollar una versión portátil o adaptada a las necesidades específicas de comunidades rurales, así como efectuar pruebas de operación prolongada en condiciones reales para validar su durabilidad, seguridad y aceptación por parte de los usuarios.

6.3. Logros obtenidos

Artículos publicados

- García García, R. Y., Martínez-Rebollar, A., & Da Silva Muñoz, L. (2024). *Literature review of the development of biomass burners*. Tecnología y Ciencia Aplicada, 7(2). https://tycap.cenidet.tecnm.mx/
- García García, R. Y., Martínez Rebollar, A., & De Silva Muñoz, L. (2025). *Control on/off de alimentación de biomasa con sensor termopar K*. En Congreso Internacional de Mecatrónica, Control e Inteligencia Artificial (CIMCIA). Universidad Nacional Autónoma de México, FES Cuautitlán, Estado de México, México.

Conferencias

- Participación como asistente en el *Congreso Internacional de Mecatrónica, Control e Inteligencia Artificial (CIMCIA 2025)*, realizado en la Universidad Nacional Autónoma de México (FES Cuautitlán), donde se presentó el trabajo titulado *"Control on/off de alimentación de biomasa con sensor termopar K"*.
- Participación como asistente en el Congreso Internacional de *Tecnología y Ciencia Aplicada*, Vol. 7, Núm. 2 (2024), en la publicación del artículo *"Literature review of the development of biomass burners*

Referencias

Referencias

Basu, P., Cen, K., & Jestin, L. (2000). Boilers and Burners: Design and Theory. Springer Science+Business Media.

Brochero Montero, J. J., & Estupiñán Hinestroza, R. (2019). Sistema de calentamiento con biomasa para uso alternativo en el secador solar de túnel Hohenheim. Universidad Pontificia Bolivariana, Facultad de Ingeniería Mecánica, Floridablanca.

Buchmayr, M., Gruber, J., Hargassner, M., & Hochenauer, C. (2016). A computationally inexpensive CFD approach for small-scale biomass burners equipped with enhanced air staging. Energy Conversion and Management, 115, 32–42.

Choe, K. (2021). Review of wood biomass cyclone burner. Energies, 14(4807), 1–18.

Coady, J., & Duquette, J. (2021). Quantifying the impacts of biomass-driven combined heat and power grids in northern rural and remote communities. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 148, 111296.

Figaj, R. (2021). Performance assessment of a renewable micro-scale trigeneration system based on biomass steam cycle, wind turbine, photovoltaic field. Renewable Energy, 177, 193–208.

Guevara, J. A. M. (2013). Diseño de quemador de biomasa para trapiches paneleros. Entre Ciencia e Ingeniería, 7(14), 77–84.

Huscio, T., & Kowalewski, A. (2017). Modern burner for central heating boilers utilizing renewable energy source – biomass. Engineering for Rural Development, 1271–1276.

Imbrenda, V., Coluzzi, R., Mariani, F., Nosova, B., Cudlinova, E., Salvia, R., Quaranta, G., Salvati, L., & Lanfredi, M. (2023). Working in (slow) progress: Socio-environmental and economic dynamics in the forestry sector and the contribution to sustainable development in Europe. Sustainability, 15(10271).

Iriarte, A., García, V., & Rodríguez, C. (1995). Quemador de residuos para la provisión de energía térmica al medio rural: ensayos preliminares. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente – AVERMA, 1, 89–96.

Kashyap, A., Mishra, V., & Sharma, A. (2024). *Comparative performance analysis of domestic biomass cookstoves: Emissions and thermal efficiency*. Renewable Energy, 220, 567–579.

Lizana Fernández, J. M., & Velasco Rivera, E. O. (2020). Diseño de un quemador de combustibles sólidos para estudios físicos y térmicos en la escuela de ingeniería mecánica eléctrica.

Madhlopa, A. (2007). Solar dryer with thermal storage and biomass backup heater. Solar Energy, 81, 449–462.

Manrique, S. M., Salvo, A. W., Villafañe, F., Martín, J. N., & Honorato, M. O. (2020). Panorama de tecnologías de bioenergía en Argentina.

Mathiesen, B. V., Lund, H., & Connolly, D. (2012). Limiting biomass consumption for heating in 100% renewable energy systems. Energy, 48(1), 160–168.

Mendiburu, F. L. (2010). Desarrollo rural y reservas de la biosfera: La esperanza de nuevos horizontes.

Míguez, J. L., Morán, J. C., Granada, E., & Porteiro, J. (2012). *Review of technology in small-scale biomass combustion systems in the European market*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 16(6), 3867–3875.

Mirza, U. K., Ahmad, N., & Majeed, T. (2008). An overview of biomass energy utilization in Pakistan. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 12*(7), 1988–1996.

Patil, S. R., Kalbande, S. R., & Khambalkar, V. P. (2017). Feasibility evaluation of briquette biomass cook stove for rural area. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences, 6*(10), 3190–3203.

Rodríguez, C., Iriarte, A., & Luque, V. H. (1999). Quemador de biomasa con flujo de aire indirecto para su uso combinado con energía solar en el calentamiento de invernaderos. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente, 3,* 9–13.

Ruiz, I. M. (2011). El uso de la biomasa cobra cada vez más importancia en el sector doméstico. *Vida Rural, 336,* 50–54.

Saraswat, D., & Kinshuk, K. (2022). Technology-based risk management for rural sectors and natural disasters in developing countries. *Munich Personal RePEc Archive.*

Sheinbaum Pardo, C. (1988). *Estudio termodinámico de una estufa doméstica de leña para uso rural*. Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México.

Surjosatyo, A., & Ani, F. N. (2011). Study of Enhancing the Swirl Burner Performance on a Small Scale Biomass Gasification. *International Journal of Engineering & Technology*

IJET- IJENS, 11(4), 21-38.

Suyitno, B. M., Ismail, & Rahman, R. A. (2022). An experimental study on the development of multipurpose biomass burner for cooking stove and thermal generator for household application. *Acta Innovations, 45,* 72–81.

Tucki, K., Orynycz, O., Wasiak, A., Świć, A., & Wichłacz, J. (2019). The impact of fuel type on the output parameters of a new biofuel burner. *Energies, 12*(1383), 1–12.

Wegener, M. (2020). *Feasibility of biomass-driven distributed concepts: Island-based polygeneration systems* [Tesis doctoral]. Universitat Politècnica de Catalunya y KTH Royal Institute of Technology.

Yin, C., Rosendahl, L., Kær, S. K., & Condra, T. J. (2004). Use of numerical modeling in design for co-firing biomass in wall-fired burners. *Chemical Engineering Science, 59,* 3281–3292.

Zhang, W., Tong, Y., Wang, H., Chen, L., Ou, L., Wang, X., Liu, G., & Zhu, Y. (2014). Emission of metals from pelletized and uncompressed biomass fuels combustion in rural household stoves in China. *Scientific Reports, 4,* 5611.