

**SISTEMA DE CALENTAMIENTO CON BIOMASA PARA USO ALTERNATIVO
EN EL SECADOR SOLAR DE TUNEL HOHENHEIM.**

**JUAN JOSE BROCHERO MONTERO
ROMARIO ESTUPIÑAN HINESTROZA**

**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA
FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA
FLORIDABLANCA**

2019

**SISTEMA DE CALENTAMIENTO CON BIOMASA PARA USO ALTERNATIVO
EN EL SECADOR SOLAR DE TUNEL HOHENHEIM**

Presentado por:

**JUAN JOSE BROCHERO MONTERO
ROMARIO ESTUPIÑAN HINESTROZA**

**Trabajo de grado para optar por el título de
INGENIERIA MECÁNICA**

DIRECTORA

Dr.agr. SANDA PATRICIA CUERVO ANDRADE

**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA
FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA
FLORIDABLANCA**

2019

NOTA DE ACEPTACIÓN:

JURADO

JURADO

TABLA DE CONTENIDO

| | |
|--|----|
| 1. INTRODUCCIÓN..... | 11 |
| 2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA..... | 12 |
| 3. OBJETIVOS..... | 14 |
| 3.1 OBJETIVO GENERAL..... | 14 |
| 3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS..... | 14 |
| 4. ALCANCE..... | 15 |
| 5. JUSTIFICACIÓN..... | 16 |
| 6. ANTECEDENTES..... | 17 |
| 7. MARCO TEÓRICO..... | 19 |
| 7.1 BIOMASA..... | 19 |
| 7.1.1 Biomasa primaria..... | 20 |
| 7.1.2 Biomasa secundaria..... | 21 |
| 7.1.3 Biomasa residual en el sector agrícola..... | 23 |
| 7.1.4 Procesos de transformación de la biomasa..... | 24 |
| 7.1.5 Tipos de procesos de transformación de la biomasa..... | 25 |
| 7.1.6 Caracterización de la Biomasa..... | 28 |
| 7.1.7 Importancia de las variables físicas de las muestras de Biomasa..... | 31 |
| 7.2 TÚNELES DE SECADO..... | 35 |
| 7.3 QUEMADORES..... | 38 |
| 7.3.1 Impacto..... | 38 |
| 7.3.2 Métodos de combustión en los quemadores..... | 40 |
| 7.3.3 Transferencia de calor..... | 45 |

| | | |
|-------|--|-----|
| 7.3.4 | Mecanismos de transferencia de calor..... | 46 |
| 7.3.5 | Tratamiento de partículas en gases de combustión de la biomasa.... | 46 |
| 8. | METODOLOGÍA..... | 48 |
| 9. | ANÁLISIS Y RESULTADOS..... | 56 |
| 9.1 | DISEÑO DEL QUEMADOR Y SELECCIÓN DE LA BIOMASA..... | 55 |
| 9.2 | CONSTRUCCIÓN DEL QUEMADOR E INSTALACIÓN DEL SISTEMA DE CALENTAMIENTO | 67 |
| 9.2.1 | Materiales de construcción..... | 70 |
| 9.3 | PRUEBAS DE DESEMPEÑO Y AJUSTE DEL SISTEMA DE CALENTAMIENTO CON BIOMASA | 87 |
| 10. | CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES..... | 96 |
| 11. | BIBLIOGRAFÍA..... | 98 |
| 12. | ANEXOS | 101 |

LISTA DE TABLAS

| | |
|---|----|
| Tabla 1: Poder calórico de la biomasa..... | 26 |
| Tabla 2: Composición elemental de las biomosas seleccionadas para el análisis. | 29 |
| Tabla 3: Propiedades de combustión biomasa palma de aceite..... | 30 |
| Tabla 4: Características de diferentes combustibles de la biomasa. | 34 |
| Tabla 5: Propiedades de la combustión de la biomasa..... | 35 |
| Tabla 6. Características de los sistemas de combustión a pequeña escala | 41 |
| Tabla 7. Características y aplicaciones de los ciclones | 47 |
| Tabla 8. Biomasa y poder calorífico..... | 56 |
| Tabla 9. Datos experimentales temperaturas de las temperaturas del sistema de calentamiento en el punto de entrada del túnel, biomasa madera..... | 90 |
| Tabla 10. Datos experimentales de las temperaturas del sistema de calentamiento en el punto de salida del túnel, biomasa madera | 91 |
| Tabla 11. Datos experimentales de las temperaturas del sistema de calentamiento en el punto de entrada del túnel, biomasa cascara de cacao..... | 92 |
| Tabla 12. Datos experimentales de las temperaturas del sistema de calentamiento en el punto de salida del túnel, biomasa cascara de cacao..... | 93 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1. Clasificación Fuentes de Energía Renovable | 21 |
| Figura 2. Origen y generación de la Biomasa | 23 |
| Figura 3. Procesos de conversión energética de la biomasa. Materias primas utilizadas y aplicaciones. | 25 |
| Figura 4. Poder calorífico (PCI) en función de porcentaje de humedad en base seca (b.s) para un combustible con composición 50% Carbono, 6% hidrogeno y 44% oxígeno..... | 27 |
| Figura 5. Ruta de combustión de una partícula de biomasa..... | 28 |
| Figura 6. Composición de la biomasa..... | 31 |
| Figura 7. Secador solar túnel tipo Hohenheim..... | 37 |
| Figura 8. Tipos de combustión lecho fluidizado fijo, burbujeante y circulatorio, tomada Combustión de biomasa. | 42 |
| Figura 9. Principales métodos de combustión, Combustión de biomasa..... | 44 |
| Figura 10. Metodología del proyecto..... | 48 |
| Figura 11. Cascara del cacao..... | 58 |
| Figura 12. Diseño del quemador..... | 61 |
| Figura 13. Vista del ingreso de biomasa, ingreso del aire y salida de gases en SolidWorks..... | 62 |
| Figura 14. Ducto de salida del aire, y parte interna del quemador en SolidWorks..... | 63 |
| Figura 15. Vista interna de la estructura del quemador en SolidWorks. | 63 |
| Figura 16. Vista interna de la estructura del quemador en SolidWorks. | 64 |
| Figura 17. Corte, mecanizado del quemador en Solidworks..... | 67 |
| Figura 18. Mallado automático en Ansys. | 68 |
| Figura 19. Analisis estructural en Ansys..... | 68 |
| Figura 20. Análisis térmico en Ansys | 69 |

| | |
|--|----|
| Figura 21. Aplicación de calor, análisis térmico en Ansys | 70 |
| Figura 22. Proceso de construcción del quemador..... | 72 |
| Figura 23. Tubo de calentamiento de aire | 73 |
| Figura 24. Construcción del quemador | 74 |
| Figura 25. Soporte del quemador | 75 |
| Figura 26. Sellos de entrada de alimentación y tubo de combustión | 76 |
| Figura 27. Accesorios del quemador. | 77 |
| Figura 28. Quemador acoplado con sus partes sin accesorios..... | 77 |
| Figura 29. Aplicación de laca térmica al quemador. | 78 |
| Figura 30. Aplicación de pintura anticorrosiva. | 79 |
| Figura 31. Estado de los túneles de secado. | 80 |
| Figura 32. Proceso de quitar la corrosión de los túneles de secado..... | 81 |
| Figura 33. Reestructuración del túnel. | 82 |
| Figura 34. Aplicación de pintura anticorrosiva a los túneles de secado..... | 83 |
| Figura 35. Adecuación de las bandejas y ajuste de barras del túnel de secado.... | 84 |
| Figura 36. Instalación del plástico efecto invernadero. | 85 |
| Figura 37. Sistema de calentamiento acoplado. | 86 |
| Figura 38. Sitios de toma de temperatura..... | 89 |
| Figura 39. Gráfica punto entrada túnel, temperatura vs tiempo. Madera..... | 90 |
| Figura 40. Gráfica punto salida túnel, temperatura vs tiempo. Madera..... | 91 |
| Figura 41. Gráfica punto de entrada túnel, temperatura vs tiempo. Cascara de cacao | 92 |
| Figura 42. Gráfica punto de salida túnel, temperatura vs tiempo. Cascara de cacao | 93 |

RESUMEN GENERAL DE TRABAJO DE GRADO

TITULO: SISTEMA DE CALENTAMIENTO CON BIOMASA PARA USO ALTERNATIVO EN EL SECADOR SOLAR DE TUNEL HOHENHEIM

AUTOR(ES): JUAN JOSE BROCHERO MONTERO
ROMARIO ESTUPIÑAN HINESTROZA

PROGRAMA: Facultad de Ingeniería Mecánica

DIRECTOR(A): Dr.agr. SANDA PATRICIA CUERVO ANDRADE

RESUMEN

Una alternativa para la implementación del proceso de secado, disminuyendo los costos es el uso de fuentes de energía renovable. La energía solar y la energía de la biomasa se perfilan como alternativas viables para el uso en aplicaciones energéticas de baja escala, como el caso de secadores de productos agrícolas. Adicionalmente son fuentes de energía renovables lo cual le da ventajas ambientales adicionales a su uso. Un secado continuo es decisivo en las características de calidad finales de los productos. El uso de energía solar presenta la desventaja que su disponibilidad es dependiente de las condiciones ambientales, por lo que secadores trabajando exclusivamente con este tipo de energía no son continuos en su operación. Este inconveniente puede ser solventado mediante el uso de una fuente de energía adicional como la energía de la biomasa, lo que permitiría además el uso y aprovechamiento de los residuos agrícolas que mal manejados se pueden convertir en focos de contaminación. Este proyecto aborda el diseño, construcción y puesta a punto de un sistema de calentamiento para dos túneles de secado solar tipo Hohenheim de la Universidad Pontificia Bolivariana—sede Bucaramanga, como alternativa para el proceso de secado continuo en los túneles. El sistema está conformado principalmente por un quemador de biomasa, con un intercambiador de calor de tubos concéntricos para utilizar los gases de la combustión de la biomasa como fuente térmica para calentar el aire de secado, el cual llega a las cámaras de secado a través de un sistema de distribución en Y, el cual permite el uso para un túnel o para los dos en simultaneo. Para el diseño se utilizó como herramienta el software de diseño SolidWorks y de análisis de simulación ANSYS, en donde se busca tener el diseño conceptual del quemador y análisis de los materiales del mismo.

PALABRAS CLAVE:

Sistema de calentamiento, biomasa, quemadores, túnel solar, secado

V° B° DIRECTOR DE TRABAJO DE GRADO

GENERAL SUMMARY OF WORK OF GRADE

TITLE: BIOMASS WARMING SYSTEM FOR ALTERNATIVE USE
IN THE TUNEL HOHENHEIM SOLAR DRYER

AUTHOR(S): JUAN JOSE BROCHERO MONTERO
ROMARIO ESTUPIÑAN HINESTROZA

FACULTY: Facultad de Ingeniería Mecánica

DIRECTOR: Dr.agr. SANDA PATRICIA CUERVO ANDRADE

ABSTRACT

An alternative for the implementation of the drying process, reducing costs is the use of renewable energy sources. Solar energy and biomass energy are emerging as viable alternatives for use in small-scale energy applications, such as dryers for agricultural products. Additionally they are renewable energy sources which gives additional environmental advantages to their use. Continuous drying is decisive in the final quality characteristics of the products. The use of solar energy has the disadvantage that its availability is dependent on environmental conditions, so dryers working exclusively with this type of energy are not continuous in their operation. This inconvenience can be solved by the use of an additional energy source such as biomass energy, which would also allow the use and exploitation of agricultural waste that is poorly managed can become sources of pollution. This project addresses the design, construction and tuning of a heating system for two Hohenheim-type solar drying tunnels of the Bolivarian Pontifical University - Bucaramanga headquarters, as an alternative for the continuous drying process in the tunnels. The system consists mainly of a biomass burner, with a concentric tube heat exchanger to use biomass combustion gases as a thermal source to heat the drying air, which reaches the drying chambers through a Y distribution system, which allows use for a tunnel or for both simultaneously. For the design, the SolidWorks design and ANSYS simulation analysis software was used as a tool, which seeks to have the burner's conceptual design and analysis of its materials.

KEYWORDS:

Heating system, biomass, burners, solar tunnel, drying

V° B° DIRECTOR OF GRADUATE WORK

1. INTRODUCCIÓN

El proceso de secado es un proceso que se aplica en variedad de productos con técnicas agroindustriales para el aprovechamiento y la conservación de los alimentos. A medida del tiempo estas prácticas se han venido combinando con ayuda de nuevas máquinas y las energías renovables, para que el secado sea continuo y garantizar que el producto sea de mejor calidad. Ya que los secadores industriales no están a la mano del sector agrícola en donde se encuentran pequeños agricultores, el empleo de las energías renovables y las investigaciones realizadas hasta el momento podrían ayudar a este tipo de población para que puedan realizar un secado de forma amigable con el medio ambiente, fácil obtención y creación.

El presente proyecto muestra de manera específica los métodos y resultados para el diseño y construcción de un quemador para que funcione en las horas donde no hay radiación solar o hay bajas temperaturas, siendo de más efectivo para este tipo de aplicaciones. Para ello se realizó una investigación que incluyera todos los temas de biomasa, tipos de secadores, y quemadores para poder determinar y realizar un diseño del mismo. Con ayuda de softwares SolidWorks y Ansys, se realizaron análisis de diseño, análisis térmicos y estructurales para poder determinar los materiales que se iban a usar para la construcción del quemador.

Con el quemador ya construido se procedió a realizar la instalación del sistema de calentamiento en los túneles de secado en el CDT de la Universidad Pontificia Bolivariana y realizar las pruebas de desempeño térmico con la combustión de la biomasa.

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El secado es el método más utilizado para la conservación de los alimentos, logrando que no varíen sus propiedades naturales. Con el tiempo y el avance de la tecnología se han venido creando nuevos métodos de secado buscando desde el ámbito de las ingenierías avanzar en términos de optimización del recurso energético y el impacto ambiental sin afectar la calidad del producto. Existen diferentes equipos de secado con diferentes aplicaciones y tecnologías para los procesos a realizar, pero los secadores “tradicionales” tienen un alto consumo energético, por lo que en el campo de la ingeniería se busca innovar con otros estudios para la misma aplicación¹.

Una de las limitaciones del secado solar es la no continuidad del proceso afectando la calidad del producto, debido a esto se han realizado desarrollos tecnológicos en los diseños, construcción, y puesta a punto del túnel solar tipo Hohenheim aprovechando la energía solar de nuestro entorno garantizando el proceso de secado durante el día. A esto le surgió una nueva investigación para garantizar el proceso de secado durante el día (energía solar) y las horas donde no hay la suficiente radiación para llevar a cabo el proceso, obligando a buscar alternativas energéticas que permitan obtener un secado continuo y obtener un producto sin tener pérdidas en su calidad. Por esto es importante continuar con los estudios, para presentar alternativas ya que no es posible garantizar el proceso de secado durante las horas que no hay sol, generalmente en las noches, se afecta la calidad del producto sin la continuidad del proceso, condensándose el agua y no permite obtener los resultados deseados del proceso de secado².

Por esta razón este proyecto se basará en diseñar un sistema complementario buscando otra fuente energética logrando un proceso de secado continuo

¹ CODUSE, Agencia Suiza para el desarrollo y la cooperación - Ministerio de Relaciones Exteriores – Guía de uso de secadores solares para frutas, legumbres, plantas medicinales y carnes

² UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA. Innovación aplicada a la industria de alimentos.

disminuyendo los efectos negativos sobre la calidad del producto. Con esta investigación el secado podrá ser continuo debido a las dos técnicas aplicadas en este sistema, y disminuir los daños que pueda llegar a tener el proceso cuando no es continuo.

3. OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GENERAL

Diseñar y construir un sistema energético de calentamiento con uso de la biomasa como fuente térmica para el secador dual del túnel tipo Hohenheim para lograr un secado continuo.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Diseñar el quemador para el sistema energético que utilice biomasa en base a una metodología de construcción de quemadores que cumpla con los requerimientos del sistema.

Resultado: Documento con los planos e información de la biomasa a utilizar en el sistema de calentamiento para el túnel.

Indicador: Diseño del quemador que cumpla con los requerimientos de diseño según la revisión bibliográfica o metodología de construcción.

- Construir el quemador e instalar el sistema del calentamiento con biomasa en el secador solar de túnel tipo Hohenheim.

Resultado: Quemador construido para la incorporación al sistema de calentamiento con biomasa.

Indicador: El sistema implementado en el secador solar de túnel tipo Hohenheim.

- Realizar las pruebas de desempeño y ajuste para la puesta a punto del sistema de calentamiento con biomasa a través de un análisis energético del sistema.

Resultado: Caracterización del desempeño térmico del secador cuando trabaja con la biomasa como fuente térmica.

Indicador: Funcionamiento del sistema dual en el túnel tipo Hohenheim.

4. ALCANCE

Colombia como país, se constituye en un productor y consumidor de biomasa. El departamento de Santander se caracteriza por tener una gran producción agrícola lo cual repercute en un alto potencial de biomasa.

El sistema de calentamiento del túnel solar tipo Hohenheim es una alternativa para realizar un secado continuo evitando pérdidas de calidad, mejorando el tiempo de proceso y darle la posibilidad al productor de disminuir costos de producción o de hacer uso de sus residuos y obteniendo una energía alternativa viable que mejora la producción. Aprovechando la sostenibilidad de la biomasa surgen diversos residuos orgánicos como el abono obtenido de las cenizas después del proceso de combustión que sirven para diferentes aplicaciones. Una de las ventajas más importantes de la biomasa, es que es una fuente de energía renovable, la cual puede resultar más económica, segura y eficiente.

5. JUSTIFICACIÓN

Esta investigación proporciona competencias orientadas a la utilización agrícola de la biomasa dándole continuidad al proceso de secado, evitando pérdidas de calidad en su proceso en el túnel dual tipo Hohenheim.

La biomasa es un recurso abundante en la mayoría de los procesos agrícolas productivos y es una fuente energética disponible y con alto potencial de uso, lo cual facilitaría al sector agrícola en gran parte, no solo a las grandes industrias sino también al campesino agricultor en su día a día, ya que su forma de operar hace que sea viable usarse en cada finca agricultora del país. Su instalación es relativamente sencilla como su forma de operar dejando por sentado una base para avanzar y mejorar los procesos productivos del sector agrícola.

6. ANTECEDENTES

La combustión de la biomasa es un proceso en el cual se transforma la materia prima (los residuos de la biomasa) en energía térmica, siendo un proceso que se ha llevado a cabo desde hace muchos años. La investigación sobre las tecnologías de secado por medio de quemadores está arrojando resultados convenientes para mejorar o extender el proceso cuando existen tecnologías duales.

La metodología en estas investigaciones es complementar el proceso, añadiendo al sistema este tipo de fuente térmica. Para llevar a cabo el diseño, construcción e implementación de los quemadores. Según Wolf & Dong (2013) se deben tener en cuenta las tecnologías de combustión, caracterizándose en 3 tipos, caracterizándose por la capacidad de producción de energía térmica partiendo de estufas comunes adecuando la cantidad de biomasa en la parrilla, para aprovechar la propagación del calor desde la fuente generadora del aire hasta el punto de salida. La incorporación de intercambiadores de calor es otro tipo de tecnología, que son llevados en sistemas de mayor potencia, que sería para sistemas de calentamiento de agua para consumo humano, uso residencial y otras alternativas.³

Para sistemas domésticos, en donde se busca mantener la calefacción al interior de las viviendas son sistemas de mayor consumo, el diseño, la construcción y la implementación del sistema requiere un mayor número de accesorios, como la eliminación y control de cenizas producidas por la biomasa, el control del sitio donde se realiza la combustión de la biomasa, la entrada y salida del aire caliente, y la evacuación de gases contaminantes.

³ Barrera, J. C., Ramirez-Contreras, N.E. y Garcia-Nuñez, J.A. (2018). Combustión de biomasa: conceptos, tecnologías y aplicaciones de la aroindustria de la palma.

En el proyecto de grado por Robiel Ignacio Arguello, y Edgar Alonso Sánchez, llamado Diseño y construcción de un silo secador de granos de café con la utilización de un quemador dual de combustible, liderado por el Ing. Omar Gelvez Arocha, de la Universidad Industrial de Santander en el año 2.005 hizo el estudio para el diseño construcción de un silo con el uso de un quemador dual para el calentamiento del aire, teniendo en cuenta los factores de combustión, transferencia de calor a través de tubos para el aprovechamiento de la energía proporcionada por la combustión de la biomasa. Como resultado obtuvieron la construcción y la implementación de un sistema de calentamiento basado en las tecnologías de combustión para el calentamiento de los granos de café, cumpliendo con los requisitos básicos de funcionamiento. El diseño de la maquina fue de fácil mantenimiento, ya que todas sus partes son desmontables en su totalidad, y los costos de construcción fueron inferiores a las máquinas de combustión que existen en el mercado.⁴

En el año 2.009, el proyecto de grado llamado Diseño conceptual de una planta piloto de combustión para el aprovechamiento energético de la biomasa residual del maíz, para optar por el título de Ingenieros Químicos, de Jenny Carolina Guerrero Contreras y Carlos Fernando Gamboa Niño. Elaboraron el diseño basado en criterios e indicadores con un gran impacto con referencia a los aspectos ambientales, tecnológicos, económicos y sociales. Cada criterio compuesto por indicadores que tienen variables cuantificables, e información cualitativa, por lo tanto caracterizaron la composición de la biomasa que utilizaron, obteniendo la potencia energética del Maíz proveniente del Departamento de Córdoba, siendo la mejor alternativa para el diseño conceptual de la planta y la simulación del proceso.⁵

⁴ Arguello, Robiel.I y Sanchez,, Edgar, A. (2.005) Diseño y construcción de un silo secador de granos de café con la utilización de un quemador dual de combustible.

⁵ Guerrero, C. Jenny, C. y Gamboa, N. Carlos, F. (2.009). Diseño conceptual de una planta piloto de combustión para el aprovechamiento energético de la biomasa residual del maíz.

7. MARCO TEÓRICO

7.1 BIOMASA

La biomasa se puede definir como la porción biodegradable de productos de origen vegetal o animal, llamándolo materia orgánica que puede ser aprovechada energéticamente. Se puede clasificar en los residuos orgánicos de origen vegetal o animal obtenidos de procesos naturales o industriales. La biomasa abarca todo tipo de producción de energía renovable, más económica y amigable con el medio ambiente por sus diferentes usos de aplicación. En la composición de la biomasa se pueden encontrar grandes cantidades de oxígeno, carbono e hidrogeno, lo que indica que generan reacciones exotérmicas generadoras de energía. Por ende, la biomasa permite encontrar una gran cantidad de energía almacenada en el conjunto de componentes de origen vegetal y animal.

