

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

**Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la
Producción**

“Diseño de un equipo a nivel de laboratorio para el secado de biomasa
lignocelulósica”

PROYECTO INTEGRADOR

Previo la obtención del Título de:

Ingeniero Mecánico

Presentado por:

Jefferson Antonio Lombeida Guillen

GUAYAQUIL - ECUADOR

Año: 2021

DEDICATORIA

El presente proyecto lo dedico a mis padres, quienes han sido siempre una fuente incondicional de apoyo, cariño, confianza y motivación a lo largo de mi carrera.

A mis hermanos, abuelitos, y miembros de mi familia que de alguna manera me hicieron sentir su apoyo y entusiasmo por culminar esta etapa importante en mi vida.

AGRADECIMIENTO

A mis padres, quienes con su trabajo y esfuerzo hicieron posible mi continua preparación académica.

A mi tutora, la PhD. Emérita Delgado, por la guía brindada en el desarrollo del proyecto y por la oportunidad de hacerme parte del mismo.

A mis amigos, por su apoyo incondicional y por hacer de la vida universitaria una etapa inolvidable en mi vida.

DECLARACIÓN EXPRESA

“Los derechos de titularidad y explotación, me corresponde conforme al reglamento de propiedad intelectual de la institución; *Jefferson Antonio Lombeida Guillen* doy mi consentimiento para que la ESPOL realice la comunicación pública de la obra por cualquier medio con el fin de promover la consulta, difusión y uso público de la producción intelectual”


Jefferson Antonio Lombeida Guillen

EVALUADORES

EMERITA
ALEXANDR
A
DELGADO
PLAZA

Firmado digitalmente por
EMERITA ALEXANDRA
DELGADO PLAZA
Nombre de reconocimiento
(DN): cn=EMERITA ALEXANDRA
DELGADO PLAZA,
serialNumber=150921191312,
ou=ENTIDAD DE
CERTIFICACION DE
INFORMACION, o=SECURITY
DATA S.A. 2, c=EC
Fecha: 2021.10.27 20:08:35
-05'00'

PhD. Emérita Delgado Plaza

PROFESOR DE LA MATERIA

EMERITA
ALEXANDR
A DELGADO
PLAZA

Firmado digitalmente por
EMERITA ALEXANDRA
DELGADO PLAZA
Nombre de reconocimiento
(DN): cn=EMERITA ALEXANDRA
DELGADO PLAZA,
serialNumber=150921191312,
ou=ENTIDAD DE CERTIFICACION
DE INFORMACION, o=SECURITY
DATA S.A. 2, c=EC
Fecha: 2021.10.27 20:08:58
-05'00'

PhD. Emérita Delgado Plaza

PROFESOR TUTOR

RESUMEN

La biomasa lignocelulósica proveniente de sectores forestales, agrícolas e industriales, por su potencial energético es considerada como una de las fuentes de energía renovable más rentables a nivel mundial. En relación con el costo logístico varía desde el lugar de producción hasta el centro de acopio donde se realiza el pre-proceso de densificación y reducción de volumen. La biomasa para aplicaciones energéticas se evalúa la humedad como un factor importante para procesos termoquímicos. Por lo tanto, se propone el diseño de un equipo de secado de biomasa lignocelulósica a nivel de laboratorio para la realización de pruebas experimentales con la finalidad de determinar los parámetros óptimos que debe alcanzar la biomasa de la región costa Ecuatoriana para ser utilizada para los procesos antes indicados. Se consideró el diseño de un secador de tipo de lecho fluidizado, donde se determinó la velocidad de fluidización requerida para el secado de astillas de tamaño previamente fijado, y el dimensionamiento de los componentes del equipo implementando conceptos de ingeniería mecánica. Posteriormente, se realiza simulaciones del diseño inicial para analizar el comportamiento fluido dinámico del sistema, utilizando el software de simulación fluido dinámica Solidworks. Como resultado se determinó que la energía necesaria para secar 5 kg debe ser de 4 kW, utilizando un ventilador centrífugo de 4 pulgadas con una potencia instalada de 450 W, elementos que garantizan alcanzar una temperatura de 52 °C y una velocidad del fluido de 2 m/s a la entrada de la cámara de secado. Luego de un análisis de costos se concluye que es factible la construcción de un equipo de secado de biomasa que cumple con los requerimientos de diseño y que a través de los resultados simulados se garantiza una homogénea distribución de las líneas de flujo y temperatura durante el proceso de secado de biomasa.

Palabras Clave: CFD, astillas, biomasa, equipo de laboratorio.

ABSTRACT

Lignocellulosic biomass from the forestry, agricultural and industrial sectors, due to its energy potential, is considered one of the most profitable renewable energy sources worldwide. In relation to the logistics cost, it varies from the place of production to the collection center where the pre-process of densification and volume reduction is carried out. Biomass for energy applications is evaluated humidity as an important factor for thermochemical processes. Therefore, the design of a lignocellulosic biomass drying equipment at the laboratory level is proposed for the realization of experimental tests in order to determine the optimal parameters that the biomass of the Ecuadorian coast region to be used for the aforementioned processes. The design of a fluidized bed type dryer was considered, where the fluidization speed required for drying chips of previously set size was determined, and the sizing of the equipment components implementing mechanical engineering concepts. Subsequently, simulations of the initial design are performed to analyze the fluid dynamic behavior of the system, using Solidworks fluid dynamic simulation software. As a result, it was determined that the energy required to dry 20 kg should be 4 kW, using a 4-inch centrifugal fan with an installed power of 450 W, elements that guarantee reaching a temperature of 52 °C and a fluid speed of 2 m/s at the inlet of the drying chamber. After a cost analysis, it is concluded that it is feasible to build a biomass drying equipment that meets the design requirements and that through the simulated results a homogeneous distribution of the flow and temperature lines is guaranteed during the process of drying of biomass.

Keywords: *CFD, wood chip, biomass, laboratory equipment.*

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN.....	I
ABSTRACT.....	II
ÍNDICE GENERAL.....	III
ABREVIATURAS.....	V
SIMBOLOGÍA.....	VI
ÍNDICE DE FIGURAS.....	IX
ÍNDICE DE TABLAS.....	X
ÍNDICE DE PLANOS.....	XI
CAPÍTULO 1.....	1
1. Introducción.....	1
1.1 Definición del Problema.....	1
1.2 Justificación del proyecto.....	1
1.3 Objetivos.....	2
1.3.1 Objetivo General.....	2
1.3.2 Objetivos Específicos.....	3
1.4 Marco teórico.....	3
1.4.1 Biomasa lignocelulosa.....	3
1.4.2 Secadores para biomasa.....	4
1.4.3 Tamaño de la muestra.....	7
1.4.4 Análisis elemental para el diseño del secador.....	8
1.4.5 Simulación utilizando programas computacionales.....	12
CAPÍTULO 2.....	13
2. Metodología.....	13
2.1 Diseño conceptual.....	14
2.1.1 Requerimientos del diseño.....	14

2.1.2	Alternativas de solución.....	14
2.1.3	Matriz de selección.....	15
2.1.4	Diseño de forma del secador.....	17
2.2	Diseño del secador	18
2.2.1	Análisis térmico del secador	18
2.2.2	Dimensionamiento del equipo	22
2.3	Simulación.....	27
2.3.1	Mallado y propiedades térmicas	28
2.3.2	Simulación termofluido	29
CAPÍTULO 3.....		32
3.	Resultados y Análisis.....	32
3.1	Dimensionamiento del secador	32
3.1.1	Resultados obtenidos de análisis térmico	32
3.1.2	Dimensionamiento y selección de componentes	36
3.2	Simulación termofluido.....	38
3.3	Análisis de costos	40
CAPÍTULO 4.....		42
4.	Conclusiones y Recomendaciones	42
4.1	Conclusiones	42
4.2	Recomendaciones	43

BIBLIOGRAFÍA

APÉNDICES

ABREVIATURAS

ESPOL	Escuela Superior Politécnica del Litoral
FIMCP	Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la Producción
CDTS	Centro de Desarrollo Tecnológico Sustentable
CFD	Fluido Dinámica Computacional
CAD	Diseño asistido computarizado
STEP	Standard for the Exchange of Product Data
SLDASM	SOLIDWORKS Assembly Document
ISO	International Organization for Standardization
FVM	Método de volumen fijo
PCS	Poder calorífico superior
PCI	Poder calorífico inferior

SIMBOLOGÍA

q	Flujo de calor requerido para el proceso de secado [W]
\dot{m}_{air}	Flujo másico de aire [kg/s]
h_f	Entalpia de agua líquida saturada [kJ/kg]
h_g	Entalpia de vapor de agua saturada [kJ/kg]
T_{sec}	Temperatura de secado [°C]
T_{in}	Temperatura de entrada [°C]
T_{inc}	Temperatura a la entrada de la cámara de secado [°C]
Cp_{air}	Calor específico del aire [J/kg. °C]
Cp_{sec}	Calor específico de la madera [J/kg. °C]
Cp_{agua}	Calor específico del agua [J/kg. °C]
t_{sec}	Tiempo teórico de secado [s]
m_{bico}	Masa total de la muestra de astillas a secar [kg]
m_{vap}	Masa de vapor de agua a evaporar [kg]
m_{sec}	Masa de biomasa seca [kg]
m_{agua}	Masa de agua presente en la biomasa [kg]
X_i	Humedad inicial de la muestra [%]
X_f	Humedad final de la muestra [%]
q_{air}	Flujo de calor transmitido por el aire a la cámara de secado [W]
q_{sec}	Flujo de calor requerido para calentar la biomasa seca [W]
q_{agua}	Flujo de calor requerido para calentar la masa de agua [W]
q_{vap}	Flujo de calor para la evaporación del agua [W]
q_{per}	Flujo de calor perdido por transferencia de calor [W]
\bar{U}	Coefficiente global promedio de transferencia de calor [W/m ² °C]
h_i	Coefficiente de transferencia de calor por convección forzada [W/m ² °C]
h_a	Coefficiente de transferencia de calor por convección libre [W/m ² °C]
h_r	Coefficiente de transferencia de calor radiante [W/m ² °C]
k_{air}	Conductividad térmica del aire [W/m °C]

k_{ac}	Conductividad térmica del acero [W/m °C]
Nu	Número de Nuselt
Re	Número de Reynolds
Gr	Número de Grashof
Pr	Número de Prandtl
Ra	Número de Rayleigh
Ar	Número de Arquímedes
β	Coefficiente de expansión térmica volumétrica [K ⁻¹]
μ	Viscosidad dinámica del aire [N.s/m ²]
ν	Viscosidad cinemática del aire [m ² /s]
ε	Emisividad térmica
σ	Constante de Stefan-Boltzmann [W/m ² .K ⁴]
ρ_{air}	Densidad del aire [kg/m ³]
ρ_{bio}	Densidad de la madera [kg/m ³]
d_p	Diámetro esférico equivalente de la partícula [m]
u_{mf}	Velocidad mínima de fluidización [m/s]
ε_{mf}	Porosidad de mínima fluidización
ϕ	Esfericidad de la partícula
g	Aceleración de la gravedad [m/s ²]
\mathcal{P}	Potencia del ventilador [W]
H_{vent}	Carga útil del ventilador [m]
\dot{V}	Flujo volumétrico del aire [m ³ /s]
η	Eficiencia del ventilador [%]
\forall_{ϕ}	Volumen de una esfera [cm ³]
P_{atm}	Presión de la atmosfera [Pa]
z	Altura del nivel de la tubería de entrada del secador [m]
h_L	Pérdidas hidráulicas [m]
L_d	Longitud de la tubería [m]
V_d	Velocidad en la tubería [m/s]
K_L	Coefficiente de pérdida de carga hidráulica
f	Factor de fricción de flujo en la tubería

ϵ	Rugosidad de la tubería [mm]
d	Diámetro de la tubería [mm]
r_1	Radio exterior de la cámara de secado [mm]
r_2	Radio interior de la cámara de secado [mm]
L	Longitud de la cámara de secado [m]
A_D	Área de cámara de secado [m ²]

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Relación entre poder calorífico y humedad (HARGASSNER).....	10
Figura 1.2 Curva de secado referencial (Dávila, 2017).....	11
Figura 1.3 Curva de secado para diferentes temperaturas de secado (Moreno M., 1991)	11
Figura 2.1 Diagrama de metodología de diseño	13
Figura 2.2 Esquema de secador de biomasa	17
Figura 2.3 Diagrama del sistema de secado	18
Figura 2.4 Condiciones iniciales de la simulación.....	30
Figura 2.5 a) ventana de property manager. Condiciones de frontera: b) entrada del secador. C) salida del secador	31
Figura 3.1 Calor neto entregado a los elementos del sistema de secado	34
Figura 3.2 Temperatura de secado vs tiempo estimado de secado, para diferentes tamaños de astilla (cálculos teóricos, Matlab)	35
Figura 3.3 Potencia requerida para el secado vs tiempo, para diferentes tamaños de astilla (cálculos teóricos, Matlab)	35
Figura 3.4 Modelo de secador para biomasa lignocelulósica	36
Figura 3.5 a) modelo de ventilador centrifugo de 4 in. b) modelo de tubería PVC de 110 mm.	37
Figura 3.6 Modelo de la cámara de distribución	38
Figura 3.7 a) diagrama de corte en la base de cámara de secado con escala de colores por velocidad. b) diagrama de corte en la base de cámara de secado con escala de colores por temperatura.	39
Figura 3.8 a) vista lateral de la cámara de secado con escala de colores por velocidad. b) vista lateral de la cámara de secado con escala de colores por temperatura.	40

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Norma UNE-CEN/TS 14961	8
Tabla 1.2 Norma ÖNORM M7133	8
Tabla 2.1 Criterios de evaluación y su ponderación	15
Tabla 2.2 Matriz de selección	16
Tabla 2.3. Datos para cálculo de coeficientes de transferencia de calor	21
Tabla 2.4 Dimensiones de una astilla de madera	24
Tabla 2.5 Parámetros de la ecuación de energía de flujo estacionario	25
Tabla 2.6 Coeficientes de pérdida de carga hidráulica	26
Tabla 2.7 Datos fijados para el desarrollo del cálculo	26
Tabla 2.8 Comandos de la configuración manual del mallado	28
Tabla 3.1 Datos relevantes obtenidos de los cálculos	32
Tabla 3.2 Calor neto distribuido entre elementos del sistema	33
Tabla 3.3 Parámetros de funcionamiento de ventilador centrífugo	37
Tabla 3.4 Costo estimado de construcción	40
Tabla 3.5 Costo de operación	41

ÍNDICE DE PLANOS

- PLANO 1 Lista de piezas del equipo de secado
- PLANO 2 Equipo de secado
- PLANO 3 Calentador de flujo
- PLANO 4 Expansión gradual
- PLANO 5 Cámara de distribución
- PLANO 6 Cámara de secado
- PLANO 7 Electric blower (4 PULG.)

