

Escuela Superior Politécnica del Litoral

Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la Producción

Adecuación de un secador vertical de biomasa para el laboratorio del

CDTS

INGE-2769

Proyecto Integrador

Previo la obtención del Título de:

Ingeniero Mecánico

Presentado por:

José Sebastián León Chamba

Guayaquil - Ecuador

Año: 2024

Dedicatoria

Dedico este proyecto a mis padres Fanny y José, quienes me han apoyado incondicionalmente desde el inicio hasta el final de esta etapa académica. A mis hermanos Andrea, Oliver y Nube, quienes me han apoyado directa e indirectamente cuando más los necesitaba. Finalmente, dedico este proyecto Marlene y a mis amigos, personas importantes de mi vida y parte de mi familia, quienes me han inspirado y apoyado para desarrollarme académica y profesionalmente a lo largo de esta etapa.

Agradecimientos

En primer lugar, agradezco el apoyo de la Ing. Doménica León y de la PhD. Emérita Delgado, profesoras y mentoras de ESPOL quienes me han apoyado en el desarrollo de este proyecto con el que culmino mi etapa académica universitaria. También agradezco a mis profesores de carrera, quienes con su sabiduría y conocimiento han aportado al desarrollo de mi etapa profesional.

Finalmente, y sin menos importante, agradezco a mis familiares y amigos, que sin su apoyo hubiera sido muy complicado poder culminar esta etapa de mi vida.

Declaración Expresa

Yo José Sebastián León Chamba acuerdo y reconozco que:

La titularidad de los derechos patrimoniales de autor (derechos de autor) del proyecto de graduación corresponderá al autor o autores, sin perjuicio de lo cual la ESPOL recibe en este acto una licencia gratuita de plazo indefinido para el uso no comercial y comercial de la obra con facultad de sublicenciar, incluyendo la autorización para su divulgación, así como para la creación y uso de obras derivadas. En el caso de usos comerciales se respetará el porcentaje de participación en beneficios que corresponda a favor del autor o autores.

La titularidad total y exclusiva sobre los derechos patrimoniales de patente de invención, modelo de utilidad, diseño industrial, secreto industrial, software o información no divulgada que corresponda o pueda corresponder respecto de cualquier investigación, desarrollo tecnológico o invención realizada por mí durante el desarrollo del proyecto de graduación, pertenecerán de forma total, exclusiva e indivisible a la ESPOL, sin perjuicio del porcentaje que me corresponda de los beneficios económicos que la ESPOL reciba por la explotación de nuestra innovación, de ser el caso.

En los casos donde la Oficina de Transferencia de Resultados de Investigación (OTRI) de la ESPOL comunique al autor que existe una innovación potencialmente patentable sobre los resultados del proyecto de graduación, no se realizará publicación o divulgación alguna, sin la autorización expresa y previa de la ESPOL.

Guayaquil, 16 de octubre del 2024.


José Sebastián León

Chamba

Evaluadores

Ph.D. Emérita Delgado Plaza

Profesor de Materia

Ph.D. Emérita Delgado Plaza

Profesor de Materia

Ing. Doménica León Moreira

Tutora

Resumen

El proyecto tiene como objetivo rediseñar un secador vertical de biomasa de laboratorio para el mejoramiento de la eficiencia del proceso de secado de astillas de madera, utilizado en investigaciones experimentales. Se busca la optimización del secado para asegurar resultados más confiables en los estudios realizados con biomasa lignocelulósica. Para llevar a cabo el rediseño, se utilizaron simulaciones computacionales CFD, que permitieron identificar y corregir puntos críticos en el flujo de aire y la distribución térmica. Se fabricaron componentes nuevos utilizando materiales reutilizados, como planchas de acero estructural, de acuerdo con los parámetros de diseño establecidos. Además, se llevaron a cabo pruebas de funcionamiento y validación con inclinómetro y anemómetro digital para evaluar el rendimiento del equipo. Los resultados obtenidos demostraron que el rediseño optimizó el flujo de aire, logrando un secado uniforme y eficiente. La reducción de vibraciones mecánicas fue exitosa, lo que incrementó la confiabilidad en los datos de futuras investigaciones. En conclusión, el rediseño del secador vertical mejora la eficiencia del proceso de secado de biomasa, promoviendo la sostenibilidad y optimización de recursos, lo que beneficia el desarrollo de investigaciones experimentales.

Palabras Clave: rediseño, secador de biomasa, simulaciones CFD, economía circular.

Abstract

The project aims to redesign a laboratory-scale vertical biomass dryer to improve the efficiency of the wood chip drying process used in experimental research. The goal is to optimize the drying process to ensure more reliable results in lignocellulosic biomass studies. To achieve the redesign, computational fluid dynamics (CFD) simulations were utilized to identify and address critical points in airflow and thermal distribution. New components were fabricated using repurposed materials, such as structural steel sheets, by established design parameters. Additionally, performance and validation tests were conducted using an inclinometer and a digital anemometer to evaluate the equipment's performance. The results demonstrated that the redesign improved airflow, achieving uniform and efficient drying. The successful reduction of mechanical vibrations enhanced the reliability of data for future research. In conclusion, the redesigned vertical dryer improves the efficiency of the biomass drying process, promoting sustainability and resource optimization, thereby benefiting the development of experimental research.

Keywords: redesign, biomass dryer, CFD simulations, circular economy.

Índice general

Resumen.....	I
<i>Abstract</i>	II
Índice general.....	III
Abreviaturas.....	VI
Simbología.....	VII
Índice de imágenes.....	VIII
Índice de tablas.....	XI
Índice de planos.....	XII
Capítulo 1.....	1
1.1 Introducción.....	2
1.2 Descripción del Problema.....	3
1.3 Justificación del Problema.....	5
1.4 Objetivos.....	6
1.4.1 Objetivo general.....	6
1.4.2 Objetivos específicos.....	6
1.5 Marco teórico.....	6
1.5.1 Secado de biomasa lignocelulosa.....	6
1.5.2 Principios de la termodinámica aplicados al secado.....	7
1.5.3 Mecánica de fluidos aplicado al secador vertical de biomasa.....	7
1.5.4 Secador vertical de biomasa.....	9

1.5.5	Deshumidificación del flujo de aire de secado	13
1.5.6	Software ANSYS para el análisis de la adecuación del equipo.....	14
1.5.7	Fundamentos de adecuación del equipo	14
Capítulo 2.....		16
2. Metodología.....		17
2.1 Diseño conceptual.....		19
2.1.1	Inspección de fallas del secador vertical de biomasa.....	19
2.1.2	Requerimientos del cliente.....	21
2.1.3	Alternativas de solución.....	22
2.2 Simulación de las alternativas del rediseño		25
2.2.1	Parámetros para la simulación de fluidos del secador	25
2.2.2	Simulación de fluidos de las alternativas.....	28
2.3 Matriz de selección		31
2.4 Rediseño del secador vertical de biomasa		32
2.5 Construcción del secador vertical de biomasa		34
2.5.1	Elaboración y revisión de planos constructivos.....	34
2.5.2	Identificación y selección de materiales	35
2.5.3	Preparación del proceso de fabricación	37
2.5.4	Fabricación de componentes.....	39
Capítulo 3.....		48
3. Resultados y análisis		49

3.1	Resultados de simulación de la alternativa #4	49
3.2	Ensamblaje del secador vertical de biomasa.....	52
3.3	Análisis de costos.....	55
3.4	Pruebas de funcionamiento y validación	57
3.5	Guía de operación	61
	Capítulo 4.....	63
4.1	Conclusiones y recomendaciones	64
4.1.1	Conclusiones.....	64
4.1.2	Recomendaciones	65
	Referencias.....	68
	Apéndices.....	70
	Apéndice A.....	71
	Apéndice B	76

Abreviaturas

CDTS	Centro de Desarrollo de Tecnologías Sustentables
ESPOL	Escuela Superior Politécnica del Litoral
EPP	Equipo de Protección Personal
ODS	Objetivos de Desarrollo Sostenible
CFD	Computational Fluid Dynamics (Dinámica de Fluidos Computacional)
3D	Tridimensional
SMAW	Shielded Metal Arc Welding (Soldadura por Arco con Electrodo Revestido)
CAD	Computer Aided Design (Diseño Asistido por Ordenador)

Simbología

m	Metro
mm	Milímetro
pulg.	Pulgadas
kg	Kilogramo
m/s	Metros sobre segundos
W	Watts
kW	Kilowatts
HP	Horse Power (Caballos de Fuerza)
VAC	Volts of Alternating Current (Voltios de Corriente Alterna)
K	Kelvin
°C	Grados Celsius

Índice de imágenes

Figura 1. <i>Gráfica de peso medido vs tiempo del secador vertical de biomasa</i>	4
Figura 2. <i>Desarrollo del perfil de velocidad</i>	8
Figura 3. <i>Secador vertical de biomasa del CDTS</i>	10
Figura 4. <i>Cámara de secado</i>	11
Figura 5. <i>Base de la expansión y baffles</i>	12
Figura 6. <i>Sistema de generación de calor</i>	13
Figura 7. <i>Diagrama de flujo de la adecuación del secador vertical de biomasa</i>	18
Figura 8. <i>Identificación de fallas del secador vertical de biomasa</i>	21
Figura 9. <i>Alternativa de solución #1</i>	23
Figura 10. <i>Alternativa de solución #2</i>	23
Figura 11. <i>Alternativa de solución #3</i>	24
Figura 12. <i>Alternativa de solución #4</i>	24
Figura 13. <i>Ventanas de trabajo del software</i>	26
Figura 14. <i>Líneas de corriente del flujo de aire de la alternativa #1</i>	28
Figura 15. <i>Líneas de corriente del flujo de aire de la alternativa #2</i>	29
Figura 16. <i>Líneas de corriente del flujo de aire de la alternativa #3</i>	30
Figura 17. <i>Líneas de corriente del flujo de aire de la alternativa #4</i>	30
Figura 18. <i>Rediseño de forma del secador vertical de biomasa</i>	34
Figura 19. <i>Planchas de acero estructural</i>	36
Figura 20. <i>Tubo de acero estructural</i>	36

Figura 21. <i>Máquinas y herramientas utilizadas.</i>	37
Figura 22. <i>Diagrama de Gantt del flujo de trabajo.</i>	38
Figura 23. <i>Equipo de protección personal (PPE).</i>	39
Figura 24. <i>Limpieza de las planchas de acero estructural.</i>	39
Figura 25. <i>Sección del Plano #3 Cámara de Secado.</i>	40
Figura 26. <i>Sección del Plano #4 Sistema de Generación de Calor.</i>	41
Figura 27. <i>Rolado de los componentes del secador vertical de biomasa.</i>	42
Figura 28. <i>Cuerpo de la cámara de secado y del sistema de generación de calor.</i>	42
Figura 29. <i>Armado de la cámara de secado.</i>	43
Figura 30. <i>Armado del sistema de generación de calor.</i>	43
Figura 31. <i>Aros de la estructura del secador vertical de biomasa.</i>	44
Figura 32. <i>Armado de los soportes de la estructura del equipo.</i>	44
Figura 33. <i>Armado final y soldado de los componentes del equipo.</i>	45
Figura 34. <i>Ducto flexible.</i>	46
Figura 35. <i>Ensamble parcial del secador vertical de biomasa.</i>	47
Figura 36. <i>Resultados de simulación.</i>	50
Figura 37. <i>CAD del ensamblaje del nuevo secador vertical de biomasa.</i>	52
Figura 38. <i>Sección del Plano #1 del nuevo secador vertical de biomasa.</i>	53
Figura 39. <i>Nuevo secador vertical de biomasa.</i>	54
Figura 40. <i>Prueba de funcionamiento con nivel digital.</i>	58
Figura 41. <i>Prueba de funcionamiento con anemómetro digital.</i>	59

Figura 42. *Astillas de madera para la prueba de funcionamiento.*60

Figura 43. *Gráfica de Peso vs Tiempo de la prueba de funcionamiento.*61

Índice de tablas

Tabla 1. <i>Criterios de evaluación de las alternativas del rediseño.</i>	31
Tabla 2. <i>Matriz de selección.</i>	32
Tabla 3. <i>Costos de materiales e insumos.</i>	55
Tabla 4. <i>Costos de mano de obra.</i>	56
Tabla 5. <i>Costo del rediseño del secador vertical de biomasa.</i>	56
Tabla 6. <i>Costo total del rediseño y construcción del equipo.</i>	57

Índice de planos

PLANO 1 Ensamble Secador Vertical de Biomasa

PLANO 2 Soporte Secador Vertical de Biomasa

PLANO 3 Cámara de Secado

PLANO 4 Sistema de Generación de Calor

Capítulo 1

1.1 Introducción

El Centro de Desarrollo Tecnológico Sustentable (CDTS) impulsa el desarrollo de tecnologías sostenibles mediante la integración de enfoques técnicos, ambientales y socioeconómicos, con énfasis en la transferencia efectiva de estas tecnologías a la comunidad para generar un impacto positivo. Sus líneas de investigación abarcan bioenergía y biocarburantes, tecnologías de secado sustentable, modelado de recursos energéticos locales, sistemas híbridos de energización distribuida, y soluciones térmicas convencionales y alternativas (Centros y Laboratorios, s.f.).

Actualmente, existe la necesidad de soluciones sostenibles para la producción y almacenamiento de biomasa, como lo es el secado eficiente de materiales lignocelulósicos, entre ellos las astillas de madera y residuos agrícolas, donde se han convertido en una etapa crítica, con el fin de mejorar la eficiencia energética y reducir la emisión de gases contaminantes en procesos de combustión. En el CDTS se dispone, desde mayo del 2023, de un secador vertical de biomasa que tiene como objetivo reducir el contenido de humedad de este, optimizando así su combustión y almacenamiento (Lombeida, 2021). Sin embargo, este equipo presenta problemas significativos tales como: vibraciones mecánicas, errores instrumentales, funcionamiento deficiente entre otros.

Estos problemas pueden generarse por una serie de factores complejos, incluyendo fallas geométricas en el diseño, problemas instrumentales, y turbulencias inherentes al flujo de aire que interactúa con las paredes internas del equipo. Las fallas geométricas, como desalineaciones o irregularidades en la estructura del secador, pueden amplificar las vibraciones al crear puntos de resonancia que afectan la estabilidad del flujo. Los problemas instrumentales, tales como sensores mal calibrados o elementos sueltos dentro del equipo, contribuyen a esta inestabilidad al no proporcionar datos precisos para el monitoreo y control

del proceso. Además, las turbulencias no deseadas generadas por un flujo de aire caliente irregular o mal distribuido amplifican las vibraciones y alteran la dirección del flujo, creando variaciones de temperatura que afectan la distribución uniforme del secado en la biomasa.

El proyecto tiene como objetivo principal el rediseño del secador vertical de biomasa identificando, analizando y corrigiendo las fallas presentes en el diseño actual. Por lo que se desarrollará una propuesta de rediseño basada en criterios de ingeniería que permita optimizar su rendimiento, donde se emplearán simulaciones computacionales de fluidos y herramientas de modelado 3D para validar las mejoras propuestas.

Se espera que los resultados permitan reducir las vibraciones y mejorar la distribución del flujo de aire en el secador, asegurando un proceso de secado más eficiente y uniforme. De esta manera, el rediseño contribuirá a fortalecer las capacidades del CDTS en el desarrollo de tecnologías sostenibles aplicadas al tratamiento de biomasa, con impactos positivos en la reducción de emisiones y el aprovechamiento energético.

1.2 Descripción del Problema

En el CDTS se construyó, en el periodo de mayo a septiembre del 2021, un secador vertical de biomasa diseñado específicamente para reducir la humedad en astillas de madera. El secador vertical de biomasa está equipado con un sistema de celdas de carga, que permite monitorear y visualizar, a través del procesamiento de datos, cómo varía la masa de las astillas de madera a lo largo del tiempo durante el proceso de secado. Este seguimiento es fundamental para determinar la efectividad del secado y establecer parámetros operativos que optimicen el funcionamiento del equipo.