La valorización energética de la biomasa está constituida por la cantidad de energía que contiene y puede ser liberada cuando se somete a un proceso de conversión energética, los cuales resultan interesantes para muchos investigadores y la población en general, debido que gran parte de la población rural en Colombia y en países en vía de desarrollo, la biomasa representa fuente de energía. Ejemplo, el uso de la leña como fuente energética. “Colombia ofrece variedad de condiciones favorables (climáticas y geográficas) para el desarrollo de múltiples actividades agropecuarias. El país cuenta con una superficie continental de 114.174.800 hectáreas, de las cuales el 44,77% se estima que se destina a la actividad agropecuaria⁶”.

La producción del cacao en Colombia ha aumentado considerablemente, ya que es reconocida como “el cultivo reforestado por excelencia”, el cual lo convierte en

⁶ MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA, Republica de Colombia. Atlas del potencial energético de la biomasa residual en Colombia- Ttomado de: Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, 2006.

uno de los cultivos más importantes por lo fines comerciales y de investigación alrededor del mundo, últimamente siendo utilizado para uso de biomasa en diversos sectores. Para lograr un aprovechamiento energético del cacao como biomasa, se han investigado dos rutas específicamente, la primera es el uso de las cascavas de cacao mediante aplicaciones térmicas, las cuales usan calderas o estufas tanto industriales como caseras. La otra ruta para su aplicación es en centrales de biomasa o combustión, las cuales están ligadas a aplicaciones eléctricas esencialmente⁷.

Para la clasificación de la biomasa existen multitud de criterios por diferentes investigadores para definir exactamente los tipos de biomasa en los que se pueden basar en las características, en su procedencia, y en el modo en la que se puede obtener energía. Los cuales se definen así:

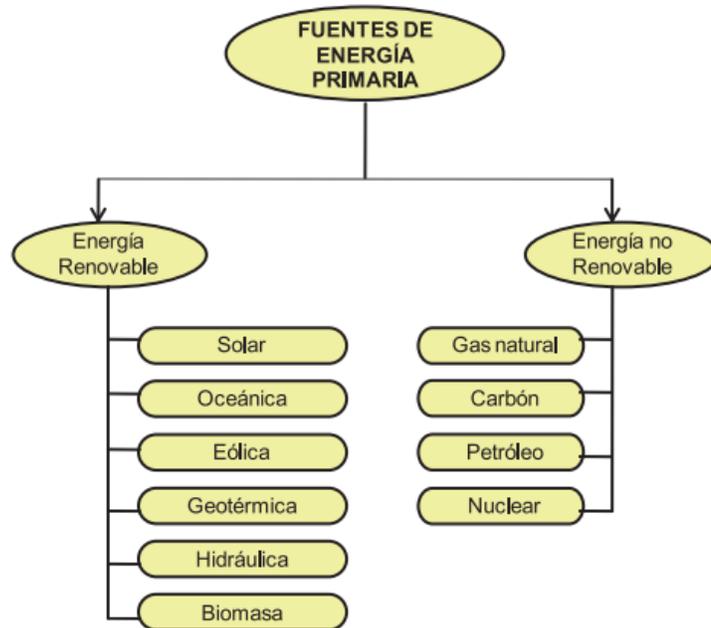
7.1.1 Biomasa primaria. Es la que se obtiene del ecosistema natural para la aplicación energética sin la intervención humana. Este tipo de biomasa se considera que puede resultar viable energéticamente pero cuando es intervenida por el humano podría salir económicamente inviable debido que si la explotación es en grandes cantidades necesitaría gestión de adquisición, transporte del recurso, además que afectaría el medio ambiente cuando no es utilizada adecuadamente. Se trata de los productos derivados de los bosques o plantaciones. En los cultivos energéticos se aprecia la importancia de la cantidad de aplicaciones donde se ve reflejado el uso de la biomasa con fines específicos para la producción de energía.

⁷ARGUELLO, O., MEJIA, A, & CONTRERAS, N. Manual de caracterización morfoagronómica del cacao en el nororiente colombiano. Bucaramanga: Corpoica. 1999.

7.1.2 Biomasa secundaria o residual. Es la que se obtiene por medio de la actividad humana o residual húmeda. Existe otro tipo de biomasa, que es previamente procesado antes de su utilización energética que es el biogas, obtenido de la digestión de la biomasa residual húmeda, del biodiesel, del bioetanol. La biomasa residual humana hace referencia a la biomasa encontrada en la parte agrícola, forestal o industrial, según el caso de obtención⁸.

La principal y más importante característica de la biomasa es el contenido energético o poder calorífico, que se obtiene después de su transformación, para así caracterizar el tipo de biomasa y aplicación.

Figura 1. Clasificación Fuentes de Energía Renovable



Fuente:<https://blog.gruponovelec.com/energias-renovables/sistemas-aprovechamiento-la-biomasa/>

⁸ NOGUÉS, F., GARCÍA G, D., REZEAU, A. Energía de la Biomasa (Volumen 1).

Los sistemas de aprovechamiento de la biomasa se basan en aprovechar la energía eléctrica, mecánica y térmica que pueda proporcionar. Por eso se utilizan diferentes métodos en los que generalmente esta la combustión y la gasificación.

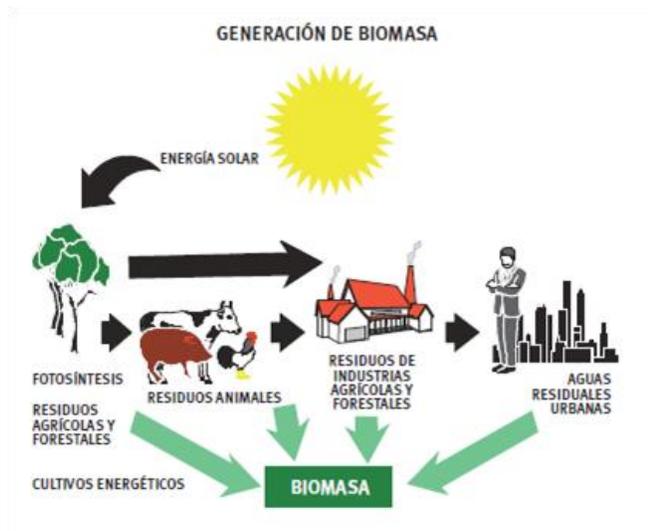
- I. En los sistemas de combustión, consiste en quemar la biomasa a temperaturas muy altas (entre 500°C y 1.300°C) y en presencia de grandes cantidades de aire. Para aprovechar mayores rendimientos de la combustión se pueden usar diferentes métodos o tecnologías como calderas de parrilla, cámaras torsionales, o combustores de lecho fluidizado, con un rendimiento de hasta un 95%.
- II. En los sistemas de gasificación, gracias a la acción del calor sobre el recurso, se produce un gas combustible, cuyas aplicaciones son similares al gas natural y otros combustibles gaseosos⁹.

⁹ GRUPO NOVELCEC -Aprovechamiento de la biomasa.

7.1.3 Biomasa residual en el sector agrícola.

La agricultura es una actividad antropogénica que genera cantidades considerables de biomasa residual. En esta investigación se basó en la agricultura y el potencial de la Biomasa en Colombia para el aprovechamiento. En dicho caso, el 75% del total de la biomasa producida en el campo corresponde a Residuos Agrícolas de Cosecha (RAC), y el restante a los Residuos Agrícolas Industriales (RAI). Ejemplos de estos tipos de biomasa, en el caso del RAC, los residuos de raquis en las plantaciones de palma, frutos, tallos, hojas de descarte, cuescos, entre otros. En el caso del RAI, los residuos generados por las actividades domésticas, las cadenas comerciales o de industrias de alimentos o productos vegetales que generan volúmenes de residuos orgánicos urbanos. El aprovechamiento de la biomasa residual depende fundamentalmente de la facilidad de recolección, por lo que su posición geográfica es de suma importancia para la evaluación de su uso¹⁰.

Figura 2. Origen y generación de la Biomasa



Fuente: Revista Clima Tropical, Actividades de calefacción.

¹⁰ MINISTERIO DE MINAS Y ENERGIA, Republica de Colombia Atlas del potencial energético de la biomasa residual en Colombia.

7.1.4 Procesos de transformación de la biomasa.

En un proceso de transformación de la biomasa en energía, se evalúa la factibilidad técnica y económica del proceso al cual se va a llevar a cabo por las diferentes formas de transformar la biomasa. Se considera el manejo, tratamiento del cultivo para los residuos generales, entre otros. Para determinar las características del proceso de transformación y seleccionar el más adecuado para obtener los mejores beneficios ambientales y económicos de esta práctica.

Los procesos de transformación de la biomasa sean bioquímicos o termoquímicos permiten obtener un compuesto de gases con alto poder energético ya que producen componentes (H_2 y CO), acompañados de subcomponentes (CO_2 , H_2O , CH_4 , entre otros) que no aportan con la calidad del gas, disminuyéndola. Por ende, se buscan técnicas o equipos para mejorar la calidad del gas, incrementar su poder calorífico, haciendo uso de catalizadores para aumentar su velocidad de reacción y así disminuir la emisión de gases dañinos para el ambiente (CO), filtros para que el gas sea de mejor calidad al terminar su ciclo y ser aprovechado energéticamente, entre otros¹¹.

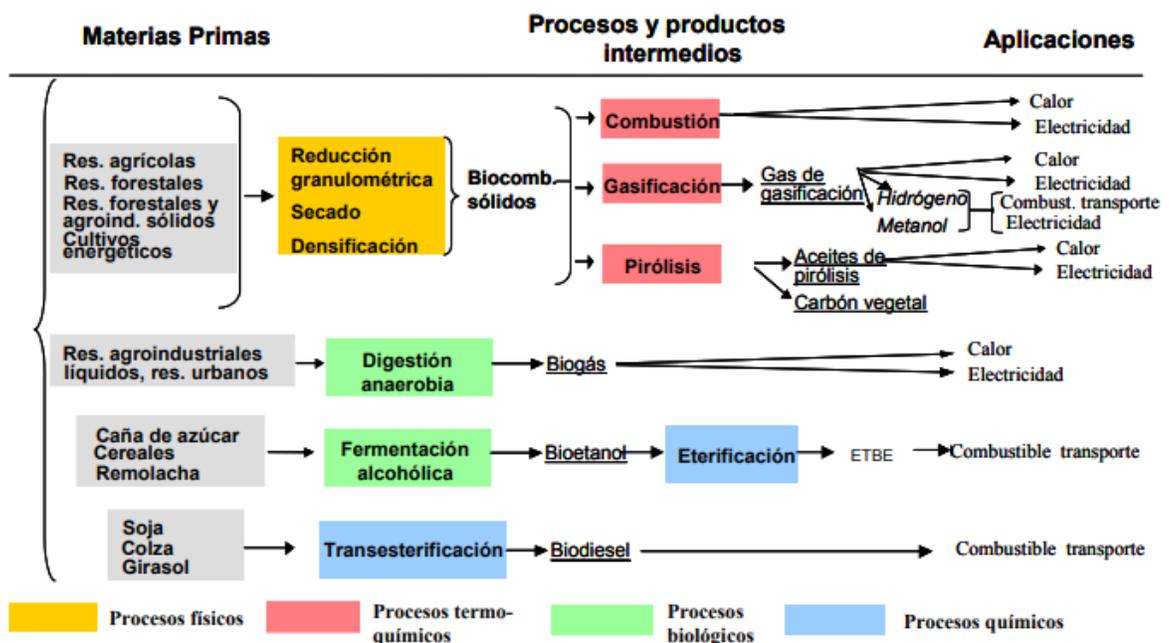
En los procesos termoquímicos se generan dos clases de productos, siendo una fracción volátil que consiste en gases, vapores y alquitrán, la otra fracción es la parte sólida que es rica en carbón, según su composición. Para cada proceso de transformación de biomasa en energía se presenta una relación directa entre la aplicación y disminución de la biomasa.

¹¹ CORDOBA, LUIS. Mejoramiento de la calidad del gas producido por el proceso de gasificación mediante el uso de catalizadores.

7.1.5 Tipos de procesos de transformación de la biomasa.

Existen diferentes tipos de procesos termoquímicos, esta investigación se basa en los tipos de procesos termoquímicos para la generación de aire caliente y la aplicación al túnel de secado, en especial al proceso de combustión, la pirólisis, y la gasificación hacen parte de estos tipos. En la Imagen 3 se observa los tipos de combustión, materias primas y aplicaciones de transformación de la biomasa en energía.

Figura 3. Procesos de conversión energética de la biomasa. Materias primas utilizadas y aplicaciones.



Fuente: Combustión directa de la biomasa, García Carrasco, Juan. E.

El proceso de la combustión es uno de los procesos de mayor utilización, teniendo una reacción química en el cual se deshace una gran cantidad de energía en forma de calor y de luz, por la cual se mezcla mediante el oxígeno del aire (comburente) con los diferentes elementos oxidantes del combustible originándose calor. Para que se produzca este proceso químico deben converger suficiente cantidad de combustible (biomasa), suficiente aire comburente, que contiene el

oxígeno necesario para reaccionar con el combustible, suficiente temperatura para que se produzca y se mantenga la reacción, y el iniciador de la combustión. Al existir combustión, se libera dióxido de carbono que está relacionado directamente con la cantidad de biomasa, su contenido de fibra y humedad.

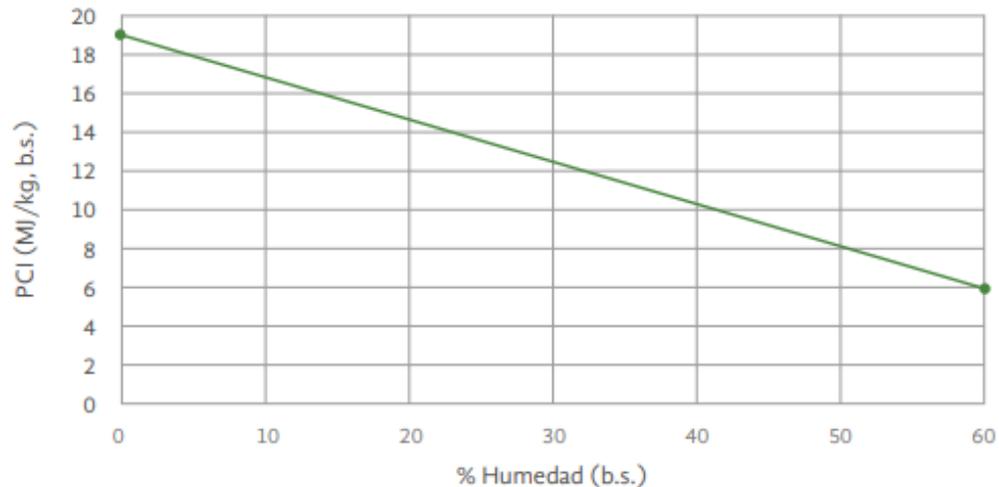
Tabla 1: Poder calórico de la biomasa

| BIOMASA | PODER CALORIFICO (MJ/kg) |
|---------------------------------|-----------------------------|
| Madera | 20 |
| Paja de cereal | 16-17 |
| Caña de azúcar (bagazo) | 9 |
| Desechos orgánicos sin secar | 13 |

Fuente: Moragues y Rapallini.

Esta energía puede ser usada directamente para proporcionar calor (secado de alimentos, secado de productos agrícolas, cocción, preservar calor en calderas, entre otros), o indirectamente, para producir electricidad (a través de turbinas, previa evaporación del agua por medio del calor producido en la combustión), generalmente aplicada en las plantas térmicas para la generación de electricidad. En la gráfica 1, se aprecia lo expresado anteriormente para el aprovechamiento de los residuos con bajo porcentaje de Humedad (%Hu). Entre menor porcentaje de humedad, mayor poder calórico, es decir, mayor aprovechamiento energético por parte de residuos de palma de aceite.

Figura 4. Poder calorífico (PCI) en función de porcentaje de humedad en base seca (b.s) para un combustible con composición 50% Carbono, 6% hidrogeno y 44% oxígeno.



Fuente: Van-Loo (2.008) por Revista Palmas. Bogotá (Colombia) vol.39, octubre 2018.

En el proceso de la pirolisis, se conoce como la técnica de la degradación o descomposición química de los combustibles líquidos, sólidos, o gaseosos. Se origina a partir de la ruptura de la estructura molecular de la biomasa bajo presiones o temperaturas moderadas.

En el proceso de la gasificación, el residuo orgánico es transformado en un gas combustible de bajo poder calorífico, mediante una serie de reacciones que ocurren en determinada temperatura según el residuo con el agente gasificante. Este proceso es llevado a cabo en una cámara de combustión cerrada y sellada que trabaja por debajo de la presión atmosférica, desarrollándose en varias etapas de secado, y pirolisis.

Figura 5. Ruta de combustión de una partícula de biomasa.



Fuente: Revista Palmas. Bogotá (Colombia) vol. 39 – octubre 2018.

7.1.6 Caracterización de la Biomasa.

La caracterización de la biomasa residual se considera una de las más favorables para el tipo de investigación que se está llevando a cabo, por lo que se tiene en cuenta diferentes parámetros para su utilización, ya que permite describir la composición de la materia orgánica correspondiente a un análisis fisicoquímico y contenido energético.

En Colombia, el potencial energético de la biomasa está representado en residuos orgánicos de la cascarilla de arroz, los residuos de la almendra de la palma de aceite, la mazorca del cacao, la pulpa del café, el bagazo de caña de azúcar. En la zona rural de Colombia son los lugares donde se presenta un mayor consumo y producción de productos agrícolas que posterior a eso son utilizados como biomasa. La biomasa se plantea como una fuente energética viable en zonas de difícil acceso al sistema de gas y eléctrico del país¹².

De las principales ventajas de la biomasa y de la combustión, se destaca por tener la capacidad de ser usada después de haber cumplido con su ciclo y fuente de

¹² UNIVERSIDAD DE CUENCA. Evaluación energética de cáscaras de cacao nacional Y ccn-51, , Octubre del 2013.

energía, pudiendo ser tratada como fertilizantes o abonos para la misma plantación de la zona rural. Al igual que no requiere cambios drásticos en equipamientos, vehículos, calderas, recipientes, entre otros. Con la caracterización y selección de la biomasa se puede determinar su composición fisicoquímica para determinar que contaminantes o que tan nociva es para el medio ambiente¹³.

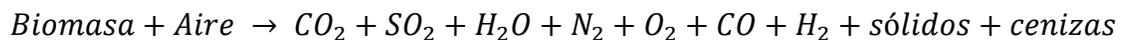
En la literatura disponible, se cuantifica diversos indicadores en donde muestran cuales son las características y el análisis elemental de cada muestra.

Tabla 2: Composición elemental de las biomásas seleccionadas.

| Combustible | Análisis Elemental (%) | | | | | Contenido de humedad (%) |
|---------------------|------------------------|-----|------|------|------|--------------------------|
| | C | H | O | N | S | |
| Bagazo de caña | 49,9 | 6 | 43,9 | 0,16 | 0,04 | 50 |
| Cascarilla de arroz | 50,1 | 6,2 | 43 | 0,62 | 0,1 | 9 |
| Cascarilla de arroz | 46,8 | 4,9 | 47,1 | 0,6 | 0,6 | 10 |

Fuente: Meter Quaak, Harrie Knoef, Hubert Stassen.

En el proceso de la combustión de la biomasa, la reacción se basa en una reacción exotérmica de una mezcla o una sustancia. Los productos de la reacción de Carbono e Hidrogeno con Oxigeno en la combustión directa y completa son Dióxido de Carbono e Hidrogeno (CO_2) y Agua (H_2O), la presencia de Monóxido de Carbono (CO) en los productos es producida a una reacción incompleta, teniendo una aparición de reacciones secundarias. Las cenizas inquemadas y los sólidos hacen parte de la Biomasa que no reacciona, el proceso anterior se describe así:



CO_2 : Dióxido de Carbono

SO_2 : Dióxido de Azufre

¹³ GARCIA, C. (1997). Cacao (*Thebroma cacao* L.). Palmira, Colombia: Universidad Nacional de Colombia.

H_2O : Agua

N_2 : Nitrogeno

O_2 : Oxigeno

H_2 : Hidrogeno

La liberación de energía casi siempre se da en forma de calor, se da en los procesos de combustión que son aprovechados en los procesos agrícolas, procesos de secado, procesos industriales obteniendo calefacción, iluminación o fuerza motriz. Dicha energía liberada durante la combustión provoca que la temperatura suba en los productos, y dependerá de la velocidad de liberación y disipación de energía (relación cantidad biomasa – combustión).

Tabla 3: Propiedades de combustión biomasa palma de aceite.

| Biomasa | Contenido de humedad (% b.s. ¹) | Contenido de cenizas (% b.s.) | Contenido de materia volátil (% b.s.) | Poder calorífico superior (MJ kg ⁻¹) |
|---------|---|-------------------------------|---------------------------------------|--|
| Tusa | 67.00 ± 1.41 | 4.60 ± 0.50 | 87.04 ± 0.42 | 18.88 ± 0.74 |
| Fibra | 37.09 ± 2.06 | 6.10 ± 0.94 | 84.91 ± 0.62 | 19.06 ± 0.32 |
| Cuesco | 12.00 ± 1.08 | 3.00 ± 1.27 | 83.45 ± 0.68 | 20.09 ± 0.43 |

Tomada, Combustión de biomasa: conceptos, tecnologías y aplicaciones en la agroindustria *b. s*¹: *En base seca*.

Hoy, la industria colombiana le está apostando a la industria manufacturera, en donde se encuentran las calderas, los quemadores, los túneles de secado, las nuevas tecnologías de investigación para el aprovechamiento de los combustibles. En donde se encuentran programas dispuestos con suficientes herramientas como el Programa de Transformación Productiva (PTP), centrándose en la productividad, el capital humano dispuesto para la investigación, la facilidad de adaptar los diferentes combustibles en energía¹⁴.

¹⁴ CENTRO DE INFORMACION TECNOLOGICA Y APOYO A LA GESTIÓN DE LA PROPIEDAD INDUSTRIAL – Boletín Tecnológico – Superintendencia de Industria Y comercio -2.017

7.1.7 Importancia de las variables físicas de las muestras de Biomasa para la combustión. Para determinar la selección y el uso de la materia prima (biomasa) se tienen en cuenta sus condiciones físicas, ya que está relacionada directamente con la geometría de su equipo, horno o quemador para la transformación térmica.

Figura 6. Composición de la biomasa.



Fuente: BTG (1995).

Poder calorífico: Se refleja en el contenido calórico por unidad de masa, es el parámetro que establece la energía disponible en la biomasa y se expresa como la cantidad de energía por unidad física. Es la indicación de la energía combinada químicamente en el combustible referente a un ambiente estandarizado (sitio de donde proviene la biomasa). La estandarización de la selección y el sitio de donde proviene la biomasa implica la temperatura, el contenido de agua (vapor o líquido) y productos de combustión. La energía este combinado químicamente en el combustible está compuesta por el poder calorífico del combustible (biomasa) en energía, Joule [J], y por la cantidad de materia, kilogramo [kg]. Cada combustible es diferente, el poder calorífico varia por el volumen, el peso, la humedad, la densidad, por ello se estima y se da una referencia para poder diferenciar en cada prueba que se realice con diversos poderes caloríficos. De forma más concreta, el poder calorífico superior (PCS) es el que realmente se produce en la reacción de combustión, y el poder calorífico inferior (PCI) es el poder producido que es provechado sin utilizar la energía de la condensación del agua y otros procesos.