CAPÍTULO 1

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Definición del Problema

La biomasa residual es considerada como una alternativa de los combustibles fósiles para la generación de calor a través de la combustión de biomasa seca debido a su alto potencial energético. La biomasa lignocelulósica constituye esencialmente la porción fibrosa de las plantas provenientes de residuos forestales, agrícolas e industriales; siendo el material sólido usado para la elaboración de biocombustibles como pellets y briquetas. Para la utilización de los biocombustibles sólidos es necesario analizar la humedad de la materia prima final al pasar por el proceso de secado. Como parte de la investigación realizada en el Centro de Desarrollo Tecnológico Sustentable de la FIMCP y el Departamento de Ingeniería Rural de la Politécnica de Valencia se requiere un secador a nivel de laboratorio para realizar pruebas experimentales de diversas muestras de biomasa leñosa con la finalidad de utilizarlas para pellets.

Si bien es cierto, este proyecto aborda todos los conceptos técnicos aprendidos en la carrera de ingeniería Mecánica, también se involucra aspectos globales, económicos, seguridad socioeconómica y social, que irían desde el aprovechamiento de los residuos del campo hasta el procesamiento productivo de la materia generando posibles puestos de trabajo para la comunidades. Con relación al aspecto ambiental el uso de esta biomasa para fabricación de otro producto con mayor rentabilidad elimina la quema discriminada del residuo en el suelo, que generan emisiones de dióxido de carbono y material particulado en la zona, lo cual se relaciona indirectamente en la salud de la población al inhalar el humo.

1.2 Justificación del proyecto

Los materiales lignocelulósicos por su composición química y celular son aprovechados principalmente como biocombustible sólido para la generación

de calor a través de procesos termoquímicos como la combustión para la generación eléctrica. También se utilizan en hornos cerámicos de panadería, uso de calefacción centralizada en instalaciones de pequeño o mediano tamaño, entre otras aplicaciones. Por su abundante cantidad en el medio y por su alto potencial energético se considera a la biomasa lignocelulósica como una de las fuentes de energía renovable más rentables a nivel mundial.

En el ámbito de escala Nacional, analizando las cinco principales actividades de *producción agrícola* de cada provincia, se estima una cantidad de residuos en las etapas de cosecha y pos cosecha de 17,7 millones de toneladas anuales, mientras que los residuos de *origen forestal* se estiman en 206.519 toneladas por año. Siendo los mayores productores las provincias de Imbabura, Los Ríos, Cotopaxi y Pichincha. Es por ello, que el aprovechamiento de la biomasa lignocelulósica puede llegar a generar recursos económicos en la región, abriendo paso a nuevas fuentes de trabajo como implicación del requerimiento de procedimientos logísticos y de procesamiento de material.

Dentro de los medios de tratamiento de residuos, es indispensable analizar el proceso de secado, donde el material debe contener la cantidad de humedad adecuada para mantenerse en camino a su continuo tratamiento. Dependiendo previamente de varios factores en el proceso de secado como: la velocidad y distribución del aire, la temperatura del agente secador, tiempo y espesor de las muestras (ESIN, 2014).

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

Diseñar un secador a nivel de laboratorio con una capacidad de 5 kg para el secado de biomasa lignocelulósica para ello, se implementarán conceptos de ingeniería mecánica y programas de simulación fluido dinámico, con el fin de utilizarlos para la evaluación de parámetros representativos de la biomasa local.

1.3.2 Objetivos Específicos

1. Discriminar las diferentes tecnologías de secadores para biomasa existente a nivel nacional e internacional con la finalidad de la obtención de un diseño adecuado a nivel de laboratorio.
2. Diseñar un equipo para laboratorio con capacidad de 5 kg para el secado de biomasa utilizando conceptos de ingeniería y programas de simulación CFD.
3. Determinar el sesgo del funcionamiento del equipo utilizando los resultados obtenidos en la simulación y datos teóricos.

1.4 Marco teórico

1.4.1 Biomasa lignocelulosa

Históricamente el proceso de combustión para la obtención de calor y energía, es el uso más antiguo y primitivo que el hombre le ha dado a la biomasa lignocelulósica, la biomasa es considerada como una gran alternativa al uso de combustibles de origen fósil.

La lignocelulosa es una de las estructuras que componen a la materia seca vegetal denominada biomasa proveniente generalmente de residuos agrícolas y forestales. El material lignocelulósico está compuesto principalmente por tres tipos de polímeros; celulosa y hemicelulosa que son polímeros de carbohidratos y representan un porcentaje aproximado del 60-80%; y lignina, un polímero aromático que representa el 20-35% del total. Minoritariamente la biomasa lignocelulósica posee otros componentes como grasas, proteínas, resinas, entre otras, que no representan más del 4-10% del peso total. Tomando como ejemplo la madera; tiene una composición promedio del 50% celulosa y 25% hemicelulosa, mientras que la lignina representa el 25% restante (Almenares et al., 2011). La celulosa es elementalmente el polímero más abundante en la tierra y junto con la hemicelulosa forman parte de la pared celular de las plantas, sin embargo, se pueden destacar notables y

fundamentales diferencias entre estas dos: la celulosa está compuesta únicamente por unidades de glucopiranosas y es un polímero puramente lineal. La hemicelulosa puede contener polímeros con diferentes tipos de azúcares y a diferencia de la celulosa, esta puede constituirse por una, dos o varias unidades de polímeros. La principal función de la hemicelulosa es brindar una correcta unión entre la celulosa y la lignina. Después de la celulosa y la hemicelulosa, al ser uno de los elementos predominantes en el material lignocelulósico, la lignina es el tercer polímero natural más abundante en la tierra, y es el encargado de darle soporte a las fibras polisacáridas, y colaborar en el transporte de agua y nutrientes (Vergara Alarcón, 2019).

La biomasa lignocelulósica a pesar de estar presente de manera natural principalmente en bosques, para fines de producción energética se considera de forma habitual la biomasa de origen residual, subclasificándose esta última en: residuos forestales, residuos agrícolas y residuos industriales. Dentro de los residuos forestales y agrícolas podemos citar; restos de trabajos de aserrío, ebanistería y cortes por tala de árboles de astillas, cortezas, ramas, entre otras. Se estima que, en labores forestales con fines comerciales de la madera se aprovecha apenas el 20% de la cantidad total del proceso de talado, un 40% corresponde a restos como ramas, raíces y cortezas, mientras que el 40% restante se atribuye a residuos del proceso de aserrado como: astillas y aserrín. (de Lucas Herguedas & del Peso Taranco, 2012).

1.4.2 Secadores para biomasa

Para proceder con la clasificación de los secadores para biomasa presentados en la revisión bibliográfica, consideran varios parámetros de diseño tal como; temperatura de operación, la mecánica del fluido de secado o del material sólido a secarse.

Partiendo del estado de movimiento de la biomasa, los secadores se clasifican en dos grupos esenciales como: secadores estacionarios y continuos.

Dentro de los **secadores estacionarios** tenemos secadores de túnel y de lecho fluidizado, donde el sólido a secarse se mantiene estático mientras a través de él fluye una corriente continua de aire.

En los **secadores continuos** se ven involucrados sistemas en los cuales el material sólido se encuentra en constante movimiento independientemente del estado de movimiento del fluido, entre estos tenemos: secadores rotatorios, neumáticos (flash) y en cascadas (Abarca & Aldaz, 2014).

Realizando un análisis más amplio del funcionamiento de los secadores antes mencionados, podemos citar lo siguiente;

- Secador de túnel consiste en el alojamiento de bandejas o carretillas dentro de un túnel de viento por el cual fluye generalmente aire precalentado impulsado por un ventilador. El material a secar descansa sobre bandejas de manera que a través de una transferencia de calor por convección forzada se va reduciendo la cantidad de humedad presente en el material sólido. Este tipo de secador es empleado mayormente en la industria agrícola, para el secado de granos o semillas (Fito, 2016).
- Secador de lecho fluidizado, reside en la circulación de una corriente de aire a una mínima velocidad estimada (de fluidización) a lo largo de la base del lecho de las astillas a secar. Este tipo de secador está compuesto de cuatro elementos fundamentales: cámara de distribución, cámara de secado, generador de flujo y sistema de calentamiento de aire.

La fluidización es un estado que se alcanza cuando las partículas sólidas son soportadas por completo sobre el flujo de aire que pasa por su base. En ocasiones donde el material es demasiado húmedo, es necesario que la velocidad de fluidización se incremente para contrarrestar las fuerzas de cohesión entre la base del lecho de astillas con la superficie de la cámara de secado. La velocidad de

fluidización de operación se debe mantener en un rango entre dos y cuatro veces la velocidad mínima de fluidización (Egea, 2020).

- Los secadores de tipo rotatorios son los más utilizados en la industria de biomasa, debido a su capacidad de operatividad en óptimas condiciones con varios tipos y tamaños de residuos. El proceso de secado rotatorio consiste en un tambor giratorio dentro del cual fluye una corriente de aire caliente exponiendo al material sólido a un contacto directo con el fluido. La mayoría de los secadores de este tipo tienen incorporado el sistema de calentamiento junto con el generador de flujo, para poder proporcionar una temperatura de entrada de mejor uniformidad. El tambor giratorio del secador se lo puede encontrar operando de forma vertical u horizontal, puesto que en ambos casos las partículas sólidas se encuentran suspendidas o pegadas a las paredes del tambor debido al efecto de centrifugación (Abarca & Aldaz, 2014).
- Los secadores neumáticos; tienen un particular funcionamiento donde transporta la materia sólida cortada muy pequeña a lo largo de la cámara de secado. Este transporte de biomasa se lleva a cabo gracias a una fuerte corriente del agente secador, el cual recoge y traslada la biomasa desde la entrada del secador hasta un torbellino localizado en el lado opuesto de la cámara de secado, siendo el encargado de separar las partículas secas para despacharlas mientras que el resto de la biomasa que aún no alcanza la humedad deseada es retornada al inicio del trayecto para proseguir con el proceso de secado.

El consumo energético del diseño se ve acrecentado por las altas velocidades de flujo que demanda el proceso y además, porque se requiere una etapa adicional de triturado de materia muy pequeña que otros secadores no poseen. A pesar de las limitaciones y demanda energética, este proceso de secado es mucho más rápido comparados con los otros modelos anteriormente presentados (SEI-CONTRERAS, 2021).

- Los secadores en cascada son comunes en el ámbito agroindustrial debido que se permite manejar grandes cantidades de biomasa. La operación de estos secadores involucra aspectos más naturales como la fuerza de gravitación, donde el proceso de secado consiste en dejar caer de una altura considerable las partículas sólidas dentro de un gran acopiamiento. De cierta forma se puede considerar este diseño como un secador de lecho fluidizado, puesto que, en ciertas ocasiones, el elemento de transporte es un flujo de aire caliente. Una de sus desventajas del modelo es el costo de mantenimiento de las superficies del secador al ser propensas a la corrosión.

Por otra parte, es necesario indicar que en ciertos tipos de secadores estacionarios, se suele aprovechar la energía solar como sistema de calentamiento, haciendo uso de colectores solares que le proporcionan calor a la cámara de secado.

1.4.3 Tamaño de la muestra

El tamaño ideal que deben tener el residuo lignocelulósico o biomasa forestal para ingresar al proceso de secado, no existe una referencia clara de lo más apropiado, lo cual procedemos a describir este apartado en relación a su utilidad final.

Empezamos indicando que las astillas procedentes de los aserraderos y ebanistería son utilizadas como materia prima como biocombustibles sólidos, y, su elaboración se rige bajo normas estatales de origen europeo, que determinan estándares de calidad para la astilla según su tamaño y humedad. Entre las principales y más importantes normas tenemos: la norma UNE-CEN/TS 14961 de origen Español y la norma ÖNORM M7133 de origen Austriaco, siendo esta última, pionera en estándares de calidad de astillas (HARGASSNER). En la tabla 1.1 y 1.2 se presentan los tamaños de las astillas por cada norma.

Tabla 1.1 Norma UNE-CEN/TS 14961

Dimensiones	Fracción fina < 5%	Fracción principal > 80%	Fracción gruesa < 1%
P16	< 1 [mm]	3,5 – 16 [mm]	45 - 85 [mm]
P45	< 1 [mm]	3,5 – 45 [mm]	> 63 [mm]
P63	< 1 [mm]	3,5 – 63 [mm]	> 100 [mm]
P100	< 1 [mm]	3,5 – 100 [mm]	> 203 [mm]

Tabla 1.2 Norma ÖNORM M7133

Dimensiones	Fracción fina 4% [mm]	Fracción pequeña 20% [mm]	Fracción principal 60-100% [mm]	Fracción gruesa 20% [mm]	Sección max. [cm ²]	Longitud max. [cm]
G30	< 1	1 - 2,8	2,8 - 16	> 16	3	8,5
G50	< 1	1 – 5,6	5,6 – 31,5	> 31,5	5	12
G100	< 1	1 - 11,2	11,2 - 63	> 63	10	25

En relación al aserrín y virutas que también provienen de la industria del aserrío, no existen normas de calidad como tal, sin embargo, Arroyo Vinuesa (2016) en su trabajo menciona que el tamaño común de las partículas de aserrín fluctúa entre 1 y 5 mm, mientras que las virutas provenientes de la fricción ente la madera y herramientas de corte pueden alcanzar tamaños que van desde los 3 mm hasta 30 mm.