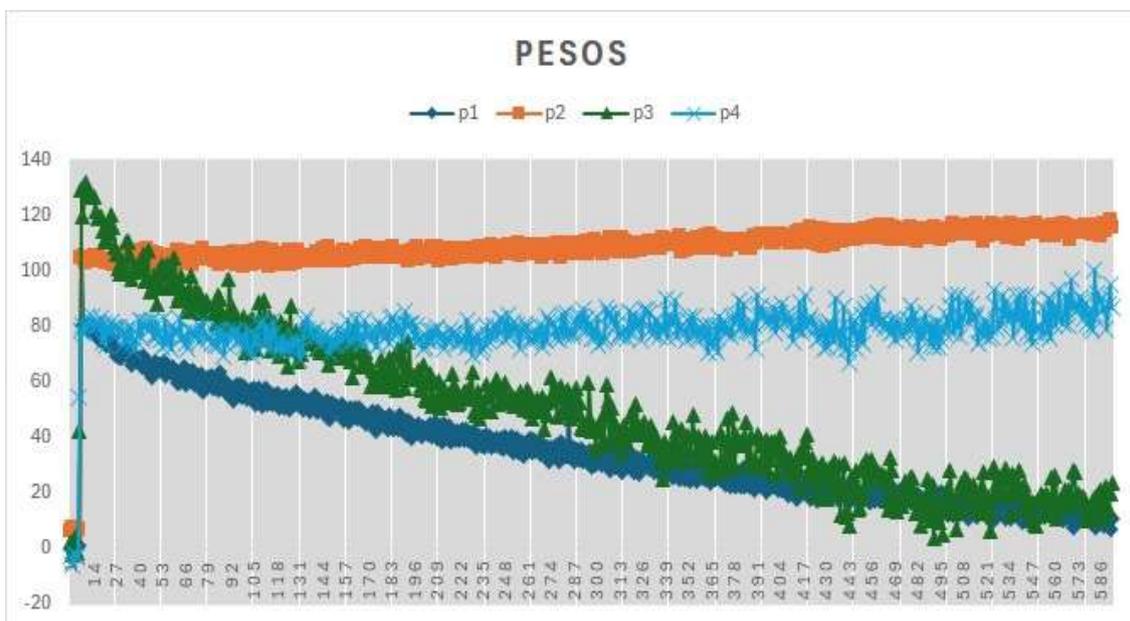
No obstante, el secador de biomasa ha mostrado ineficiencia en su funcionamiento desde su puesta en marcha, lo que indica que nunca ha operado de manera óptima. Las curvas obtenidas en la toma de datos con la instrumentación, como se observa en la figura 1, reflejan

la disminución del peso de la biomasa con el tiempo. Sin embargo, en la gráfica se observan dos problemas principales: el ruido presente en los datos en las curvas donde se encuentran los sensores de pesos (p4 y p2) que incrementan en lugar de decrecer a medida que transcurre el tiempo de secado.

El ruido en las curvas es un indicador de baja precisión, lo que dificulta determinar un intervalo de secado óptimo. Además, las curvas ascendentes sugieren fallas en el equipo, posiblemente atribuibles a problemas en la instrumentación, errores en la geometría de la estructura, vibraciones generadas por el sistema de inyección de aire caliente o turbulencias en el flujo de aire. Por lo tanto, es necesario realizar una adecuación al secador vertical de biomasa para garantizar su funcionamiento óptimo y abordar estas deficiencias.

Figura 1

Gráfica de peso medido vs tiempo del secador vertical de biomasa



Nota: Datos experimentales de una prueba experimental con residuos lignocelulosas

1.3 Justificación del Problema

El presente proyecto se justifica por la necesidad de continuar con el desarrollo de tecnologías que puedan aportar al análisis de residuos de biomasa para posibles usos de biocombustibles sólidos. A partir de ello, surge la necesidad de mejorar la funcionabilidad del secador vertical de biomasa.

Este proyecto contribuye significativamente a los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), en particular al ODS 4: Garantizar una educación inclusiva, equitativa y de calidad, y promover oportunidades de aprendizaje durante toda la vida para todos. La implementación del secador de biomasa a pequeña escala fomenta la investigación y el aprendizaje en áreas clave como ingeniería química, mecánica y ambiental. Este dispositivo no solo ofrece un enfoque práctico para la enseñanza de conceptos fundamentales como termodinámica, mecánica de fluidos y transferencia de calor, sino que también impulsa el desarrollo de investigaciones multidisciplinarias, fortaleciendo la formación académica.

Asimismo, el proyecto se alinea con el ODS 7: Garantizar el acceso a una energía asequible, segura, sostenible y moderna. El secador no solo optimiza la calidad del biocombustible al reducir la humedad en las astillas de madera, sino que también tiene el potencial de generar un impacto positivo en zonas rurales. Aprovechar residuos agrícolas y forestales para la producción de biocombustibles, que pueden ser utilizados de manera eficiente en chimeneas y cocinas, promoviendo así prácticas sostenibles y mejorando la calidad de vida en comunidades vulnerables.

1.4 Objetivos

1.4.1 *Objetivo general*

Realizar el rediseño y construcción estructural del secador vertical de biomasa mediante el uso de conocimientos de ingeniería mecánica para la validación y puesta en funcionamiento óptimo del equipo.

1.4.2 *Objetivos específicos*

1. Validar el rediseño mediante la utilización de programa de dinámica de fluidos computacionales para una correcta implementación del equipo.
2. Realizar la construcción de los componentes del rediseño del secador.
3. Realizar pruebas experimentales de flujo de aire en el secador vertical de biomasa.
4. Elaborar una guía de operación del secador vertical de biomasa.

1.5 Marco teórico

1.5.1 *Secado de biomasa lignocelulosa*

La biomasa vegetal lignocelulósica es la forma más abundante de nuestro ecosistema, compuesta principalmente por celulosa, hemicelulosas y lignina. A diferencia de otros tipos como el almidón o los azúcares presentes en los granos y cereales, la lignocelulosa proviene de fuentes diversas, incluyendo bosques, cultivos agrícolas y residuos industriales de sectores como la madera y el papel. Esta misma ha sido utilizada desde tiempos antiguos como combustible y material de construcción. Sin embargo, hoy en día su papel se ha ampliado, dado que es la base de industrias que producen papel, productos químicos, materiales de construcción, y biocombustibles líquidos y gaseosos, entre otros (Abril & Navarro, 2012).

1.5.2 Principios de la termodinámica aplicados al secado

La convección forzada es un proceso de transferencia de calor que ocurre cuando un flujo de aire se mueve de manera controlada mediante dispositivos como ventiladores o sopladores, lo cual genera una transferencia de energía térmica más eficiente en comparación con la convección natural (Strausser, Julia, 2023).

En el caso del secador vertical de biomasa, el aire caliente circula de manera vertical a través del material, transmitiendo su energía térmica hacia las partículas de biomasa para eliminar la humedad de forma efectiva. Este proceso depende de factores como; la velocidad mínima del fluido y la temperatura del aire, 1.94 m/s y 52°C respectivamente (Lombeida, 2021). Estos factores deben mantenerse constantes para garantizar un secado uniforme, por tanto, cuando se introducen vibraciones en el equipo, el flujo de aire puede verse alterado generando movimientos irregulares y cambios de presión dentro del sistema que afectan la distribución del calor y reducen la eficiencia del secado (Abarca Mora, 2018).

1.5.3 Mecánica de fluidos aplicado al secador vertical de biomasa

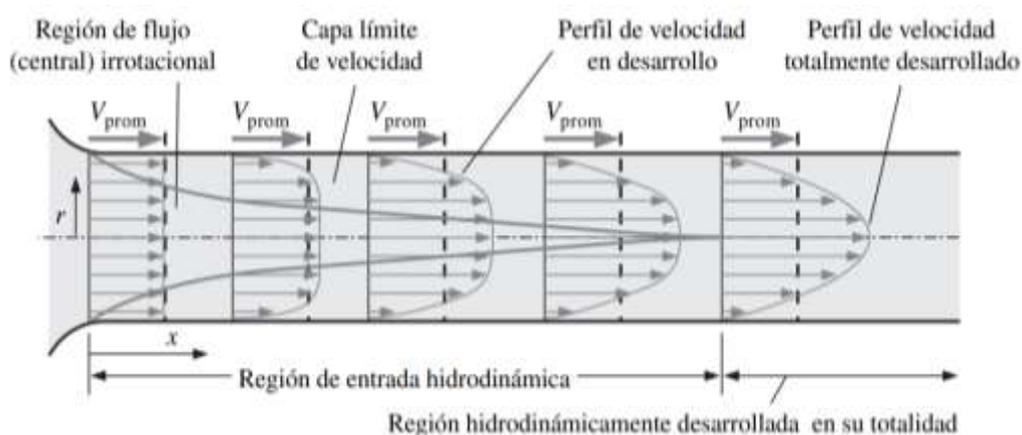
El flujo de aire en los secadores juega un papel crítico en la eficiencia del proceso de secado dado que debe mantenerse estable y bien distribuido para garantizar una transferencia de calor uniforme a la biomasa. Cuando ocurren vibraciones en el equipo, el flujo de aire puede desestabilizarse, generando turbulencias indeseadas y cambios en la dirección del aire que afectan negativamente la uniformidad de la temperatura y, por lo tanto, disminuye la eficiencia del secado (Rahman, 2024).

Para entender la importancia del flujo de aire en los secadores de biomasa, es fundamental analizar conceptos de mecánica de fluidos como el flujo desarrollado y cómo los cambios de secciones afectan a este. El flujo desarrollado, en términos de

mecánica de fluidos, se refiere a una región de flujo en la que las velocidades del fluido ya no varían en la dirección axial, véase la figura 2, lo que genera un perfil de velocidad constante y predecible que facilita una transferencia de calor eficiente (Rahman, 2024). Los cambios en la sección transversal de un conducto también afectan significativamente el flujo de aire. En una sección reducida, el aire se acelera debido a la conservación de la masa, lo que genera una mayor velocidad en un área más estrecha (Rahman, 2024). Esto puede ser beneficioso si se necesita un aumento en la velocidad para penetrar más eficientemente la biomasa en ciertas zonas. Sin embargo, si no se controla bien, puede generar turbulencias al volver a secciones más amplias. Por el contrario, las expansiones de sección ayudan a disminuir la velocidad del aire, lo que puede facilitar un flujo más uniforme antes de entrar en la cámara de secado (Cengel & Cimbala, 2006).

Figura 2

Desarrollo del perfil de velocidad.



Nota: Tomado de (Cengel & Cimbala, 2006)

1.5.4 Secador vertical de biomasa

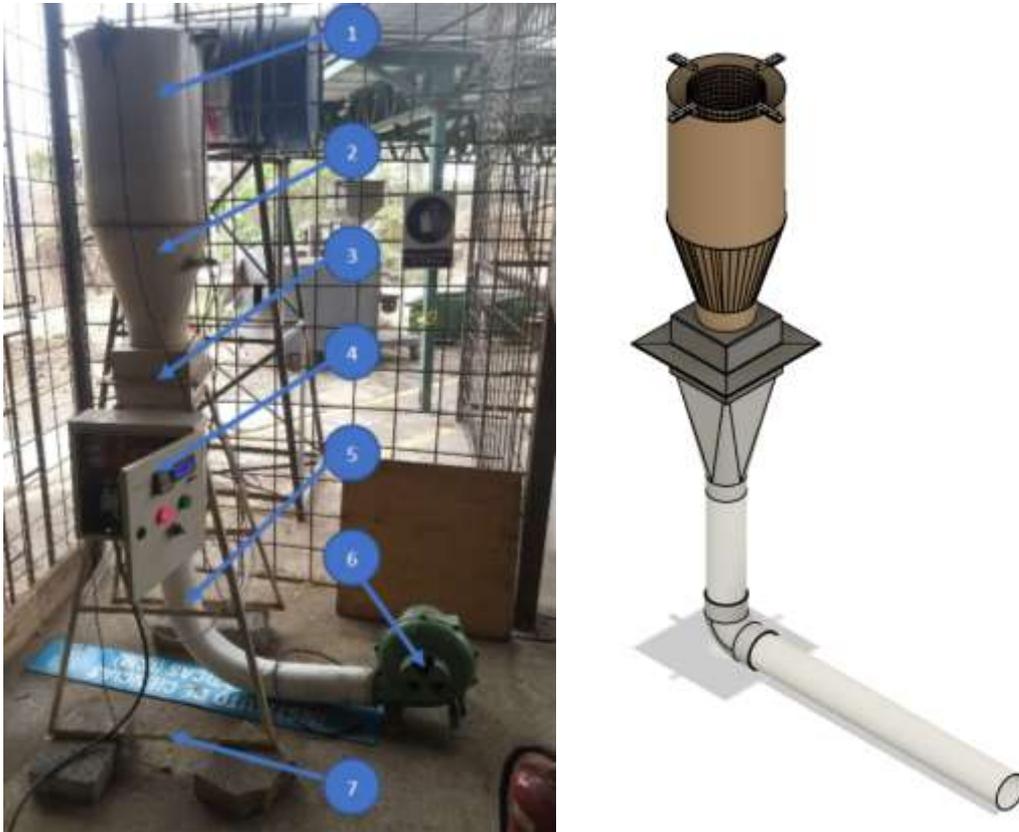
El secador vertical de biomasa ubicado en el CDTTS, véase la figura 3, se ha diseñado para reducir la humedad en las astillas de madera, aprovechando un flujo de aire caliente a temperaturas entre 35 y 50 °C. El objetivo es lograr un material con baja humedad, adecuado para una combustión eficiente y almacenamiento prolongado.

El secador vertical de biomasa cuenta con las siguientes partes:

1. Cámara de secado, donde se encuentra una canasta para la colocación de la biomasa, así como la instrumentación del muestreo de datos.
2. Expansión y rectificador de flujo, el cual es la conexión entre la salida del sistema de generación de calor y la entrada de la cámara de secado.
3. Sistema de generación de calor, donde se encuentran los elementos eléctricos calefactores para el calentamiento del aire.
4. Tablero de control, en el cual se realiza la regulación de las potencias eléctricas, así como se tiene la instrumentación del sistema de adquisición de datos.
5. Conexión del ventilador centrífugo a la caja de resistencias.
6. Estructura de soporte del equipo.

Figura 3

Secador vertical de biomasa del CDTS



Nota: A la izquierda, equipo actual, a la derecha el modelo 3D del secador

Los parámetros actuales del secador vertical de biomasa provistos por el laboratorio del CDTS indican que el tiempo de secado de la biomasa es de más de 8 horas continuas, donde el ventilador centrífugo tiene una entrada regulable capaz de inyectar un flujo de aire promedio máximo y mínimo de 22 y 11 m/s respectivamente. Este alto tiempo de secado se debe a que en la cámara de secado (sección final del secador) el flujo de aire llega de manera despreciable y no se produce una convección correcta.

Además, el flujo de aire en esta sección es no uniforme, contribuyendo a un secado irregular de la biomasa, y por ende aumentando el tiempo de secado.

En la figura 4 se observan 2 imágenes, a la izquierda está la cámara de secado, donde están ubicados en la parte superior 4 celdas de carga de 1kg cada uno, las cuales forman parte de la instrumentación de muestreo de datos (disminución del peso de la biomasa vs tiempo). A la derecha se muestra la canasta perforada de acero inoxidable, la cual sirve para la colocación y retención de la biomasa para su secado óptimo.

Figura 4

Cámara de secado



Nota: A la izquierda estructura de la cámara de secado, a la derecha, canasta de colocación de la biomasa

En la figura 5 se muestra la base de la expansión y los baffles para la rectificación del flujo de aire. Dentro de este elemento, se encuentran 3 accesorios. 2 de estos son sensores de humedad los cuales aportan información sobre las condiciones internas de humedad del fluido. El tercer accesorio es un sensor de temperatura. Con estos accesorios y la instrumentación implementada es posible

controlar la potencia de las resistencias eléctricas para cambios de la temperatura del flujo de aire para el secado.

Figura 5

Base de la expansión y baffles



Nota: A la izquierda la base de la expansión y a la derecha una vista superior de los baffles de rectificación del flujo de aire.

En la figura 6 se muestra el sistema de generación de calor del equipo conformado por un conjunto de resistencias eléctricas tipo espiral, las cuales proveen 2 kW de potencia para calentar el flujo de aire. Cómo se puede observar en la figura, esta caja de resistencias produce un cambio de sección brusco, de sección transversal circular a cuadrada, por lo que genera caída de presión e inestabilidad del flujo de aire, provocando las fallas mencionadas sobre las vibraciones y turbulencias en el flujo de aire.