El poder calorífico inferior (PCI) de un combustible se determina a partir del poder calorífico superior (PCS), extrayendo el calor latente del agua formado por la siguiente ecuación:

$$PCI = PCS - 2,5 (9H + H_2O)$$

En donde,

PCI, Poder calorífico inferior [MJ/Kg]

PCS, Poder calorífico superior [MJ/Kg]

2,5 calor de condensación del agua a 0°C [MJ/kg agua].

9 kilos de agua que se forman cuando se oxida un kilo de hidrogeno.

H, hidrogeno en el combustible tanto por uno.

H_2O , humedad del combustible, tanto por uno.

Densidad aparente. La densidad real se considera como la densidad del sólido sin considerar los poros entre partículas, entre tanto, la densidad aparente es considerada como el volumen ocupado por la fase sólida, como la fase de fluidos, que, en la biomasa, generalmente es aire.

Una baja densidad aparente desfavorece la relación de energía por unidad de volumen, ya que comprende una mayor capacidad de transporte y almacenamiento, aumentando los costos de operación. Además de influir en la cuantificación de la biomasa¹⁵.

Humedad: Es la cantidad de agua presente en una muestra de biomasa, usualmente se usa como la relación de masa de agua por masa de materia seca.

El proceso de transformación en energía de la biomasa se ve sumamente afectado por su contenido elevado de humedad. La biomasa con una humedad inferior al 50% pueden ser aprovechadas térmicamente mediante el proceso de la combustión directa, pirolisis o gasificación, anteriormente mencionados. Aunque se considera que para obtener una mayor eficiencia y menor tiempo de transformación de la biomasa es imprescindible que la biomasa tenga un contenido de humedad inferior al 30%.

Cuando se va a llevar a cabo el proceso de transformación de energía de la biomasa, se debe tener en cuenta el porcentaje de humedad de cada materia prima, ya que, si es muy elevado su porcentaje de humedad es necesario pasar nuevamente antes de iniciar el proceso a un nuevo secado para tener un mejor aprovechamiento energético. La ceniza resultante, contiene una variación de formas, tamaños y composiciones.

¹⁵ CARMONA, Cepeda, René y URZUA, M. Alvaro- Caracterización de Biomasa Leñosa. Universidad de Chile, Facultad Ciencias Forestales – 2013.

Tabla 4: Características de diferentes combustibles de la biomasa.

| Tipo | PCI,h (kJ/kg) | CH,h (%) | CC,s (%) |
|-------------------------------------|---------------|----------|----------|
| Bagazo | 7,700-8,000 | 40-60 | 1.7-3.8 |
| Cáscara de cacao | 13,000-16,000 | 7-9 | 7-14 |
| Cáscara de coco | 18,000 | 8 | 4 |
| Cáscara de café | 16,000 | 10 | 0.6 |
| Residuos de algodón: | | | |
| tallos | 16,000 | 10-20 | 0.1 |
| residuo del despepitado | 14,000 | 9 | 12 |
| Maíz: | | | |
| cobs | 13,000-15,000 | 10-20 | 2 |
| tallos | | | 3-7 |
| Residuos de palma de aceite: | | | |
| tallos de fruta | 5,000 | 63 | 5 |
| fibra | 11,000 | 40 | |
| cáscara | 15,000 | 15 | |
| Escombros | 15,000 | 15 | |
| Turba | 9,000-15,000 | 13-15 | 1-20 |
| Cáscara de arroz | 14,000 | 9 | 19 |
| Paja | 12,000 | 10 | 4.4 |
| Madera | 8,400-17,000 | 10-60 | 0.25-1.7 |
| Carbón vegetal | 25,000-32,000 | 1-10 | 0.5-6 |

PCI,h: Poder Calorífico Inferior, húmedo CC,s: Contenido de Cenizas, seca
 CH,h: Contenido de humedad, húmedo Source: Author.

- Contenido de ceniza: Los inquemados se pueden expresar de la misma forma como el porcentaje de húmeda sobre una base seca, húmeda o de seca libre de ceniza. El contenido total de ceniza en la biomasa y la composición química de la ceniza son importantes para el comportamiento en altas temperaturas y de la gasificación. La ceniza se puede esparcir, se puede derretir dependiendo de sus características y pueden obstruir el retiro por la ceniza hecha escoria.
- Materia volátil: se refiere a los gases volátiles y carbón de leña que son obtenidos cuando la biomasa está expuesta a altas temperaturas (hasta 400 a 500°C)
- Composición elemental: Los componentes principales son carbono, oxígeno e hidrogeno. Siendo uniforme el componente orgánico libre de ceniza en la biomasa.

Tabla 5: Propiedades de la combustión de la biomasa.

| Físicas | Químicas | Térmicas | Minerales |
|---|---|--|--|
| <ul style="list-style-type: none">• Densidad de bulbo• Densidad energética | <ul style="list-style-type: none">• Análisis último• Análisis próximo• Análisis de productos de pirólisis• Poder calorífico• Contenido de humedad | <ul style="list-style-type: none">• Calor específico• Conductividad térmica• Emisividad• Temperatura• Grado de degradación térmica | <ul style="list-style-type: none">• Cenizas• Compuestos inorgánicos |

Fuente: Combustión de biomasa: conceptos, tecnologías y aplicaciones en la agroindustria.

7.2 TÚNELES DE SECADO

El proceso de deshidratación de alimentos es un proceso llevado a cabo por los túneles de secado, que tiene como finalidad la conservación de alimentos para diferentes usos. Actualmente existen diferentes tipos de secadores a nivel industrial, o agroindustrial, estos siendo creados bajo la necesidad e investigación por parte de los ingenieros para el diseño y aplicación del túnel de secado. La técnica de secado nos ayuda a preservar los alimentos de las personas alrededor del mundo que consumen productos secos y manteniendo los nutrientes de cada uno de ellos, haciéndolos limitados para el consumo en general.

El diseño del túnel de secado es especialmente para contribuir en la calidad del secado de las frutas, verduras y otros productos, ya que ayuda a extraer el agua que contiene cada producto. Ayudando a deshidratar en grandes cantidades su porcentaje de humedad en un periodo de tiempo estipulado por las características de la fruta, verdura o tubérculo a secar y las características del túnel siendo energéticamente eficaces y amigables con el medio ambiente, debido que existen otros tipos de túneles de secado que consume grandes cantidades de energía.

Para poder hacer un uso adecuado de los secadores, se deben clasificar los equipos de secado bajo las características, propiedades del producto como su porcentaje de humedad, temperatura de secado.

Los secadores directos o por convección se caracterizan por el uso de gases calientes que entra en contacto directo con el producto por medio de la convección para así transmitir el calor. Siendo los gases calientes:

- Aire calentado por vapor de agua.
- Productos de combustión
- Aire calentado por radiación solar.

Los secadores por conducción o indirectos, se caracterizan porque la transferencia de calor hacia el producto húmedo tiene lugar por conducción a través de una pared metálica (generalmente). Siendo las fuentes de calor:

- Vapor que condensa
- Agua caliente
- Resistencia eléctrica

Los tipos de secadores directos o por convección son aparatos de fácil manejo, lo que lo hace más sencillo a la hora de operar. Son los más usados en industrias agrícolas y constan de partes como recinto, sistema de calefacción (en donde se realiza la evaporación), sistema de impulsión de aire¹⁶.

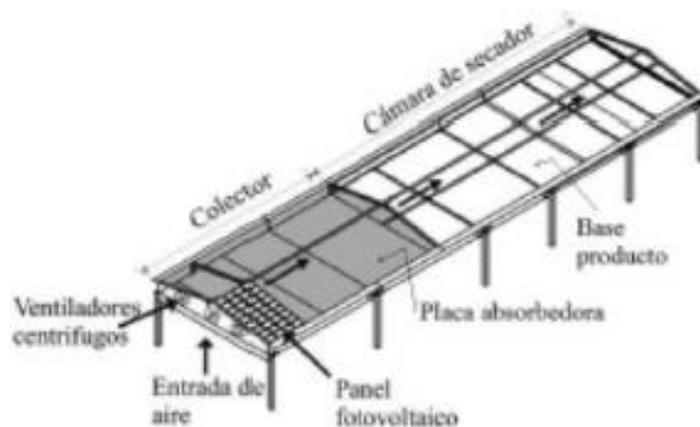
La conservación de los alimentos, en este caso, frutas y tubérculos, puede determinar la vida de cada uno de ellos, manteniéndolos con las características principales como textura, sabor, color, sabor y especialmente el valor nutritivo.

¹⁶ UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA, Conservación y secado de alimentos.

La importancia y ventajas de la conservación de los productos secados:

- Alimentos vitales para la conservación y desarrollo de las personas.
- Al conservarlo prolonga la vida útil de cada producto, tanto su disponibilidad para consumo.
- Permite disponer en cualquier momento y lugar del producto, garantizando las características que proporciona la técnica de secado.
- Son de fácil manejo, empaque y transporte para el consumo
- Su tamaño se reduce debido a la deshidratación del producto.
- Puede volver a rehidratar para su consumo¹⁷.

Figura 7. Secador solar túnel tipo Hohenheim.



Fuente: Revista Fuente. Pedro Julián García Guarín, Sonia Lucía Rincón Prat, Sandra Patricia Cuervo Andrade.

¹⁷ GIRALDO, G., GÓMEZ, A. Tratamiento de Conservación del Banano por el Método Combinado de Impregnación a vacío y Secado con Aire Caliente.

7.3 QUEMADORES

Respecto a los quemadores de biomasa a su funcionamiento se puede clasificar como la ubicación en donde se produce la mezcla del combustible y el aire, en la caldera. Según como está construido el túnel de secado de la Universidad Pontificia Bolivariana por módulos, así mismo de integrará el sistema de calentamiento del quemador.

Los quemadores de biomasa se pueden utilizar en calderas o estufas para calefacción, pero también en hornos de panaderías, secadores industriales o cualquier otra máquina generadora de calor¹⁸.

7.3.1 Impacto. Debido a su estabilidad física, alto rendimiento y su facilidad para obtenerse y almacenarse, una gran parte de procesos industriales actuales en su mayoría utilizan combustibles de origen fósil.

Se puede decir con certeza que, la biomasa, la cual fue el primer combustible utilizado por nosotros, cada vez está obteniendo mayor importancia y por ende muchas investigaciones y patentes se han creado en busca de optimizar su uso. Cabe resaltar, que en gran parte de proceso agroindustriales la biomasa se ha venido utilizando como un subproducto fuente de recurso energético para diferentes labores.

Se puede afirmar que, hoy en día, una gran parte de la biomasa obtenida en plantaciones agrícola es utilizada como fuente energética en diversos procesos, ejemplo: como combustible para caldera. Lo que antes, se consideraba como un exceso o un desecho en sus cultivos, paso a ser utilizada debido al amplio rango de posibilidades en las que se puede usar. Debido a esto, muchas investigaciones se han generado para lograr una mejor eficiencia y generar métodos que logren un

¹⁸ Chaves, E. Secado solar de alimentos.

alto rendimiento y mejoramiento en sus aplicaciones. Un aspecto importante, es que al ser un producto natural es que no posee emisiones contaminantes a gran escala, y se pueden reducir completamente por medio de ciertas mejoras; estas son una de las principales razones que han impulsado la investigación y el desarrollo tecnológico en esta rama.

Ventajas de uso

Al usar este tipo de quemadores obtenemos varias ventajas como:

- Reducción de emisiones contaminantes puesto que se considera que la biomasa es una energía limpia por sus emisiones neutras de CO₂.
- Funcionamiento automatizado, según su diseño.
- El precio de la biomasa no se ve influido por cambios en la moneda internacional, ya que es un combustible independiente del exterior.
- Es un combustible fácilmente de transportar que puede ser trasladado a cualquier lugar sin dificultades ni riesgos como otros tipos de combustibles. Esto hace de la biomasa una opción especialmente interesante para lugares remotos.
- Sus combustibles tienen un costo inferior al de la energía convencional (hasta 3 veces menor.)

Desventajas de su uso

- El rendimiento de las calderas es inferior a los de las calderas que usan combustible gaseoso o fósil.
- La distribución de la biomasa no está tan desarrollada como el de los combustibles fósiles.
- Muchos de los combustibles tienen altos porcentajes de humedad, lo que demora el proceso y disminuye su eficiencia.

- La biomasa contiene menor densidad energética, lo que resulta que los sistemas de almacenamiento sean mayores.

Para utilizar eficientemente el calor generado a partir de la biomasa se implican 2 pasos fundamentales. La primera es la combustión de la biomasa (combustible) y la segunda es que también logramos transferir el calor de la biomasa en combustión hasta llegar al disipador de calor.

7.3.2 Métodos de combustión en los quemadores. Actualmente, existen diversas tecnologías, estudios o formas de combustión de la biomasa por distintos técnicos. Según Wolf & Dong (2013) se distinguen tres tipos de tecnologías más usados para la combustión de la biomasa de lecho fluidizado (puede ser de lecho circulatorio o burbujeante), lecho fijo, o combustible pulverizado. Los métodos de combustión de pequeña escala (5-5.000kW) se caracterizan por tener una producción de energía térmica en estufas y hogares partiendo de la biomasa en parrillas, aprovechando la propagación del calor desde la fuente generadora del aire. La incorporación de intercambiadores de calor (sistema caldera), se lleva a cabo en los sistemas que requieren mayor potencia ($\geq 15\text{kW}$) que serían para la producción de agua caliente con fines de consumo sanitario o calefacción residencial. El control de entrada de aire por medio de respiraderos o entradas dispuestas para los sistemas de menor potencia. Eliminación manual de cenizas, excepto de los sistemas que se autoalimentan de combustible.

Para sistemas domésticos de alta potencia que tienen como finalidad mantener la calefacción por días o por semanas, la instalación de cámaras de combustión debe estar diseñada de tal forma que la biomasa sea transportada desde su entrada hasta la caldera por medio de un transportador o tornillo sin fin.

Una de las características de los métodos de combustión a escala pequeña es que no incorporan sistemas de limpieza de gases, debido que la instalación de

tubos con acceso al exterior de la caldera permite la evacuación de humos. Siendo necesaria la instalación de otras entradas de aire al sistema de combustión para que se dé el fenómeno de ciclón que permite la remoción continua de gases y sea más eficiente el sistema de calentamiento¹⁹.

Tabla 6. Características de los sistemas de combustión a pequeña escala

| Tipología de horno | Potencia | Tipo de energía | Entrada combustible | Retirada de ceniza |
|-----------------------------|-------------|--------------------|---------------------|--------------------|
| Hornos de palos y briquetas | | | | |
| Hogares | 3 – 5 kW | Aire caliente | Manual | Manual |
| Estufas | 3 – 8 kW | Aire caliente | Manual | Manual |
| Estufas de cerámica | 8 kW | Aire caliente | Manual | Manual |
| Calderas | 15 kW | Agua caliente | Manual | Automática |
| Hornos para astillas | 15 – 500 kW | Aire/agua caliente | Automática | Automática |
| Hornos para pelets | 15 – 500 kW | Aire/agua caliente | Automática | Automática |
| Hornos para palos y pelets | 15 – 500 kW | Aire/agua caliente | Manual/automática | Automática |

Combustión de lecho fluidizado. Es uno de los métodos más eficientes y usados para quemar directamente la biomasa, es uno de los métodos más versátiles en el manejo de la caracterización y contenido de humedad de la combustible (biomasa). Es un método emergente que es altamente confiable y viable, tiene ventaja por su sistema convencional de combustión, por su diseño más compacto, alta eficiencia de combustión, flexibilidad en el uso de la biomasa, reducción de contaminante, como sulfuros:

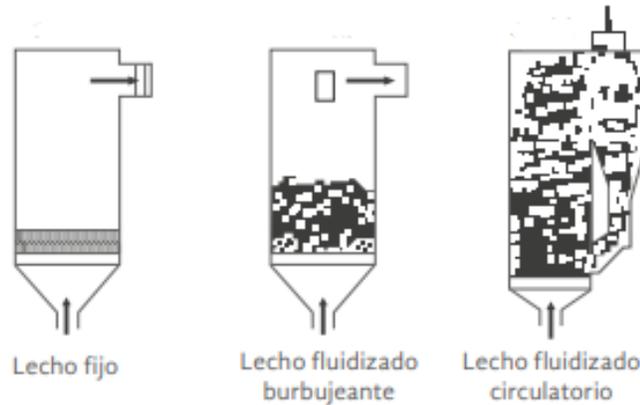
Oxidos de azufre (SO_x) y Oxidos de nitrógeno (NO_x).

- **Lecho fluidizado burbujeante**, en comparación a la velocidad de fluidización es menor que la velocidad terminal de las partículas del lecho en donde parten los gases a través del lecho como burbujas y alcanzan temperaturas alrededor de 800 y 900°C (Ver figura 8).

¹⁹ MARTÍNEZ, Sergio. Evaluación de la biomasa como recurso energético renovable en Cataluña (2.009).

- **Lecho fluidizado circulatorio**, la velocidad de fluidización se incrementa pasando del límite de burbujeo, arrastrando el material con la corriente gaseosa generada por este método de combustión (Ver figura 8).

Figura 8. Tipos de combustión lecho fluidizado fijo, burbujeante y circulatorio, tomada Combustión de biomasa.



Fuente: Conceptos, tecnologías y aplicaciones en la agroindustria, adaptada de Vakkilainen (2017).

7.3.2.1 *Combustión de lecho fijo.* Incluye quemadores con parrillas y alimentadores. La biomasa es ubicada en la parrilla y se mueve a través de la caldera hasta llegar al punto de combustión. El aire que requiere el sistema ingresa por las entradas dispuestas de aire a presión atmosférica para que cumpla el papel de oxidante en los residuos de biomasa. Los quemadores de biomasa con parrilla son apropiados para cantidad de biomasa de alto contenido de humedad y alto contenido de ceniza. Para el diseño de estos equipos, se requiere un buen diseño y control de sus partes, su parrilla garantiza una correcta distribución del combustible (biomasa). Para el flujo del aire caliente después de la combustión, se debe garantizar que el suministro de aire a presión atmosférica sea equitativo debido que se pueden presentar escorificación, exceso de oxígeno, acumulación de cenizas, lo que ocasionaría pérdidas en de calor en el proceso, bajando la eficiencia térmica del sistema²⁰.

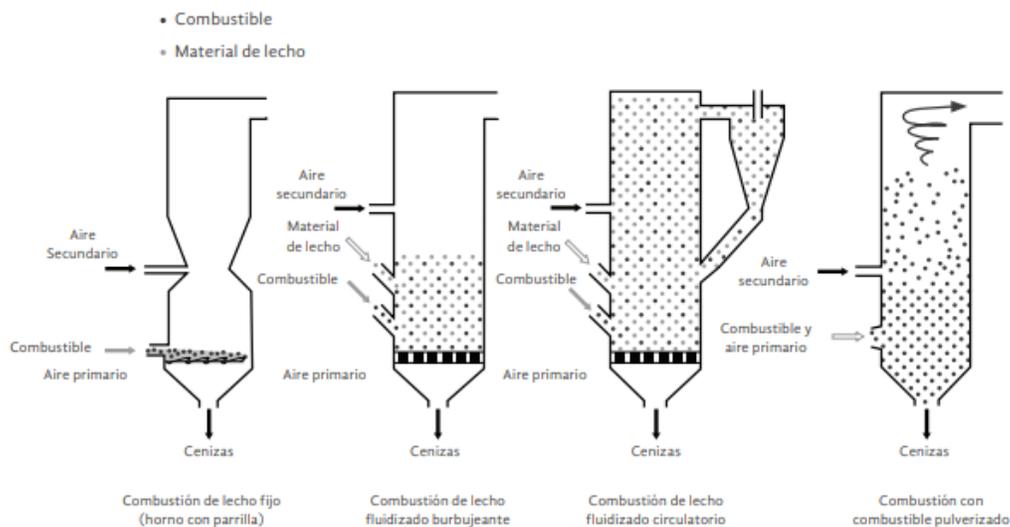
Controlar el suministro de aire en el quemador permitirá una operación liviana operación en las parrillas y se logrará reducir los problemas de operación en donde este expuesta la carga y control de la biomasa. Cuanto mejor sea y se garantice la calidad de la mezcla entre los gases de combustión, la eficiencia del sistema mejorará. Según el diseño y su operación existen tres sistemas de acción:

- **Flujo contracorriente** (las flamas se encuentran en posición en contra a la del combustible), permite que la biomasa pase directamente a través de los gases de combustión, lo que le permite la evaporación y el secado. Se aplica para combustibles de bajo poder calorífico. Su funcionamiento es de un sistema con un lecho de un mineral como arena, o caliza, en la cual el aire sopla con una presión y volumen suficiente por la parte inferior de su base, para formar una cama del material inerte asemejándose a la de un fluido

²⁰ METER Quaak, HARRIE Knoef, HUBERT Stassen. Energy from Biomass a review of Combustion and Gasification Technologies, World Bank Publications, 2-4, Washington DC, USA, March, 1999.

- **Flujo en corriente** (las flamas se encuentran en la misma dirección que el combustible), se aplica para combustibles secos o en sistemas en los que el combustible ya ha pasado por un secado primario para reducir su porcentaje de humedad.
- **Flujo cruzado** (la eliminación de los gases de combustión en medio del horno), es la mezcla entre los sistemas de contra corriente y en corriente, para lograr una combustión adecuada y se da una recirculación de los gases de combustión y cámara de combustión con agua de enfriamiento, dicho enfriamiento tiene una ventaja de reducir los volúmenes de gases de combustión que impide la acumulación de las cenizas en las paredes del quemador.

Figura 9. Principales métodos de combustión, Combustión de biomasa.



Fuente: Conceptos, tecnologías y aplicaciones en la agroindustria.

Tipo de combustible. Para iniciar el proceso de la combustión debe existir una mezcla de diferentes componentes para que exista flama. Una vez determinado esto, se debe buscar la forma para calentar el aire y se pueda utilizar en el sistema de calentamiento para el túnel de secado. Los combustibles más utilizados son, carbón mineral, coque, gas natural, gas propano, acpm, entre otros.