En relación con los residuos de poda y trozos de tala de árboles considerados como residuos, no se evidencian trabajos que nos garanticen cual es el tamaño recomendable para triturar la madera, antes del secado. Es evidente, que una biomasa con mayor humedad y tamaño de muestra requiere más tiempo de secado y por ende implica mayor consumo de energía.

1.4.4 Análisis elemental para el diseño del secador

Para el diseño del secador para biomasa lignocelulósica es necesario tomar en consideración varios aspectos y parámetros relacionados con

las propiedades físicas y químicas del material, como también los fenómenos físicos que posibilitaran la transferencia energética necesaria para el proceso de secado.

Empezamos considerando el agente físico responsable del proceso fundamental de este sistema, como es la **transferencia de calor**, mencionando que debido a la naturaleza del problema es necesaria la aplicación de transferencia de calor por convección forzada utilizando una corriente de aire a cierta temperatura para la remoción de la cantidad de agua presente en la muestra sólida.

Uno de los parámetros a considerar para el diseño es el porcentaje de humedad presente en las astillas que representa un factor predominante en el análisis térmico. La **humedad** es la cantidad de agua contenida en la muestra sólida medida con respecto al peso total de la muestra. Es importante cuantificar esta variable, debido a que el porcentaje de humedad nos marca el punto inicial y final por transferencia de masa en el momento de calcular el flujo y temperatura del aire adecuados para la remoción de humedad de la biomasa.

El **poder calorífico** de un material se define como la energía liberada en forma de calor. El poder calorífico de un material depende de cierta forma, del porcentaje de humedad presente en el material, donde el agua presente en el producto se encuentra en forma de líquido o de vapor. A partir de lo antes mencionada se clasifica en: poder calorífico superior (PCS) cuando el agua contenida es liberada en forma de vapor al momento de la combustión o poder calorífico inferior (PCI) cuando el agua como producto de combustión se condensa por completo, rescatando el calor de vaporización (Çengel, 2019).

En el gráfico 1.1 se puede apreciar el poder calorífico de materiales lignocelulósicos (pellets, leña y astillas) para un cierto porcentaje de humedad correspondiente.

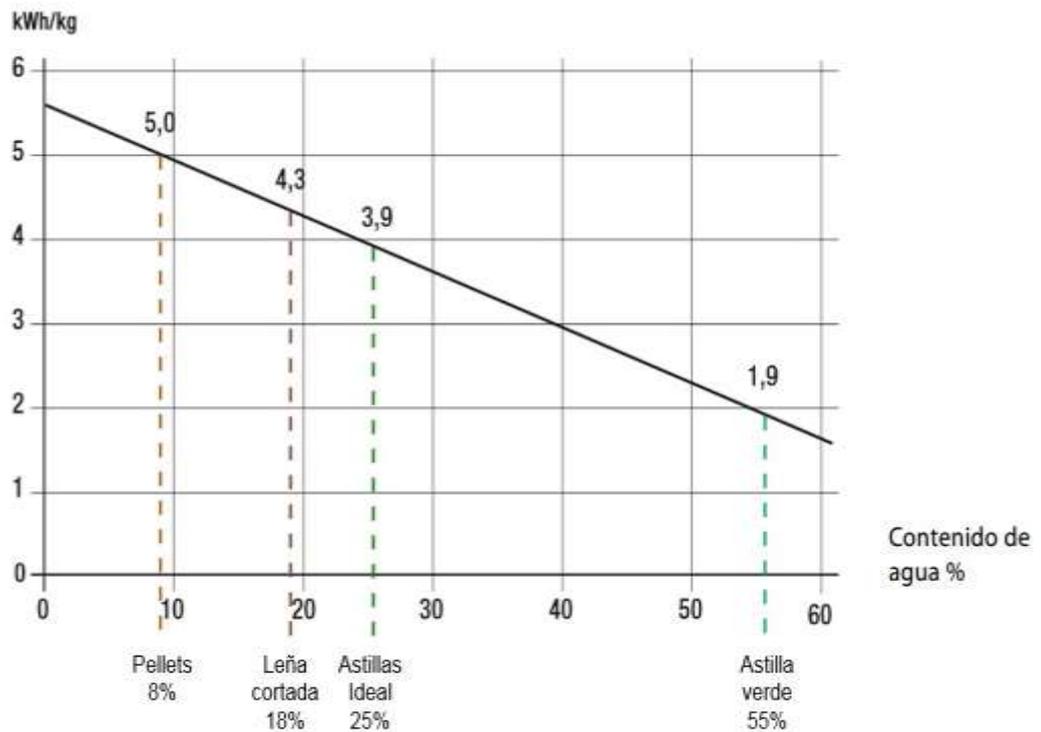


Figura 1.1 Relación entre poder calorífico y humedad (HARGASSNER)

Otro aspecto que se debe considerar para calificar la calidad de biomasa es la **densidad aparente** de un material, la cual mide la cantidad de masa contenida en una unidad de volumen, siendo los espacios entre partículas debidos a los procesos de prensado o compactación.

Es oportuno continuar escribiendo este apartado haciendo referencia a la **curva de secado**, presentada en la figura 1.2, donde se ilustra el cambio de contenido de humedad con respecto al tiempo de secado. En el grafico se pueden notar segmentos de la curva con características distintivas de las que podemos hacer mención. En el tramo AB se aprecia el periodo inicial de secado que da paso al tramo BC donde se aprecia una curva de secado con tendencia lineal donde la velocidad de secado se mantiene constante. A partir del punto crítico 'C' se ve como la línea recta tiende a curvarse formando una asíntota horizontal con el valor de humedad mínima (Dávila, 2017).

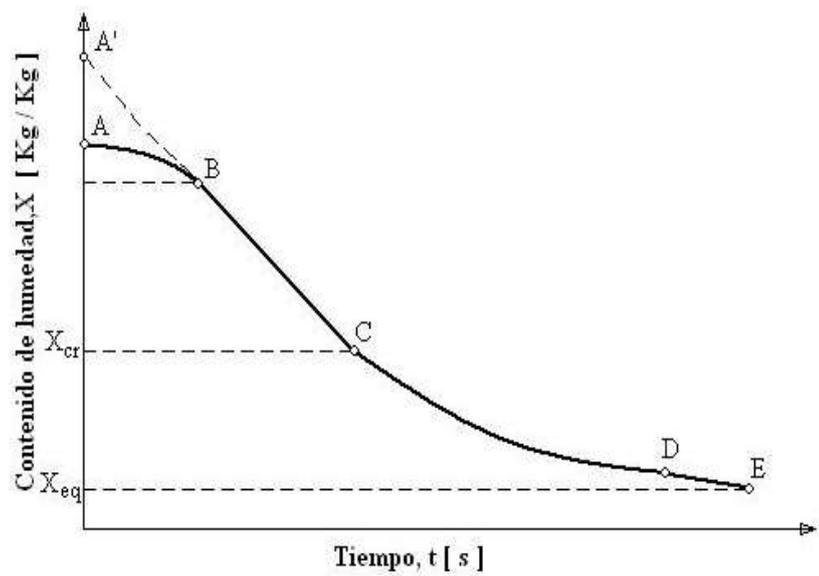


Figura 1.2 Curva de secado referencial (Dávila, 2017)

A manera de ejemplo en la Figura 1.3 se presenta la curva de secado de la astilla del mismo tamaño analizada a diferentes temperaturas de secado. Se pueden apreciar los segmentos mencionados anteriormente, variando en relación al tiempo y la capacidad de elijación del agua ligada a la astilla, además de la velocidad de aire caliente.

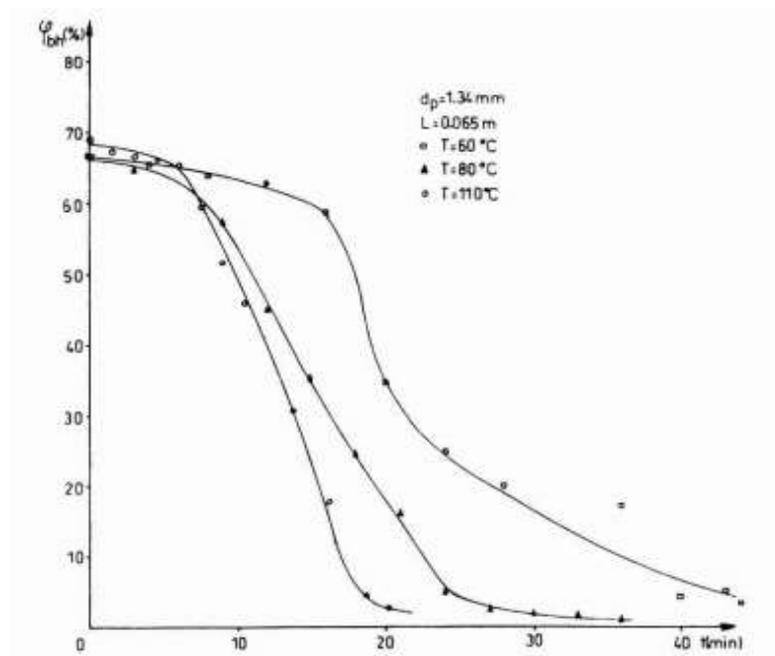


Figura 1.3 Curva de secado para diferentes temperaturas de secado (Moreno M., 1991)

1.4.5 Simulación utilizando programas computacionales

Debido a la necesidad de cerciorar las inferencias o hipótesis previamente planteadas sobre el comportamiento de un fluido en torno a un diseño, es de suma importancia la disposición de un software de simulación dinámica de fluidos computacional (CFD) como lo es Solidworks.

Solidworks es un software de diseño CAD 3D que brinda a sus usuarios una gama de herramientas de análisis que facilitan la predicción de comportamiento físico de un producto a través de pruebas virtuales de sus correspondientes modelos CAD. Entre dichas herramientas de simulación, 'Flow Simulation' ofrece una solución de dinámica de fluidos computacional que permite simular de forma rápida y sencilla flujos de líquido y gas a través y alrededor de diseños CAD, así como también transferencia del calor y fuerzas vinculadas con fenómenos fluido dinámicos. Esta herramienta utiliza un método de volumen fijo (Finite Volume Method, FVM) para determinar el rendimiento de un producto; además posibilita la realización de un análisis dependiente del tiempo, utilizando las ecuaciones de Navier-Stokes y el cálculo del análisis transitorio (Solidworks Corporation, 2021).

Es necesario mencionar que la simulación en general es un proceso indispensable para determinar el rendimiento y calidad de un producto, reduciendo así variables como el tiempo y costo de producción en la creación de prototipos y realización de pruebas experimentales.

CAPÍTULO 2

2. METODOLOGÍA

Para la elaboración del diseño de un secador para biomasa lignocelulósica se consideró la metodología descrita en la figura 2.1 que abarca los principales procedimientos a tomar en cuenta en el diseño del equipo.

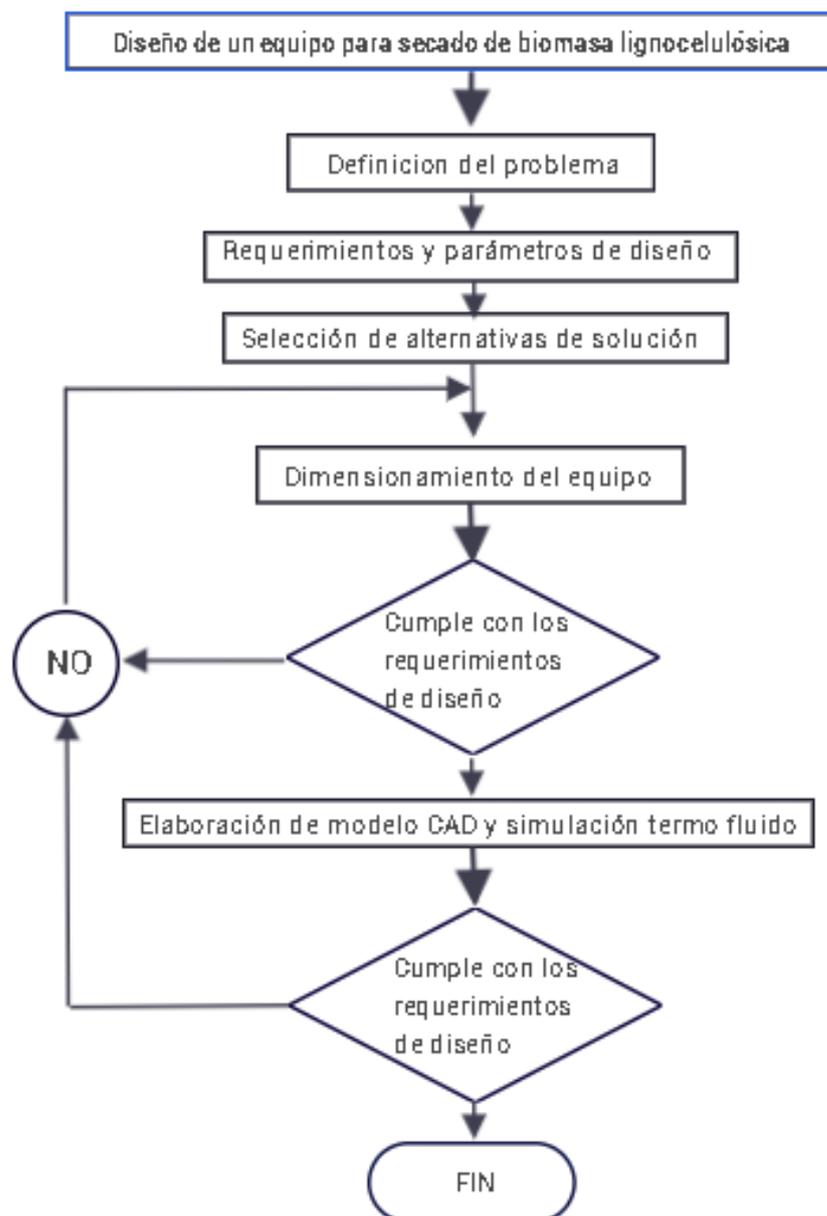


Figura 2.1 Diagrama de metodología de diseño

2.1 Diseño conceptual

2.1.1 Requerimientos del diseño

Es necesario recalcar que el objetivo de un secador de biomasa es remover la cantidad de humedad presente en una muestra de materia sólida, por tanto, no se puede empezar sin antes analizar los porcentajes de humedad que la biomasa debe contener para su posterior utilización. Tomando como referencia varias normas de calidad para biocombustibles sólidos, como la norma CEN/TS 14961 y la norma ÖNORM M 7135 se puede considerar un porcentaje de humedad final de secado no mayor al 10% para el diseño del secador (Neobisur).