Figura 6

Sistema de generación de calor



Nota: Resistencia eléctrica tipo espiral de 220VAC.

1.5.5 Deshumidificación del flujo de aire de secado

La deshumidificación del flujo de aire en el secador vertical de biomasa es fundamental para garantizar la eficiencia del secado, especialmente en condiciones ambientales como las de Guayaquil, donde la temperatura promedio es de 32°C y humedad relativa de 60%. Estas condiciones generan un aire húmedo que limita la capacidad de extracción de agua de los materiales. Por ello, el uso de resistencias eléctricas es una solución eficaz para modificar las propiedades del aire, permitiendo un secado más eficiente.

Las resistencias eléctricas trabajan calentando el flujo de aire que ingresa al sistema. Este calentamiento reduce la humedad relativa del aire, aumentando su capacidad para absorber humedad de los materiales como la biomasa. Aunque la humedad absoluta del aire permanece constante, el aumento de temperatura genera un

aire más seco en términos relativos, lo que resulta óptimo para el secado (Bergman, Lavine, Incropera, & Dewitt, 2011).

El uso de resistencias eléctricas ofrece varias ventajas en condiciones ambientales como las de Guayaquil. En primer lugar, se adaptan bien al clima cálido y húmedo, permitiendo modificar las propiedades del aire de manera precisa. Además, son compactas, económicas y permiten un control total de la temperatura del flujo de aire.

1.5.6 Software ANSYS para el análisis de la adecuación del equipo

Para validar las propuestas de adecuación y predecir el comportamiento del flujo de aire del equipo, es fundamental contar con herramientas avanzadas de simulación de dinámica de fluidos computacional (CFD). En este proyecto, se utilizará ANSYS versión estudiantil 2023, limitada (Ansys ACE, s.f.), se utilizará software de ingeniería ampliamente reconocido por su capacidad de realizar simulaciones precisas y detalladas en diferentes campos, incluyendo la mecánica de fluidos y la transferencia de calor.

1.5.7 Fundamentos de adecuación del equipo

La adecuación del secador vertical de biomasa debe abordar de manera integral los problemas identificados, particularmente las vibraciones que afectan su estabilidad, eficiencia y funcionamiento adecuado. Estas vibraciones no solo alteran la uniformidad del flujo de aire, sino que también pueden comprometer la precisión de las mediciones realizadas durante el proceso de secado. Por tanto, las consideraciones clave en la adecuación incluyen la reducción de las vibraciones y la optimización de la geometría y estructura del secador para obtener un flujo de aire estable en la cámara de secado del secador vertical.

El laboratorio del CDTS ha señalado como requisitos fundamentales que el secador debe minimizar las vibraciones y operar correctamente bajo condiciones de flujo de aire y temperatura entre 1 m/s y 50°C respectivamente. Un flujo uniforme tiene como objetivo potenciar la convección forzada, logrando una transferencia de calor más eficiente y reduce el tiempo necesario para secar la biomasa. La adecuación se centrará en los siguientes aspectos:

1.5.7.1 Estructura y estabilidad. Se analizará la estructura actual del secador para identificar y mitigar puntos de resonancia y zonas de debilidad que contribuyen a las vibraciones. Esto incluirá el uso de simulaciones dinámicas para prever el comportamiento estructural bajo diferentes condiciones operativas.

1.5.7.2 Optimización del flujo de aire. Se debe asegurar una distribución uniforme de flujo de aire dentro de la cámara de secado, el cual es esencial para mejorar la transferencia de calor por convección forzada. Herramientas de simulación de fluidos permitirán analizar el comportamiento del flujo y garantizar que este sea uniforme y sin turbulencias significativas dentro del rango provisto por el ventilador centrífugo.

1.5.7.3 Durabilidad y eficiencia. La evaluación de los materiales incluirá consideraciones de resistencia al desgaste, corrosión y eficiencia térmica, asegurando que el equipo no solo cumpla con las condiciones operativas actuales, sino que también sea sostenible y eficiente a largo plazo

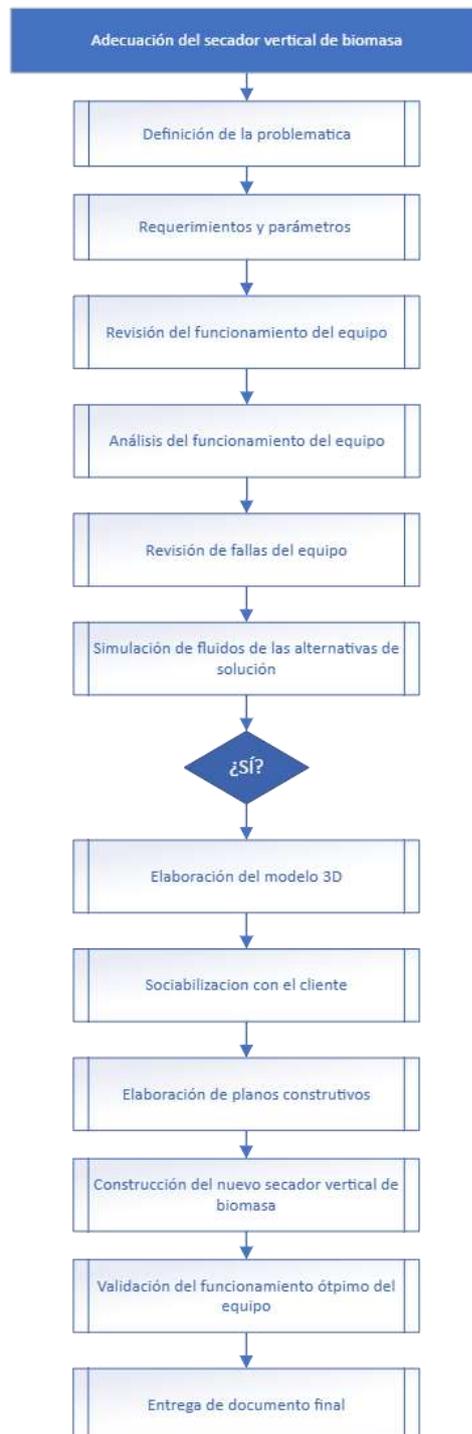
Capítulo 2

2. Metodología.

Para la adecuación y construcción del secador vertical de biomasa, se estableció el siguiente diagrama de flujo (figura 7). El diagrama contiene la información sistemática sobre los procesos seguidos, como la recolección de datos, simulaciones para la formulación de alternativas de solución, adecuación del secador, entre otros.

Figura 7

Diagrama de flujo de la adecuación del secador vertical de biomasa



2.1 Diseño conceptual

2.1.1 *Inspección de fallas del secador vertical de biomasa*

En esta primera etapa de la metodología, se llevó a cabo una inspección general del funcionamiento del secador vertical de biomasa. Como parte de este proceso, se realizó una visita técnica con el propósito de observar e inspeccionar el desempeño habitual del equipo.

Durante esta visita, los ingenieros del laboratorio del CDTS encendieron el equipo, y se identificaron de inmediato varios problemas operativos. Entre estos se presentaron fuertes vibraciones mecánicas, inestabilidad en los componentes debido a un mal ensamblaje del equipo, así como insuficiencia del flujo de aire caliente en la salida de la cámara de secado.

Tras identificar las fallas, se procedió a analizar la estructura del secador vertical para determinar las causas de los problemas. A continuación, se las fallas encontradas en el equipo en el momento de la inspección:

1. Mal ensamblaje de los componentes del equipo. Se determinó que las juntas y sujeciones del ensamblaje permitían fugas del flujo de aire y caídas de presión. Estas deficiencias explican tanto la ineficiencia del flujo de aire dentro de la cámara de secado como las vibraciones mecánicas detectadas previamente.
2. Diseño inadecuado del sistema de generación de calor. La forma transversal cuadrada del sistema genera un cambio abrupto de sección, ya que los elementos conectados a la entrada y salida tienen formas transversales circulares. Esto, sumado a la expansión del aire caliente en esta zona, provocaron una caída significativa de presión, reduciendo la potencia del flujo de aire necesario para un secado eficiente.

3. Cambio brusco de dirección del flujo de aire. El uso de un codo de 90° a la salida del ventilador centrífugo interrumpe el desarrollo del flujo de aire, generando turbulencias. Estas turbulencias contribuyeron a las vibraciones estructurales, afectando la estabilidad general del equipo.
4. Falta de aislamiento mecánico en el ventilador centrífugo. El ventilador centrífugo, encargado de inyectar el flujo de aire, produce vibraciones adicionales debido al motor eléctrico en su interior. Al estar acoplado directamente al secador y carecer de aislamiento mecánico, estas vibraciones se transmitían al equipo, aumentando su inestabilidad durante la operación.
5. Ausencia de anclaje en la estructura del secador. La estructura del secador vertical no contaba con anclajes al suelo, lo que impedía disipar las vibraciones generadas. Como resultado, el equipo se desplazaba continuamente durante el proceso de secado, comprometiendo tanto su funcionamiento como su seguridad operativa.

En la figura 8 se presenta para mejor visualización las fallas descritas.

1. Inadecuado acople entre la cámara y la sección de distribución del aire.
2. Cambio brusco de sección, cámara de resistencia y sistema de distribución de aire.
3. Utilización de un codo de 90° y longitud de desarrollo del flujo.
4. Ventilador centrífugo sin anclaje.
5. Inadecuado soporte de la estructura.

Figura 8

Identificación de fallas del secador vertical de biomasa



2.1.2 Requerimientos del cliente

Como se mencionó, uno de los principales requerimientos del cliente, solicita la disminución de las vibraciones de toda la estructura por motivo que afectan las mediciones de temperatura y velocidad de secado. Además, el flujo de aire debe ser laminar como lo menciona en la tesis desarrollada por (Lombeida, 2021) para realizar el secado. Sin embargo, el laboratorio del CDTs ha considerado a partir de las pruebas una velocidad de flujo promedio de 1 m/s es más que necesario para realizar el secado de las astillas de biomasa. Por lo tanto, se tomarán en cuenta estas consideraciones cuando se realicen la simulación de las alternativas de solución.

Por otro lado, como restricción del laboratorio del CDTS se tiene que el secador vertical de biomasa conserve su forma cilíndrica y sea totalmente vertical, por lo cual las alternativas planteadas son con base a los parámetros descritos.

2.1.3 Alternativas de solución

Con base al análisis descrito y a los requerimientos del cliente, se trató de hacer una adecuación del equipo. Sin embargo, desde la identificación de fallas se optó por hacer mejoras en la parte estructural, por lo tanto, se realizó el rediseño del secador vertical de biomasa.

Las alternativas de solución fueron realizadas con base a los parámetros descritos, y estas fueron desarrolladas con criterios de ingeniería, considerando que el tamaño también es un factor crucial dado la disponibilidad del almacenamiento y operación del equipo, por tanto, las alternativas fueron restringidas a una altura de 1800 mm.

La figura 9, muestra la alternativa #1 la cual se basa en mantener la forma cilíndrica en todo el equipo, considerando las expansiones de forma cilíndrica para disminuir los cambios bruscos de sección y evitar caídas de presión que influyan en la potencia del flujo de aire. En esta primera alternativa, se optó por modificar la sección del sistema de generación de calor en una sección circular, manteniendo los elementos como en el secador original. La parte inferior representa el tubo de salida del ventilador centrífugo el cual mide 4 pulg. de diámetro y, por ende, este tubo será de la misma dimensión.

Figura 9

Alternativa de solución #1



La figura 10, muestra la alternativa #2 la cual es semejante a la primera, no obstante, se decidió combinar las expansiones presentes y hacer una sola expansión en la cual se integre el sistema de calentamiento, es decir, las resistencias se acoplarán directamente en este elemento para evitar cambios de secciones y optimizar la geometría del secador.

Figura 10

Alternativa de solución #2



La figura 11 muestra la alternativa #3 la cual se basa en alargar el tubo de entrada del flujo de aire, manteniendo el sistema de generación de calor y la cámara de secado.

Figura 11

Alternativa de solución #3



La figura 12 muestra la alternativa #4 la cual es semejante a la tercera, no obstante, en vez de alargar el tubo de entrada, se alarga la cámara de secado para que el flujo de aire se desarrolle y así obtener a la salida de este un flujo más estable que permita el secado más uniforme de la biomasa.

Figura 12

Alternativa de solución #4



En las 3 últimas alternativas, las resistencias eléctricas, estarán orientadas y sujetadas directamente en los elementos principales del rediseño del secador, los cuales se optimizaron a 3: cámara de secado, sistema de generación de calor y un ducto flexible.

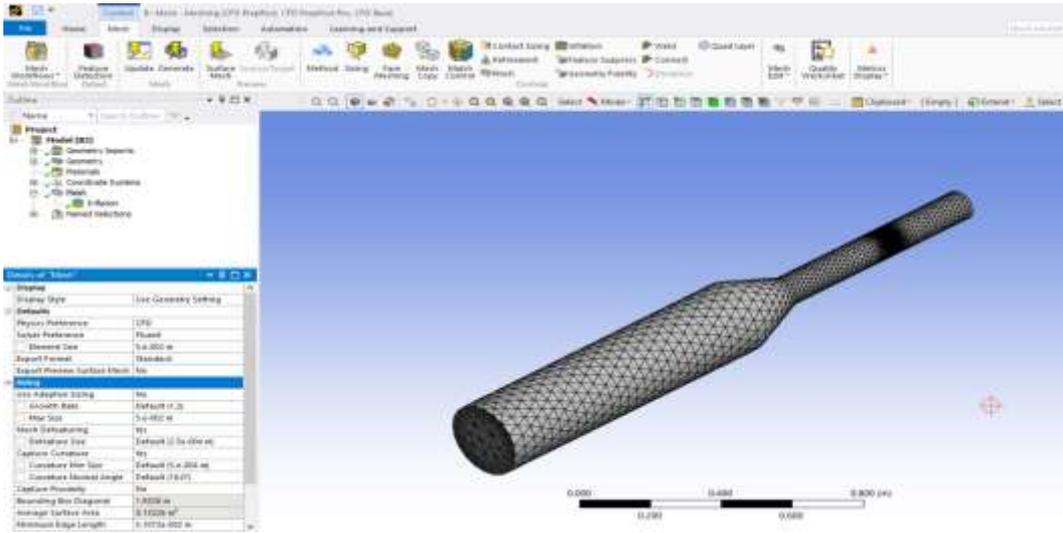
2.2 Simulación de las alternativas del rediseño

2.2.1 Parámetros para la simulación de fluidos del secador

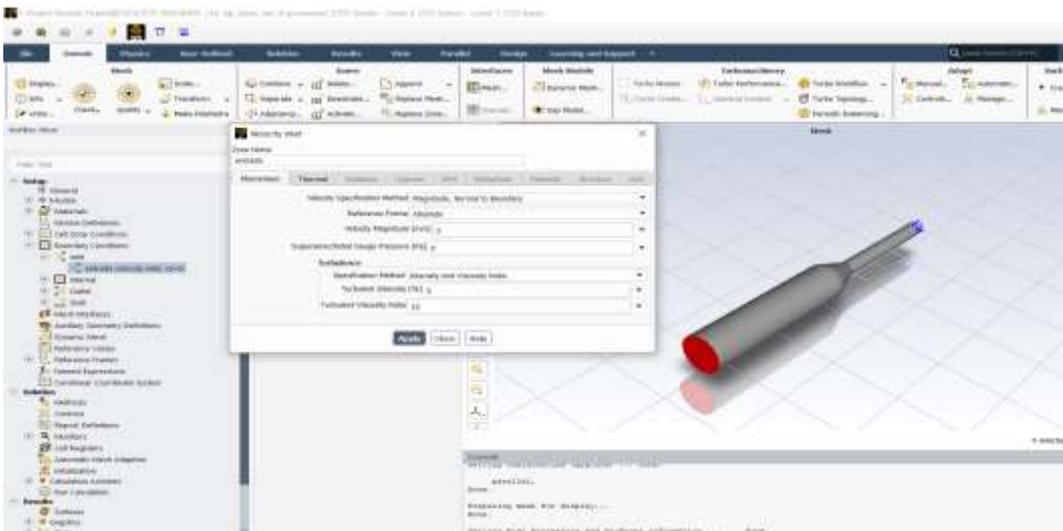
Las alternativas del rediseño del secador tienen que ser validadas mediante la simulación del comportamiento del flujo de aire, se describen a continuación cuales fueron los parámetros secuenciales necesarios que se tomaron en cuenta al simular dentro del software Ansys Workbench (véase la figura 13):