La correcta utilización del combustible depende del requerimiento y cuidado para la combustión por los gases contaminantes o ácido que pueda generar al medio ambiente y al alimento o producto que este expuesto en el túnel de secado. Los combustibles líquidos de uso común se clasifican en aceites combustibles destilados, derivados del petróleo directa o indirectamente y/o aceites combustibles mezclados. El coque es poco utilizado por la liberación de azufre al ambiente, cuya contaminación se ve evidenciada en la oxidación en las partes metálicas del equipo. Por término medio, un kilogramo de biomasa permite obtener 3.500 [kcal] kilocaloría = 3.5 [cal] caloría = 14.651 [J] Joule (Implica-T 2014)

Expresión calor en calorías y energía (trabajo) en Joules:

$$1 \text{ caloría} = 4.186 \text{ Joule y su relacion inversa } 1 [J] = 0.24 [cal]$$

7.3.3 Transferencia de calor. Uno de los factores más importante a la hora del diseño del quemador es la transferencia de calor, independiente al tipo de biomasa, tipo de horno, combustión, el flujo del calor desde la flama hacia el alimento o producto a secar, teniendo contacto con las paredes del quemador, parrilla y cada uno de sus accesorios.

7.3.4 Mecanismos de transferencia de calor. Para el inicio de este proceso se necesita un aporte de calor iniciar la concentración de calor en la biomasa y el proceso en todo el sistema de calentamiento para el túnel de secado. Los intercambios térmicos en el quemador inician en la fase de calentamiento, en donde la flama generada por la combustión genera transferencia de calor por convección y radiación. Por otra parte, la parrilla y las paredes cercanas a la flama son llevadas a una temperatura superior que la temperatura donde se encuentra el producto a secar, cediendo una cantidad de calor por radiación²¹.

La corriente de aire por dentro del túnel se puede dar por diferentes formas de transferencia de calor, por convección natural o convección forzada:

Convección natural, la corriente de aire es movida por la diferencia de temperaturas en el interior del túnel buscando un cambio de densidad. Este tipo de convección puede tardar más en lograr un equilibrio, por lo que la vuelve más complicada.

Convección forzada, es el mecanismo de transferencia de calor en donde la corriente de aire es movida por factores externos. Comúnmente este tipo de convección se da por un agitador, o un ventilador, lo que hace que la corriente de aire fluya.

7.3.5 Tratamiento de partículas en los gases de combustión de la biomasa.

- **Ciclón:** Es un colector de partículas de forma cónica con una entrada tangencial, dispuesta en el diseño del sistema de calentamiento, en donde ingresa la corriente de aire y se mezcla con los gases para depurar. Mediante la fuerza centrífuga, gravitatoria y el diseño de los colectores, el

²¹ ELIAS, XAVIER. Tratamiento y Valorización Energética de Residuos. Fundación Universitaria Iberoamericana. Capítulo 3: "La Combustión. Factores Endógenos y Exógenos". Editorial Diaz de Santos. España. Pág. 150-215, (2005).

gas “limpio” sale por la parte superior y las partículas, o los inquemados son llevados a la parte inferior del quemador.

- La eficiencia de la separación de los gases y las partículas varía en función del diseño principal del quemador y del ciclón, las propiedades químicas de biomasa (gas), las características físicas de la biomasa (composición, y tamaño de la partícula).

Tabla 7. Características y aplicaciones de los ciclones

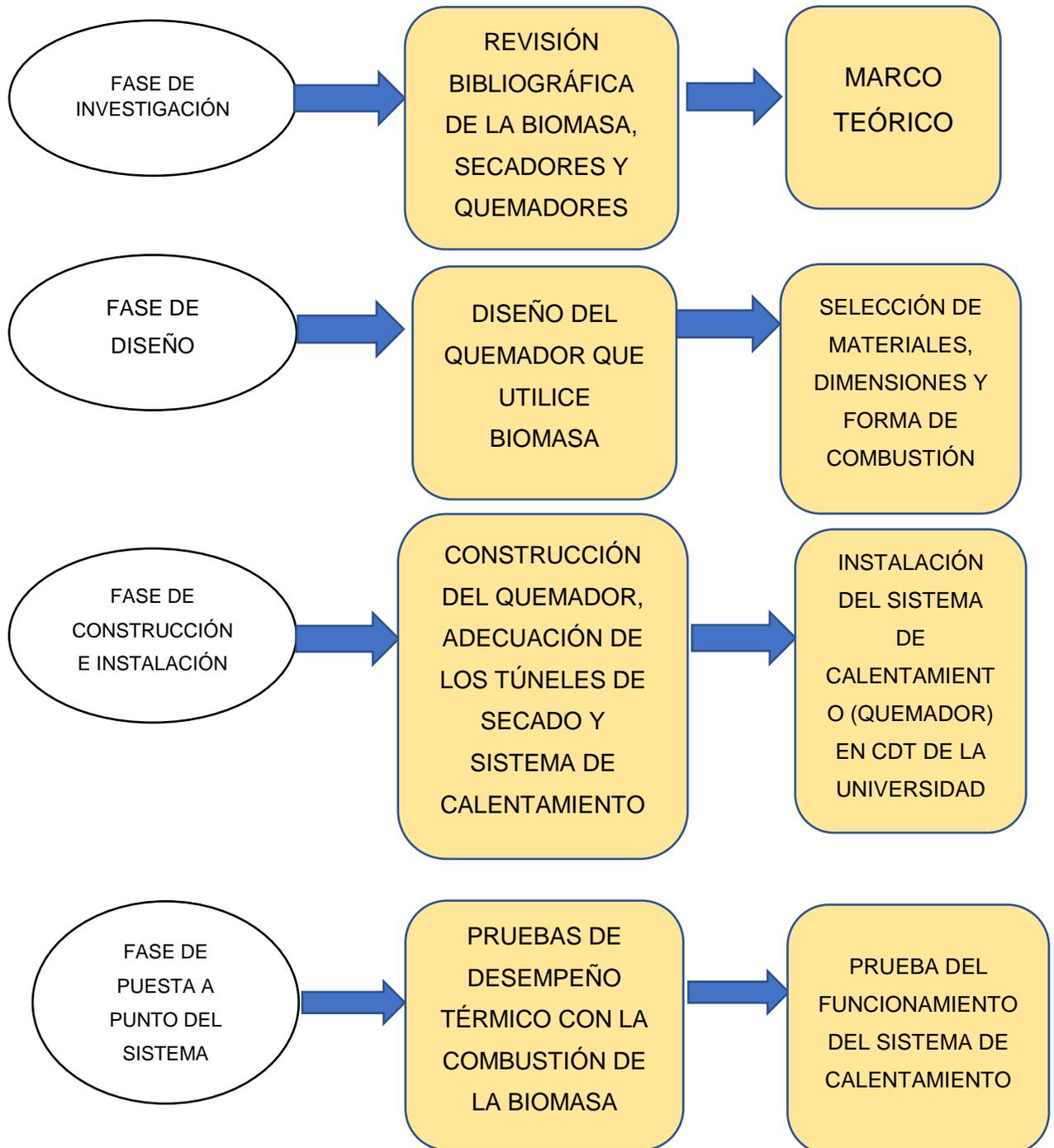
| Tipo | Diámetro de cono (cm) | Corriente de gas (m ³ /min) | Vel.de entrada aire (cm/s) | Eficiencia separación (%) | Aplicación |
|--|-----------------------|--|----------------------------|---------------------------|--|
| Convencional | 122 - 366 | 283 - 5663 | 6 - 21 | 50 – 80 | Manipulación del material. Pre-depurador del gas exhausto |
| Ciclón de alta eficiencia | > 90 | 28'3 - 566 | 15 - 21 | 80 – 95 | Control en calderas industriales |
| Multiciclón | 15 - 30 | ≥ 8.495 | 15 - 21 | 90 – 95 | Control en calderas industriales |
| Ciclón irrigado (húmedo) de elevada eficiencia | >90 | 28'3 - 566 | 15 | 90 - 95 | Aplicación en calderas para combustibles bajos en azufre. Temperatura del gas baja |

Fuente: Adaptado de Martínez Lozano, Sergio. Evaluación de la biomasa como recurso energético renovable en Cataluña (2.009).

8. METODOLOGÍA

Este proyecto se desarrolla en cuatro (4) fases, como se muestra en la figura 10.

Figura 10. Metodología del proyecto



Diseñar el quemador para el sistema energético que utilice biomasa en base a una metodología de construcción de quemadores que cumpla con los requerimientos del sistema.

Investigar en bases de datos para seleccionar la biomasa teniendo en cuenta las características energéticas, potencia calórica y la obtención, la preparación para que cumpla con los diferentes procesos y garantizar el flujo necesario al momento de su aplicación. Encontrar los parámetros de la implementación de la biomasa en este tipo de energía y las características para su uso.

Para el diseño del quemador con uso de la biomasa se determinó los requerimientos del sistema para tener una metodología del proceso diseño y construcción del quemador. La caracterización de la biomasa permitió detallar los residuos orgánicos en general y la zona de siembra de la leña, caña de azúcar, cacao, entre otros. Permitiendo evaluar el análisis elemental y poder calorífico para representar su eficiencia térmica como biomasa, para promover el uso de este recurso en la combustión. A partir de análisis basados en las dimensiones del sistema y con el diseño obtenido se realizaron observaciones entorno a los materiales, que deben ser capaz de tolerar las temperaturas a las que alcanza la combustión de la biomasa seleccionada, la capacidad y relación entre la cantidad de biomasa, y su potencia calórica para que sea capaz de suplir la demanda requerida por el sistema. Para el análisis térmico fue necesario tener en cuenta los rangos de temperatura de la combustión de la biomasa para elegir el material necesario y el aislamiento térmico adecuado.

Para realizar el análisis térmico y estructural en el quemador, se analizaron los principios de combustión de la biomasa, el porcentaje de humedad y el poder calorífico que brinda cada biomasa seleccionada. En SolidWorks se diseñó el bosquejo del quemador para importarlo a ANSYS donde se le realizaron las diferentes pruebas de diseño, análisis térmico, cargas estructurales con el material escogido.

Construir el quemador e instalar el sistema del calentamiento de biomasa en el secador de túnel tipo Hohenheim.

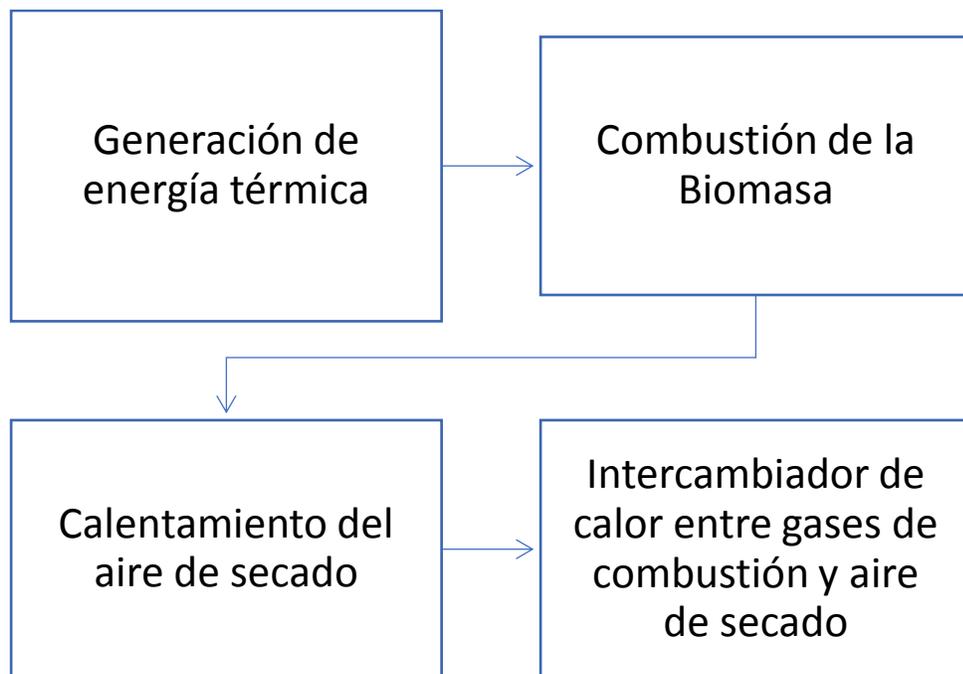
El proceso de construcción del quemador se consta en diferentes fases, diseño, construcción y puesta a punto. En la composición mecánica se procedió a buscar el material adecuado que sea compatible con la combustión y biomasa en el proceso. Una vez definido se trabajó en las dimensiones y mecanizados de las partes estructurales del quemador. La cámara de combustión está compuesta por una ventana de admisión de biomasa y unos orificios para la respiración del sistema, los cuales son importantes para cumplir con la función de intercambiador de calor y para el funcionamiento del quemador por lo que se debe buscar la precisión del diseño y sus tolerancias. La importancia del diseño de la base del quemador es garantizar la estabilidad del proceso y la conexión con el sistema, sin que existan problemas estructurales ejerciendo cargas en ubicaciones no admisibles. Un factor importante es el diseño y ubicación en el quemador del depósito de residuos con los filtros necesarios para que el sistema no contamine el medio ambiente. El depósito debe ser diseñado para el fácil mantenimiento y limpieza de los residuos de la biomasa.

El análisis en SolidWorks y ANSYS permitió obtener datos específicos sobre la construcción y el funcionamiento del sistema en general, con la proyección que el sistema es seguro y funcional.

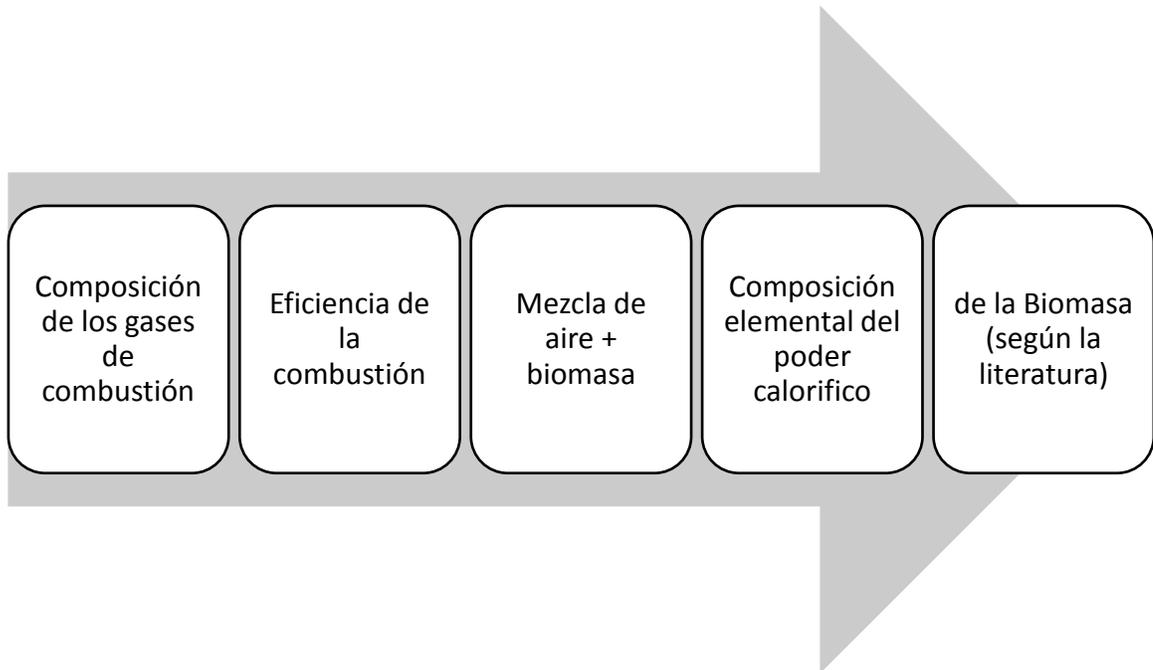
Realizar las pruebas de desempeño y ajuste para la puesta a punto del sistema de calentamiento con biomasa a través de un análisis energético del sistema.

Para realizar las pruebas y el análisis de energético del sistema, se definió el sitio de operación para saber las condiciones meteorológicas del lugar, altura del sitio,

cantidad de biomasa para la combustión. Las pruebas iniciaron cuando se determinaron las horas del día ideales para la operación del sistema, durante las pruebas se hizo uso de diferentes instrumentos de medición para saber la temperatura, humedad, variación de potencia calorífica con la cantidad de biomasa y su eficiencia por las variaciones climáticas. La ubicación del sistema de calentamiento para los túneles de secado se dejó en donde ya estaban en funcionamiento, que es en el CDT de la Universidad Pontificia Bolivariana, seccional Bucaramanga. Conceptualización del análisis del sistema de calentamiento del aire de secado:



- Conceptualización del análisis del proceso de combustión,



- Análisis del proceso de secado, cantidad de energía utilizada en el proceso

En este análisis se realizaron pruebas determinando la cantidad de energía utilizada en el proceso de secado teniendo como objetivo una mejor eficiencia respecto al tiempo, consumo y potencia calorífica de la biomasa.

Energía usada en la

$$\text{cámara de secado} = E_{\text{entrada}} - E_{\text{salida}} = \dot{m}_{\text{aire}}(h_{\text{entrada}} - h_{\text{salida}})$$

Por medio de esta fórmula se calculó las pérdidas de energía por convección natural a lo largo del sistema.

$$\dot{Q} = h * A_s(T_s - T_{\infty})$$

Donde,

h= coeficiente de transferencia de calor por convección, $[\frac{W}{m^2.C}]$

A_s = área superficial de transferencia de calor, m^2

T_s = temperatura de la superficie, °C

T_∞ = Temperatura del fluido lejos de la superficie, °C

Para calcular la energía total del sistema se aplicó la siguiente formula

$$E_{total} = \text{Energía}_{usada en la cámara} - \text{Perdidas}$$

- Análisis de gases de combustión

Para la selección los filtros o intercambiador de calor del sistema es muy importante saber la composición de la combustión en los que están el análisis de los gases, la densidad de la prueba de la biomasa, el porcentaje de humedad. Ya que con esto se pudo conocer si está en el rango de la calidad de los gases de combustión sin antes volverse contaminante para el medio ambiente, las características, el tipo y la cantidad de biomasa a utilizar. Es importante resaltar las temperaturas de combustión, dado que a bajas temperaturas con fuego bajo no se generan toxinas nocivas. Además, que suministra la cantidad de biomasa quemada, las cenizas y partes inquemadas.

Al determinar la energía de la biomasa, la energía de los gases y la energía de inquemados se puede determinar la eficiencia de la combustión con la siguiente formula.

$$n_{comb} = \frac{\text{Energía}_{biomasa} - \text{Energía}_{inquemados}}{\text{Energía}_{biomasa}}$$

- Análisis del comportamiento térmico interno de la cámara de secado,

Para analizar el comportamiento térmico observaremos la temperatura interna de la cámara de secado utilizando termocuplas K las cuales son fabricadas específicamente para quemadores y calderas; su funcionamiento se basa al entrelazar en un punto dos cables metálicos o semiconductores, que por medio de una propiedad termoeléctrica se genera el efecto Seebeck, el cual indica que al

aumentar la temperatura esta generara un voltaje, entregándonos como resultados el gradiente térmico del sistema.

Fórmulas de calentamiento de aire de secado:

$$n_{comb-intercambiador} = \frac{E_{aire salida} - E_{aire entrada}}{E_{entregada biomasa} - E_{ventilador}}$$

$$n_{comb-int} = \frac{\dot{m}(h_{salida sistema de secado} - h_{entrada sistema de secado})}{PCI_{biomasa} * \dot{m}_{biomasa} + W_{ventilador}}$$

El análisis de energía de todo el sistema de calentamiento nos proporcionara la información necesaria para determinar la eficiencia por medio de datos estadísticos y eficacia del proyecto.

Uno de los factores a tratar con importancia son los controladores que serían esencialmente para realizar las diversas pruebas en el sistema. Uno de los controladores que se escogió gracias a la investigación específica de lo que era necesario en el sistema fueron las termocuplas.

Las termocuplas permitieron tener un análisis experimental de las temperaturas que se presentarán en el quemador y en otros puntos del sistema, lo cual también proporcionó datos necesarios para analizar la transferencia del calor en el sistema.

9. ANÁLISIS Y RESULTADOS

Se realizó una síntesis de la información investigada acerca de los factores que involucran el sistema de calentamiento en general. Uno de ellos es la caracterización de la biomasa. Un factor importante son las dimensiones estructurales para poder obtener los valores que proporciona la biomasa seleccionada. A partir de cálculos basados en las dimensiones del sistema y con el diseño obtenido se realizaron diferentes análisis entorno a los materiales, que deben ser capaz de tolerar las temperaturas a las que llega la combustión de la biomasa, la capacidad y relación entre la cantidad de biomasa y su potencia calorífica, para que sea capaz de suplir la demanda requerida por el sistema. Para el análisis térmico fue necesario tener en establecer hasta qué punto se necesita la temperatura, para ello se analizó 1 kilogramo de biomasa cuanto alcanza a llegar en temperatura y en poder calorífico.

9.1 DISEÑO DEL QUEMADOR Y SELECCIÓN DE LA BIOMASA

Se entabló una relación entre el residuo, el tamaño y la potencia que se desea obtener. Teniendo las principales características, se empieza con el diseño del quemador, se realizó una síntesis con el objetivo de tener una noción del diseño y del proceso de fabricación a llevar a cabo en la construcción del quemador con sus accesorios. La importancia de los criterios de diseño se ven reflejadas al momento de construir con mayor facilidad sus componentes, su rentabilidad, la confortabilidad en los sistemas incorporados, la versatilidad en su innovación, el manejo del quemador, y la fiabilidad siendo uno de los criterios más importantes. Se retoma los conceptos de la combustión y de los quemadores, mostrando las zonas que se genera una corriente ascendente con las respectivas zonas de ingreso de aire y recarga de la biomasa, salida de aire caliente y salida de los gases de combustión.

La síntesis del diseño del quemador permitió adecuar el sistema de combustión en donde se involucra una mezcla del residuo (biomasa), aire, dosificación, ignición y conservación de la flama. En la primera etapa, se estimaron las dimensiones generales del ingreso de la caldera y de almacenamiento de la biomasa, según los requerimientos térmicos y de la instalación del sistema de calentamiento. Se consideraron dos (2) tipos de biomasa principales para este proyecto siendo la cascara del cacao, y la madera.

Tabla 8. Biomasa y poder calorífico.

| Biomasa | Poder Calorífico [MJ / kg] |
|---------------------------|------------------------------------|
| Madera | 10 - 20 |
| Cáscara de coco | 18 - 19 |
| Paja | 14 - 16 |
| Cáscara de café | 16 |
| Cáscara de cacao | 13 - 18 |
| Cuesco de Palma de aceite | 15 |
| Cáscara de arroz | 13 - 14 |
| Carbón coquizado | 25 - 32 |
| Tallos de maíz | 13 - 15 |
| Aserrín | 11 |
| Pellet de madera | 20,3 |
| Pellet de aserrín | 20,5 |
| Tallos de algodón | 16 |

Fuente: Highman, M.v.D. Burgt, Gasification, Elsevier Science, 2003

Para la selección de la madera y la cascara de cacao, se tuvo en cuenta que su forma de adquirir es más sencilla y el poder calorífico es alto para este tipo de pruebas. Como la materia prima crece de forma natural y en diferentes zonas del país, presenta una variedad considerable en cuanto a las características en función al porcentaje de humedad y especie de la madera. Para el cálculo del porcentaje de humedad se caracterizó y se zonificó la materia prima recolectada

para la combustión en el quemador. Una de las zonas en donde se encontró mayor diferencia y calidad fue en Santander, en las fincas de producción de cacao se encontraron cascaras de cacao que han pasado por un proceso de secado, después de haber sido cortada y separada de sus frutos, lo que da mayor eficiencia y manejo de la biomasa. Los granos del cacao al desprenderse dejan como residuo la cascara que es utilizada como biomasa, sea la biodegradación o para la combustión, convirtiéndose en energía térmica.