Por otra parte, al tratarse de un equipo con fines investigativos y por tanto a escala de laboratorio, es oportuno tomar en consideración el tamaño y espacio que ocuparía dentro de una instalación de este tipo. Dicho de esta manera, existen otras variables como la capacidad de secado y el consumo energético que se verían minimizadas por el mismo hecho de la disponibilidad espacial y energética en un centro de investigación. Habiendo así planteado en los objetivos del proyecto, alcanzar una capacidad de secado de 5 kg de biomasa.

Finalmente, el tiempo de secado al ser una variable que depende de otros factores como la capacidad de secado, las condiciones iniciales de la biomasa y el agente secador, podemos fijar como meta, que la duración del proceso de secado se encuentre en un rango de 45 a 60 minutos. Sin embargo, es un factor para sacrificar debido a que nuestro diseño no se lo realiza con fines comerciales, donde la capacidad y tiempo de secado serían aspectos a optimizar.

2.1.2 Alternativas de solución

Considerando que el secador para biomasa lignocelulósica se lo empleará para la realización de pruebas experimentales, cumplimos con los requerimientos anteriormente planteados. Se procede el análisis con las siguientes alternativas de valoración:

- A. Secador neumático: el diseño de un secador de partículas sólidas que transporta materia mediante aire comprimido y tritura la misma en partículas más pequeñas, calentamiento del agente secador, un sistema de separación de las partículas sólidas y retorno de la materia restante para su continuo proceso de secado.
- B. Secador de lecho fluidizado: diseño de un equipo de secado que incluye una cámara de distribución, una cámara de secado, un generador de flujo impulsado por un ventilador centrífugo y calentamiento de aire por resistencias térmicas.
- C. Secador de tipo rotatorio: diseño de un equipo de secado accionado por un sistema de rotación con la capacidad de hacer girar un tambor cilíndrico para el centrifugado de partículas sólidas. Adicional a esto se requiere de una corriente de aire precalentado fluyendo en dirección del eje de rotación del tambor.
- D. Secador de túnel: diseño de un equipo de secado con la capacidad de alojar bandejas o carretillas para la materia sólida. El flujo de aire es impulsado a través de un túnel de viento por un ventilador axial y calentado con resistencias térmicas.

2.1.3 Matriz de selección

Tabla 2.1 Criterios de evaluación y su ponderación

Criterio	Ponderación	Descripción
Capacidad de secado	0.20	Masa (kg) total de biomasa para secado
Costo de construcción y mantenimiento	0.20	Costo de material, equipos y mecanización de secador
Tiempo de secado	0.10	Tiempo promedio de secado
Espacio disponible	0.15	Espacio ocupado por el equipo dentro del laboratorio
Consumo energético	0.25	Potencia requerida para impulsión y calentamiento de agente secador
Tamaño de la muestra	0.10	Disponibilidad del equipo para secado de muestras de cierto tamaño

Para la elección de la mejor alternativa de solución se ha realizado la selección de diferentes factores de evaluación de alternativa

considerando los requerimientos, limitaciones y parámetros de diseño planteados anteriormente. En la tabla 2.1 se muestran dichos criterios de evaluación con sus respectivos porcentajes de valor y una pequeña descripción del mismo.

En la tabla 2.2 se muestra la matriz de selección de la mejor alternativa de solución. Los valores de calificación van de 1 a 5, siendo 5 el valor que cumple de mejor manera el criterio de evaluación.

Tabla 2.2 Matriz de selección

Criterio	Peso	Alternativas de secador							
		Neumático (A)		De lecho fluidizado (B)		Rotatorio (C)		De túnel (D)	
Capacidad de secado	0.20	5	1.00	5	1.00	5	1.00	3	0.60
Costo de construcción y mantenimiento	0.20	1	0.20	4	0.80	1	0.20	4	0.80
Tiempo de secado	0.10	5	0.50	3	0.30	4	0.40	1	0.10
Espacio disponible	0.15	2	0.30	3	0.45	3	0.45	2	0.30
Consumo energético	0.25	2	0.50	4	1.00	2	0.50	3	0.75
Tamaño de la muestra	0.10	1	0.10	3	0.30	5	0.50	4	0.40
TOTAL	1.00		2.60		3.85		3.05		2.95

Siguiendo el proceso de selección de la mejor alternativa de solución se determinó al secador de lecho fluidizado como la alternativa que mejor se ajusta a los parámetros y requerimientos de diseño. Esta alternativa posiblemente no nos otorgue el tiempo más corto del proceso de secado, sin embargo, la importancia de este criterio se veía superada por el bajo costo de construcción que se presupuesta para el equipo debido a que

otras alternativas requieren del uso de equipos adicionales para posibilitar su funcionamiento.

Un factor determinante en la selección de alternativas es el consumo energético que demanda cada una de las alternativas, dado que el secador de lecho fluidizado requiere de una velocidad mínima de fluidización, aspecto en el que, en comparación con otras alternativas significa una disminución del consumo eléctrico.

2.1.4 Diseño de forma del secador

En la figura 2.2 se muestra un esquema del secador de lecho fluidizado en el que se aprecian los cuatro elementos principales que componen este tipo de secador. El generador de flujo es el equipo encargado de suministrar la cantidad de aire necesaria con la velocidad adecuada para la fluidización. Para cumplir con esta función, se podría elegir un ventilador de tipo axial o centrífugo dependiendo de los requerimientos que los cálculos nos presenten más adelante, debido a que para la selección del mismo se debe considerar el flujo de aire adecuado, la caída de presión dentro del secador, la forma del conducto y la potencia necesaria para abastecer de aire al secador.

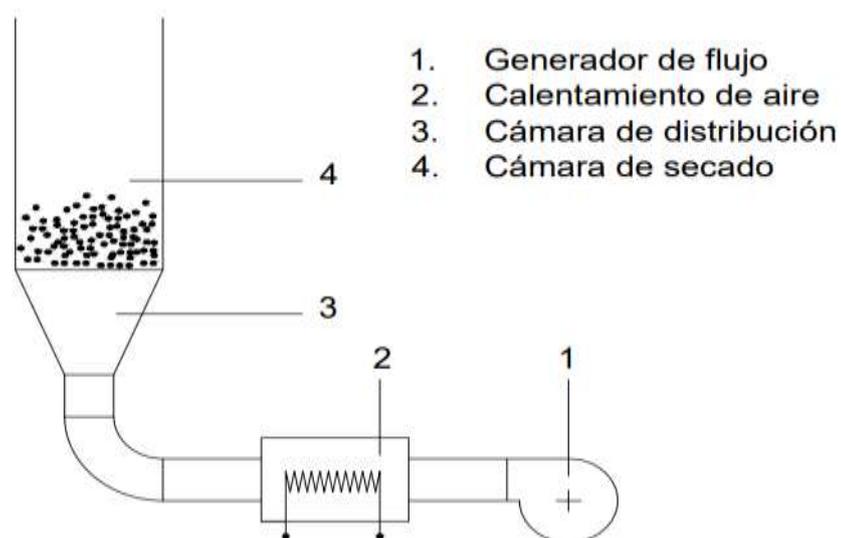


Figura 2.2 Esquema de secador de biomasa

El calentamiento de aire toma lugar en el espacio previo a la cámara de secado, dado que el flujo proveniente del generador debe tener el tiempo y espacio suficiente para alcanzar la temperatura de secado que posibilitará el proceso de secado. En esta cámara del secador se deberá llevar a cabo el suministro de calor requerido, para lo que se puede hacer uso de un arreglo de resistencias térmicas.

La cámara de distribución es un conducto de forma cónica que le brindará al flujo de aire una mejor uniformidad a la entrada de la cámara de secado, para asegurar la correcta distribución en la base del lecho. La cámara de secado está constituida por un tanque cilíndrico abierto a la atmosfera por un extremo y conectado a la cámara de distribución por el otro. Entre estas dos cámaras se debe incluir una malla o plancha con pequeños orificios que no superen el diámetro de las muestras para evitar filtraciones a lo largo del conducto de secado y ocasionen posibles obstaculaciones o daños a los demás componentes del secador.

2.2 Diseño del secador

2.2.1 Análisis térmico del secador

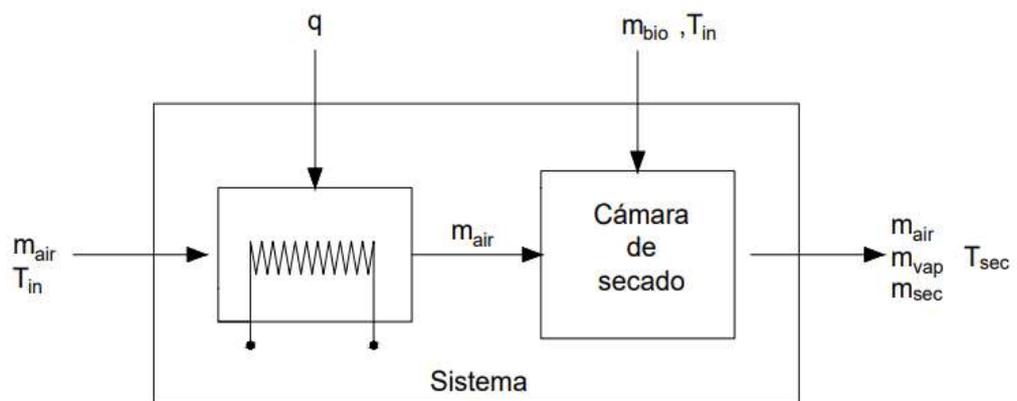


Figura 2.3 Diagrama del sistema de secado

Para determinar la cantidad de energía requerida en la evaporación del porcentaje de humedad de la biomasa es necesario realizar un balance energético obedeciendo a la primera ley de la termodinámica o

conservación de la energía del sistema durante el proceso. Para esto ha servido de ayuda un diagrama que muestra los elementos involucrados en el sistema de secado que se puede observar en la figura 2.3.

De lo anteriormente mencionado y obedeciendo a la ley de conservación de energía para el sistema de secado tenemos:

$$E_{entrada} - E_{salida} = \Delta E_{sistema}$$

$$\frac{d}{dt} \left(Q - \dot{m}_{air} (h_o - h_i)_{air} - m_{vap} (h_g - h_f) - m_{bio} C p_{bio} (T_{sec} - T_{in}) \right) = \frac{d}{dt} (\Delta E_{sistema})$$

$$q = \dot{m}_{air} C p_{air} \Delta T_s + \frac{1}{t_{sec}} (m_{vap} h_{fg} + m_{sec} C p_{sec} \Delta T_s + m_{agua} C p_{agua} \Delta T_s) \quad (2.1)$$

$$\Delta T_s = T_{sec} - T_{in}$$

Donde, q es el flujo de calor requerido para el proceso de secado (W), \dot{m}_{air} es el flujo másico de aire (kg/s), h_f y h_g son las entalpías del agua y vapor saturados a la temperatura de secado (J/kg), T_{sec} y T_{in} son las temperaturas de secado y de entrada (°C), t_{sec} tiempo del proceso de secado (s), $C p_{air}$ el calor específico del aire, $C p_{sec}$ el calor específico de las astillas de madera y $C p_{agua}$ el calor específico del agua (J/kg. °C).

De las variables mostradas en la ecuación (2.1) las masas desconocidas se pueden relacionar con la capacidad de biomasa a secar de la siguiente manera:

$$m_{bio} = m_{sec} + m_{agua} \quad (2.2)$$

$$m_{agua} = m_{sec} (X_i) \quad (2.3)$$

$$m_{vap} = m_{sec} (X_i - X_f) \quad (2.4)$$

Siendo, m_{bio} la masa total de la muestra de astillas a secar (kg), m_{vap} la masa de vapor de agua a evaporar (kg), m_{sec} la masa de biomasa seca (kg), m_{agua} la masa de agua presente en la biomasa como humedad (kg), X_i y X_f la humedad inicial y final de la muestra.

Para la estimación de pérdidas térmicas debido a la transferencia de calor por conducción en las paredes del secador, la transferencia de calor por convección forzada dentro del secador y la transferencia de calor por convección libre y radiación en los alrededores del secador, se hizo un análisis de pérdidas y ganancias de calor en la cámara de secado.

$$q_{air} = q_{sec} + q_{agua} + q_{vap} + q_{per} \quad (2.5)$$

Donde q_{air} es el flujo de calor transmitido por el aire a la cámara de secado (W).

$$q_{air} = \dot{m}_{air} C_{p_{air}} (T_{inc} - T_{sec}) \quad (2.6)$$

q_{sec} es el calor requerido para elevar la temperatura de las partículas de biomasa seca a la temperatura de secado (W).

$$q_{sec} = \frac{m_{sec} C_{p_{sec}} (T_{sec} - T_{in})}{t_{sec}} \quad (2.7)$$

q_{agua} es el calor requerido para calentar hasta la temperatura de secado, la cantidad de agua presente en la muestra sólida (W).

$$q_{agua} = \frac{m_{agua} C_{p_{agua}} (T_{sec} - T_{in})}{t_{sec}} \quad (2.8)$$

q_{vap} es el calor latente de evaporación del agua multiplicado por la cantidad de materia humedad que se desea remover (W).

$$q_{vap} = \frac{m_{vap} (h_g - h_f)}{t_{sec}} \quad (2.9)$$

q_{per} es el calor perdido debido a la transferencia de calor de tipo conductivo, convectivo y radiante dentro del secador y con su entorno (W).

$$q_{pssr} = \bar{U}A(T_{scc} - T_{\infty}) \quad (2.10)$$

Donde \bar{U} es el coeficiente global promedio de transferencia de calor y depende de los coeficientes de transferencia de calor [W/m². °C].

$$\frac{1}{\bar{U}A} = \frac{\ln(r_2/r_1)}{2\pi k_{ac}L} + \frac{1}{2h_i\pi r_1L} + \frac{1}{2(h_s + h_r)\pi r_2L} \quad (2.11)$$

Para determinar los coeficientes de transferencia de calor por convección forzada (h_i), convección libre (h_e) y calor radiante (h_r) es conveniente realizar una serie de cálculos que involucra las ecuaciones y propiedades del aire a diferentes temperaturas presentadas en la tabla 2.3.