1. Se dibujó el volumen que ocupa el flujo del aire en el interior del rediseño mediante el software de modelado 3D, Autodesk Fusion.
2. Exportar el dibujo en una extensión compatible con el software Ansys Workbench, en este caso, los dibujos fueron exportados con la extensión “.step”.
3. En Ansys Meshing (programa interno de Ansys Workbench) se realizó el mallado de la geometría de las alternativas, en donde se configuró la malla para un tamaño de 50 mm, dado que un tamaño más fino (un valor más pequeño), implicaba un mallado más preciso y el software requería de una licencia adicional para poder simular las alternativas, además que las capacidades del ordenador limitaban una simulación mucho más precisa que la realizada. Los otros parámetros se los dejaba por defecto.
4. En Ansys Fluent (programa interno de Ansys Workbench) se configuraron los parámetros para realizar la simulación de fluidos de la geometría de las

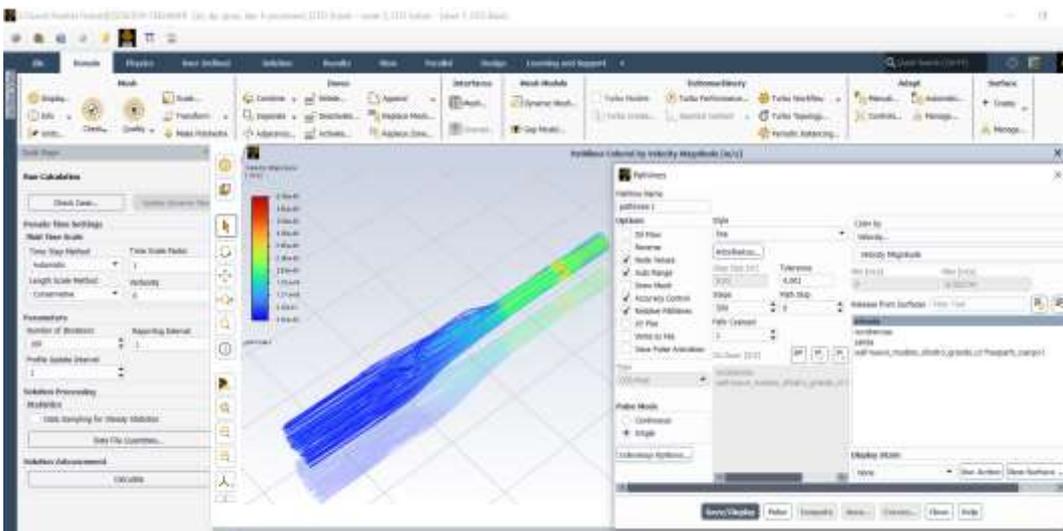
3.



4.



5.



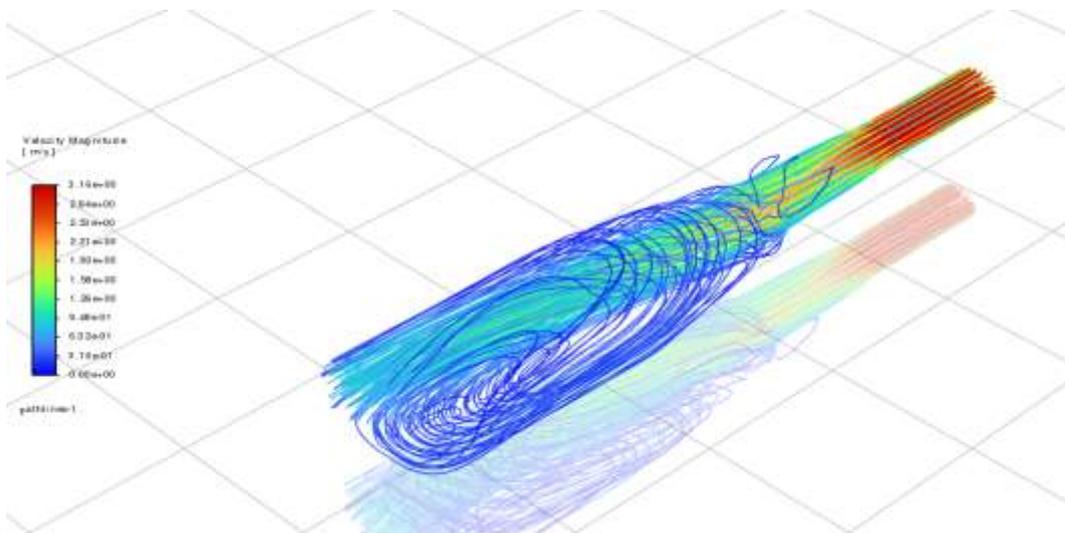
2.2.2 Simulación de fluidos de las alternativas

Definido los parámetros, se procedió a realizar las simulaciones de las alternativas del rediseño para seleccionar la que mejor se adapte a los requerimientos del secador vertical de biomasa.

La figura 14 muestra la simulación de la alternativa #1, en donde se visualizan las líneas de corriente del flujo de aire que circula por el secador vertical con una velocidad de entrada de 3 m/s. Las líneas de corriente indican como se distribuye el flujo, por lo que como se indica en la simulación, se forman turbulencias en las expansiones del rediseño y continúan en la parte de la cámara de secado donde se vuelven más evidentes. Esto indica no uniformidad de flujo y provoca una mala distribución en el secado de la biomasa.

Figura 14

Líneas de corriente del flujo de aire de la alternativa #1

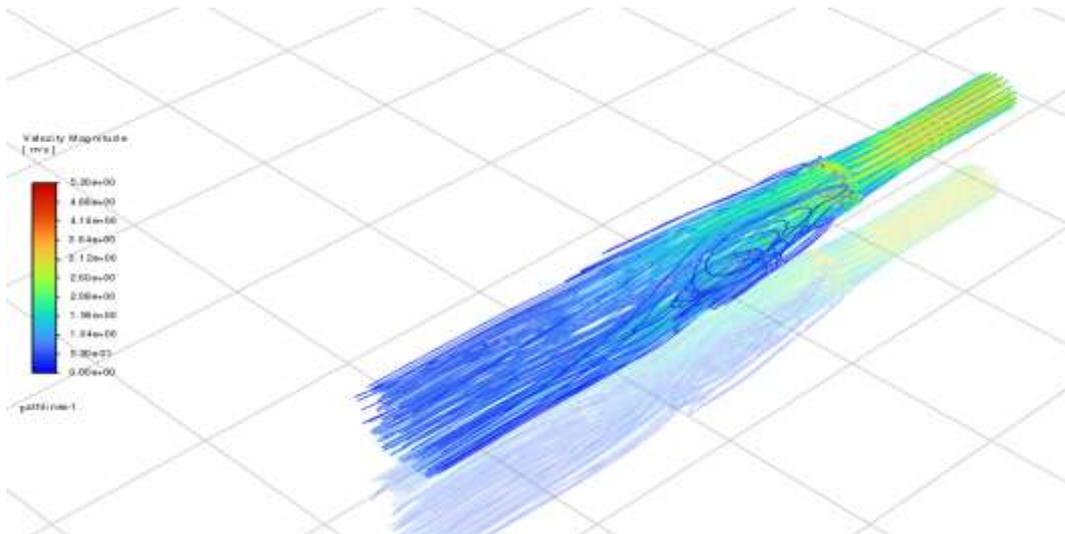


La figura 15 muestra la simulación de la alternativa #2. Como indican las líneas de corriente del flujo de aire, se forman vacíos y turbulencias o remolinos del flujo de aire en la zona de la expansión. Sin embargo, en la cámara de secado existe un flujo desarrollado que indica una uniformidad del flujo, y, por ende, una mejor

distribución de calor para el secado de la biomasa. Según los resultados de esta simulación, se obtuvo una velocidad de salida de aire entre 0.52 a 1.04 m/s.

Figura 15

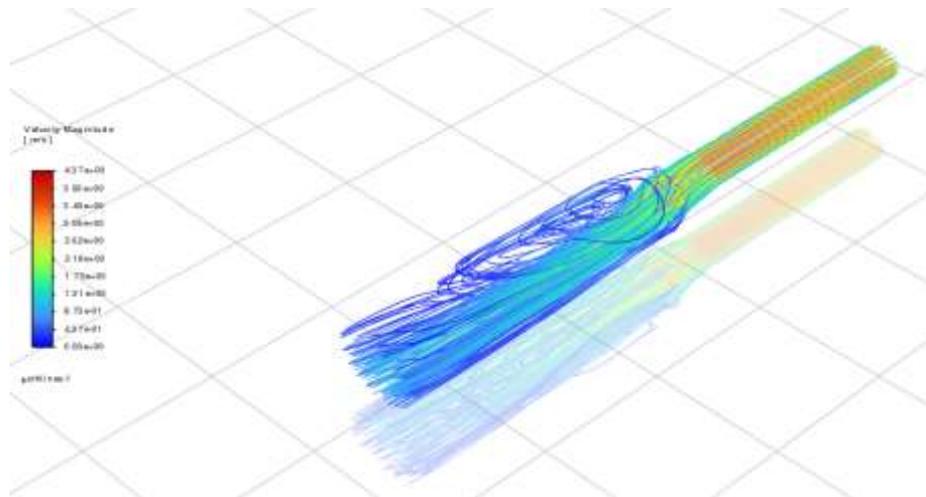
Líneas de corriente del flujo de aire de la alternativa #2



La figura 16 muestra la simulación de la alternativa #3. Las líneas de corriente muestran la presencia de vacíos y turbulencias en el flujo de aire en la cámara de secado. A pesar de que los resultados de esta simulación mostraran una velocidad de salida de aire entre 0.44 a 1.31 m/s, no habrá uniformidad en esta zona y no se tendrá un óptimo secado.

Figura 16

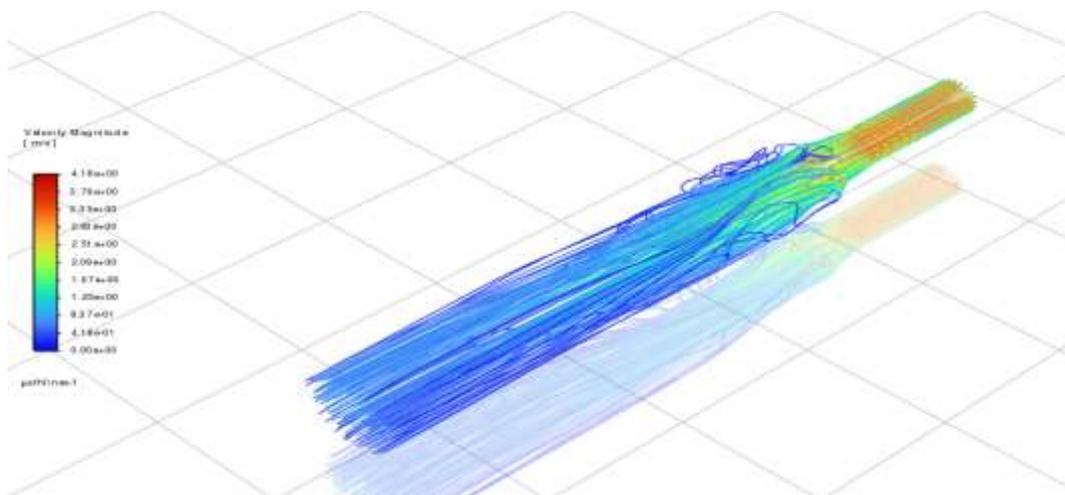
Líneas de corriente del flujo de aire de la alternativa #3



La figura 17 muestra la simulación de la alternativa #4. Como indica las líneas de corriente, aún se crean vacíos y remolinos del flujo de aire, sin embargo, estas están en la zona de la expansión y no en la cámara de secado. Esta uniformidad del flujo de aire en la cámara de secado es un indicador de un óptimo secado de la biomasa. Además, los resultados muestran una velocidad de salida de aire entre 0.42 a 1.25 m/s.

Figura 17

Líneas de corriente del flujo de aire de la alternativa #4



2.3 Matriz de selección

Tal como se observó en la sección 2.2.2, los resultados de la simulación inicial se definen que las alternativas #2 y #4 son las más propicias por la continuación de un flujo uniforme. Por lo tanto, para el desarrollo de la matriz de selección, en la tabla 1 se presentan los criterios respectivos de porcentaje de valor establecidos por el cliente:

Tabla 1

Criterios de evaluación de las alternativas del rediseño

Criterio	Porcentaje de valor (%)	Descripción
Funcional	35%	El equipo debe disminuir las vibraciones para una constante y uniforme velocidad y temperatura de aire dentro de la cámara de secado. La reducción de las vibraciones permitirá además implementar una instrumentación futura de muestreo de datos de peso vs tiempo.
Durabilidad	30%	Analiza la vida esperada del equipo bajo las condiciones de uso provistas.
Construcción	20%	Considera la facilidad y disponibilidad de materiales y herramientas para la fabricación de las partes del equipo.
Costo	15%	Evalúa los materiales existentes dentro del mercado local. Factibilidad de compra. Costos accesibles. Repuestos asequibles y de fácil mantenimiento.

En la tabla 2 se muestra la matriz de selección, donde cada alternativa fue evaluada en función de los criterios definidos. Las calificaciones van de 1 a 5, siendo 5 la puntuación que mejor cumple el criterio y 1 la puntuación que menos cumple.

Tabla 2*Matriz de selección*

Criterio	Factor porcentual	Calificación alternativa #2	Alternativa # 2	Calificación alternativa #4	Alternativa # 4
Funcional	0.35	4	1.4	5	1.75
Durabilidad	0.30	3	0.9	3	0.9
Construcción	0.20	3	0.6	3	0.6
Costo	0.15	3	0.45	3	0.45
Total	1.00		3.35		3.70

Con base en los resultados obtenidos en la matriz de selección, se concluyó que la alternativa #4 es la mejor opción, obteniendo el mayor puntaje (3.70) al establecer de manera óptima los criterios definidos.

2.4 Rediseño del secador vertical de biomasa

Con base a la alternativa de rediseño seleccionada, se comenzó a rediseñar las partes del secador vertical de biomasa. El rediseño consistió en diseñar nuevas partes del secador vertical de biomasa y tratar de optimizar y reutilizar los componentes necesarios del anterior secador.

Con esto, se describen a continuación las partes o componentes del nuevo secador vertical de biomasa:

1. La inyección del flujo de aire se la realizará con el mismo ventilador centrífugo del laboratorio del CDTS, el cual tiene una potencia de $\frac{3}{4}$ HP con una salida de sección circular de 4 pulg.

2. El componente que conecta al ventilador centrífugo con el sistema de generación de calor será un ducto flexible. Este tiene una sección transversal de 4 pulg. compatible con el ventilador. La longitud de este elemento será de 1200 mm y se acoplará con abrazaderas del mismo tamaño. Este elemento servirá de aislamiento mecánico para evitar la transmisión de las vibraciones al nuevo secador.
3. Sistema de generación de calor, el cual es una expansión en forma de cono truncado, el cual conectará al ducto flexible con la cámara de secador. La expansión se fabricará con plancha de acero estructural de 1 mm de espesor.
4. La cámara de secado será un cilindro de 1000 mm de alto con un diámetro nominal a 230 mm. Este será fabricado con plancha de acero estructural de 1 mm de espesor, dado que las temperaturas a las que estará sometido no son altas. El material se lo reciclará del laboratorio del CDTS o del propio secador anterior.
5. La canasta para la biomasa será la misma del secador vertical anterior, la cual tiene un diámetro y altura nominal de 200 mm y 300 mm respectivamente.
6. La estructura del secador se la fabricará con acero estructural y dependerá de la disponibilidad de material ubicado en el laboratorio del CDTS. La estructura será construida para soportar el peso de la canasta con la biomasa, la cámara de secado el sistema de generación de calor, dado que estos 3 elementos son los que tienen un mayor peso considerable que los anteriores descritos. Se omite el ventilador centrífugo dado que este descansará sobre el suelo. La estructura será anclada a la cámara de secado dado que este tiene mayor punto de apoyo para la estructura.