La recolección de la cascara del cacao para uso en la combustión, permitió observar el balance de materia prima apta, al igual que la materia prima que se deshecho debido que tenía un alto nivel de descomposición o superaba el porcentaje de humedad. *Se recolectaron 8030 gramos* de cascara de cacao proveniente de lugares aledaños de Sabana de Torres, Santander. En el proceso de revisión de la materia prima se obtuvo como resultado que *solo 650 gramos fueron no aptos debido a su alto contenido de humedad. Así dejando 7.380 gramos* óptimos para la combustión.

$$\text{Rendimiento} = 8030 \text{ g} - 650 \text{ g} = 7380 \text{ gramos}$$

Teniendo una efectividad en la etapa de recolección,

$$\text{Efectividad (Efec.)} = \frac{\text{cáscara}_{\text{recolectada}} - \text{cáscara NO apta}}{\text{cáscara}_{\text{recolectada}}} * 100$$

$$\text{Efec.} = \frac{8030 \text{ g} - 650 \text{ g}}{8030 \text{ g}} * 100\% = 92\%$$

Para la recolección y selección de las biomásas principales en este proyecto, se tuvieron en cuenta diferentes criterios para definir cuáles eran los más adecuados según la literatura, entre esos las características físicas y químicas de la biomasa y el lugar de obtención de la biomasa.

En el secado se pudo observar que tan solo 940 gramos de la materia prima total estaba húmeda, lo que representa una efectividad del 87,3% que serían 6.440 gramos de la materia prima total como se relaciona en la formula a continuación.

$$\text{Materia prima SECA} = 7380 \text{ g} - 940 \text{ g} = 6.440 \text{ gramos}$$

$$\text{Efec. de materia seca} = \frac{\text{cáscara}_{\text{APTA}} - \text{cáscara}_{\text{parcialmente seca}}}{\text{cáscara}_{\text{APTA}}} * 100\%$$

$$\text{Efec. de materia seca} = \frac{7380 \text{ g} - 940 \text{ g}}{7380 \text{ g}} * 100\% = 87,3\%$$

Figura 11. Cascara del cacao.



Fuente: tomada por autores.

9.1.1 Diseño.

Los cálculos necesarios para el diseño del quemador se basaron primordialmente en la capacidad de suministrar aire caliente para los dos túneles de secado. A través de un análisis y toma de mediciones de los volúmenes de los túneles de secado, se obtuvieron diferentes

resultados ya que los túneles tenían geometrías diferentes en la parte superior:

Túnel de secado de geometría semicirculo

Radio [r]: 55 cm

$$\text{Área túnel semicirculo} = \frac{\pi r^2}{2}$$

$$\text{Área túnel semicirculo} = \frac{\pi(55\text{cm})^2}{2} = 4751,65 \text{ cm}^2$$

Longitud [L]: 250cm

$$\text{Volumen túnel semicirculo} = A * L = \left(\frac{\pi(55\text{cm})^2}{2}\right) * 250\text{cm}$$

$$\text{Volumen túnel semicirculo} = 1187914,72 \text{ cm}^3 \approx \mathbf{1.18791472m^3}$$

Túnel de secado de geometría triangular

Base [b]: 122 cm

Altura [h]: 55 cm

$$\text{Área túnel triangular} = \frac{b * h}{2}$$

$$\text{Área túnel triangular} = \frac{122 \text{ cm} * 55 \text{ cm}}{2} = 3355 \text{ cm}^2$$

Longitud [L]: 250cm

$$\text{Volumen túnel triangular} = A * L = \left(\frac{122 \text{ cm} * 55\text{cm}}{2}\right) * 250 \text{ cm}$$

$$\text{Volumen túnel triangular} = 838750 \text{ cm}^3 \approx \mathbf{0,83875 m^3}$$

$$A \text{ tubo} = l * l$$

$$A \text{ tubo} = 0,7 \text{ [m]} * 0,7\text{[m]} = 0,49 \text{ m}^2$$

$$\dot{V} = \vec{v} * A$$

$$\dot{V} = 0,833 \frac{\text{m}}{\text{s}} * 0,49 \text{ m}^2$$

$$\dot{V} = 0,040877 \text{ [m}^3/\text{s]}$$

La densidad (δ) se toma a 25°C de temperatura a 1 atm.

$$\dot{m} = \delta * \dot{V}$$

$$\dot{m} = 1,184 [kg/m^3] * 0,40877[m^3/s]$$

$$\dot{m} = 0,48398368 \left[\frac{kg}{s} \right]$$

Variables:

A tubo: Área tubo

Π : pi

δ : Densidad del aire

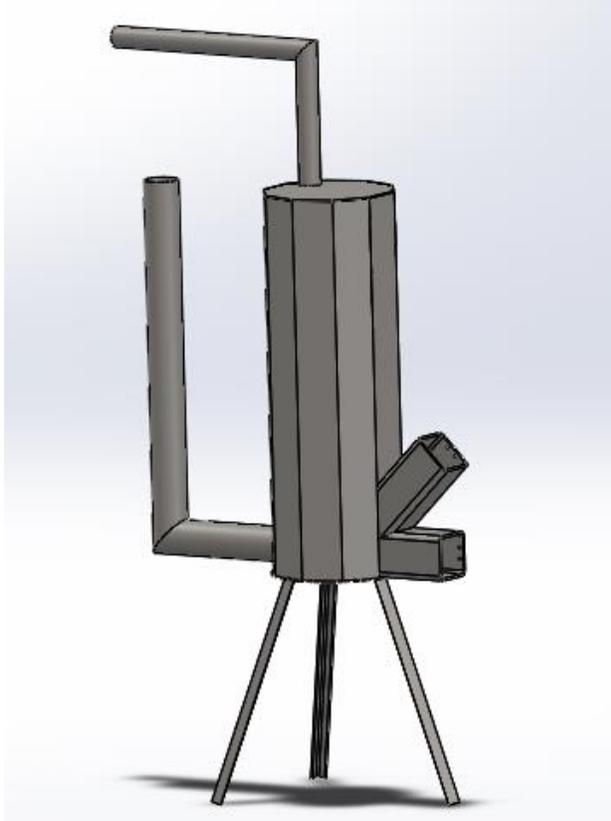
\dot{V} : flujo volumétrico

\dot{m} : flujo masico

Con esta fórmula hallamos el volumen de aire del sistema, en donde el flujo volumétrico del aire es 0.040877 [m³/s]. Logrando tener una idea de la cantidad de aire que se debía calentar sabiendo que en 1 hora consumen 2,5 kg de biomasa que nos genera aproximadamente 45 [MJ/kg] en 15 minutos empezada la combustión para lograr una temperatura promedio entre 60 °C y 80 °C que se observo experimentalmente.

En la figura 12 se observa un plano isométrico de la parte frontal del ensamblaje del quemador de biomasa. En el anexo A se observa los planos con las cotas del quemador.

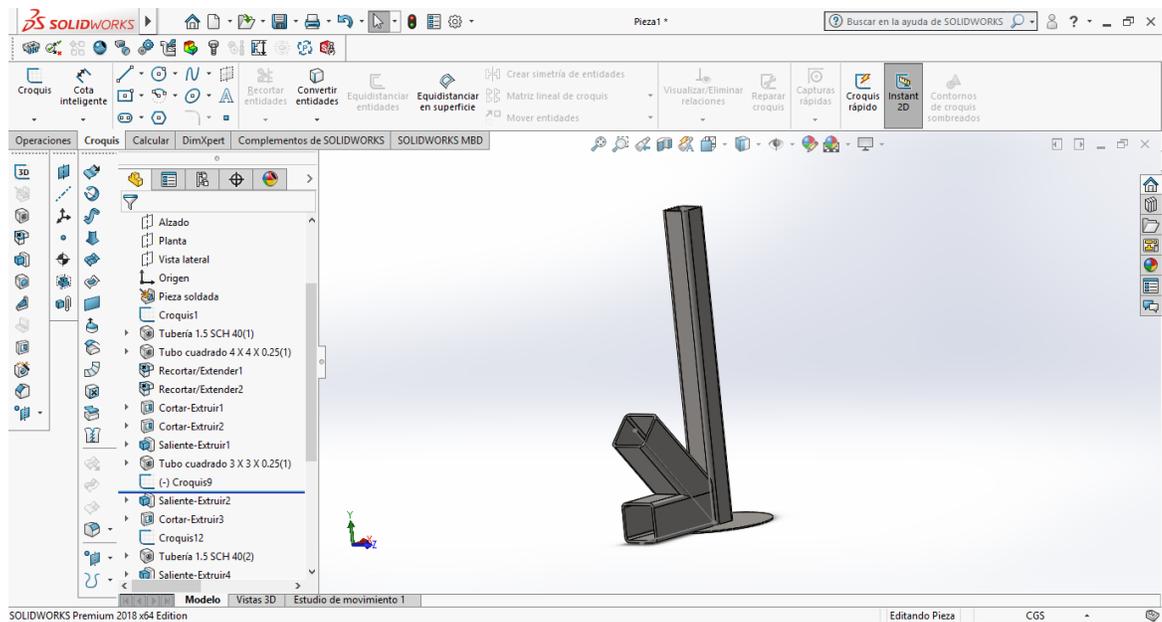
Figura 12. Diseño del quemador.



Fuente: Diseño elaborado por los autores.

En la figura 13 se muestra la vista lateral izquierda de la parte interna del quemador, con una altura 63 cm, con las entradas de aire y de biomasa dejadas a 45° respectivamente de la una con la otra.

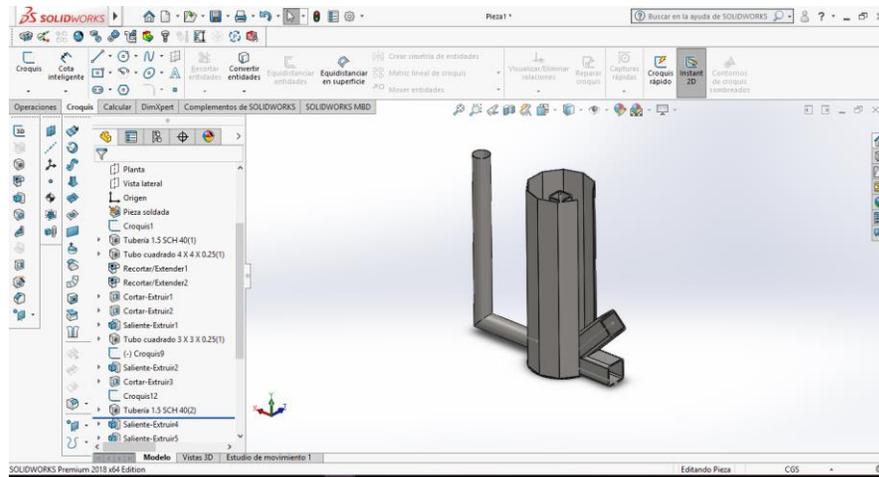
Figura 13. Vista del ingreso de biomasa, ingreso del aire y salida de gases en SolidWorks.



Fuente: Elaborado por los autores.

En la figura 14 se muestra el ensamblaje del caparazón al quemador para sellar la parte interna formando una cámara de aire. En el anexo B se observan los planos y medidas del exterior del quemador.

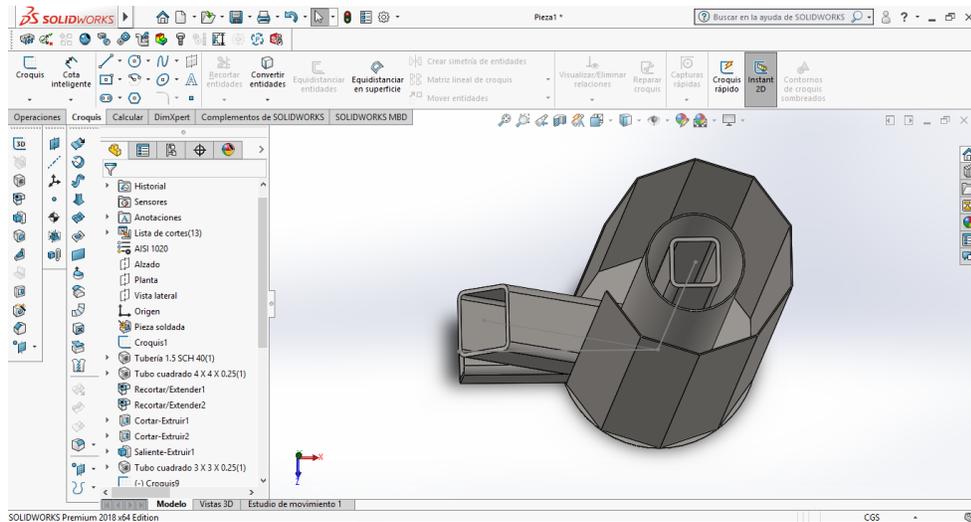
Figura 14. Ducto de salida del aire, y parte interna del quemador en SolidWorks.



Fuente: Elaborado por los autores.

La estructura del caparazón para formar la cámara de aire se observa en la figura 15 desde el plano superior.

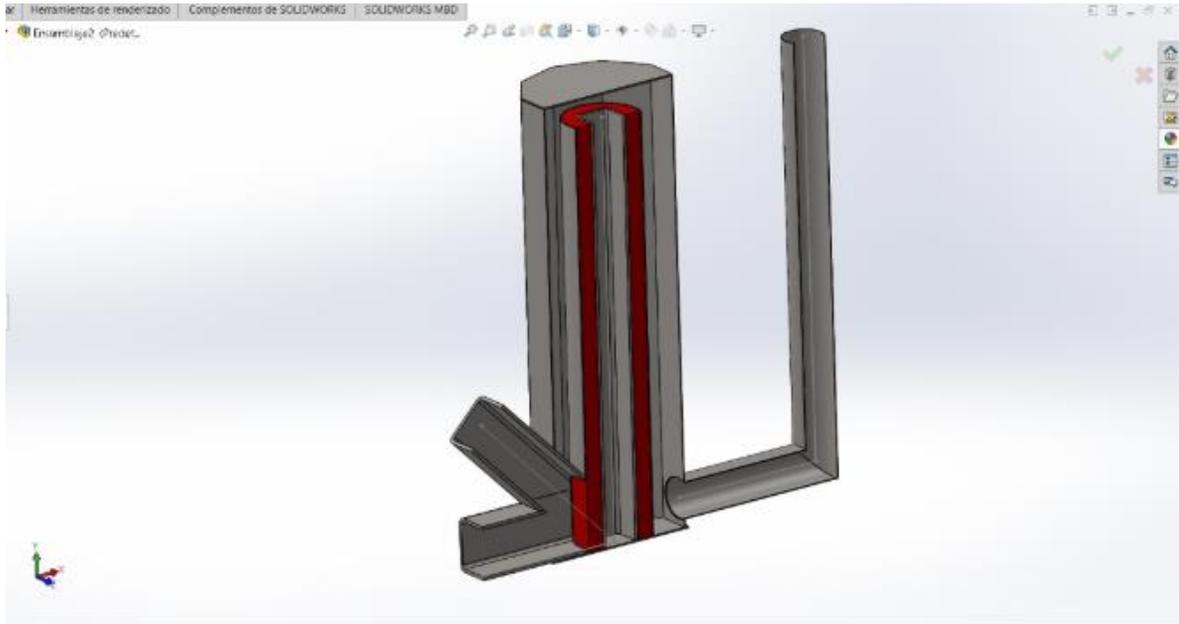
Figura 15. Vista interna de la estructura del quemador en SolidWorks.



Fuente: Elaborado por los autores.

En esta figura 12 se muestra un corte en donde se observa el interior del quemador ensamblado.

Figura 16. Vista interna de la estructura del quemador en SolidWorks.



Fuente: Elaborado por los autores.

Teniendo las dimensiones de las medidas del quemador, se aplicaron las fórmulas de problemas de transferencia de calor de tubos concéntricos, transferencia de calor por convección para hallar la temperatura teórica.

Asumiendo que el aire ingresa al sistema a una temperatura de 100°C , a presión atmosférica en el ducto cuadrado de $0,72\text{ m}$ de largo y una sección transversal de $0,07\text{ m} \times 0,07\text{ m}$ que pasa a razón de $0,04083\text{ [m}^3/\text{s}]$. Y la superficie externa del tubo se encuentra a una temperatura de 80°C al momento de su operación, se determina teóricamente la temperatura del aire a la salida del quemador. Por las tablas a-15 de las propiedades del aire a presión de 1 atm en el libro transferencia de calor²² se seleccionó:

²² Cengel. Yunus, A. Transferencia De Calor y Masa, Universidad de Nevada, Reno. Editorial Mc Graw Hill, 2.007

Al no conocer la temperatura de salida en el ducto no se puede determinar la temperatura media de masa del aire para tomar las propiedades. La temperatura de admisión es de 100°C y se espera que haya una pérdida de calor a través del ducto cuya superficie se encuentra a 80°C.

| Densidad (ρ) | Calor específico C_p | Viscosidad cinemática ν | Conductividad térmica k | Prandtl Pr |
|----------------------------|------------------------|---|---------------------------|------------|
| 0,9458[kg/m ³] | 1009 [J/kg.°C] | 2,306* 10 ⁻⁵ [m ² /s] | 0,03095 [W/m°C] | 0,7111 |

Para hallar el Diámetro hidráulico (D_h) se tuvieron en cuenta la longitud característica, velocidad media (V_{prom}) y el número de Reynolds (Re).

$$\text{Área cuadrado} = A_c = a^2 = 0,0049 \text{ m}^2$$

$$D_h = \frac{4 * A_c}{P} = \frac{4 * a^2}{4 * a} = a = 0,07 \text{ m}$$

$$V_{prom} = \frac{\dot{V}}{A_c} = \frac{0,04083[\text{m}^3/\text{s}]}{(0,07\text{m}^2)} = 8,3265[\text{m}/\text{s}]$$

$$Re = \frac{V_{prom} * D_h}{\nu} = \frac{8,3265[\text{m}/\text{s}] * 0,07 \text{ m}}{2,306 * 10^{-5}[\text{m}^2/\text{s}]} = 25275,58$$

El numero de Reynolds es > 10.000. Por lo tanto, el flujo es turbulento y la longitud de entrada es más corta en el flujo turbulento, siendo así aproximadamente:

$$L_{h,turbulento} \approx L_{t,turbulento} \approx 10 * D = 10 * 0,07 \text{ m} = 0,7\text{m}$$

Lo cual es mas corto a la longitud total del ducto. Se puede suponer que se tiene un flujo turbulento completamente desarrollado en todo el ducto y se determina

con el número de Nusselt con la siguiente expresión, con $n=0,3$ por pérdida de calor,

$$Nu = \frac{h * Dh}{k} = 0,023 * Re^{0,8} * Pr^n$$

$$Nu = 0,023 * (25275,58)^{0,8} * 0,7111^{0,3} = 69,1$$

Entonces,

$$h = \frac{k}{Dh} Nu = \frac{0,03095 \text{ [W/m}^\circ\text{C]}}{0,07 \text{ m}} (69,1) = 30,55 \text{ [W/m}^2\text{ }^\circ\text{C]}$$

A_s : Área transversal

$$A_s = pL = 4 * a * L = 4 * 0,07 \text{ m} * 0,72 \text{ m} = 0,2016 \text{ m}^2$$

$$\dot{m} = \rho * \dot{V} = \left(0,9458 \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right] * 0,04083 \left[\frac{\text{m}^3}{\text{s}} \right] \right) = 0,0385 \text{ kg/s}$$

Con estos datos se determina la temperatura de salida a partir de la siguiente expresión:

$$T_{\text{exterior}} = T_s - (T_s - T_i) \left(\frac{h * A_s}{\dot{m} * C_p} \right)$$

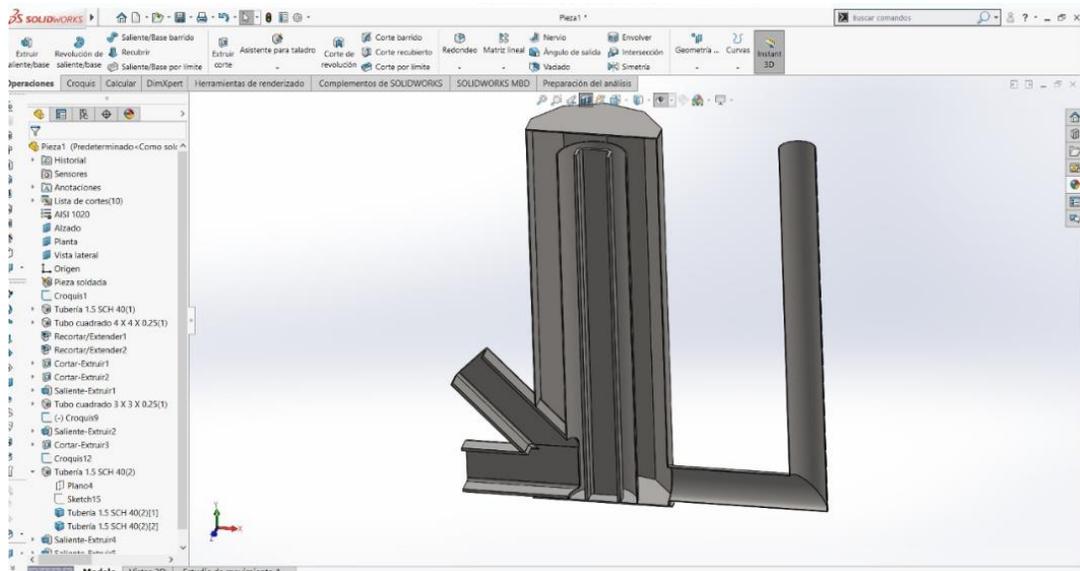
$$T_{\text{exterior}} = 80^\circ\text{C} - (80^\circ\text{C} - 100^\circ\text{C}) \left(\frac{(30,55 \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2} \right] * (0,2016 \text{ m}^2))}{(0,0385 \frac{\text{kg}}{\text{s}}) * (1009 \text{ [J/kg}^\circ\text{C]})} \right)$$

$$T_{\text{exterior}} = 79,37^\circ\text{C}$$

9.2 CONSTRUCCIÓN DEL QUEMADOR E INSTALACIÓN DEL SISTEMA DE CALENTAMIENTO

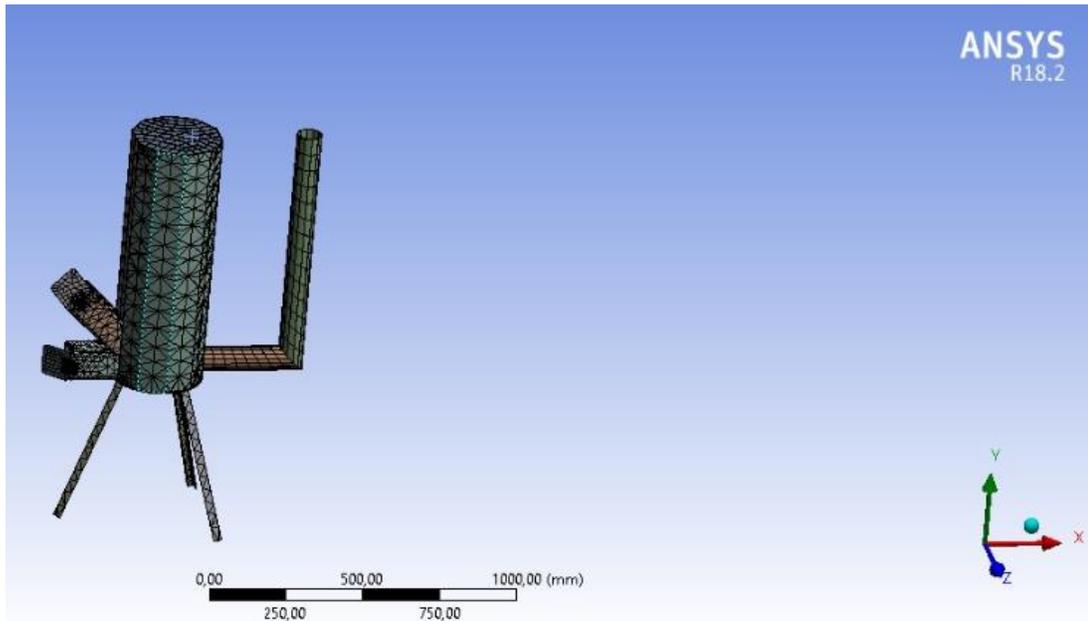
Con los análisis estructurales y térmicos en ANSYS, después de haber definido el mallado para la estructura en general del quemador, se evidenció que el quemador soportaba las cargas a las que se sometió en diferentes pruebas.