Tabla 2.3. Datos para cálculo de coeficientes de transferencia de calor

Nombre	Símbolo	Propiedades	Ecuaciones
Coeficiente de transferencia de calor por convección forzada	h_i	$T = 46 \text{ °C}$ $k_{air} = 27,78 * 10^{-3} \text{ [W/m. °C]}$ $Pr = 0,7042$ $\mu = 194,04 * 10^{-7} \text{ [N.s/m}^2\text{]}$	$h_i = \frac{k_{air}Nu_D}{D}$ $Nu_D = 0,023Re_D^{4/5}Pr^{0,3}$ $Re_D = \frac{4\dot{m}_{air}}{\pi D\mu}$
Coeficiente de transferencia de calor por convección libre	h_e	$T_{prom} = 34 \text{ °C} = 307 \text{ °K}$ $k_{air} = 26,78 * 10^{-3} \text{ [W/m. °C]}$ $Pr = 0,7061$ $\nu = 16,544 * 10^{-6} \text{ [m}^2\text{/s]}$	$h_e = \frac{k_{air}Nu_D}{D}$ $Nu_D = 0,59Ra^{1/4}$ $Ra = Gr.Pr$ $Gr = \frac{\beta g(T_s - T_{\infty})L^3}{\nu^2}$ $\beta = \frac{1}{T_{prom}}$
Coeficiente de transferencia de calor radiante	h_r	$\varepsilon = 0,22$ $\sigma = 5,67 * 10^{-8} \text{ [W/m}^2\text{.K}^4\text{]}$	$h_r = \varepsilon\sigma(T_s^2 + T_{\infty}^2)(T_s + T_{\infty})$

2.2.2 Dimensionamiento del equipo

Como parte del método de dimensionamiento del equipo es necesario determinar el flujo másico de aire que debe fluir por el secador para llevar a cabo el cálculo de la potencia requerida como flujo de calor analizado en la sección anterior.

$$\dot{m}_{air} = \rho_{air} A_n u_n \quad (2.12)$$

Siendo, ρ_{air} la densidad del aire (kg/m^3), A_n y u_n el área (m^2) y la velocidad del aire (m/s) en una sección 'n' del conducto interior del secador. Con esto aclarado podemos continuar considerando como punto de análisis, la sección donde empieza la cámara de secado a la que denotaremos como A_D , sección además donde se lleva a efecto la fluidización.

Ya hemos visto que, en un estado de fluidización mínima el peso de la muestra sólida se ve completamente contrarrestado por las fuerzas de empuje y la fuerza ejercida por el fluido que asciende por la cámara de secado en este caso. Para la estimación de la velocidad mínima de fluidización es acertado entonces realizar una igualación de la ecuación de Ergun que predice la caída de presión en un lecho fluidizado con la caída de presión en el lecho debido al peso de la muestra sólida, obteniendo de esta forma, la ecuación para sólidos isotrópicos (Piña & Bucalá, 2013).

$$\frac{1,75}{\varepsilon_{mf}^3 \phi} \left(\frac{d_p u_{mf} \rho_{air}}{\mu} \right)^2 + \frac{150(1 - \varepsilon_{mf})}{\varepsilon_{mf}^3 \phi^2} \left(\frac{d_p u_{mf} \rho_{air}}{\mu} \right) = \frac{d_p^3 \rho_{air} (\rho_{bio} - \rho_{air}) g}{\mu^2} \quad (2.13)$$

Donde, d_p es el diámetro esférico equivalente de la partícula (m), u_{mf} y ε_{mf} la velocidad (m/s) y porosidad de mínima fluidización, ρ_{bio} la densidad de la madera (kg/m^3), ϕ la esfericidad de la partícula, μ la viscosidad dinámica del aire (N.s/m^2) y g es la aceleración de la gravedad (m/s^2).

La ecuación (2.13) puede expresarse también en términos de números adimensionales como son Reynolds y Arquímedes:

$$Re = \frac{d_p^1 u_{mf} \rho_{air}}{\mu}$$

$$Ar = \frac{d_p^3 \rho_{air} (\rho_{bio} - \rho_{air}) g}{\mu^2}$$

$$K_1 Re^2 + K_2 Re = Ar \quad (2.14)$$

Para la estimación de los valores de esfericidad y porosidad de fluidización mínima, es necesario llevar a cabo una medición experimental de la muestra, si no se conoce estos valores, se puede realizar el cálculo a través de correlaciones. Piña & Bucalá (2013) mencionan en su trabajo que, varios investigadores como Wen y Yu (1966) notaron que K_1 y K_2 no varían mucho para diferentes tipos de partículas por lo que propusieron las siguientes relaciones:

$$\frac{1}{\varepsilon_{mf}^3 \phi} \cong 14$$

$$\frac{(1 - \varepsilon_{mf})}{\varepsilon_{mf}^3 \phi^2} \cong 11$$

Reescribiendo la ecuación para la estimación de la velocidad mínima de fluidización en función del tamaño de la partícula y las propiedades del fluido de trabajo, utilizamos la ecuación 2.15:

$$24,5 \left(\frac{d_p u_{mf} \rho_{air}}{\mu} \right)^2 + 1650 \left(\frac{d_p u_{mf} \rho_{air}}{\mu} \right) = \frac{d_p^3 \rho_{air} (\rho_{bio} - \rho_{air}) g}{\mu^2} \quad (2.15)$$

Podemos ahora abordar el asunto referente al tamaño de la muestra, el cual es un parámetro fundamental en los cálculos y diseño del secador. Para la determinación del tamaño de las partículas de la muestra se consideraron las astillas de denominación G50 de la norma ÖNORM M7133, donde se estimó un valor promedio de la fracción principal de esta categoría. Esta junto con las demás especificaciones para las astillas G50 como el área de sección, longitud media y volumen de la partícula han

sido de talladas en la tabla 2.4. Por otro lado, el método para la determinación del diámetro esférico equivalente de la partícula consiste en la igualación del volumen de la partícula con el volumen de la esfera en cuya ecuación el diámetro de la esfera equivaldrá al diámetro esférico equivalente de la astilla.

$$V_{\phi} = \frac{1}{6} \pi d_p^3 \quad (2.16)$$

Donde, V_{ϕ} es el volumen de una esfera (cm^3), d_p es el diámetro esférico equivalente de una astilla (cm).

Tabla 2.4 Dimensiones de una astilla de madera

Nombre	Valor	Unidad
Sección	5	cm^2
Longitud media	5	cm
Tamaño promedio	0,18	cm
Volumen	9	cm^3

Ahora bien, obteniendo la velocidad mínima de fluidización es conveniente proseguir con el cálculo de los parámetros necesarios para la selección del ventilador que será el encargado de la generación de flujo en el secador. Sabemos entonces que, la potencia mecánica requerida para mover una razón de flujo es proporcional a la razón de flujo y a la carga del ventilador útil entregada al fluido.

$$\mathcal{P} = \frac{\rho_{air} g H_{vent} \dot{V}}{\eta} \quad (2.17)$$

Donde, \mathcal{P} es la potencia del ventilador (W), H_{vent} es la carga útil del ventilador (m), \dot{V} es el flujo volumétrico del aire (m^3/s) y η es la eficiencia del ventilador.

$$\dot{V} = u_{mf} \left(\frac{\pi}{4} D^2 \right) \quad (2.18)$$

Siendo D el diámetro de la cámara de secado (m).

La carga útil del ventilador entregada al fluido puede ser estimada mediante la ecuación de energía de flujo estacionario (2.19), analizando como punto '1' la toma de entrada del ventilador y punto '2' la sección a la entrada de la cámara de secado. En la tabla 2.5 se presentan los parámetros para el desarrollo de los cálculos.

$$P_1 + \frac{1}{2} \rho_{\text{air}} u_1^2 + \rho_{\text{air}} g(z_1 + H_{\text{vent}}) = P_2 + \frac{1}{2} \rho_{\text{air}} u_2^2 + \rho_{\text{air}} g(z_2 + h_L) \quad (2.19)$$

Tabla 2.5 Parámetros de la ecuación de energía de flujo estacionario

Nombre	Símbolo	Unidad	Ecuaciones
Presión punto 1	P_1	Pa	$P_1 = P_{\text{atm}}$
Presión punto 2	P_2	Pa	$P_2 = P_{\text{atm}} + \frac{m_{\text{bio}} g}{\frac{\pi}{4} D^2}$
Velocidad punto 1	u_1	m/s	$u_1 = 0$
Velocidad punto 2	u_2	m/s	$u_2 = u_{\text{mf}}$
Nivel punto 1	z_1	m	$z_1 = 0$
Nivel punto 2	z_2	m	$z_2 = z$
Pérdidas mayores	h_L	m	$h_L = f \frac{L_d V_d^2}{d 2g}$
Pérdidas menores	h_L	m	$h_L = \sum K_L \frac{V_d^2}{2g}$
Factor de fricción	f	-	$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2,0 \log \left(\frac{\epsilon/d}{3,7} + \frac{2,51}{Re \sqrt{f}} \right)$

Donde, P_{atm} es la presión de la atmosfera (Pa), z es la altura del punto 2 medida con respecto al nivel de la tubería de entrada del secador (m), L_d es la longitud de la tubería (m), V_d es la velocidad en la tubería (m/s), d es el diámetro de la tubería (m), K_L es el coeficiente de pérdida de carga hidráulica, f es el factor de fricción de flujo en la tubería, ϵ es la rugosidad de la tubería (mm).

Para flujo turbulento, la longitud para que el fluido se desarrolle completamente se puede aproximar mediante la siguiente ecuación.

$$L_d \cong 10d \quad (2.20)$$

El factor de fricción de flujo turbulento completamente desarrollado en tuberías depende del número de Reynolds y la rugosidad de la superficie de la tubería. Por tal razón, este no puede ser estimado de forma teórica, y los datos que en la actualidad son utilizados provienen de un análisis experimental realizado de manera cuidadosa variando la rugosidad de las superficies de tubería. Para la estimación de este parámetro se usó la relación implícita conocida como ecuación de Colebrook desarrollada por Cyril F. Colebrook (1910 – 1997) (Çengel et al., 2018). Para los coeficientes de pérdida de carga hidráulica se tabuló en la tabla 2.6 los valores correspondientes a los diferentes accesorios presentes en el tramo de la entrada del secador hasta la entrada de la cámara de secado.

Tabla 2.6 Coeficientes de pérdida de carga hidráulica

Coeficientes de pérdida	Símbolo	Valor
Codo de 90°	K_L	0,3
Expansión gradual de 20°	K_L	0,0067
Cono de 35°	K_L	0,0267

Finalmente, en la tabla 2.7 se muestran los datos fijados para el desarrollo de los cálculos, recogidos del análisis térmico y de la metodología de dimensionamiento del equipo.

Tabla 2.7 Datos fijados para el desarrollo del cálculo

Nombre	Símbolo	Valor	Unidad
Masa de la muestra	m_{bico}	5	kg
Temperatura de entrada	T_{in}	27	°C
Temperatura de secado	T_{ssc}	40	°C
Humedad inicial de la muestra	X_i	55	%

Humedad final de la muestra	X_f	8	%
Calor específico del aire	Cp_{air}	1005	J/kg. °C
Calor específico de la madera	Cp_{sec}	2385	J/kg. °C
Calor específico del agua	Cp_{agua}	4180	J/kg. °C
Entalpia de agua saturada	h_f	167,53	kJ/kg
Entalpia de vapor de agua saturado	h_g	2573,50	kJ/kg
Coeficiente de conductividad térmica del acero	k_{ac}	15,1	W/m.°C
Densidad del aire	ρ_{air}	1,1614	kg/m ³
Densidad de la madera	ρ_{bio}	435	kg/m ³
Viscosidad dinámica del aire	μ	1,846x10 ⁻⁵	N.s/m ²
Altura de la cámara de secado	z	538,86	mm
Rugosidad de la tubería	ϵ	0,0015	mm
Diámetro de la tubería	d	107,2	mm
Diámetro de la cámara de secado	D	300,0	mm
Radio exterior de la cámara de secado	r_2	150,0	mm
Radio interior de la cámara de secado	r_1	149,2	mm
Longitud de la cámara de secado	L	0,40	m

2.3 Simulación

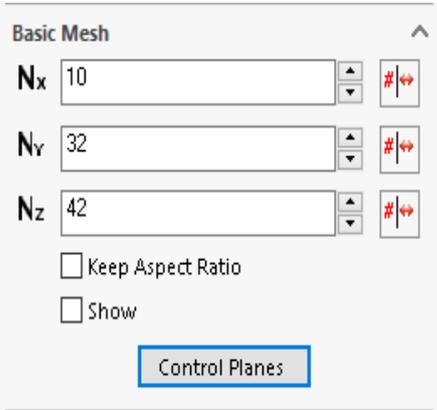
Como recurso para predecir el comportamiento fluido dinámico y termofluido del secador es conveniente la realización de la simulación CFD del sistema de secado, usando "SOLIDWORKS Education – 60 day trial" que es una

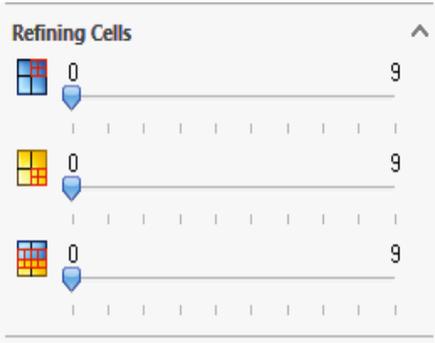
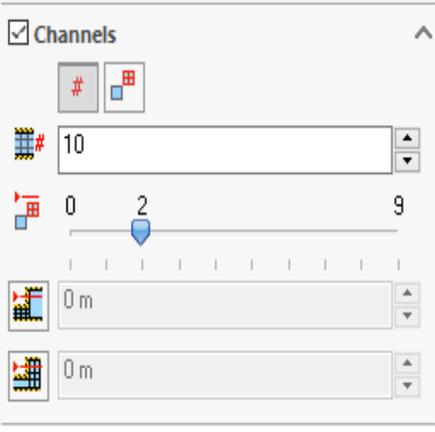
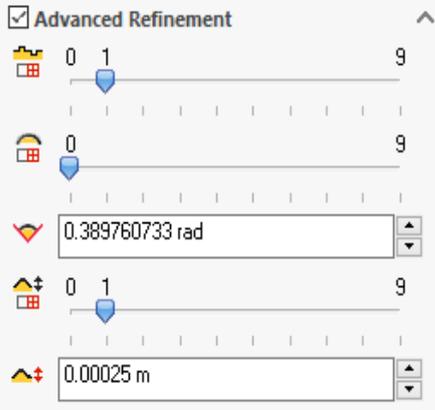
versión de prueba de 60 días del software disponible para fines académicos. Para llevar a cabo este procedimiento, es precisa la ejecución de un modelo 3D de los componentes del secador de biomasa y su posterior ensamblaje. Este ensamblaje se lo puede realizar directamente en el software de Solidworks (extensión SLDASM), o a su vez ejecutar un archivo con extensión (.STEP). Hay dos aspectos esenciales para la obtención de resultados concretos en la simulación CFD que son la generación adecuada del mallado de elementos finitos y el detalle de los parámetros de entrada.