Con base a la descripción del rediseño, se muestra en la figura 18 el rediseño de forma del secador vertical de biomasa, en donde se presentan las principales características que tendrá, las cuales son el ventilador centrífugo, ducto flexible que conecta el ventilador con el

sistema de generación de calor, donde irán las resistencias eléctricas, la cámara de secador y la estructura de soporte.

Figura 18

Rediseño de forma del secador vertical de biomasa



2.5 Construcción del secador vertical de biomasa

Una vez definido el rediseño final mediante la matriz de selección y el rediseño de forma, se procedió con la construcción siguiendo una metodología estructurada que incluyó desde la preparación inicial hasta la implementación final del sistema. Los pasos considerados son los siguientes.

2.5.1 Elaboración y revisión de planos constructivos

Con base en el rediseño presentado (figura 18), se desarrollaron los modelos 3D de los componentes del secador vertical de biomasa, tomando en cuenta las especificaciones del laboratorio del CDTs y principios fundamentales de ingeniería.

A partir de estos modelos, se elaboraron los planos constructivos correspondientes a los principales componentes del rediseño, que son:

1. Soporte del secador vertical de biomasa
2. Cámara de secado
3. Sistema de generación de calor (elemento de transición entre la salida del ventilador centrífugo y la entrada de la cámara de secado).
4. Ducto flexible

Los planos constructivos, incluidos en el *Apéndice A*, se dibujaron a partir de los modelos 3D de los componentes. Estos planos también permitieron determinar la cantidad exacta de material necesario para su fabricación, optimizando así los recursos del proyecto.

2.5.2 Identificación y selección de materiales

Con base a los planos constructivos, se definió el tipo y la cantidad de material necesario para llevar a cabo la fabricación de los componentes del secador, los cuales son:

- Media plancha (1220 x 1220 mm) de acero estructural de 1 mm de espesor
- 1 tubo cuadrado (1 ½ pulg.) de acero estructural de 6000 mm por 1 mm de espesor
- 1kg de electrodo revestido 6011
- Discos de corte, desbaste y pulir
- Ducto flexible
- Abrazaderas de 4 pulg.

El laboratorio del CDTS proporcionó parte del material necesario para fabricar los componentes, promoviendo así la reutilización de recursos como principio fundamental de la economía circular. Como se observa en la figura 19, el laboratorio

suministró dos planchas de acero estructural de 1220 x 610 x 1 mm. Estas planchas, provenientes de material remanente de proyectos anteriores, fueron aprovechadas para fabricar la media plancha de acero estructural requerida en la construcción de los componentes del secador.

Figura 19

Planchas de acero estructural



Nota: Planchas de acero estructural utilizadas (1220 x 610 x 1 mm cada una) entregados por el laboratorio del CDTs para la fabricación de los componentes del rediseño del secador vertical de biomasa.

La figura 20 muestra el tubo de acero estructural con el que se fabricó el soporte del secador vertical de biomasa.

Figura 20

Tubo de acero estructural



Nota: Tubo de acero estructural de 1 ½ pulg. x 6000 x 2mm.

2.5.3 Preparación del proceso de fabricación

Para realizar el proceso de fabricación de los componentes del rediseño del secador vertical de biomasa, se identificaron los instrumentos, máquinas/herramientas y fungibles necesarios, los cuales se detallan a continuación (véase figura 21):

1. Mesa de trabajo
2. Soldadora SMAW y electrodo revestido 6011
3. Amoladora de mano de 4 ½ pulg. con disco de corte, desbaste, pulir para metal y disco removedor de pintura
4. Roladora de lámina
5. Taladro y brocas
6. Escuadras metálicas
7. Prensas
8. Martillo
9. Arco con hoja de cierra para corte de metal
10. Lijas y hojas de lija de grano grueso
11. Pintura gris

Figura 21

Máquinas y herramientas utilizadas



Del mismo modo, se presenta en la figura 22 el diagrama de Gantt del flujo de trabajo que se siguió para la construcción del secador vertical de biomasa.

Figura 22

Diagrama de Gantt del flujo de trabajo

Nombre de la tarea	Hora de inicio	Hora de finalización	04.12.2024	05.12.2024	06.12.2024	07.12.2024	08.12.2024	09.12.2024	10.12.2024	11.12.2024	14.12.2024	15.12.2024	16.12.2024	17.12.2024	20.12.2024	21.12.2024	22.12.2024	23.12.2024	26.12.2024	27.12.2024	28.12.2024	29.12.2024	30.12.2024	31.12.2024	01.01.2025
Traslado de material	13:00:00	16:00:00	■																						
Preparación de herramientas e instrumentos	18:00:00	19:00:00		■	■																				
Cortes de la plancha y del tubo	13:00:00	18:00:00				■	■																		
Rolado de las planchas	17:00:00	18:00:00						■	■	■															
Armado de la cámara de secado	10:00:00	18:00:00									■	■													
Armado del expansor de 34°	10:00:00	18:00:00										■													
Preparación de los materiales para seguir con la construcción	18:00:00	19:00:00											■	■	■										
Armado de la estructura del secador	10:00:00	18:00:00														■	■								
Armado del tubo acoplador	10:00:00	18:00:00															■								
Armado del codo flexible	10:00:00	18:00:00																■	■						
Soldar las juntas de los armados	18:00:00	19:00:00																	■	■					
Rectificación y ensamble de muestra	8:00:00	18:00:00																			■	■			
Acabados	8:00:00	18:00:00																					■		

Nota: Diagrama de Gantt del flujo de trabajo para la construcción del secador vertical de biomasa.

Para un correcto proceso de fabricación, se debió utilizar el equipo de protección personal (EPP) adecuado, el cual se muestra en la figura 23.

Figura 23

Equipo de protección personal (EPP)



Nota: Guantes de cuero y de algodón, gafas protectoras, careta de soldar, protección auditiva, mascarilla.

2.5.4 Fabricación de componentes

La construcción del secador vertical de biomasa se inicia con la limpieza de las planchas de acero estructural como se muestra en la figura 24, para lo cual se utilizó la amoladora de 4 ½ pulg. con un disco removedor de pintura con la finalidad de eliminar óxidos, pinturas y otros materiales contaminantes impregnados en la superficie que dificultan su posterior tratado.

Figura 24

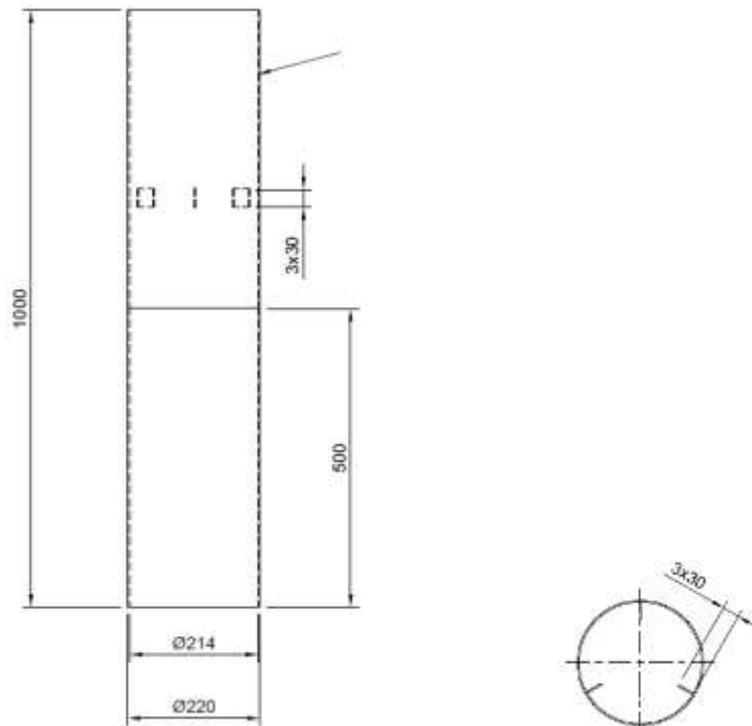
Limpieza de las planchas de acero estructural



Posterior a la limpieza de las planchas de acero estructural, se procedió al corte de estas para realizar el rolado con las dimensiones según indica el Plano #3 ubicado en el *Apéndice A*. La figura 25 indica una dimensión de 220 mm de diámetro por 1000 mm de alto, no obstante, para facilidad de ensamblaje, se decidió dividir la cámara de secado en dos partes. Las dimensiones de la cámara de secado antes del rolado son de 600 x 71 mm y la otra parte de 400 x 71 mm.

Figura 25

Sección del Plano #3 Cámara de Secado

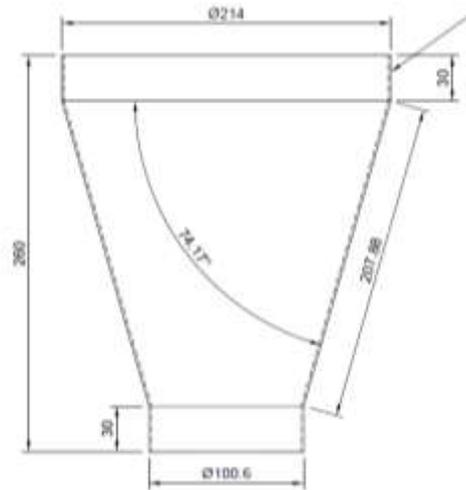


En el Plano #4 ubicado en el *Apéndice A* se indican las dimensiones del sistema de generación de calor. Como indica en la figura 26, las dimensiones de este componente son 214 mm y 100.6 mm de diámetro mayor y menor, con una altura de 200 mm, al cual se le soldarán 2 aros de 30 mm de alto cada uno en el diámetro mayor y menor, con la finalidad de lograr un correcto acople entre estos componentes.

Además, para fabricarlo, se debió realizar un molde correspondiente dado que este tiene una forma de cono truncado.

Figura 26

Sección del Plano #4 Sistema de Generación de Calor



Una vez realizados los cortes de las planchas, se procedió con el rolado para darles las formas correspondientes. En la figura 27 se puede observar el proceso de rolado de la cámara de secado y del sistema de generación de calor. El rolado de las piezas se llevó a cabo utilizando una roladora de rodillos de accionamiento manual. Para ello, las planchas previamente cortadas se colocaban en la máquina, donde eran presionadas entre los rodillos. Mediante el giro de un volante, las planchas pasaban repetidamente de un lado a otro, adoptando gradualmente una forma cilíndrica. Al finalizar cada pasada, se ajustaba la presión de los rodillos para que la pieza adquiriera progresivamente la forma final del cilindro. En la figura 28 se presenta el resultado final del rolado, listo para su posterior proceso de armado y soldado.

Figura 27

Rolado de los componentes del secador vertical de biomasa



Nota: la izquierda el rolado del cuerpo de la cámara de secado, a la derecha el rolado del cuerpo del sistema de generación de calor.

Figura 28

Cuerpo de la cámara de secado y del sistema de generación de calor



Posterior al rolado de las piezas, se llevó a cabo su armado y soldadura. En la figura 29 se ilustra el proceso de armado y soldadura de la cámara de secado, mientras que en la figura 30 se presenta el cuerpo del sistema de generación de calor soldado. Para la soldadura, se utilizó electrodo revestido 6011, lo cual garantiza una unión firme entre las piezas y una adecuada penetración. Debido al espesor de las piezas (1 mm), se optó primero por puntearlas, dado que realizar un cordón de soldadura completo podría provocar perforaciones o defectos a causa de la alta corriente requerida para este tipo de electrodo.

Figura 29

Armado de la cámara de secado



Figura 30

Armado del sistema de generación de calor



Después del armado de las piezas, se procedió a construir la estructura del secador vertical. Como primer paso, se ensamblaron los aros que asegurarán la fijación de la cámara de secado a la estructura. En la figura 31 se muestran los tres aros necesarios para sujetar la cámara de secado, garantizando un ensamblaje y fijación adecuados.

Figura 31

Aros de la estructura del secador vertical de biomasa



Por otro lado, en la figura 32 se detalla el proceso de fabricación de los soportes verticales de la estructura del secador. Estos soportes se fabricaron utilizando los tubos cuadrados previamente descritos, a los cuales se les realizó un corte transversal para obtener el ángulo de 10° especificado en el Plano #2 ubicado en el *Apéndice A*.

Figura 32

Armado de los soportes de la estructura del equipo



Después de realizar los cortes correspondientes, se soldaron los aros de fijación a los tubos cuadrados para conformar la estructura del secador. En la figura 33 se observa la estructura del secador vertical de biomasa, la cámara de secado y el cuerpo del sistema de generación de calor. Una vez finalizado el armado y la soldadura de las piezas, se procedió con el ensamblaje de la estructura, completando los ajustes y retoques finales necesarios.

Figura 33

Armado final y soldado de los componentes del equipo



Nota: Estructura, cámara de secado y cuerpo del sistema de generación de calor.

En la figura 34 se muestra ducto flexible, el componente que conecta el ventilador centrífugo con el sistema de generación de calor. Inicialmente, se demostró fabricarlo, sin embargo, se encontró en el mercado un ducto flexible con características iguales o superiores a las propuestas. Este tipo de ducto, utilizado en las campanas de extracción de aire de las cocinas, se adapta perfectamente a las necesidades del proyecto.

Figura 34

Ducto flexible



La figura 35 muestra el ensamblaje parcial de los componentes principales del secador vertical de biomasa: la cámara de secado, el cuerpo del sistema de generación de calor y el ducto flexible. Todos estos elementos fueron tratados previamente con pintura anticorrosiva de color gris para protegerlos contra la corrosión y prolongar su vida útil.

Para una correcta sujeción de los componentes, se realizaron las perforaciones de 5/16 pulg. y se utilizó perno y tuerca del mismo tamaño. El ducto flexible se sujetó con abrazaderas de 4 pulg. dado que es la dimensión de la salida del ventilador centrífugo y la entrada del sistema de generación de calor.

Figura 35

Ensamble parcial del secador vertical de biomasa



Realizado el ensamble, se procedió a desmontar las resistencias eléctricas, los sensores de temperatura y humedad, así como el tablero de control del secador vertical de biomasa antiguo, con la finalidad de trasladar estos elementos al nuevo secador de biomasa y terminar con el ensamble final del equipo.

Capítulo 3

3. Resultados y análisis

A continuación, se presentan los resultados y el análisis correspondientes al rediseño del secador vertical de biomasa. Este capítulo incluye los planos de ingeniería necesarios para su fabricación.

Además, se detalla la tabla de costos de los materiales utilizados en el proyecto, proporcionando un desglose claro de los recursos requeridos.

Por último, se describen los resultados de las pruebas realizadas para verificar el correcto funcionamiento del equipo y demostrar las mejoras alcanzadas en el proceso de secado. También se incluye una guía de operación del nuevo secador vertical de biomasa, diseñada para facilitar su uso y mantenimiento.

3.1 Resultados de simulación de la alternativa #4

Con base a la sección **2.2.1** donde se presentó los resultados de la alternativa más conveniente para el cliente (alternativa #4), se tiene a continuación los principales resultados obtenidos de esta alternativa la cual fue la escogida para realizar el rediseño del secador vertical de biomasa.