Figura 17. Corte, mecanizado del quemador en Solidworks.



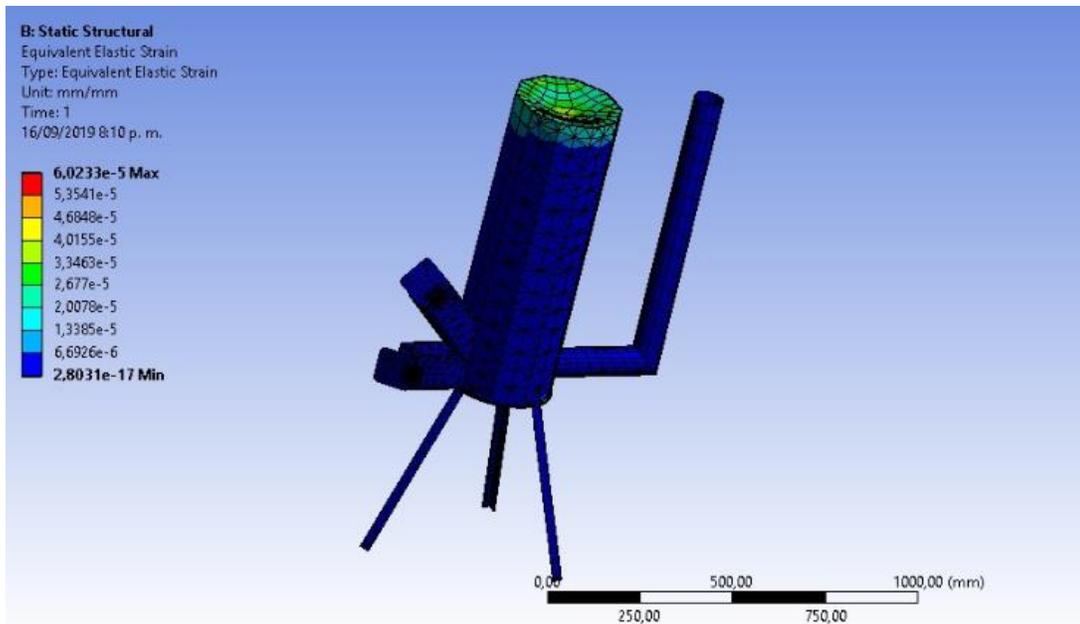
Fuente: Elaborado por los autores.

Figura 18. Mallado automático en Ansys.



Fuente: Elaborado por los autores.

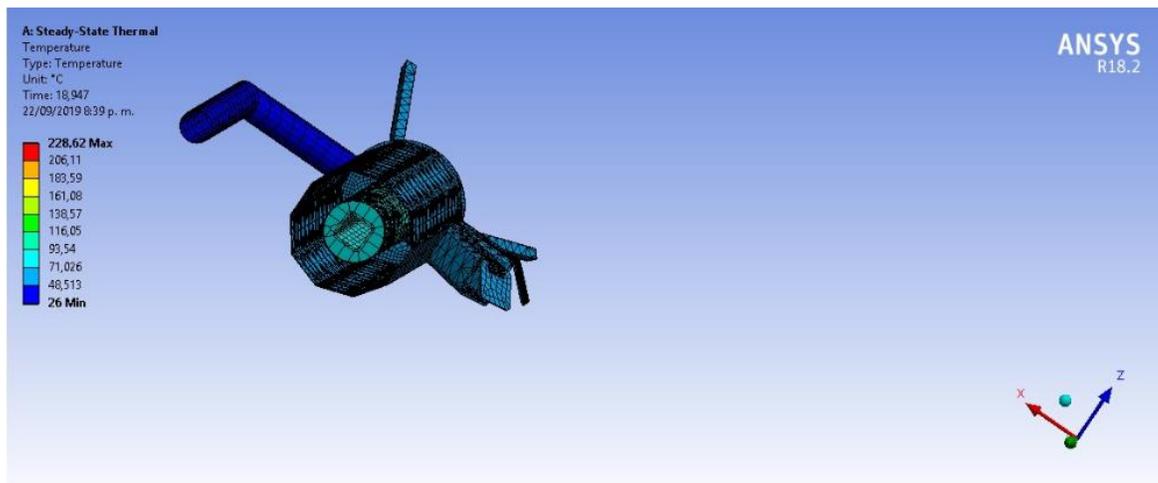
Figura 19. Analisis estructural en Ansys.



Fuente: Elaborado por los autores.

Con el mallado aplicado en la estructura se prosiguió a realizar un estudio de deformación elástica durante un periodo de tiempo. Según la figura 21 se puede observar que la estructura se sometió una fuerza aplicada en todos los sentidos de esta, lo cual dio como resultados una deformación elástica casi inexistente debido a las propiedades físicas del material escogido para su construcción.

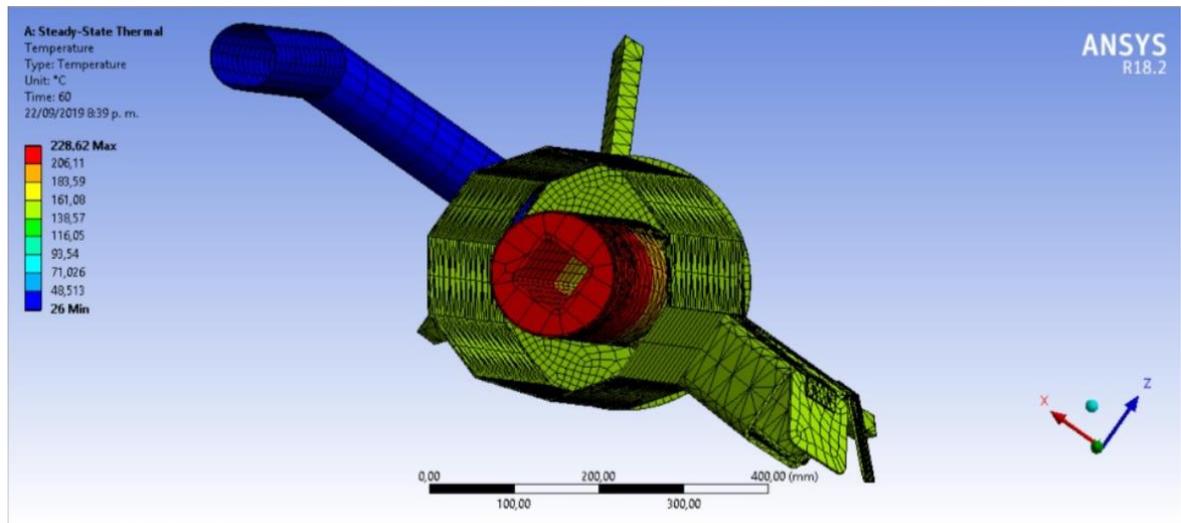
Figura 20. Análisis térmico en Ansys



Fuente: Elaborado por los autores

En el análisis térmico de la estructura se hizo el modelamiento del lugar en donde se concentra el calor y su transferencia a las partes externas para verificar que la estructura pudiera soportarlo. Este estudio se realizó en un tiempo de 18 minutos donde soporto temperaturas desde 26 °C a 228,62 °C. Debido a esto la estructura externa no se vio afectada por la temperatura de combustión en la parte interna del quemador por su aislamiento que cumple función de mantener el calor por dentro y evitar pérdidas de calor.

Figura 21. Aplicación de calor, análisis térmico en Ansys



Fuente: Elaborado por los autores

9.2.1 Materiales de construcción

- Discos de 3/16 para las tapas del quemador
- Tubo cuadrado de 70 mm x 70 mm estructural en cold rolled.
- Estos tubos se utilizaron para la construcción de la base del quemador, en donde está ubicada la zona de entrada de aire, entrada de biomasa y salida de gases de combustión. Teniendo una longitud de 50 cm para la salida de los gases, para el ingreso de aire y de biomasa 40 cm desde el interior del quemador.
- Arcilla, fue usada para rellenar el espacio entre el tubo de 120 mm y 70 mm.
- Tubo cuadrado de 120 mm x 120 mm estructural.
- Este tubo se soldó alrededor de la tubería de 70mm x 70mm para aislar la zona de combustión, rellenándose con arcilla para mantener el calor y que

el principio de funcionamiento del quemador funcionara correctamente con la cámara de aire que se dejó.

- Lamina de 2,5 mm de espesor.
- Esta lamina se encuentra alrededor de la zona interna del quemador, se soldó a las tapas para así cerrar el quemador ayudando a formar una cámara de aire caliente después de pasar por la combustión de la biomasa.
- Tubo de 2" estructural
- Este tubo está ubicado en el exterior del quemador, sirviendo como salida del aire caliente hacia los túneles de secado. A la lámina que encierra el quemador, se le hizo un hueco para que el tubo pudiera entrar y tener la salida de aire.
- Ángulo de ½" de espesor de 1/8, se usaron para que sirvieran como base del quemador a una altura de 20 centímetros.

De acuerdo con el diseño, materiales seleccionados y datos obtenidos se construyó el quemador para así acoplarlo al sistema de calentamiento.

Para el proceso de construcción del quemador la base fue soldar 3 tubos que estuvieran interconectados donde cada tubo tendría un papel específico; los 3 tubos se unen en un solo punto, el cual es donde se genera la combustión del sistema, partiendo de ahí se encuentra un tubo a 45° que es donde está la zona de alimentación de la biomasa. Inferior al tubo de 45° grados, se encuentra el tubo donde está la rejilla del quemador en donde se genera la ignición del sistema. En el tubo vertical que se encuentra a 90° es donde sale el aire de la combustión hacia la parte superior del quemador

Figura 22. Proceso de construcción del quemador.



Fuente: Elaborado por los autores.

El tubo de calentamiento de aire tiene una subdivisión interna, de su misma altura pero diferente área. La cual está aislada con arcilla casera que se encarga de concentrar la potencia calorífica del quemador, dando por resultado un aire a altas temperaturas.

Figura 23. Tubo de calentamiento de aire



Fuente: Elaborado por autores

El sistema interno del quemador esta encerrado por una lamina metalica a la cual llega el aire caliente donde circula por el caparazón y debido a la presion atmosferica encuentra la salida por el tubo que alimenta a los tuneles de secado.

Figura 24. Construcción del quemador .



Fuente: Elaborado por los autores.

Para el soporte del quemador se utilizaron 4 ángulos metálicos de $\frac{1}{2}$ " con altura de 20 cm, las cuales fueron cortadas con plasma y fueron soldadas al quemador con el objetivo de darle estabilidad como también separarlo del suelo por sus altas temperaturas.

Figura 25. Soporte del quemador



Para los sellos de los tubos de alimentación y combustión se consiguieron bisagras las cuales se soldaron al lado de la entrada de estos, y a estas se les acoplo el sello el cual permite sellar la zona de alimentación como también regular la entrada de aire a la zona de combustión.

Figura 26. Sellos de entrada de alimentación y tubo de combustión



Fuente: Elaborada por los autores

Los accesorios del quemador fueron diseñados de tal manera que el quemador se pueda utilizar con 1 túnel de secado o simultáneamente 2 túneles. El primer accesorio tiene una geometría en L la cual permite la entrada directa al túnel de secado, comprado con esta geometría. El segundo accesorio consta de dos tubos cortados con plasma y unidos mediante soldadura a 45 ° en dos sentidos otorgándole la facilidad de suplir 2 túneles al mismo tiempo.

Figura 27. Accesorios del quemador.



Fuente: Elaborado por los autores.

En esta fotografía se puede observar el ensamble de todas las partes del quemador sin accesorios.

Figura 28. Quemador acoplado con sus partes sin accesorios.



Fuente: Elaborado por los autores.

Debido a las altas temperaturas del sistema se aplicó una laca en el exterior del quemador que es resistente a altas temperaturas llegando a soportar capacidades de 540°C.

Figura 29. Aplicación de laca térmica al quemador.



Fuente: Elaborado por los autores.

Luego de un tiempo de haber aplicado la laca térmica, se pintó la estructura del quemador completamente con una capa anticorrosiva y reflectora de luz solar.

Figura 30. Aplicación de pintura anticorrosiva.



Fuente: Elaborado por los autores.

ADECUACION DE LOS TUNELES DE SECADO

Para la instalación del quemador en el sistema de calentamiento de los túneles de secado que están ubicados en la Universidad Pontificia Bolivariana, se le realizaron unas adecuaciones y cambios a los túneles debido que se encontraban en regular estado y presentaban oxidación. Para ello se listaron las adecuaciones que requería los túneles, se hizo compra de materiales como lijas, brochas, pintura para la corrosión, plástico efecto invernadero, oiales y arandelas para cambiar el sistema de ajuste del plástico efecto invernadero en los túneles, entre otros.

El estado en el que se encontraban los túneles de secado no era apto para su uso y por lo tanto fue necesario cambiar y restaurar partes del sistema. Las cuales fueron inventariadas para su proceso.

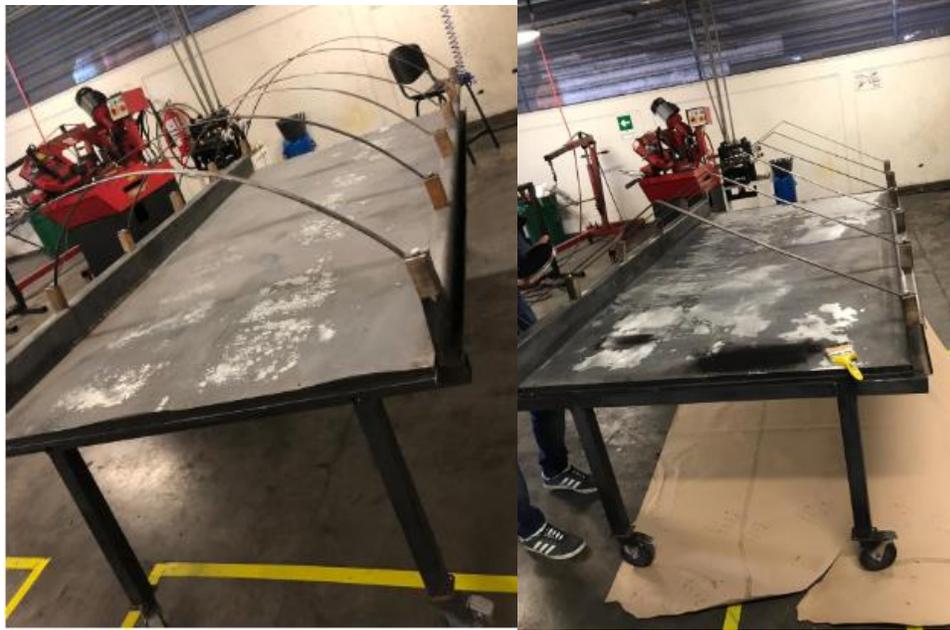
Figura 31. Estado de los túneles de secado.



Fuente: Elaborado por los autores.

Debido al avanzado estado de oxidación y desgaste del material que se encontraban algunas partes fue necesario remover cada punto de oxidación del sistema lijándolo manualmente.

Figura 32. Proceso de quitar la corrosión de los túneles de secado.



Fuente: Elaborado por los autores.

Reestructuración de la estructura metálica y partes de la madera que estaban en estado de deterioro. Debido al mal estado nos tocó remover las piezas de madera las cuales le daban inestabilidad al sistema, debido que no se le podían ajustar los tornillos y tenían grietas. Por tal motivo toco hallar las medidas de estas y reemplazarlas.

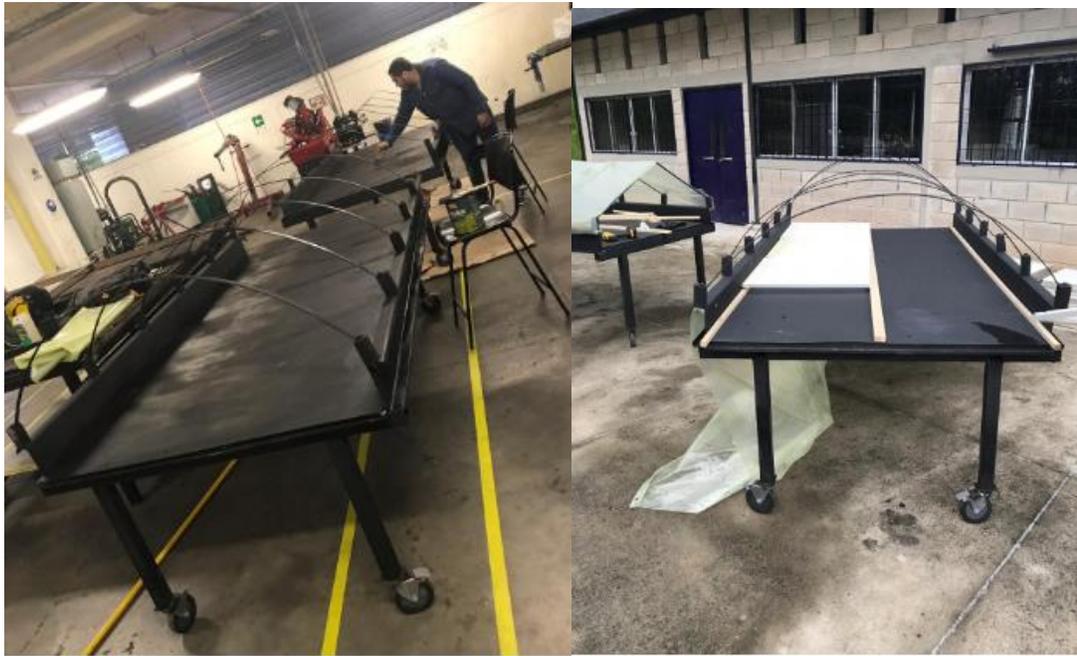
Figura 33. Reestructuración del túnel.



Fuente: Elaborado por los autores

Luego de haber lijado los dos túneles de secado en todas las partes donde había oxidación en su estructura, se procedió a aplicar dos capas de pintura anticorrosiva.

Figura 34. Aplicación de pintura anticorrosiva a los túneles de secado.



Fuente: Elaborado por los autores.

En esta fotografía se puede observar que se hizo un ajuste a cada tornillo en cada punto de la base que soporta al plástico efecto invernadero, con el objetivo de darle rigidez a todo el sistema. Para los soportes de las bandejas de secado se tuvo que instalar nuevos palos de madera de 2x2 cm a lo largo del túnel y fijarlos en la estructura mediante tornillos.

Figura 35. Adecuación de las bandejas y ajuste de barras del túnel de secado.



Fuente: Elaborado por los autores.

En esta fotografía se observa el nuevo plástico efecto invernadero, ya que el anterior se encontraba en mal estado y darle un nuevo ajuste al sistema con ayuda de ojales en la parte lateral de cada extremo del plástico.

Figura 36. Instalación del plástico efecto invernadero.



Fuente: Elaborado por los autores.

Después de haber realizado el diseño, construcción, adecuación, análisis estructurales, térmicos, éste fue el resultado final.

Figura 37. Sistema de calentamiento acoplado.



9.3 PRUEBAS DE DESEMPEÑO Y AJUSTE DEL SISTEMA DE CALENTAMIENTO CON BIOMASA

$$Energia\ ideal = E_{biomasa} = 8 [kg] * 15 \left[\frac{MJ}{kg} \right] = 120 [MJ/kg]$$

$$E_{inquemados} = 0,256 kg * 15 [MJ/kg] = 3.84 [MJ/kg]$$

La Energía de inquemados fue tomada experimentalmente y se halló su poder calorífico con su peso.

Al analizar las perdidas en el sistema de combustión se tuvieron en cuenta las temperaturas que entrego el quemador y las temperaturas en diferentes sectores del túnel de secado. Debido al sistema aplicado en el recorrido del fluido se notó experimentalmente que hay una gran pérdida de calor entre la tubería de salida del quemador y la tubería de entrada a los túneles, la cual varía entre 5°C - 10°C.

De acuerdo con los datos experimentales obtenidos, la energía real del sistema,

$$E_{real} = Energia_{ideal} - E_{inquemados} = 120 \left[\frac{MJ}{kg} \right] - 3.84 [MJ/kg]$$

$$E_{real} = 116.16 [MJ/kg]$$

Durante las pruebas que se realizaron en diferentes rangos de tiempo, el comportamiento de la biomasa en combustión fue, durante los primeros 15 minutos en diferentes pruebas experimentales se comportó de la misma forma, llegando a alcanzar a temperaturas máximas en la superficie de 478 °C en la zona de combustión y temperaturas promedio en los primeros 15 minutos de cada prueba a 230 °C en la misma zona del quemador.