2.3.1 Mallado y propiedades térmicas

Para llevar a cabo la definición geométrica del modelo, la herramienta Flow Simulation de Solidwork nos brinda la opción de elegir en el *Property Manager* entre un ajuste manual o automático, dependiendo de los requerimientos y precisión de resultados que se espera obtener de la simulación. En la tabla 2.8 se presentan todas las configuraciones que se pueden realizar como ajuste manual al momento de definir el tamaño y forma de los elementos de la malla. Por fines técnicos, debidos a la capacidad de memoria de procesamiento de la máquina y por las diferentes geometrías presentes en el modelo, se optó por la generación automática de la malla con un nivel inicial de mallado de 5.

Tabla 2.8 Comandos de la configuración manual del mallado

Comando	Ilustración	Descripción
Mallado básico		Configuración del número de celdas en el modelo, o el tamaño de la celda según su coordenada.

<p>Refinamiento de celdas</p>		<p>Ajuste del nivel de refinamiento de celdas de fluido, solidas o de frontera entre sólidos y fluidos.</p>
<p>Canales</p>		<p>Permite la configuración del número y refinamiento de celdas y dimensiones límites de espacios estrechos donde fluye el fluido.</p>
<p>Nivel de refinamiento avanzado</p>		<p>Permite variar el nivel de refinamiento de características solidas pequeñas, curvatura y tolerancia; y la especificación de criterios de curvatura y tolerancia.</p>

Por otra parte, las propiedades térmicas de la parte solida del secador se detallan en la configuración general del proyecto, donde se debe seleccionar el tipo de material (Steel Electrical Resistance) en el caso del calentador y sus propiedades térmicas.

2.3.2 Simulación termofluido

La simulación CFD del secador de biomasa lignocelulósica obedece al siguiente procedimiento para garantizar una correcta ejecución.

- Delimitación del volumen de fluido: habiendo ejecutado el equipo ensamblado se procede a la activación del flow simulation seleccionándolo de entre los componentes de Solidwork para posteriormente cubrir todas las aperturas del equipo con la herramienta *create lids*.
- Condiciones iniciales y tipo de estudio: para iniciar un nuevo proyecto de estudio se selecciona el comando *Wizard* en el que se debe especificar el análisis de flujo interno, el fluido de trabajo, el sistema de unidades y las condiciones iniciales de la parte solida del equipo y el fluido de trabajo. Como se muestra en la figura 2.5.

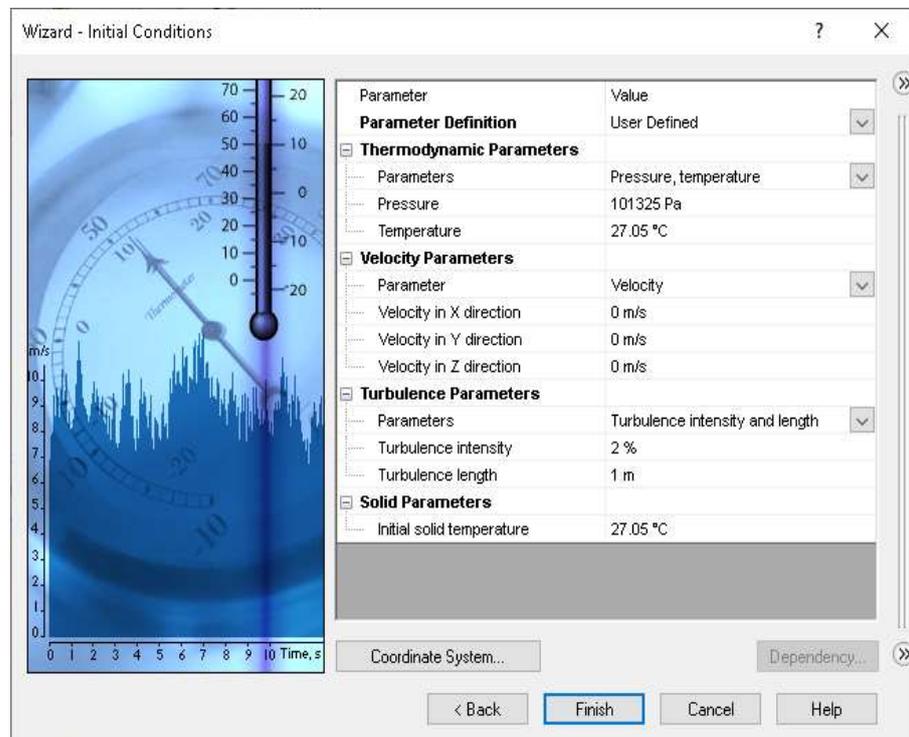


Figura 2.4 Condiciones iniciales de la simulación

- Condiciones de frontera: luego de verificar las condiciones iniciales del proyecto (*Finish*) y si no se cometió ningún error, se creará de manera automática el dominio computacional del proyecto. Por consiguiente, se especifican las condiciones de frontera seleccionando del *Property Manager* la opción de *insert boundary condition* y eligiendo las caras de entrada y salida del fluido como se aprecia en la figura 2.6.b. y 2.6.c respectivamente.

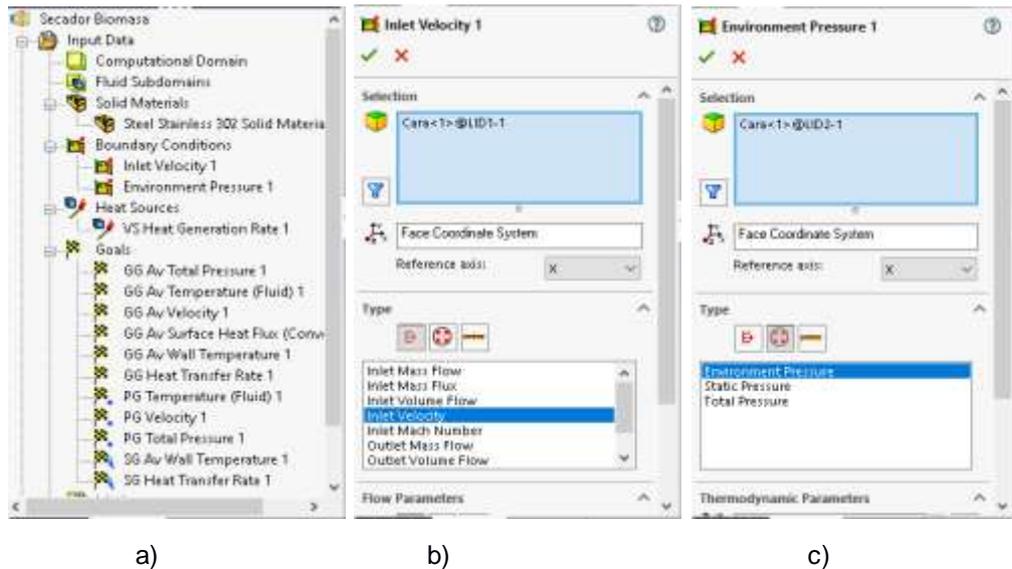


Figura 2.5 a) ventana de *property manager*. Condiciones de frontera: b) entrada del secador. C) salida del secador.

- *Materiales sólidos*: considerando las mallas metálicas dentro del conducto del secador, se debe valorar a estos como materiales sólidos dentro de la simulación, para lo cual se elige el comando *insert solid material* y selecciona el tipo de material correspondiente a las mallas o planchas de filtración.
- *Fuente de calor*: para agregar las características físicas dentro del análisis termofluido se debe insertar una fuente de calor (*volumen source heat generation*) del comando de herramientas de flow simulation donde se le asigna el valor numérico al flujo de calor de entrada en el parámetro *heat generation rate*.
- *Mallado y metas de estudio*: previo a la ejecución de la simulación se configura la geometría de los elementos finitos (*mesh*) y se insertan las metas de estudio con el comando *insert goals*.

Si no se presenta ningún error en los datos ingresados en el *property manager*, se puede finalmente ejecutar la simulación con el comando *Run*, donde se generará el mallado del modelo y la resolución de los cálculos para la simulación del secador. Los resultados de la simulación se podrán valorar en la misma ventana del *property manager*.

CAPÍTULO 3

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

3.1 Dimensionamiento del secador

3.1.1 Resultados obtenidos de análisis térmico

A partir de los datos fijados para los cálculos y las ecuaciones detallados en el capítulo anterior, se obtuvieron los valores de los diferentes parámetros del análisis térmico y fluido dinámico del sistema que están detallados en el apéndice A. Considerando los datos relevantes para la realización de la simulación y para el análisis de los resultados, se han detallado en la tabla 3.1 las principales variables obtenidas del procedimiento.

Tabla 3.1 Datos relevantes obtenidos de los cálculos

Nombre	Símbolo	Valor	Unidad
Velocidad mínima de fluidización	u_{mf}	1,9431	m/s
Velocidad en la tubería	V_d	14,4527	m/s
Flujo de calor requerido para el secado	q	3,99909	kW
Temperatura a la entrada de la cámara de secado	T_{inc}	51,9536	°C
Tiempo teórico de secado	t_{sec}	33,6904	min

Es significativo para el análisis fluido dinámico el valor numérico de las velocidades de fluidización mínima y de la tubería, debido a que la primera nos define el objetivo que se desea verificar en la simulación. Recuérdese que, de una buena distribución de flujo en la base del lecho depende la efectividad del proceso de secado por lo que, si dentro de la cámara de secado la velocidad del fluido sobrepasa este valor se

esperaría un leve aumento de la altura del lecho mas no comprometería el funcionamiento del equipo. La velocidad de la tubería correspondiente al tramo inicial del circuito de secado, nos proporciona una de las condiciones de frontera, dado que es el parámetro con el que se configura las condiciones del fluido a la entrada del secador.

Como resultado del balance de energía se obtuvo que, para alcanzar la temperatura de secado planteada en los requerimientos de diseño y llevar a cabo la mecánica de secado, es necesario suministrar un flujo constante de calor de 4 kW, flujo que será nutrido por parte de las resistencias térmicas con una potencia de dicho valor. Con este flujo de calor se esperaba que el agente secador alcance una temperatura aproximada de 52°C a la entrada de la cámara de secado donde entraría en contacto con la muestra de biomasa para mantener la temperatura de secado durante el tiempo en el que ocurre el proceso.

Tabla 3.2 Calor neto distribuido entre elementos del sistema

	kJ	kWh
Calor entregado al aire	4211,33	1,1698
Calor para la evaporación del agua	3647,81	1,0133
Calor entregado a la biomasa	196,43	0,0546
Calor perdido por transferencia de calor	28,31	0,0079

Por otro lado, en la tabla 3.2 se detalla cómo ha sido distribuida la energía neta suministrada al sistema por parte de las resistencias térmicas, y en la figura 3.1 se aprecia de manera porcentual la distribución de energía entre los elementos del sistema de secado. De ahí se infiere que un 45,1% de la energía suministrada al sistema se puede considerar como útil, debido a que representa a la energía total que se consumió para la evaporación de agua, es decir para la remoción de humedad de la muestra de biomasa lignocelulósica.



Figura 3.1 Calor neto entregado a los elementos del sistema de secado

Por añadidura, se presenta en la figura 3.2 las curvas de temperatura de secado vs tiempo, para astillas **G30, G50 y G100** según su clasificación por tamaño de acuerdo con la norma ÖNORM M7133 (detallada en la tabla 1.2) con la finalidad de estimar los tiempos de secado para cada tipo de astilla. Esta comparación es útil también, para evidenciar la influencia del tamaño del material particulado en la velocidad de fluidización mínima y por ende en el proceso de secado, constatando que para partículas de mayor tamaño se requiere de una mayor cantidad de energía para completar el proceso de secado.

Además de esto, en la figura 3.3 se graficó la potencia requerida para el proceso de secado vs tiempo, para diferentes tamaños de astillas, considerando las mismas condiciones de funcionamiento del secador como capacidad, temperatura de secado, entre otras. Esto con el fin de establecer una referencia para el diseño de secadores de biomasa en los que se desee reducir el tiempo de secado.