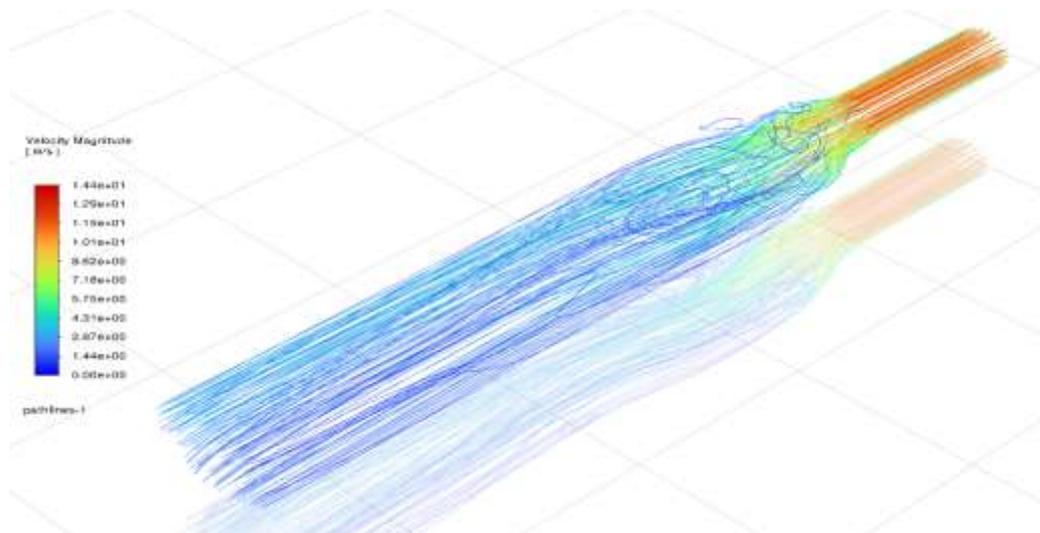
En la figura 36 se muestran las 2 gráficas principales y significativas de los resultados de la simulación de fluidos computacional de la alternativa #4. En la gráfica a. de líneas de corriente se puede observar un flujo uniforme de aire en la entrada, al llegar al sistema de generación de calor el flujo de aire se comportó de manera inestable y turbulenta, sin embargo, conforme avanza el flujo dentro de la cámara de secado, este logra alcanzar un continuo flujo de aire, el cual tiene una velocidad promedio entre 0.39 y 1.18 m/s. Estos resultados aseguran que dentro de esta sección se tendrá una uniformidad de secado dado lo descrito.

Del mismo modo, en la gráfica b. del perfil de temperatura se observa una temperatura promedio de 350K (77°C) en la sección de la cámara de secado. No obstante, como se describió en secciones anteriores, el sistema de generación de calor es controlado, es decir, la potencia de las resistencias eléctricas puede variar conforme el proceso de secado lo requiera, por tanto, a pesar de tener estos resultados del perfil de temperatura, este se vuelve una variable según el laboratorio lo requiera.

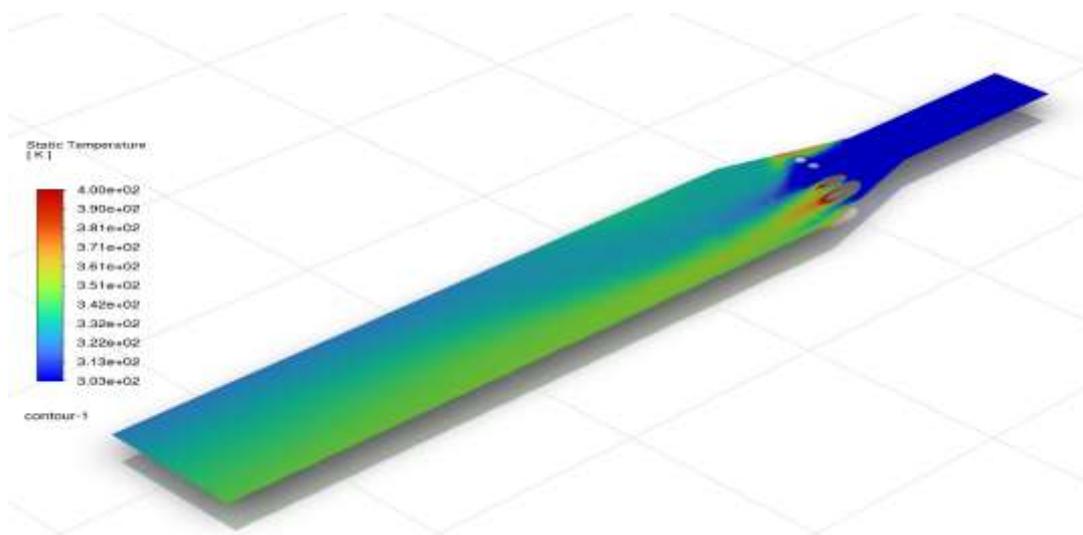
Figura 36

Resultados de simulación

a.



b.



Con base a la alternativa de rediseño descrita, se tienen a continuación los resultados del dimensionamiento del nuevo secador vertical de biomasa:

- La cámara de secado tiene una longitud total de 1000 mm y un diámetro de 220 mm, proporcionando el espacio adecuado para alojar la canasta de biomasa, que mide 300 mm de largo por 200 mm de diámetro. Para facilitar el ensamblaje y optimizar el uso de las planchas de acero estructural disponibles, se decidió dividir la cámara en dos secciones: un cilindro de 600 mm y otro de 400 mm.
- El sistema de generación de calor tiene la forma de un cono truncado, con un diámetro mayor de 235 mm y menor de 90 mm, diseñado específicamente para acoplarse a la cámara de secado. Además, se incorporó un cilindro adicional de 90 mm de diámetro y 70 mm de longitud, que mejora la sujeción del ducto flexible y optimiza la conexión con el sistema.
- El ducto flexible de 4 pulg. fue adquirido comercialmente. Está compuesto por un armazón de alambre embobinado recubierto de lámina de aluminio, lo que le permite amortiguar vibraciones y evitar su transmisión, al tiempo que garantiza la rigidez y estabilidad requeridas para el sistema.
- La estructura del secador vertical de biomasa fue diseñada con tres soportes, asegurando un asentamiento estable sobre el suelo del laboratorio del CDTs. Para su fabricación, se reutilizaron partes de las planchas estructurales disponibles, con las cuales se elaboraron tres aros que fijan la cámara de secado. Los soportes verticales se construyeron con tubos cuadrados de acero estructural de 1 ½ pulg. y 2 mm de espesor, seleccionados por su alta resistencia y facilidad de manipulación.

3.2 Ensamblaje del secador vertical de biomasa

En la figura 37 se muestra el modelo 3D del ensamblaje del nuevo secador vertical de biomasa, el cual integra tanto los nuevos componentes fabricados como elementos reutilizados del diseño anterior.

De manera complementaria, en la figura 38 se presenta el plano de ingeniería del nuevo secador. Este plano detalla cada uno de los componentes y su ubicación dentro del ensamblaje, además de especificar los materiales necesarios para la fabricación.

Por último, en el *Apéndice A* se encuentran los planos de ingeniería correspondientes para su construcción.

Figura 37

CAD del ensamblaje del nuevo secador vertical de biomasa

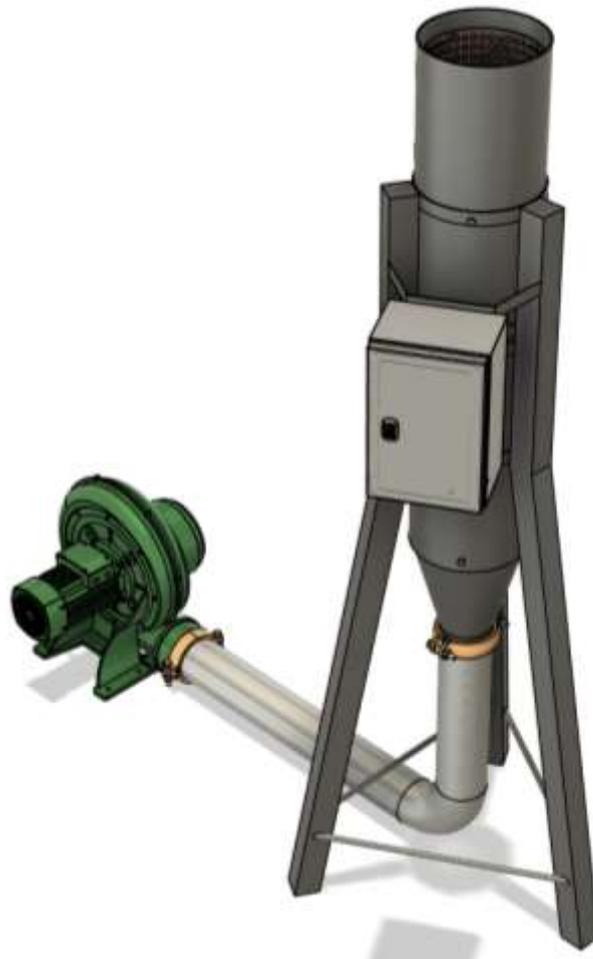
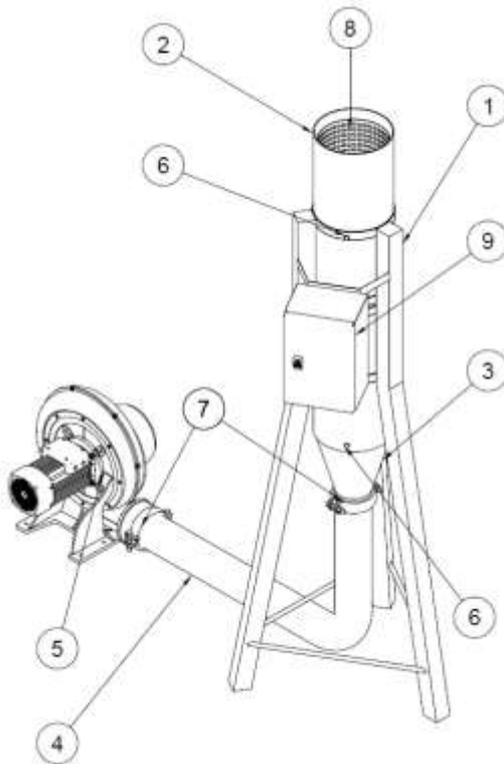


Figura 38

Sección del Plano #1 del nuevo secador vertical de biomasa



LISTADO DE COMPONENTES			
NÚMERO	NOMBRE	CANTIDAD	MATERIAL
1	Estructura Secador Vertical de Biomasa	1	Acero estructural
2	Cámara de secado	1	Acero estructural
3	Sistema de Generación de Calor	1	Acero estructural
4	Ducto Flexible	1	Aluminio
5	Ventilador Centrifugo	1	N/A
6	Pemos de $\frac{5}{16}$ pulg	15	Acero inoxidable
7	Abrazadera de 4 pulg	2	Acero inoxidable
8	Canasta	1	Acero inoxidable
9	Tablero de Control	1	N/A

En la figura 39 se presenta el nuevo secador vertical de biomasa. En él se puede apreciar los nuevos componentes fabricados para su correcto funcionamiento, así como se observan los componentes del anterior secador de biomasa.

Las dimensiones finales que se obtuvo del nuevo secador fueron:

- Altura total: 1810 mm
- Diámetro de la cámara de secado: 230 mm
- Altura total del sistema de generación de calor: 300 mm
- Longitud del ducto flexible: 1100 mm

Figura 39

Nuevo secador vertical de biomasa



3.3 Análisis de costos

En la tabla 3 se presenta los costos de los materiales e insumos utilizados para la fabricación y construcción de los componentes del secador vertical de biomasa.

El costo de los materiales e insumos (considerados como nuevos) es de \$84.49 dólares americanos.

Tabla 3

Costos de materiales e insumos

Materiales e insumos						
N°.	Nombre	Proveedor	Cantidad	Unidad	Precio unitario (dólares)	Precio total (dólares)
1	Disco de corte de metal de 4 ½ pulg.	Megametales S.A.	10	unidad	1.10	11.00
2	Disco de desbaste de metal de 4 ½ pulg.	Megametales S.A.	3	unidad	2.81	8.43
3	Disco Flap de 4 ½ pulg. #80	Megametales S.A.	3	unidad	3.54	10.62
4	Electrodo 6011 de 1/8 pulg.	Megametales S.A.	1	kg	6.36	6.36
5	Tubo cuadrado de 1 1/2 pulg. x 2 mm	Megametales S.A.	1	unidad	15.45	15.45
6	Ducto flexible de 4 pulg.	Coral Hipermercados	1	unidad	4.15	4.15
7	Lija para metal #80	Ferrisariato	2	unidad	0.91	1.82
8	Plancha de acero estructural de 1220 x 2440 x 1 mm	Megametales S.A.	1	unidad	22.08	22.08
9	Pintura anticorrosiva gris	Megametales S.A.	1	Litro	4.58	4.58
					Total	84.49

Nota: la plancha de acero estructural fue reutilizada, así como partes del anterior secador, cómo las resistencias eléctricas, sensores de temperatura y humedad, y el tablero de control.

En la tabla 4 se presenta los costos de mano de obra para la fabricación de los componentes del secador vertical de biomasa, teniendo un costo de \$184 dólares americanos.

Tabla 4

Costos de mano de obra

Mano de obra						
N°.	Nombre	Proveedor	Cantidad	Unidad	Precio unitario / dólares	Precio total (dólares)
1	Rolado de las piezas	Taller Metalmecánico	3	unidad	4.00	12.00
2	Proceso de manufactura de las piezas	N/A	4	unidad	36.00	144.00
3	Pintura	N/A	4	unidad	3.00	12.00
4	Transporte del equipo	N/A	1	unidad	15.00	15.00
					Total	183.00

En la tabla 5 se presenta el desglose del costo del rediseño del secador vertical de biomasa, este abarcó desde la simulación hasta la elaboración de planos de ingeniería. El costo del rediseño del equipo fue de \$585 dólares americanos.

Tabla 5

Costo del rediseño del secador vertical de biomasa

Rediseño			
Nombre	Precio unitario (dólares/hora)	Horas invertidas	Precio total (dólares)
Rediseño del equipo	15.00	39	585.00

Finalmente, en la tabla 6 se presenta el costo total del rediseño y construcción del secador vertical de biomasa, el cual tuvo un costo total de \$852.49 dólares americanos.

Tabla 6

Costo total del rediseño y construcción del equipo

Costo total	
Nombre	Precio (dólares)
Materiales e insumos	84.49
Mano de obra	183.00
Rediseño	585.00
Total	852.49

3.4 Pruebas de funcionamiento y validación

Para verificar el correcto funcionamiento del equipo, se llevó a cabo una prueba física destinada a medir la variación en los grados de inclinación durante su operación. Esta evaluación se realizó utilizando un inclinómetro digital con certificación IP54, diseñado específicamente para medir inclinaciones y vibraciones con un rango de $\pm 90^\circ$ por eje. El dispositivo cuenta con una precisión de $\pm 0.2^\circ$ y una resolución de $\pm 0.05^\circ$, características que aseguran alta fiabilidad y sensibilidad para detectar desalineaciones y vibraciones en el equipo.

En la figura 40 se presenta la prueba de funcionamiento con el inclinómetro digital. Este se colocó en el soporte del tablero de control, lugar donde se encuentra la instrumentación de control y muestro de datos. Como indica la gráfica, durante la mayor parte del tiempo de prueba el nivel marcaba 0.25° de inclinación, teniendo picos de 3 a 5 segundos de 0.2 y 0.3° . Por lo que las variaciones oscilaban entre los $\pm 0.05^\circ$ de inclinación, lo que evidencia una reducción significativa de las vibraciones. Estos resultados confirman el

correcto funcionamiento del equipo, cumpliendo con los parámetros establecidos para su desempeño.

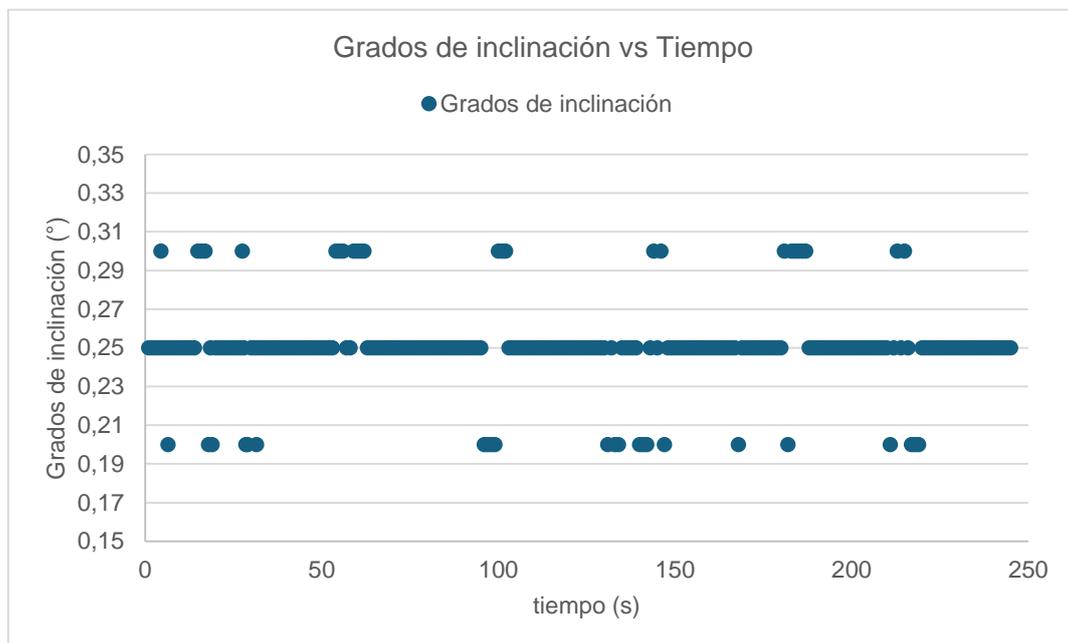
Figura 40

Prueba de funcionamiento con nivel digital

a.



b.