- Análisis de gases de combustión

Para garantizar una estructura estable y un circuito con la mayor eficiencia se analizaron variables, entre ellos, la densidad, el diferencial de presión, los gases de combustión, porcentaje de humedad, temperatura y el flujo del aire que se obtuvo como resultados en el sistema de calentamiento.

Las características y calidad de los gases de combustión a la salida del sistema del quemador por la biomasa seleccionada se determinaron que son nocivos para el secado de alimentos ya que afectaría su textura y su sabor, debido a su alta concentración de CO₂. Motivo por el cual es necesario ubicar más filtros antes de la entrada a los túneles de secado. Es importante resaltar que al momento de la combustión a bajas temperaturas con fuego bajo no se generan toxinas nocivas. Además, que suministra la cantidad de biomasa quemada, las cenizas y partes inquemadas.

Después de quemar la biomasa apta para la combustión, se determinó que, de 7400 gramos, resultaron aproximadamente 238 gramos de inquemados.

Al determinar la energía de la biomasa, la energía de los gases y la energía de inquemados se puede determinar la eficiencia de la combustión con la siguiente fórmula.

El flujo masico de la energía de la biomasa se halló para tener una idea clara de la energía entrante al sistema, sin tener en cuenta la energía de los inquemados, cabe resaltar que los inquemados también tienen poder calorífico, lo cual le resta a la energía entregada.

$$n_{comb} = \frac{Energia_{biomasa} - Energia_{inquemados}}{Energia_{biomasa}} * 100$$

$$n_{comb} = \frac{120 \left[\frac{MJ}{kg} \right] - 3.84 [MJ/kg]}{120 \left[\frac{MJ}{kg} \right]} * 100$$

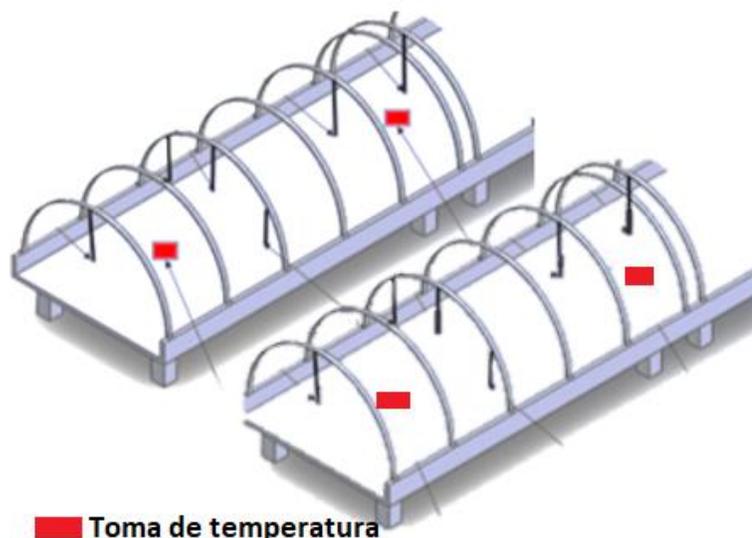
$$n_{comb} = 96.8\%$$

- Análisis del comportamiento térmico interno de la cámara de secado

Para el análisis del comportamiento térmico en el interior de la cámara de secado se hizo uso de una pistola laser y termocuplas (tipo K) que son instrumentos de medición de temperatura, ubicadas a lo largo del túnel para obtener las temperaturas en sitios diferentes y determinar la temperatura promedio en el interior de los túneles. Observando la superficie más cercana de los túneles que se encuentra contacto con la tubería de entrada a los túneles, arrojó como resultado las temperaturas después de estabilizarse el sistema, que la temperatura del aire con la **biomasa de madera** ingresaba a la cámara de secado a 68,2 °C promedio, circulando así hasta la mitad del túnel a una temperatura a 67,45°C promedio y terminando su recorrido a una temperatura de 66,7 °C en el final del túnel.

Con la **biomasa del cacao** la temperatura promedio del aire al ingreso a la cámara de secado fue de 65,6°C, circulando hasta la mitad del túnel a una temperatura promedio de 64,4°C, y finalizando su recorrido a una temperatura promedio de 63,2°C.

Figura 38. Sitios de toma de temperatura



Fuente: Elaborado por los autores

El análisis de energía de todo el sistema de calentamiento nos suministró la información necesaria para determinar la eficiencia por medio de datos estadísticos y eficacia del proyecto.

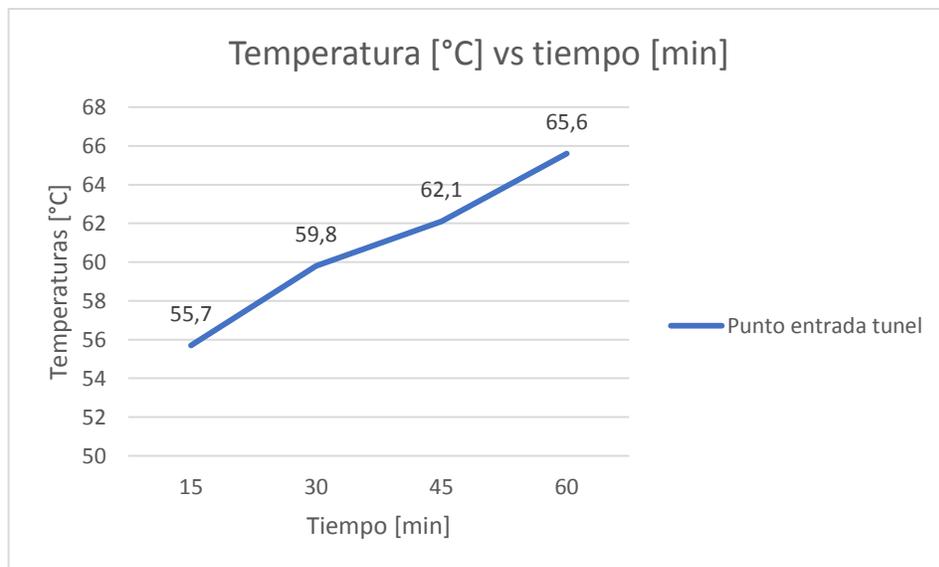
Para el análisis de la biomasa de la madera, se hizo las pruebas a temperatura ambiente de 27 °C, sensación térmica 30 °C.

Tabla 9. Datos experimentales de las temperaturas del sistema de calentamiento en el punto de entrada del túnel, biomasa madera.

| Punto entrada túnel | Medición 1 | Medición 2 | Medición3 | Medición 4 |
|---------------------|------------|------------|-----------|------------|
| Temperaturas [°C] | 57,3 | 61,2 | 64,9 | 68,2 |
| tiempo [min] | 15 | 30 | 45 | 60 |

Fuente: Elaborada por los autores

Figura 39. Gráfica punto entrada túnel, temperatura vs tiempo. Madera



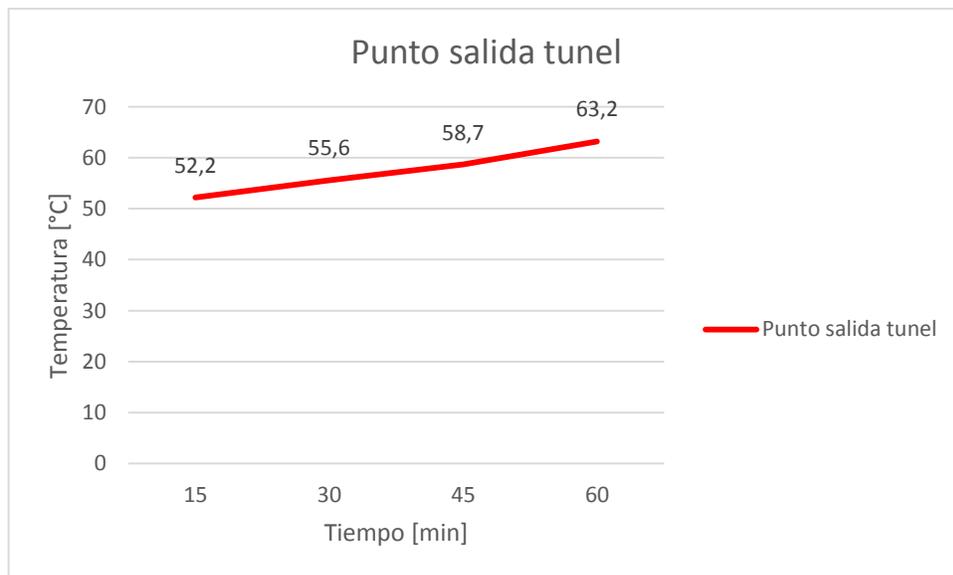
Fuente: Elaborado por autores

Tabla 10. Datos experimentales de las temperaturas del sistema de calentamiento en el punto de salida del túnel, biomasa madera.

| Punto salida túnel | Medición 1 | Medición 2 | Medición 3 | Medición 4 |
|--------------------|------------|------------|------------|------------|
| Temperaturas [°C] | 54,9 | 59,8 | 63,2 | 66,7 |
| tiempo [min] | 15 | 30 | 45 | 60 |

Fuente: Elaborada por los autores.

Figura 40. Grafica punto salida túnel, temperatura vs tiempo. Madera



Fuente: Elaborado por los autores

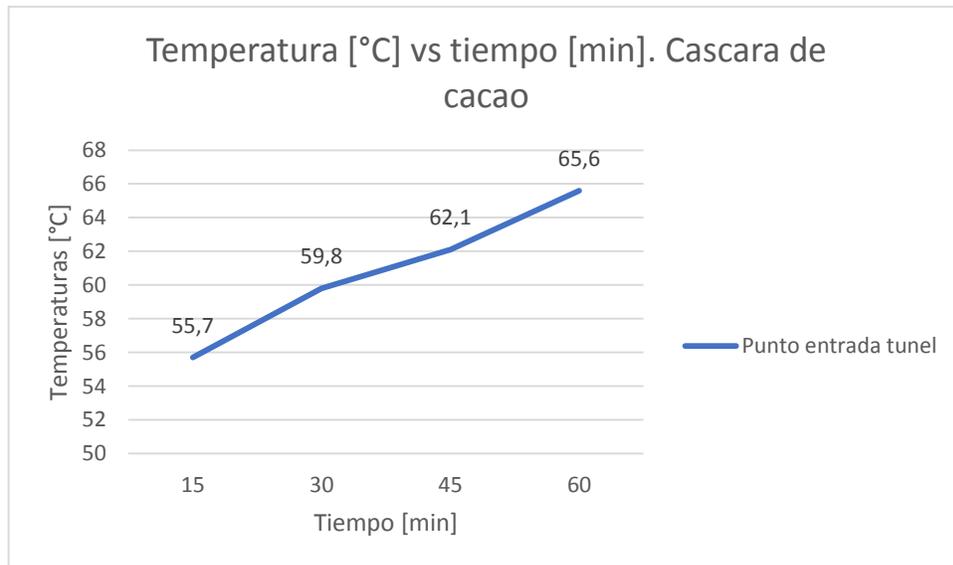
Para el análisis de datos de la biomasa de cascara de cacao, las pruebas se realizaron con una temperatura ambiente 30 °C, sensación térmica 32°C

Tabla 11. Datos experimentales de las temperaturas del sistema de calentamiento en el punto de entrada del túnel, biomasa cascara de cacao.

| Punto entrada túnel | Medición 1 | Medición 2 | Medición 3 | Medición 4 |
|---------------------|------------|------------|------------|------------|
| Temperaturas [°C] | 55,7 | 59,8 | 62,1 | 65,6 |
| tiempo [min] | 15 | 30 | 45 | 60 |

Fuente: Elaborada por los autores

Figura 41. Grafica punto de entrada túnel, temperatura vs tiempo. Cascara de cacao



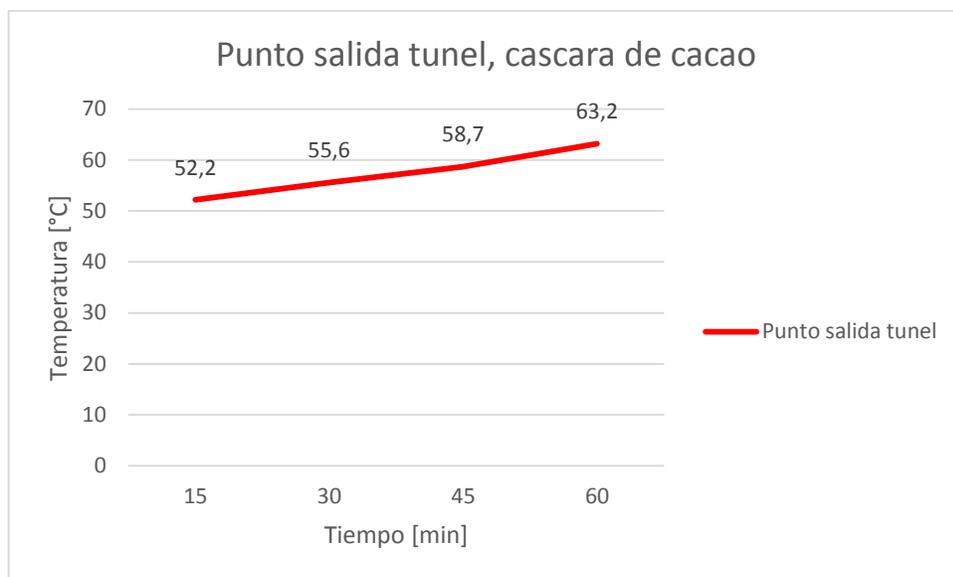
Fuente: Elaborado por los autores

Tabla 12. Datos experimentales de las temperaturas del sistema de calentamiento en el punto de salida del túnel, biomasa cascara de cacao.

| Punto salida túnel | Medición 1 | Medición 2 | Medición 3 | Medición 4 |
|--------------------|------------|------------|------------|------------|
| Temperaturas [°C] | 52,2 | 55,6 | 58,7 | 63,2 |
| tiempo [min] | 15 | 30 | 45 | 60 |

Fuente: Elaborado por los autores.

Figura 42. Grafica punto de salida túnel, temperatura vs tiempo. Cascara de cacao



Fuente: Elaborado por los autores

Los instrumentos de medición que se utilizaron durante las pruebas son considerados como unos de los instrumentos más versátiles, debido a su fácil portabilidad y operabilidad, lo cual permite observar la temperatura real en el instante exacto en el que se toma la medida. Otro instrumento de medición de temperatura son las termocuplas, las cuales son de mayor uso por su exactitud en la instalación de los sistemas.; Teniendo ventajas como la capacidad de generar una lectura durante los intervalos de tiempo asignados, lo cual se registra en un programa y ofrecen sus resultados en tablas detalladas. En el sistema de los túneles de secado tipo Hohenheim se hizo uso de estos instrumentos de medición

para tomar la medida de temperatura en diferentes puntos del quemador y de los túneles de secado para un mayor control y análisis del proceso.

Basándose en los cambios diferenciales de temperatura, en momentos experimentales cronometrados se logró adquirir los suficientes datos para modelar el comportamiento de la temperatura cuando trabaja con biomasa.

La información obtenida permitió ser analizada para mejorar las siguientes pruebas en el sistema y tener una mejor noción de la cantidad requerida de biomasa para llegar a ciertos niveles de temperatura, según el alimento a secar. Lo cual es la potencia calorífica que nos proporciona la biomasa seleccionada. Un punto importante a tener en cuenta es la duración del tiempo en el que la biomasa hará su combustión y liberará su potencia calorífica entregándonos cierto nivel de temperatura que será transportado a la totalidad del sistema para cumplir con su funcionamiento.

Calculando los valores de la biomasa utilizada y el resultado de los inquemados después de la combustión, logramos identificar qué porcentaje real de poder calorífico obtuvimos en las diferentes pruebas del sistema de calentamiento. En las pruebas de inquemados (ceniza), la diferencia del peso entre la biomasa puesta inicialmente con los residuos al final de la prueba.

Consideramos un criterio importante aplicar estas pruebas a nuestro sistema, debido a que en nuestros cálculos consideramos la contaminación que puede generar el sistema al medio ambiente, y con estas pruebas tendremos los datos necesarios para aplicar métodos que trataran de reducir la contaminación y mejorar la eficiencia del sistema. Algunos de los tipos de controles que se llevaran a cabo es la utilización de filtros para evitar el escape de toxinas al entorno; como también, la implementación de un sistema de almacenamiento donde serán depositados los residuos del quemador en los cuales posteriormente se realizaran las pruebas de inquemados, y la comparación de peso.

La recolección de datos que nos entregó las diferentes pruebas tuvo un papel importante al hacer el análisis energético del sistema pieza por pieza, en donde se resaltó las partes en donde se llevaron a cabo los procesos más importantes, en el caso del quemador, además de la transferencia de calor a lo largo del sistema. La razón de estos análisis es garantizar la durabilidad, seguridad y eficiencia del sistema, y con los datos obtenidos hacer las modificaciones necesarias al sistema.

Para análisis del comportamiento del sistema de calentamiento con uso de la biomasa para los túneles de secado tipo Hohenheim, se calculó el rendimiento teniendo en cuenta las temperaturas del aire promedio en el ingreso, a la mitad y final del túnel con las pruebas de los dos (2) tipos de biomasa utilizados.

Para la biomasa de madera, el rendimiento:

%Rend. madera: % Rendimiento del sistema con uso de la madera

$$\%Rend_{madera} = \frac{\text{Rendimiento real}}{\text{Rendimiento teorico}} * 100\%$$

$$\%Rend_{madera} = \frac{67,45\text{ }^{\circ}\text{C}}{79,37\text{ }^{\circ}\text{C}} * 100\% = \mathbf{84,98\%}$$

Para la biomasa de cascara de cacao, el rendimiento:

%Rend. cascara de cacao: % Rendimiento del sistema con uso de la cascara de cacao

$$\%Rend_{cascara\ de\ cacao} = \frac{\text{Rendimiento real}}{\text{Rendimiento teorico}} * 100\%$$

$$\%Rend_{cascara\ de\ cacao} = \frac{64,4\text{ }^{\circ}\text{C}}{79,37\text{ }^{\circ}\text{C}} * 100\% = \mathbf{81,44\%}$$

10. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- Podemos observar de los datos recolectados que tuvimos una mejor eficiencia con la biomasa de madera con un 84,98% que con la biomasa del cacao que tenía un 81,44%, esto se debe a la geometría de la biomasa ya que se puso a secar uniformemente mientras que la biomasa del cacao aún conservaba partes húmedas por sus variaciones en su forma. Lo puede mejorar o afectar su rendimiento al momento de la combustión.
- Se observó que el rendimiento de la biomasa se ve altamente influenciado por agentes externos como la humedad, temperatura, estado de la biomasa, parte del residuo de la biomasa para el aprovechamiento de la potencia calorífica.
- Uno de los datos más relevantes fue el gradiente de temperatura máximo que se elevó hasta 478 °C durante la combustión en la superficie del quemador, en donde se necesitó temperaturas tan elevadas para poder proporcionar el flujo masico requerido por el sistema a una temperatura promedio al final del túnel de 66.7 °C con la biomasa de madera, y para la biomasa de la cascara de cacao una temperatura de salida en el túnel de 63,2°C.
- Se observó que la construcción del quemador y los aislantes utilizados permitieron que este alcanzara temperaturas por encima de los 400 °C sin que se viera afectado su estructura en general. Esto demostró la importancia de haber aplicado la laca para temperaturas aproximadas de 537,77°C y la pintura reflectiva no dejara que el sistema se viera afectado y superara el límite de su funcionalidad.
- Se recomienda realizar seguimientos y revisión del estado del quemador debido que cada vez que esté en operación se somete a altas temperaturas y podría afectar su estructura.
- Debido a la cantidad de flujo masico que genera la combustión de la biomasa, este libera gases y partículas en el aire que puede ser nociva para

el secado de alimentos, por lo que se recomienda dos tipos de filtros, siendo uno que elimine las partículas de aire de CO₂ y otro filtro que purifique el aire, para que sea inoloro y no se vea afectado el producto final.

- Se recomienda un filtro adicional en la salida del quemador para no contaminar el medio ambiente.

11. BIBLIOGRAFÍA

ARGUELLO, O., MEJIA, A, & CONTRERAS, N. (1999). Manual de caracterización morfoagronómica del cacao en el nororiente colombiano. Bucaramanga: Corpoica

Atlas del potencial energético de la biomasa residual en Colombia- Ministerio de Minas y Energía, Republica de Colombia - <https://biblioteca.minminas.gov.co/pdf/ATLAS%20POTENCIAL%20ENERGETICO%20BIOMASA%20RESIDUAL%20COL.%20UPME.pdf>

CODUSE, Agencia Suiza para el desarrollo y la cooperación - Ministerio de Relaciones Exteriores – Guía de uso de secadores solares para frutas, legumbres, plantas medicinales y carnes- tomado- <http://www.unesco.org/new/fileadmin/MULTIMEDIA/FIELD/Montevideo/pdf/ED-Guiasecaderosolar.pdf>

Innovación aplicada a la industria de alimentos- Universidad Pontificia Bolivariana- <https://www.upb.edu.co/es/noticias/innovacion-aplicada-a-la-industria-de-alimentos-upb-bucaramanga>

NOGUÉS, F., GARCÍA G, D., REZEAU, A. Energía de la Biomasa (Volumen 1) – tomado.

https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=P58rcPu5O90C&oi=fnd&pg=PA1&dq=biomasa+clasificaci%C3%B3n&ots=GAO2vStSit&sig=SluAryJ0X87UzD1bH_wuJoV-rTw#v=onepage&q&f=false

Aprovechamiento de la biomasa - <https://blog.gruponovelec.com/energias-renovables/sistemas-aprovechamiento-la-biomasa/>

Mejoramiento de la calidad del gas producido por el proceso de gasificación mediante el uso de catalizadores – Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá, facultad Ingeniería Química – Luis Fernando Córdoba Castrillón
EVALUACIÓN ENERGÉTICA DE CÁSCARAS DE CACAO NACIONAL Y CCN-51, UNIVERSIDAD DE CUENCA, octubre del 2013

García, C. (1997). Cacao (*Teobroma cacao* L.). Palmira, Colombia: Universidad Nacional de Colombia.

[BOLETIN TECNOLÓGICO – SUPERINTENDENCIA DE INDUSTRIA Y COMERCIO. Enero 2017 – Centro de Información Tecnológica y Apoyo a la Gestión de la Propiedad Industrial.]