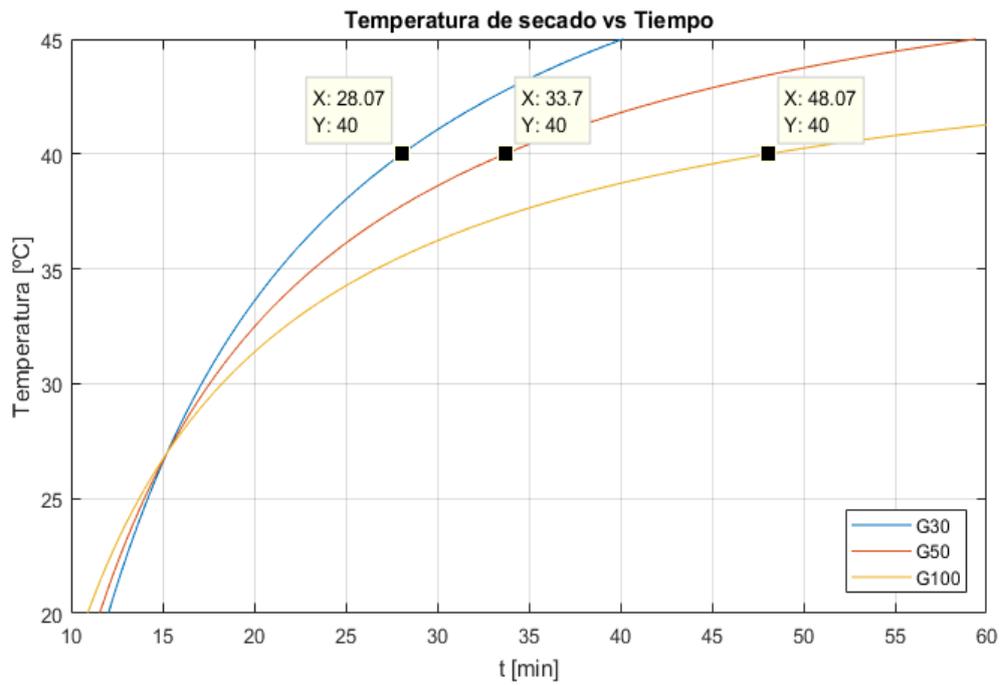


Figura 3.2 Temperatura de secado vs tiempo estimado de secado, para diferentes tamaños de astilla (cálculos teóricos, Matlab)

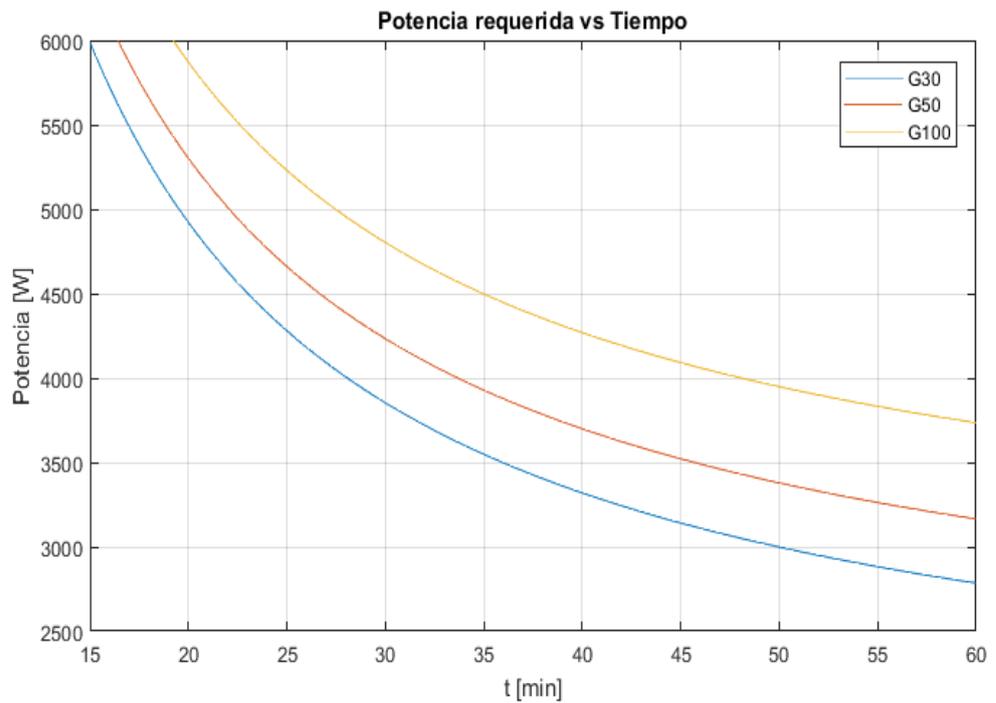


Figura 3.3 Potencia requerida para el secado vs tiempo, para diferentes tamaños de astilla (cálculos teóricos, Matlab)

3.1.2 Dimensionamiento y selección de componentes

Para el diseño de un secador de biomasa lignocelulósica se realizó la selección y dimensionamiento de los diferentes elementos que componen el sistema de secado, cuyos planos se encuentran en el apéndice D.

La figura 3.4 corresponde al modelo CAD del sistema completo de secado, donde se aprecian los diferentes elementos que lo componen. Este modelo se utilizó además en la simulación CFD del equipo, con el fin de corroborar el funcionamiento del diseño.

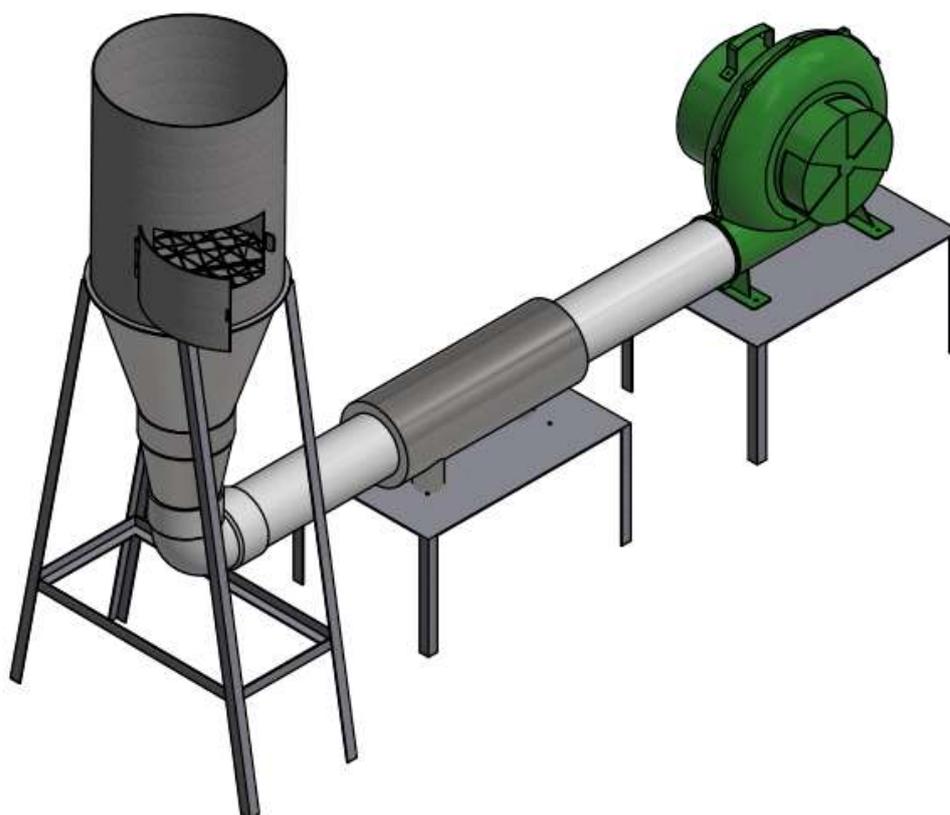


Figura 3.4 Modelo de secador para biomasa lignocelulósica

Como elemento generador de flujo para el equipo de secado, se consideró la selección de un ventilador de tipo centrífugo. Para el funcionamiento del ventilador se determinaron los parámetros detallados en la tabla 3.3 que sirvieron como referencia para discriminar los diferentes modelos de ventiladores que ofrecen los comerciales y distribuidores locales.

Tabla 3.3 Parámetros de funcionamiento de ventilador centrífugo

Parámetro	Valor	Unidad
Caida de presión	884.05	Pa
Caudal	494.45	m ³ /h
Eficiencia	35	%
Potencia	0.347	kW

De lo anterior, es oportuno seleccionar un ventilador de tipo centrífugo de 4 pulgadas de diámetro de salida de flujo debido a que se consideró para los cálculos un diámetro de tubería de 110 mm. Además de una potencia instalada de 450 W para asegurar una operación óptima del secador.

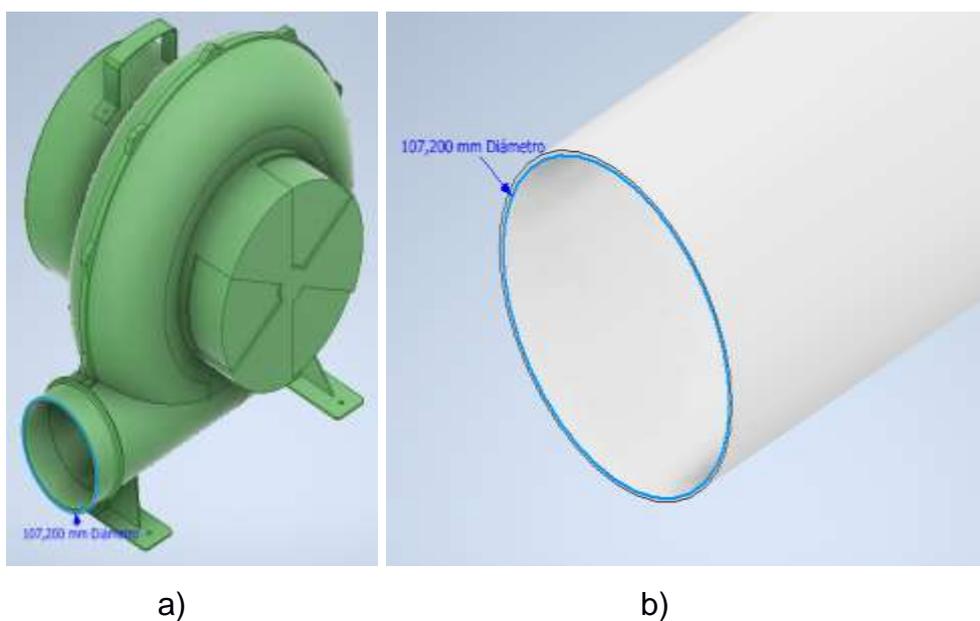


Figura 3.5 a) modelo de ventilador centrífugo de 4 in. b) modelo de tubería PVC de 110 mm.

Como parte del tramo inicial del conducto del equipo de secado se consideró una tubería (PVC-U) no plastificado y una tubería curva de 90° con manguitos para juntas con anillo, ambas regidas por la norma ISO 3633.

Para la cámara de distribución se diseñó un conducto metálico de forma cónica con un arreglo de 'baffles' en su interior, debido a que no se

obtenía una distribución uniforme en la base de la cámara de secado, fenómeno que se evidenció en las primeras simulaciones realizadas del modelo. Estos 'baffles' son paneles o planchas metálicas colocadas de manera equitativa dentro de la cámara de distribución, con el fin de direccionar el flujo de aire de tal manera que este se homogenice lo mejor posible dentro del conducto. Adicional a esto, tal como se aprecia en la figura 3.6, se dispuso de una malla metálica entre la cámara de secado y distribución con la misma finalidad de asegurar una correcta distribución del fluido y de evitar filtraciones dentro del conducto del secador que pueda dañar el ventilador.

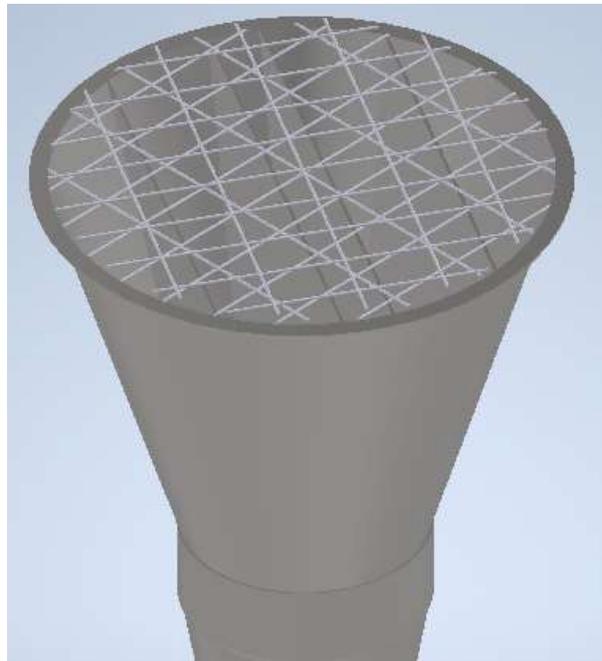
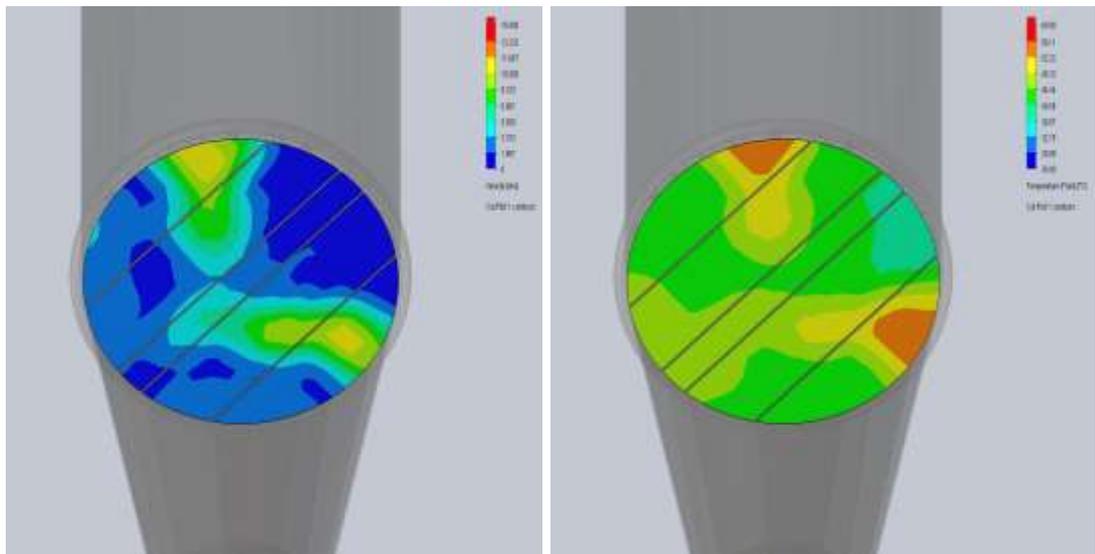


Figura 3.6 Modelo de la cámara de distribución

3.2 Simulación termofluido

De la simulación CFD del modelo se obtuvieron resultados gráficos que nos permitieron visualizar las líneas de flujo de aire a lo largo del secador, así como también diagramas de corte de diferentes superficies del secador en escala de colores que representan la magnitud de los distintos parámetros que permite el software de simulación. Dichos gráficos se presentan en el apéndice B, por lo que se ha tomado a los más representativos para este análisis.