Nota: a. Foto del inclinómetro digital durante las pruebas de funcionamiento. b. gráfica de muestreo de datos del inclinómetro digital durante 245 segundos.

El equipo no cuenta con el sistema de control para medición de masa y velocidad de viento de entrada ni salida.

Finalmente, se llevó a cabo una prueba de funcionamiento del secador de biomasa utilizando astillas de Guayacán amarillo, obtenidas en el campus ESPOL. Previamente, la madera fue procesada para convertirla en astillas adecuadas para el experimento.

La prueba consistió en evaluar el tiempo de secado de la biomasa bajo condiciones controladas. Para ello, se configuró la temperatura del secador en 60°C y la apertura del ventilador centrífugo en 1%. Con estos parámetros, se introdujeron 481.6 g de biomasa en la cámara de secado, como se muestra en la Figura 42.

El proceso de secado se monitoreó mediante el registro del peso de la biomasa cada 20 minutos. Es decir, cada 20 minutos se paraba el proceso de secado para registrar el peso, una vez registrado se volvía a colocar la biomasa para continuar el proceso. Una vez que el peso se estabilizó, indicando la ausencia de pérdida de humedad, se dio por finalizada la prueba. Finalmente, los datos obtenidos fueron graficados para su posterior análisis.

Figura 42

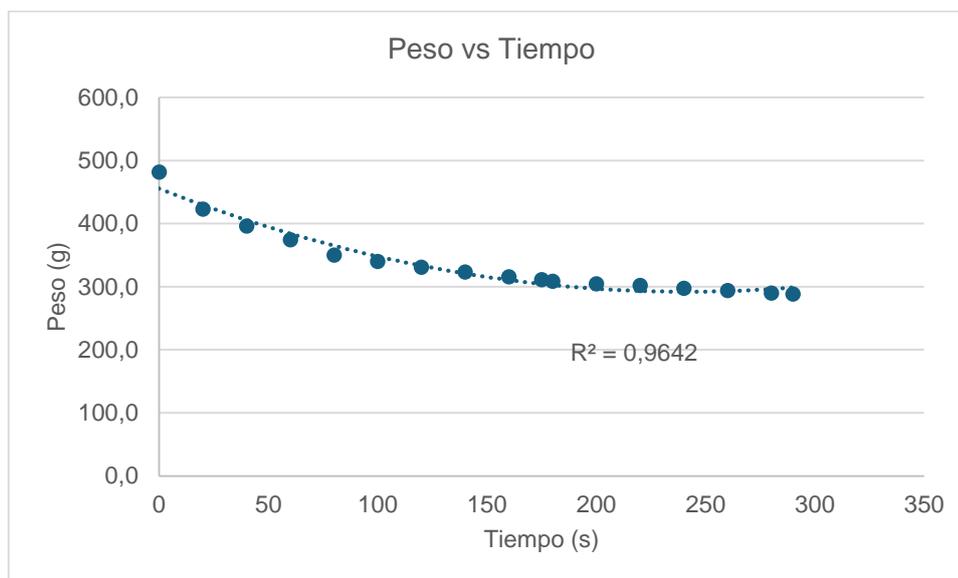
Astillas de madera para la prueba de funcionamiento



Como se muestra en la figura 43, la gráfica representa la variación del peso de la biomasa en función del tiempo de secado. Los resultados indican que el secado de 481.6 g de astillas de Guayacán amarillo se completó en 340 minutos (5.5 horas), lo que representa una reducción del 31% en comparación con el tiempo máximo de secado reportado para este tipo de biomasa (6 a 8 horas según información (Centros y Laboratorios, s.f.)). Esta disminución en el tiempo de secado evidencia una mejora en la eficiencia del proceso, atribuida a la rediseño del secador vertical de biomasa.

Figura 43

Gráfica de Peso vs Tiempo de la prueba de funcionamiento



3.5 Guía de operación

La guía de operación del secador vertical de biomasa ubicada en el **Apéndice B** proporciona un conjunto estructurado de instrucciones para el uso seguro y eficiente del equipo. Está dividida en seis secciones clave: introducción, recomendaciones de seguridad, descripción del equipo, preparación del secador, procedimiento de operación y mantenimiento.

En la introducción se destaca la función principal del secador: reducir la humedad de astillas de madera y otros materiales lignocelulósicos, con énfasis en su aplicación en investigaciones experimentales. La sección de seguridad resalta medidas esenciales para prevenir accidentes, como el uso de equipo de protección personal y la desconexión del equipo antes de cualquier mantenimiento.

La descripción del equipo detalla los principales componentes, como la cámara de secado, la canasta de biomasa, el ventilador centrífugo, el sistema de generación de calor y el tablero de control. Posteriormente, la sección de preparación del secador establece pasos para asegurar condiciones óptimas antes de iniciar el proceso, incluyendo la calibración de sensores y la distribución adecuada de la biomasa.

El procedimiento de operación describe paso a paso el uso del equipo, desde la configuración de temperatura y flujo de aire hasta la finalización del secado. Además, se especifica cómo manejar el equipo en estudios experimentales, considerando la toma de datos. Finalmente, la sección de mantenimiento establece prácticas para garantizar la durabilidad del equipo, como la limpieza después de cada uso y la calibración periódica de sensores.

Capítulo 4

4.1 Conclusiones y recomendaciones

El rediseño del secador vertical de biomasa constituye un aporte significativo al mejoramiento de tecnologías sostenibles en el CDTS. Este trabajo permitió optimizar el desempeño del equipo, logrando un flujo de aire uniforme y controlado en la cámara de secado. Los resultados obtenidos demuestran que el rediseño cumple con los objetivos planteados, garantizando un secado eficiente de la biomasa mediante una combinación de ajustes estructurales y mejoras en el sistema de generación de calor.

El proyecto se destacó por la reutilización de materiales, promoviendo la economía circular, la sostenibilidad y la reducción de costos. Además, se implementaron simulaciones computacionales que garantizaron un diseño preciso y funcional. Sin embargo, depende de condiciones externas como el ventilador centrífugo y las condiciones ambientales donde se opere el equipo, por lo que podría requerir ajustes futuros.

4.1.1 Conclusiones

Con base a los resultados presentados, la metodología aplicada y a los objetivos planteados, se tienen las siguientes conclusiones que del proyecto:

- El análisis de las simulaciones CFD del rediseño permitió identificar y corregir puntos críticos en el flujo de aire y la distribución térmica, lo que resultó en un diseño optimizado que garantiza un secado uniforme de la biomasa. Las pruebas de funcionamiento validaron la precisión de las simulaciones, demostrando que los resultados experimentales coinciden con las predicciones, lo que valida la eficacia del modelo computacional y su aplicabilidad práctica en el secador vertical.
- La fabricación de los componentes del nuevo secador vertical de biomasa, de acuerdo con las especificaciones del rediseño, fue un proceso exitoso que cumplió

con los parámetros establecidos en los planos de ingeniería. La reutilización de materiales como las planchas de acero estructural no solo contribuyó a reducir los costos de fabricación, sino que también promovió la economía circular, optimizando los recursos disponibles para el proyecto.

- Las pruebas de funcionamiento realizadas confirmaron que el flujo de aire en la cámara de secado cumple con los parámetros de velocidad y uniformidad establecidos. Las pruebas realizadas con el inclinómetro digital validaron la reducción de las vibraciones mecánicas del equipo, lo que asegura que el muestreo de datos durante el secado de la biomasa no se verá afectado por ruidos externos, garantizando la confiabilidad de los resultados obtenidos en futuras investigaciones. Finalmente, la prueba de secado con astillas de madera de Guayacán amarillo comprobó la optimización del proceso de secado del rediseño del equipo, obteniendo un 31% de reducción del tiempo de secado.
- La guía de operación desarrollada proporciona las instrucciones necesarias para el uso adecuado del secador vertical de biomasa. Esta herramienta asegura que los usuarios puedan operar el equipo de manera eficiente y dentro de los parámetros establecidos, optimizando su rendimiento y extendiendo la vida útil del equipo, lo que contribuye a la sostenibilidad y eficiencia del proceso.

4.1.2 Recomendaciones

Tras haber completado las fases planteadas en la propuesta, se obtienen las siguientes recomendaciones que pueden servir como base para futuras investigaciones y desarrollos en el área del secador vertical de biomasa:

- Se recomienda ampliar el análisis de las simulaciones CFD para evaluar el desempeño del secador en condiciones de flujo de aire y temperatura más

diversas, incluyendo variaciones estacionales y de humedad. Este estudio puede proporcionar un enfoque más robusto que permita optimizar aún más el diseño para diferentes escenarios operativos.

- Es importante realizar un seguimiento del rendimiento del secador a lo largo del tiempo, considerando su operación en condiciones reales de uso. Esto podría incluir pruebas de durabilidad, eficiencia energética y resistencia de los materiales empleados en el secador. Un análisis a largo plazo podría revelar posibles fallas o mejoras en el diseño que podrían extender su vida útil y optimizar su rendimiento.
- Una recomendación clave sería investigar la integración de fuentes de energía renovables, como la energía solar o eólica, para alimentar el sistema de calefacción del secador. Incorporar estas fuentes de energía no solo reduciría los costos operativos, sino que también contribuiría a hacer el proceso más sostenible y a reducir la huella de carbono del proyecto a largo plazo.
- Aunque las pruebas de funcionamiento confirmaron que el flujo de aire cumple con los parámetros establecidos, es posible que en futuras versiones del secador se puedan incorporar sistemas de control más avanzados, como válvulas automáticas para ajustar el flujo según las necesidades del proceso de secado. Esta mejora podría aumentar la eficiencia y flexibilidad del secador, especialmente en aplicaciones industriales con variabilidad de la biomasa.
- Dado que el secado de biomasa es un proceso crítico que depende de variables como la temperatura y la humedad, sería valioso explorar la implementación de sistemas automatizados de control para monitorear y ajustar en tiempo real estos parámetros. La automatización no solo mejoraría la eficiencia del proceso, sino que también reduciría la intervención manual, optimizando el rendimiento del secador en todo momento.

- Aunque las pruebas realizadas indicaron una mejora en la reducción de vibraciones, sería relevante investigar nuevos materiales o tecnologías que puedan optimizar aún más este aspecto, especialmente en el caso de equipos de mayor tamaño o para procesos industriales a gran escala. El estudio de nuevos materiales o técnicas de aislamiento podría ayudar a reducir las vibraciones y asegurar la estabilidad del equipo en diferentes condiciones operativas.

Referencias

- Abarca Mora, D. (2018). *Modelamiento Numérico de la Vibración Inducida por Flujo en una Tubería Horizontal que Transporta Flujo Bifásico Turbulento Agua – Aire*. Lima: ProQuest Dissertations & Theses. Obtenido de <https://www.proquest.com/openview/12cbf898ad41851566910897fa0d3ceb/1?pq-origsite=gscholar&cbl=51922&diss=y>
- Abril, A. J., & Navarro, E. A. (2012). *Etanol a partir de biomasa lignocelulósica*. Valencia: Aleta Ediciones. Obtenido de https://www.researchgate.net/profile/Enrique-Navarro/publication/241216642_Etanol_a_partir_de_biomasa_lignocelulosica/links/0c96051c8409028b93000000/Etanol-a-partir-de-biomasa-lignocelulosica.pdf
- Ansys ACE. (s.f.). ANSYS. (Ansys, Inc.) Obtenido de <https://www.ansys.com/academic/educators/education-resources/teaching-package-what-are-fluids>
- Bergman, T. L., Lavine, A. S., Incropera, F. P., & Dewitt, D. P. (2011). *Fundamentals of Heat and Mass Transfer* (7th ed.). USA: John Wiley & Sons, Inc.
- Cengel, Y. A., & Cimbala, J. M. (2006). *Mecánica de fluidos: fundamentos y aplicaciones*. México: McGraw-Hill Interamericana.
- Centros y Laboratorios. (s.f.). (Escuela Superior Politécnica del Litoral) Obtenido de <https://www.fimcp.espol.edu.ec/es/centros-y-laboratorios>
- Lombeida, J. A. (2021). *Diseño de un equipo a nivel de laboratorio para el secado de biomasa lignocelulósica*. Tesis de grado, GUAYAQUIL.
- Rahman, S. (2

024). Computational Fluid Dynamics for Predicting and Controlling Fluid Flow in Industrial Equipment. *European Journal of Advances in Engineering and Technology*, 11(9), 1-9.

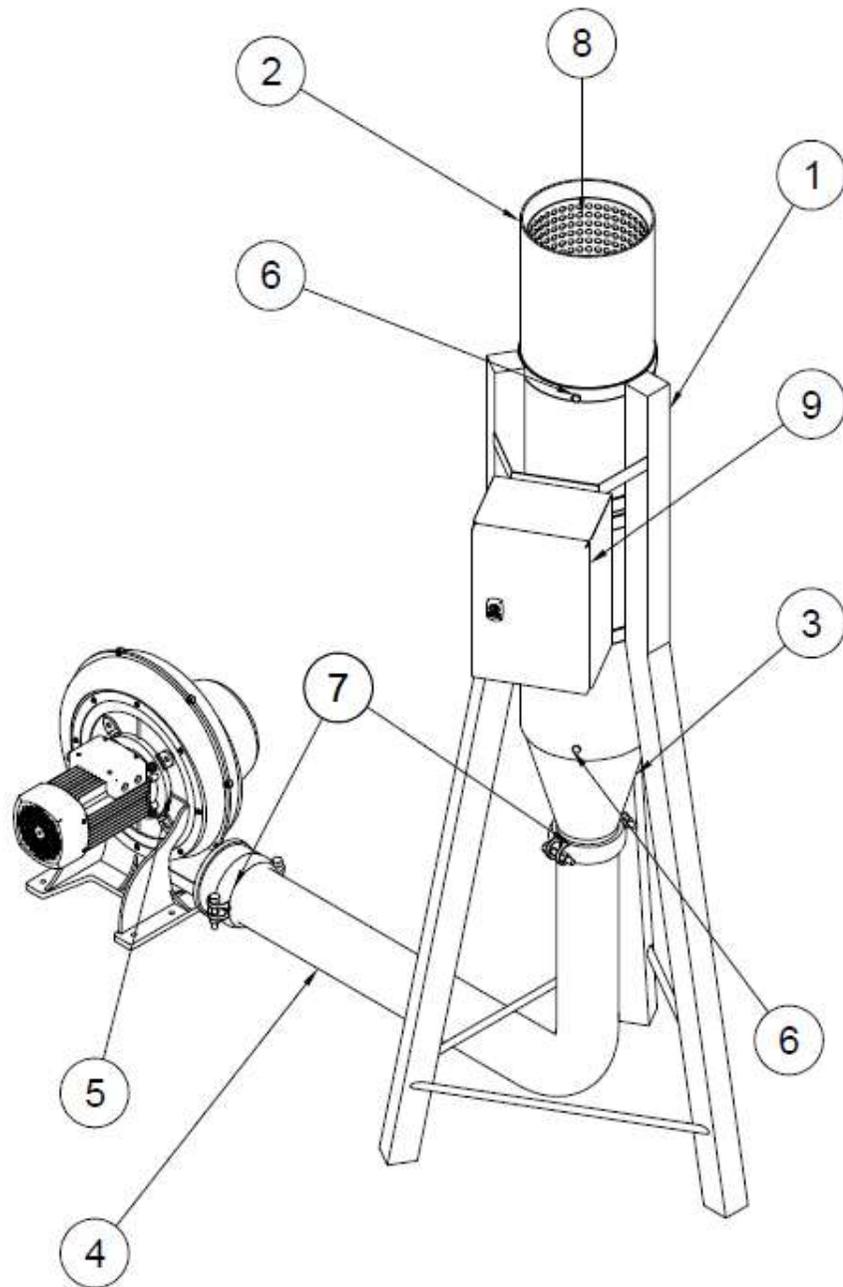
Strausser, Julia. (2023). HVAC Engineer's Handbook 2.0. En *Chapter 3: Heat Transfer*.