CARMONA, Cepeda, René y URZUA, M. Álvaro- CARACTERIZACION DE BIOMASA LEÑOSA. Universidad de Chile, Facultad Ciencias Forestales – 2.013

Conservación y secado de alimentos -
https://biblioteca.bucaramanga.upb.edu.co/docs/digital_32711.pdf

Giraldo, G., Gómez, A. Tratamiento de Conservación del Banano por el Método Combinado de Impregnación a vacío y Secado con Aire Caliente

Chaves, E. Secado solar de alimentos

Martínez Lozano, Sergio. EVALUACION DE LA BIOMASA COMO RECURSO ENERGETICO RENOVABLE EN CATALUÑA (2.009)

Cengel. Yunus, A. Transferencia De Calor y Masa, Universidad de Nevada, Reno. Editorial Mc Graw Hill, 2.007

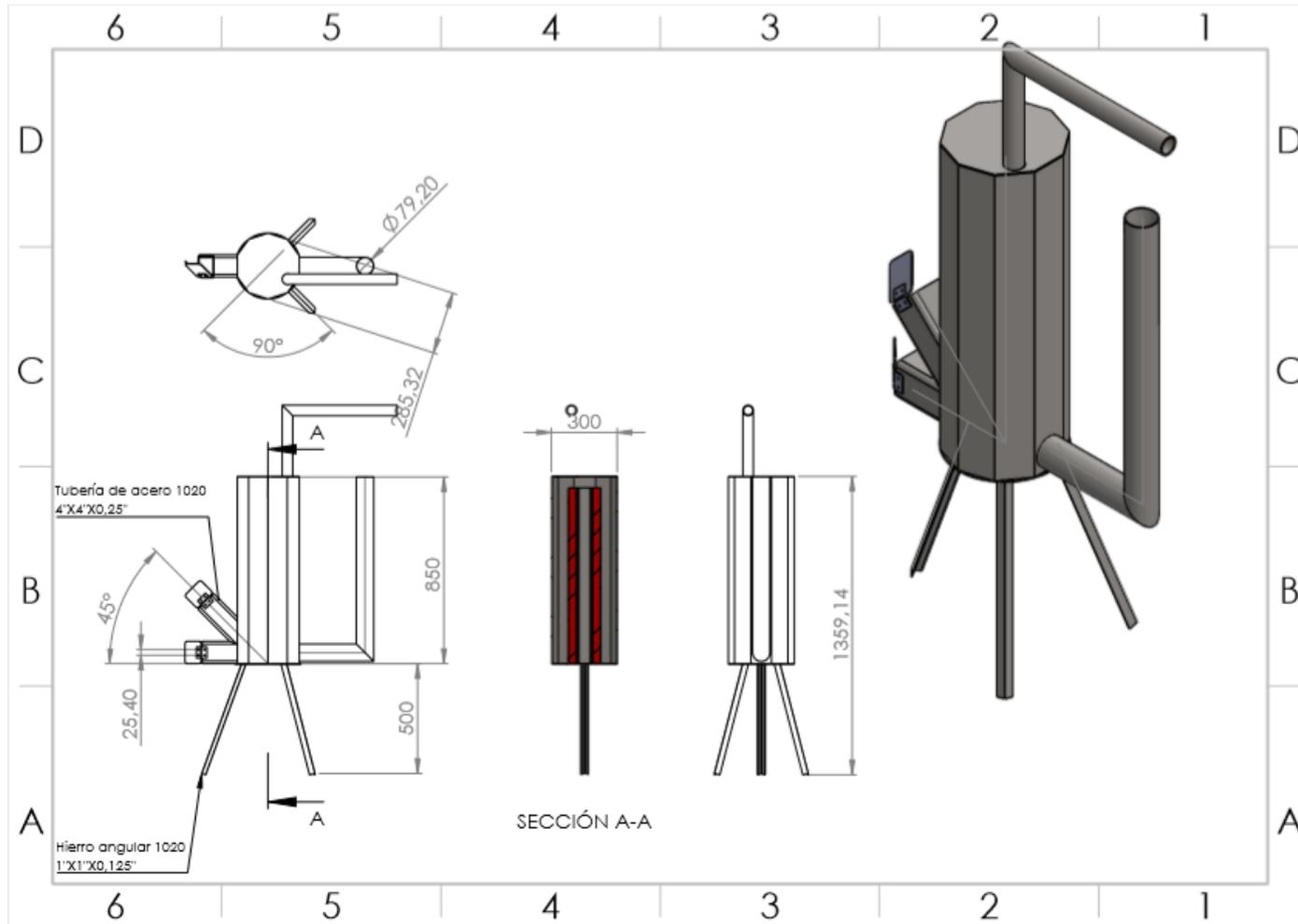
Meter Quaak, Harrie Knoef, Hubert Stassen, Energy from Biomass a review of Combustion and Gasification Technologies, World Bank Publications, 2-4, Washington DC, USA, March, 1999

ELIAS, XAVIER. Tratamiento y Valorización Energética de Residuos. Fundación Universitaria Iberoamericana. Capítulo 3: "La Combustión. Factores Endógenos y Exógenos". Editorial Diaz de Santos. España. Pág. 150-215, (2005)

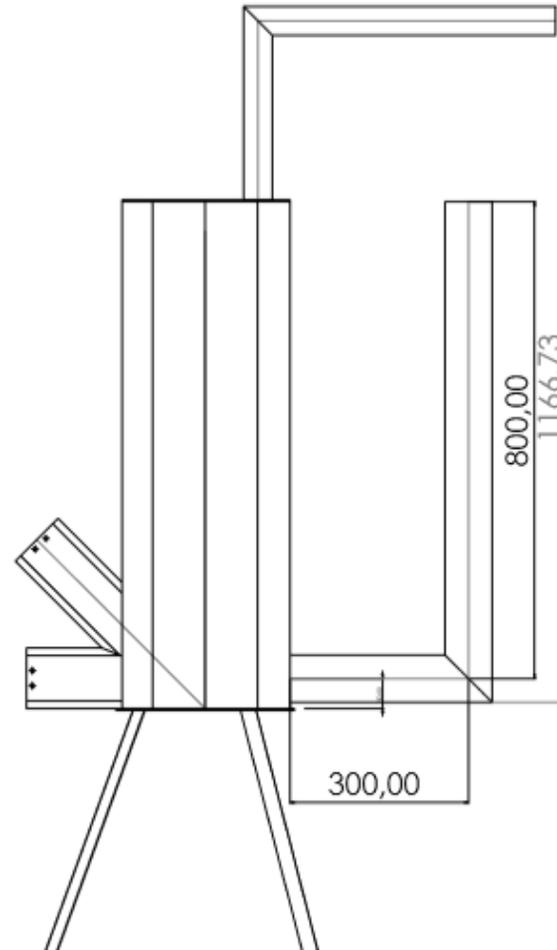
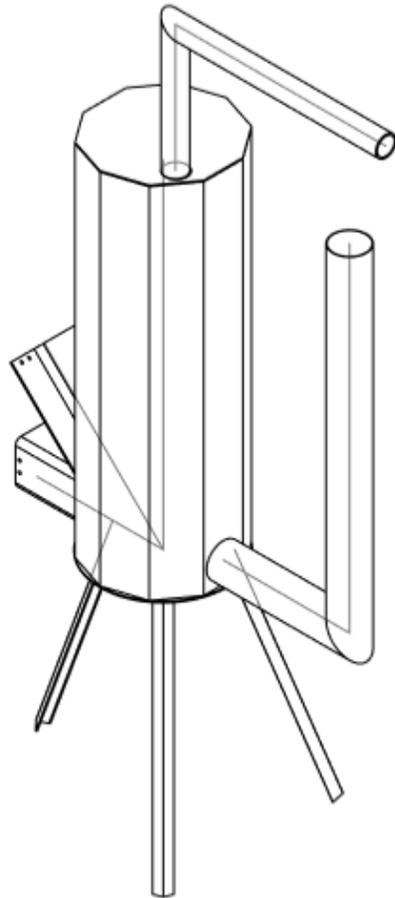
G. W. Burns, M. G. Scroger, G. F. Strouse, M. C. Croarkin, and W. F. Guthrie, "Temperature-electromotive force reference functions and tables for the letterdesignated thermocouple types based on the ITS-90," NIST Monogr. 175, vol. 93, p. 630, 1993.

12.ANEXOS

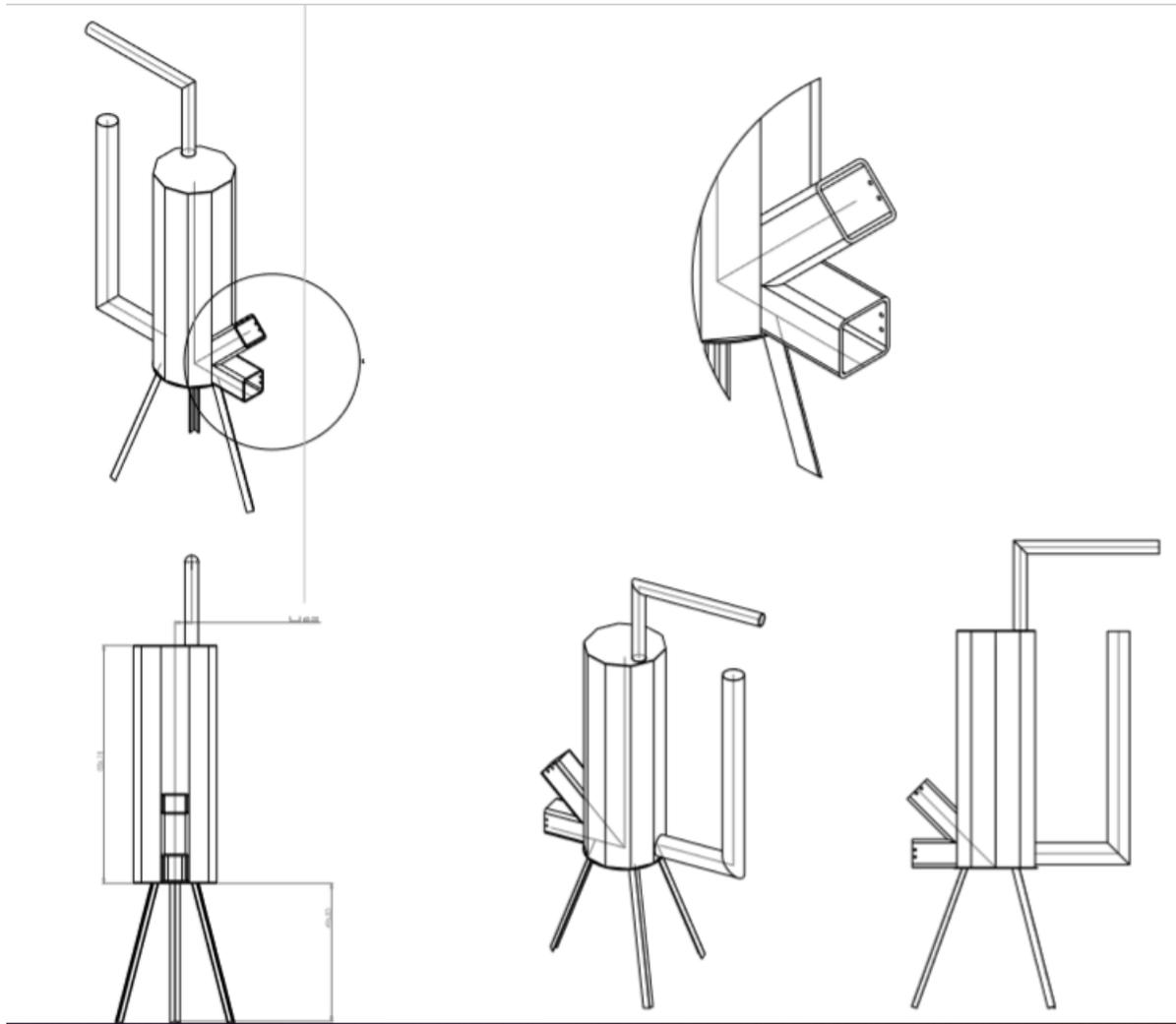
ANEXO A. Plano de diseño del quemador



ANEXO B. Vista isométrica y vista lateral del quemador



ANEXO C. Vistas del quemador y detalle de alimentación de biomasa



ANEXO D. MECHANICAL REPORT BY ANSYS. Features, material, structural analysis, thermal analysis, deformation.

Units

TABLE UNITS

| | |
|---------------------|---|
| Unit System | Metric (mm, kg, N, s, mV, mA) Degrees rad/s Celsius |
| Angle | Degrees |
| Rotational Velocity | rad/s |
| Temperature | Celsius |

Model (B4)

Geometry

**TABLE
Model (B4) > Geometry**

| | |
|---------------------|---|
| Object Name | <i>Geometry</i> |
| State | Fully Defined |
| Definition | |
| Source | C:\Users\joan_\AppData\Local\Temp\WB_DESKTOP-TF0K50K_joan__4224_2\unsaved_project_files\dp0\SYS-1\DM\SYS-1.agdb |
| Type | DesignModeler |
| Length Unit | Meters |
| Element Control | Program Controlled |
| Display Style | Body Color |
| Bounding Box | |

| | |
|----------------------------------|-----------------------------|
| Length X | 861,17 mm |
| Length Y | 1359,5 mm |
| Length Z | 428,6 mm |
| Properties | |
| Volume | 1,4655e+007 mm ³ |
| Mass | 115,04 kg |
| Scale Factor Value | 1, |
| Statistics | |
| Bodies | 22 |
| Active Bodies | 22 |
| Nodes | 45652 |
| Elements | 16804 |
| Mesh Metric | None |
| Basic Geometry Options | |
| Parameters | Independent |
| Parameter Key | |
| Attributes | Yes |
| Attribute Key | |
| Named Selections | Yes |
| Named Selection Key | |
| Material Properties | Yes |
| Advanced Geometry Options | |
| Use Associativity | Yes |

| | |
|-----------------------------------|-----|
| Coordinate Systems | Yes |
| Coordinate System Key | |
| Reader Mode Saves Updated File | No |
| Use Instances | Yes |
| Smart CAD Update | Yes |
| Compare Parts On Update | No |
| Analysis Type | 3-D |
| Decompose Disjoint Geometry | Yes |
| Enclosure and Symmetry Processing | Yes |

TABLE 3
Model (B4) > Geometry > Parts

| | | | | | | | | | | | |
|----------------------------|--------|-----|---------|--|--|--|--|--|--|--|--|
| Object Name | tap | tap | Pieza 8 | Pieza1_Pred eterminado< Como soldada> |
| State | Meshed | | | | | | | | | | |
| Graphics Properties | | | | | | | | | | | |
| Visible | Yes | | | | | | | | | | |

| | |
|--------------------------------------|---------------------------|
| Trans paren cy | 1 |
| Definition | |
| Supp resse d | No |
| Stiffn ess Beha vior | Flexible |
| Coor dinat e Syste m | Default Coordinate System |
| Refer ence Temp eratur e | By Environment |
| Beha vior | None |
| Material | |

| | | | | | | | | | | |
|------------------------|------------------|----------|---------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|----------|
| Assignment | Structural Steel | | | | | | | | | |
| Nonlinear Effects | Yes | | | | | | | | | |
| Thermal Strain Effects | Yes | | | | | | | | | |
| Bounding Box | | | | | | | | | | |
| Length X | 116,5 mm | 75,66 mm | 145, mm | 263,59 mm | 244,82 mm | 154,85 mm | 200,93 mm | 2,4721 mm | 282,09 mm | 79,2 mm |
| Length Y | 116,5 mm | 101,6 mm | 800, mm | 229,86 mm | 101,6 mm | 503,29 mm | | 641,2 mm | 3, mm | 839,6 mm |
| Length | 72,217 | 145, | | 101,6 mm | | 154,85 mm | 35,921 mm | 101,6 mm | 300, mm | 79,2 mm |

| h Z | mm | mm | | | | | | | | | |
|-------------------|--------------------------|---------------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|-----------------------------|--------------------------|-----------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|-----------------------------------|
| Properties | | | | | | | | | | | |
| Volume | 30362 mm ³ | 8,676 e+00 6 mm ³ | 5,679e+005 mm ³ | 4,9392e+005 mm ³ | 80805 mm ³ | | 80804 mm ³ | 1,6074e+005 mm ³ | 1,9744e+005 mm ³ | 2,9288e+005 mm ³ | |
| Mass | 0,2383 4 kg | 68,10 7 kg | 4,458 kg | 3,8772 kg | 0,63432 kg | | 0,63431 kg | 1,2618 kg | 1,5499 kg | 2,2991 kg | |
| Centroid X | - 44 | - 47 | - 132,5 1 mm | -325,16 mm | -321,28 mm | 9,8512 mm | 9,8511 mm | -333,8 mm | -270,68 mm | -131,82 mm | 311,19 mm |
| | 4,7 2 m m | 3,7 4 m m | | | | | | | | | |
| Centroid Y | - 98, | - 36 | - 11,34 1 mm | -214,02 mm | -365,55 mm | -664,68 mm | 118,68 mm | 440,16 mm | 38,141 mm | | |
| | 98 3 m m | 0,4 4 m m | | | | | | | | | |
| Centroid Z | 870,11 mm | 856,1 8 mm | 856,14 mm | | 713,83 mm | 998,52 mm | 856,17 mm | | 856,18 mm | 855,88 mm | |
| Moment of | 20 1,3 | 20 1,4 | 3,725 e+00 | 12931 kg·mm ² | 11212 kg·mm ² | 15071 kg·mm ² | | 15068 kg·mm ² | 44151 kg·mm ² | 8197,3 kg·mm ² | 1,2475e+005 kg·mm ² |

| | | | | | | | | | | | |
|-----------------------|----------------|----------------|----------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| Inertia Ip1 | 1 | kg·m | 6 | | | | | | | | |
| | kg·m | m | kg·m | | | | | | | | |
| | m ² | m ² | m ² | | | | | | | | |
| Moment of Inertia Ip2 | 19 | 19 | 2,368 | | | | | | | | |
| | 9,4 | 9,5 | 5e+0 | 30852 | 24012 | 70,05 | 70,047 | 70,858 | 1086,1 | 16250 | 3433,2 |
| | 9 | 3 | 05 | kg·mm ² |
| | kg·m | kg·m | kg·m | | | | | | | | |
| | m ² | m ² | m ² | | | | | | | | |
| Moment of Inertia Ip3 | 40 | 40 | 3,725 | | | | | | | | |
| | 0,4 | 0,5 | e+00 | 30186 | 22921 | 15029 | 15030 | 15028 | 43066 | 8055,4 | 1,2473e+005 |
| | 9 | 7 | 6 | kg·mm ² |
| | kg·m | kg·m | kg·m | | | | | | | | |
| | m ² | m ² | m ² | | | | | | | | |
| Statistics | | | | | | | | | | | |
| Nodes | 54 | 61 | 1766 | 3007 | 3016 | 753 | 798 | 822 | 260 | 575 | 1442 |
| | 7 | 0 | | | | | | | | | |
| Elements | 65 | 74 | 252 | 1456 | 1435 | 330 | 363 | 377 | 26 | 71 | 196 |
| Mesh Metric | None | | | | | | | | | | |

Static Structural (B5)

TABLE
Model (B4) > Analysis

| | |
|-------------------------|-------------------------------|
| Object Name | <i>Static Structural (B5)</i> |
| State | Solved |
| Definition | |
| Physics Type | Structural |
| Analysis Type | Static Structural |
| Solver Target | Mechanical APDL |
| Options | |
| Environment Temperature | 22, °C |
| Generate Input Only | No |

TABLE
Model (B4) > Static Structural (B5) > Analysis Settings

| | |
|------------------------|--------------------------|
| Object Name | <i>Analysis Settings</i> |
| State | Fully Defined |
| Step Controls | |
| Number Of Steps | 1, |
| Current Step Number | 1, |
| Step End Time | 1, s |
| Auto Time Stepping | Program Controlled |
| Solver Controls | |
| Solver Type | Program Controlled |

| | |
|-------------------------------|--------------------|
| Weak Springs | Off |
| Solver Pivot Checking | Program Controlled |
| Large Deflection | Off |
| Inertia Relief | Off |
| Rotordynamics Controls | |
| Coriolis Effect | Off |
| Restart Controls | |
| Generate Restart Points | Program Controlled |
| Retain Files After Full Solve | No |
| Combine Restart Files | Program Controlled |
| Nonlinear Controls | |
| Newton-Raphson Option | Program Controlled |
| Force Convergence | Program Controlled |
| Moment Convergence | Program Controlled |
| Displacement Convergence | Program Controlled |
| Rotation Convergence | Program Controlled |
| Line Search | Program Controlled |
| Stabilization | Off |
| Output Controls | |
| Stress | Yes |
| Strain | Yes |

| | |
|---------------------------------|--|
| Nodal Forces | No |
| Contact Miscellaneous | No |
| General Miscellaneous | No |
| Store Results At | All Time Points |
| Analysis Data Management | |
| Solver Files Directory | C:\Users\joan\AppData\Local\Temp\WB_DESKTOP-TF0K50K_joan__4224_2\unsaved_project_files\dp0\SYS-1\MECH\ |
| Future Analysis | None |
| Scratch Solver Files Directory | |
| Save MAPDL db | No |
| Delete Unneeded Files | Yes |
| Nonlinear Solution | No |
| Solver Units | Active System |
| Solver Unit System | nmm |

TABLE
Model (B4) > Static Structural (B5) > Solution (B6) > Results

| Object Name | <i>Total Deformation</i> | <i>Equivalent Elastic Strain</i> | <i>Equivalent Stress</i> |
|----------------|--------------------------|----------------------------------|--------------------------|
| State | Solved | | |
| Scope | | | |
| Scoping Method | Geometry Selection | | |
| Geometry | All Bodies | | |

| Definition | | | |
|---------------------------|-------------------------------------|---------------------------|-------------------------------|
| Type | Total Deformation | Equivalent Elastic Strain | Equivalent (von-Mises) Stress |
| By | Time | | |
| Display Time | Last | | |
| Calculate Time History | Yes | | |
| Identifier | | | |
| Suppressed | No | | |
| Results | | | |
| Minimum | 0, mm | 2,8031e-017 mm/mm | 8,6552e-014 MPa |
| Maximum | 9,7086e-002 mm | 6,0233e-005 mm/mm | 11,751 MPa |
| Minimum Occurs On | Pieza1_Predeterminado<Como soldada> | | |
| Maximum Occurs On | Pieza1_Predeterminado<Como soldada> | | |
| Information | | | |
| Time | 1, s | | |
| Load Step | 1 | | |
| Substep | 1 | | |
| Iteration Number | 1 | | |
| Integration Point Results | | | |
| Display Option | Averaged | | |
| Average Across Bodies | No | | |

TABLE
Model (B4) > Static Structural (B5) > Solution (B6) > Total Deformation

| Time [s] | Minimum [mm] | Maximum [mm] |
|----------|--------------|--------------|
| 1, | 0, | 9,7086e-002 |

TABLE
Model (B4) > Static Structural (B5) > Solution (B6) > Equivalent Elastic Strain

| Time [s] | Minimum [mm/mm] | Maximum [mm/mm] |
|----------|-----------------|-----------------|
| 1, | 2,8031e-017 | 6,0233e-005 |