Prices Industries. Obtenido de <https://priceindustries.learnupon.com/catalog/learning-paths/70894/content/426720>

Apéndices

Apéndice A

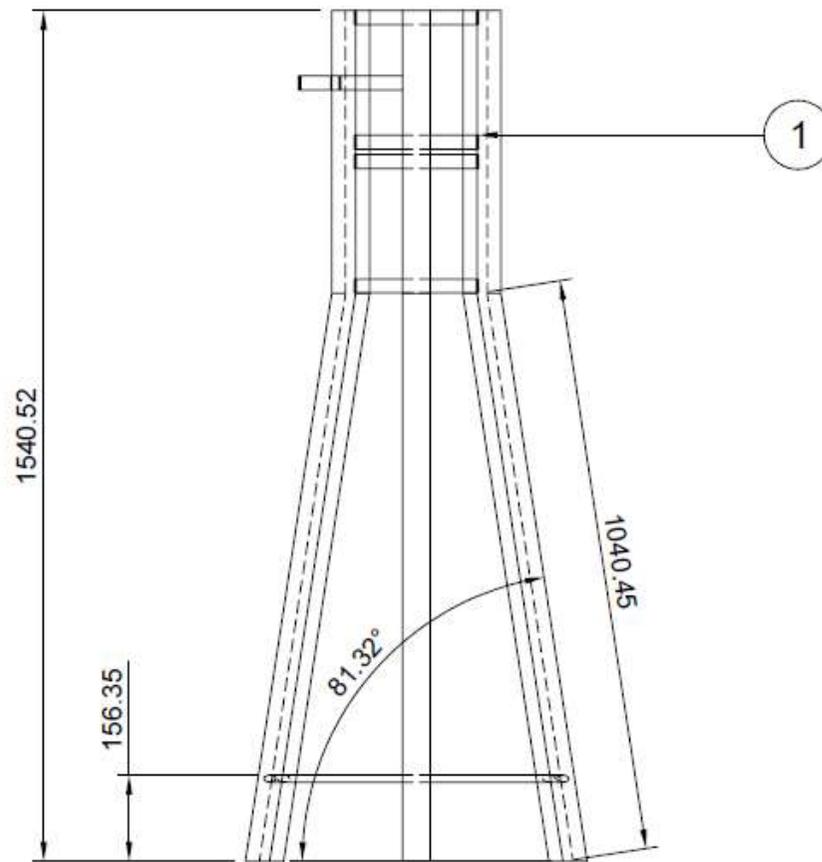
Planos de ingeniería



LISTADO DE COMPONENTES

NÚMERO	NOMBRE	CANTIDAD	MATERIAL
1	Estructura Secador Vertical de Biomasa	1	Acero estructural
2	Cámara de secado	1	Acero estructural
3	Sistema de Generación de Calor	1	Acero estructural
4	Ducto Flexible	1	Aluminio
5	Ventilador Centrífugo	1	N/A
6	Pernos de $\frac{5}{16}$ pulg.	15	Acero inoxidable
7	Abrazadera de 4 pulg.	2	Acero inoxidable
8	Canasta	1	Acero inoxidable
9	Tablero de Control	1	N/A

Diseño de: José León	Dibujado por: José León	Aprobado por: Ing. Doménica León	Escala: 1:9	
			Tipo de Documento: Ensamble	
			Título Ensamble Secador Vertical de Biomasa	DWG No. #1
			Fecha: 02/12/2024	



LISTADO DE COMPONENTES			
NÚMERO	NOMBRE	CANTIDAD	MATERIAL
1	Estructura del Secador Vertical de Biomasa	1	Acero estructural

La estructura del secador es fabricado en acero estructural.

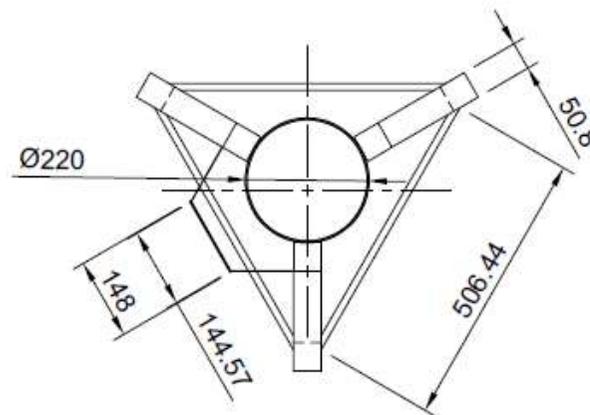
Contiene 3 tubos cuadrados de 1 1/2 pulg. que sirven de soportes principales.

Contiene 4 planchuelas de 2 pulg. que sirven de acople a la cámara de secado mediante pernos.

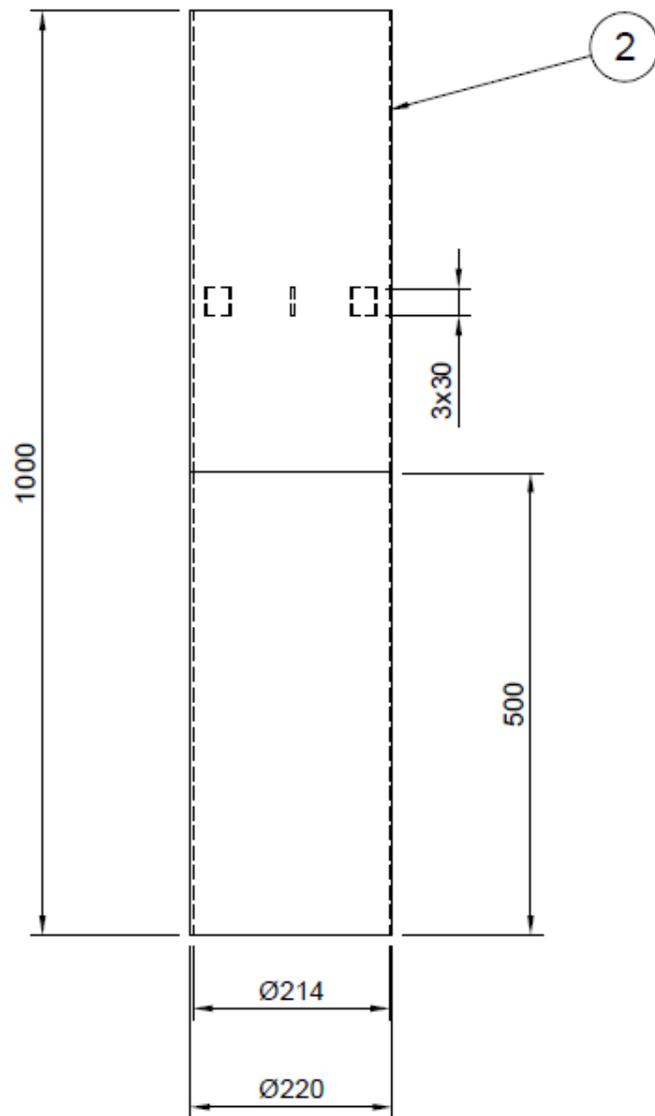
Cuenta con secciones de tubo transversales adicionales para reforzar la estructura.

Fabricación en plancha de acero estructural de 1mm de espesor.

Rolada en frío y soldada con electrodo E6011 para mantener su forma cilíndrica.



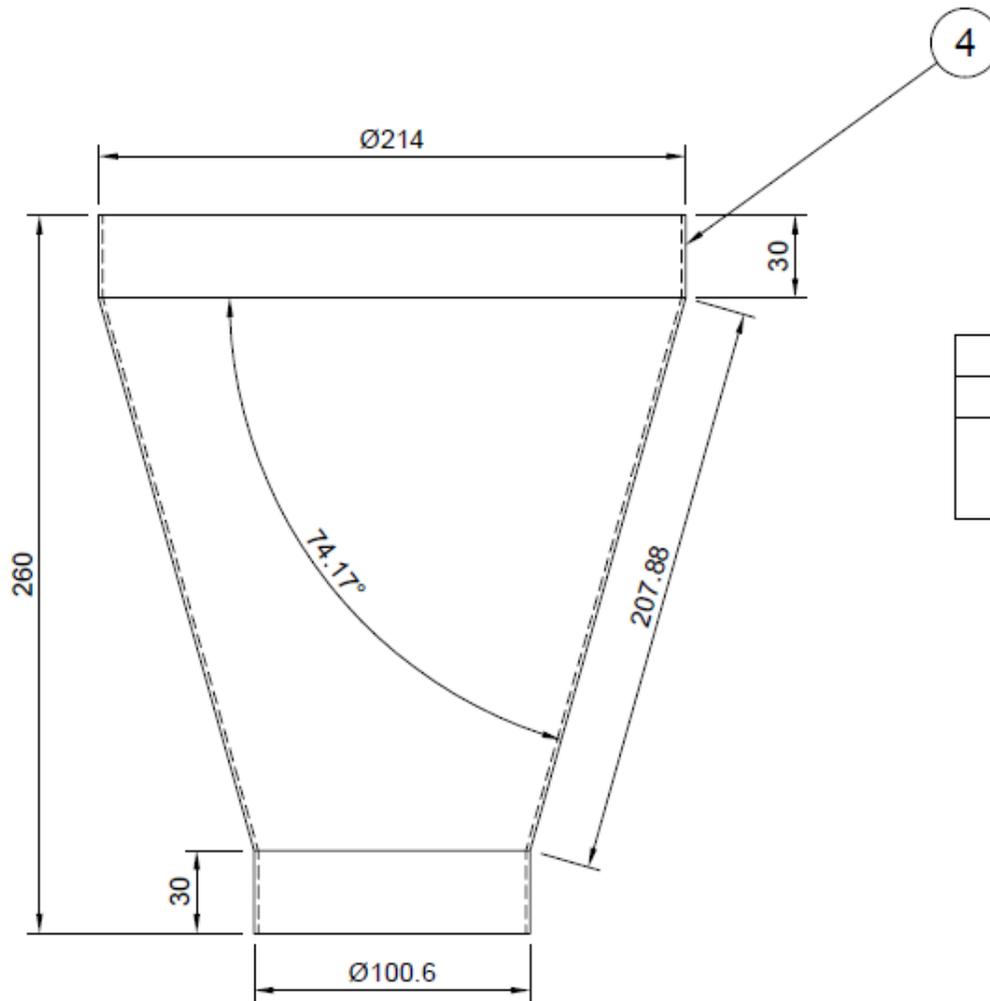
Diseño de: José León	Dibujado por: José León	Aprobado por: Ing. Doménica León	Escala: 1:10	Unidad: mm	
			Tipo de Documento: Plano constructivo		
			Título: Soporte Secador Vertical de Biomasa		DWG No. #2
			Fecha: 02/12/2024		



LISTADO DE COMPONENTES			
NÚMERO	NOMBRE	CANTIDAD	MATERIAL
2	Cámara de secado	1	Acero estructural

La cámara de secado es un conjunto de 2 cilindros de 500mmxØ220, divididos para un mejor ensamblaje. Fabricación en plancha de acero estructural de 1 mm de espesor. Rolada en frío y soldada con electrodo E6011 para mantener su forma cilíndrica.

Diseño de: José León	Dibujado por: José León	Aprobado por: Ing. Doménica León	Escala: 1:6	Unidad: mm
			Tipo de Documento: Plano Constructivo	
			Título Cámara de Secado	
			DWG No. #3	
			Fecha: 02/12/2024	



LISTADO DE COMPONENTES			
NÚMERO	NOMBRE	CANTIDAD	MATERIAL
3	Sistema de Generación de Calor	1	Acero estructural

Sistema de Generación de Calor, conecta la cámara de secado con el ducto flexible.
 Fabricación en plancha de acero estructural de 1mm de espesor.
 Rolada en frío y soldada con electrodo E6011 para mantener su forma cilíndrica.
 Cuenta con perforaciones para acoplar las resistencias eléctricas.

Diseño de: José León	Dibujado por: José León	Aprobado por: Ing. Doménica León	Escala: 1:2	Unidad: mm
			Tipo de Documento: Plano constructivo	
			Título: Sistema de Generación de Calor	DWG No. #4
			Fecha: 02/12/2024	

Apéndice B

GUÍA DE OPERACIÓN DEL SECADOR VERTICAL DE BIOMASA

1. Introducción

El secador vertical de biomasa está diseñado para reducir la humedad de astillas de madera y otros materiales lignocelulósicos de manera eficiente y uniforme. Este equipo es ideal para aplicaciones de investigación y experimentación, garantizando resultados confiables en estudios sobre secado de biomasa.

2. Recomendaciones de Seguridad

- Use equipo de protección personal (guantes, gafas de seguridad y mascarilla si es necesario).
- Asegúrese de que el equipo esté correctamente conectado a tierra para evitar riesgos eléctricos.
- No coloque las manos ni objetos dentro del equipo durante su funcionamiento. El secador alcanza altas temperaturas, lo que podría provocar quemaduras. Además, algunos materiales pueden liberar partículas o vapores que podrían causar alergias o irritaciones.
- Antes de realizar ajustes o mantenimiento, apague el equipo y desconéctelo de la fuente de alimentación.

3. Descripción del Equipo

El equipo consta de los siguientes componentes principales:

- **Cámara de secado:** Espacio donde se introduce la canasta con biomasa para el proceso de secado.
- **Canasta de biomasa:** Contenedor donde se deposita la biomasa a secar.

- **Ventilador centrífugo:** Inyecta el flujo de aire dentro del secador para asegurar una distribución uniforme del calor.
- **Sistema de generación de calor:** Controla la temperatura y potencia del secado.
- **Panel de control:** Permite ajustar la temperatura y controlar la adquisición de datos.
- **Sensores de humedad y temperatura:** Monitorean las condiciones ambientales y el sistema de generación de calor. El sensor de temperatura regula la potencia de las resistencias eléctricas.

4. Preparación del Secador

- Verifique que la canasta de biomasa esté limpia y libre de obstrucciones.
- Asegúrese de que los sensores estén correctamente calibrados.
- Distribuya las astillas de madera de manera uniforme, evitando sobrepasar el peso máximo de muestreo (1 kg).
- Revise que las conexiones eléctricas sean seguras antes de operar el equipo.

5. Procedimiento de Operación

- 1) Prepare la biomasa para el procedimiento de secado. Asegúrese de que el tamaño de las astillas sea adecuado para colocarlas en la canasta.
- 2) Conecte el equipo a la fuente de alimentación.
- 3) Encienda el equipo utilizando el interruptor principal en el panel de control.
- 4) Ajuste la apertura del ventilador centrífugo para un secado uniforme o según el criterio del operador y enciéndalo.
- 5) Configure la temperatura deseada en el panel de control, según los requerimientos del material a secar o el criterio del operador.
- 6) Espere entre 5 y 10 minutos para permitir que la temperatura y el flujo de aire se estabilicen.

- 7) Coloque la canasta con la biomasa dentro del secador vertical e inicie el proceso de secado.
- 8) Si el secado es parte de una investigación, use guantes para retirar la canasta y registre el peso de la biomasa en intervalos de tiempo establecidos.
- 9) Una vez finalizado el secado, apague el sistema de generación de calor.
- 10) Deje el ventilador funcionando durante 5 a 10 minutos para enfriar la cámara.
- 11) Apague el equipo y desconéctelo de la fuente de energía.

6. Mantenimiento

- Limpie la cámara de secado después de cada uso para evitar la acumulación de residuos.
- Revise periódicamente los componentes del sistema de generación de calor y el ventilador.
- Verifique la calibración de los sensores cada 3 meses o después de un uso intensivo.