Tomando como referencia el valor de la velocidad de fluidización mínima de la tabla 3.1 se puede apreciar en la figura 3.7a como gran parte de la base del lecho supera una velocidad de 1,667 m/s correspondiente al sombreado de color azul claro. No obstante, se obtuvieron zonas en las que se alcanza una velocidad máxima de 11,667 m/s correspondiente a la zona de color amarillo. Adicional a esto, se puede observar zonas de color azul en las que la velocidad posee valores cercanos a cero, por donde casi no fluyen corrientes de flujo. Sin embargo, cabe recalcar que las simulaciones se realizaron en un contexto en el que la carga no está incorporada, factor que contribuiría a una mejor distribución del flujo. De igual forma, en la figura 3.7b se observa como en casi toda la base del lecho se obtiene una temperatura mayor a los 40,56 °C y en ciertas zonas una temperatura máxima de 56,11 °C donde se esperaba alcanzar una temperatura promedio de 52 °C correspondiente a la zona de color amarillo.

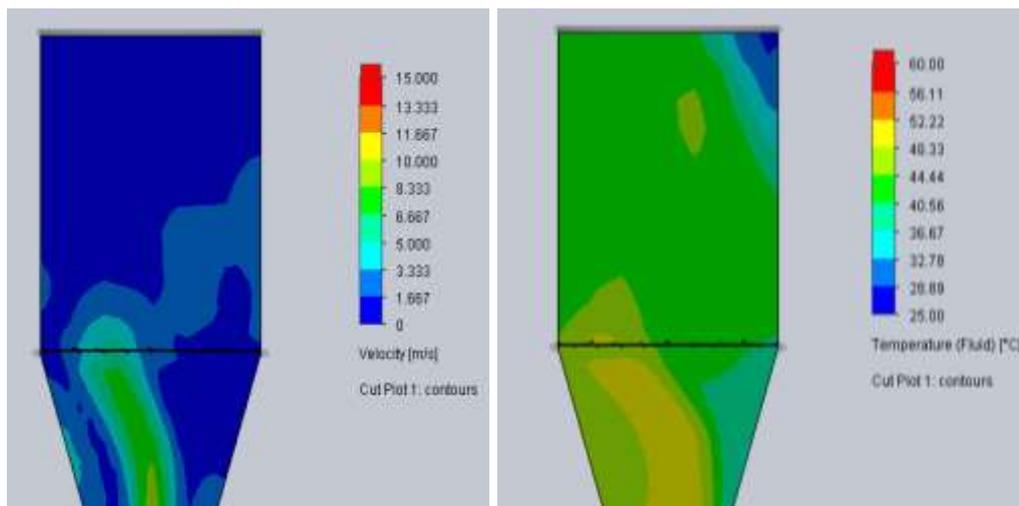


a)

b)

Figura 3.7 a) diagrama de corte en la base de cámara de secado con escala de colores por velocidad. b) diagrama de corte en la base de cámara de secado con escala de colores por temperatura.

En la figura 3.8 se observa una vista lateral de la cámara de secado donde se muestran los resultados de la simulación CFD tanto del análisis fluido dinámico como del térmico, en los que se muestra la magnitud de dichos parámetros con una escala de colores.



a)

b)

Figura 3.8 a) vista lateral de la cámara de secado con escala de colores por velocidad. b) vista lateral de la cámara de secado con escala de colores por temperatura.

3.3 Análisis de costos

Para la estimación del costo de construcción del secador de biomasa, no se consideraron los costos de ingeniería correspondientes a la simulación CFD, debido a que se usó una versión de prueba del software SOLIDWORKS. Es necesario aclarar que los valores mostrados en la tabla 3.4 son precios referenciales utilizados para analizar la factibilidad del diseño, sin embargo estos valores pueden variar dependiendo del proveedor de los materiales y de la persona a cargo de la fabricación de los elementos del equipo.

Tabla 3.4 Costo estimado de construcción

Elemento	Costo unitario
Manufactura del equipo con materiales	\$ 250,00
Resistencia térmica 4 kW	\$ 300,00
Electric blower 450 W (4 PULG.)	\$ 135,00
TUBO DESG. 110MM X 3 MTRS (4 PULG.) plastigama	\$ 15,12
CODO DESG. E/C 110MM * 90 PVC plastigama	\$ 4,00
Costo total	\$ 704,12

El trabajo de manufactura incluye la fabricación de la cámara de distribución, la cámara de secado y el ensamblaje del equipo, además de los costos por la adquisición de los materiales para su construcción, cabe indicar que varios materiales fueron reutilizados, aplicando la práctica de economía circular. Como es evidente, el proceso de manufactura del equipo y la elaboración de las resistencias térmicas corresponden aproximadamente al 80% del costo total. Debido a esto, si se desea minimizar el costo de construcción, una opción viable sería reducir la potencia de las resistencias, que implicaría un mayor tiempo de secado y por ende un mayor consumo energético. Tomando como referencia la figura 3.3 (Potencia vs tiempo) se procede a obtener los valores referenciales del consumo eléctrico, presentado en la tabla 3.5.

Tabla 3.5 Costo de operación

	Potencia [W]	Consumo eléctrico [kWh]*	Costo (dólares)*
Resistencia térmica	4000	24	\$ 2,16
Electric blower	450	2,7	\$ 0,24
Total	4450	26,7	\$ 2,40

* Asumiendo que el costo de Kwh eléctrico sea de 0.09 dólares, con un tiempo de secado de 6 horas.

Con esto se observó que, en comparación con el costo de construcción, el costo de operación es bajo en cuanto al costo total requerido para el funcionamiento del equipo de secado. Es necesario indicar, que al ser un equipo de laboratorio, las pruebas no son constante. En caso de que el prototipo, sea escalado a nivel industrial se deberá evaluar el consumo energético de la fuente principal.

CAPÍTULO 4

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 Conclusiones

- Iniciando con el análisis bibliográfico de los tipos de tecnología para el secado de biomasa, se determinó que la tecnología de secado más adecuado (análisis de matriz de selección) para este estudio es de lecho fluidizado por razones de espacio, manejo en la distribución de la velocidad de secado en la cámara, menos consumo energético, facilidad de construcción y manejo o manipulación de la biomasa para el operador del laboratorio del Centro de Desarrollo tecnológico Sustentable.
- Durante la etapa del análisis teórico del secador de biomasa, se determina la potencia máxima del conjunto de resistencias a partir del dimensionamiento de la cámara, carga y humedad inicial y final de la biomasa, además de la velocidad de fluidización. Con relación a los estudios planteados por varios investigadores de revistas internacionales, indican que es necesario evaluar el estado de fluidización del lecho, con la finalidad de mantener una temperatura homogénea del secador. Por lo tanto, realizando la respectiva comparación el diseño propuesto para cumplir con esta condición se determina que el equipo de laboratorio debería funcionar con un conjunto de resistencia total de 4000 W para secar 5 kg de biomasa con una velocidad del fluido de trabajo de 2 m/s.
- En la etapa de simulación usando el programa de fluido computacional utilizando el método de volumen fijo, se pudo constatar la estabilidad de la velocidad del aire desde la entrada del ducto, hasta el sistema de distribución del aire caliente con un diseño a manera de cono en su estructura e internamente compuesto de 'baffles' que permite la distribución homogénea del aire hacia la cámara de secado y, a su vez

se alcanzó la temperatura máxima de operación establecida en el diseño, siendo de 52°C.

- Tal como se ha señalado durante el escrito del trabajo, el tiempo de secado de la biomasa dependerá del espesor y humedad inicial del material lignocelulósico, para determinar el tiempo máximo de secado de la biomasa para el diseño del equipo, se analizan las curvas de secado para tres tipos de astillas G30, G50 y G100, determinando que el equipo se estabiliza a los 40 °C a partir de los 35 minutos con una potencia de operación a partir de los 3500 W, por consiguiente se garantiza que el diseño propuesto funcionará adecuadamente para el cliente.
- Se ha diseñado construccionalmente un equipo de laboratorio, con dimensiones consideradas por el cliente en cuanto altura para fácil manejo de entrada y salida de la biomasa, espacio y tiempo de secado para astillas G50, además, con el fin que el equipo sea de bajo costo se aplica el concepto de economía circular que consiste en recuperar materiales metálicos y reutilizarlo para otro fin. Como es el caso de la cámara, cono y ductos, fueron limpiados y modificados para el equipo de secado. Finalmente podemos indicar que, el costo del equipo de laboratorio se reduce un 60% en relación al costo del mercado nacional.
- Una vez analizado el funcionamiento del equipo de laboratorio experimental a través de la simulación, se procedió a comparar dichos datos con los obtenidos teóricamente, obteniendo un sesgo o error de velocidad y temperatura de operación del 58.78%, y, 14.74% respectivamente.

4.2 Recomendaciones

- Se hace necesario indicar que la simulación se realizó sin carga de biomasa, por lo tanto, se recomienda para aquellos investigadores que continúan con dicha investigación que se realice con cargas pequeñas

distribuidas en la cámara. Por lo tanto, se necesita de recurso computación con mayor capacidad.

- Para la utilización de muestras de tamaño diferente al considerado en el diseño del equipo de secado, es recomendable estimar la velocidad mínima de fluidización y ajustar, de ser posible, la potencia del ventilador generador de flujo o reemplazarlo, para asegurar la correcta distribución del fluido en el equipo. Y verificar que los agujeros de la plancha de la base de la cámara de secado no excedan el tamaño de la muestra sólida.
- Cabe aclarar que, para la realización de los cálculos, los valores correspondientes a las propiedades físicas de los elementos involucrados fueron estimados y/o tomados de bases de datos como libros, por lo que si se tienen los equipos y la capacidad suficiente, se recomienda medir experimentalmente estas variables físicas involucradas en el desarrollo de los cálculos, como lo son: la densidad y el tamaño de las astillas, calor específico, densidad aparente de la muestra, entre otras. Y haciendo uso de la metodología planteada en el escrito, rediseñar los parámetros de funcionamiento del equipo.
- Debido a que el análisis experimental fue realizado a través de la simulación en la que no se consideró la carga de la biomasa, y que, tanto la simulación como el análisis teórico admiten un porcentaje de error en cuanto a los resultados obtenidos, es importante tener en consideración que al momento de realizar pruebas experimentales del funcionamiento del equipo es recomendable tener a disposición ventiladores de igual tamaño pero con diferentes valores de potencia y por ende diferentes valores de presión y velocidad de flujo en el caso que se presenten contrapresiones que no puedan ser contrarrestadas por parte del ventilador seleccionado inicialmente.
- Es importante aclarar que para las propiedades físicas y térmicas de la muestra a secar, se consideraron las propiedades de madera de roble,

razón por la cual si se desea realizar pruebas con otros tipos de biomasa como balsa u otros tipos de madera de baja densidad, se recomienda recalcular el flujo de aire necesario para evaluar el estado de fluidización y, haciendo uso de dispositivos electrónicos como reguladores de frecuencia reducir el flujo de corriente hacia el ventilador y reducir el caudal de aire en caso sea necesario.

- Pese a que en el diseño de este proyecto se consideró el uso de resistencias calefactoras de tipo tubulares para el calentamiento del agente secador, se recomienda el uso de resistencias térmicas aleteadas en caso de tener los recursos suficientes y la disponibilidad del producto, esto debido a que su diseño versátil posibilita una fácil instalación y sobre todo la superficie aleteada favorece al intercambio térmico con el aire circundante.

BIBLIOGRAFÍA

- Abarca, A. E., & Aldaz, M. F. (2014). DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SECADOR ROTATORIO PARA LA OBTENCION DE ESCAMAS PET. Escuela de Ingenieria Quimica, Facultad de Ciencias, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.
- Almenares-Verdecía, J. F., Ngoma-Presline, F., & Serrat-Díaz, M. d. (2011). *Aspectos tecnológicos generales para la conversión a etanol de la biomasa lignocelulosica II*. Universidad de oriente, Facultad de ciencias naturales, Santiago de Cuba.
- Arroyo Vinueza, J. S. (2016). Aprovechamiento del recurso biomasa a partir de los desechos de madera para una caldera de vapor. Quito. Obtenido de <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/11994/3/UPS-KT01220.pdf>
- Çengel, Y. A. (2019). *Termodinámica* (9na ed.). España: McGraw-Hill.
- Çengel, Y. A., & Cimbala, J. M. (2018). *Mecánica de Fluidos. Fundamentos y Aplicaciones* (4ta ed.). McGraw-Hill. doi:ISBN: 9781259696534
- Dávila, J. R. (2017). Estudio experimental del efecto de la porosidad de particulas sobre el proceso de secado en un lecho fluidizado a vacio empleando aire. Puebla, Mexico: Escuela de ingenieria, Universidad de las Americas Puebla.
- de Lucas Herguedas, A. I., & del Peso Taranco, C. (2012). Biomasa, biocombustibles y sostenibilidad. doi:ISBN: 978-84-931891-5-0
- Egea, S. G. (2020). *Techno-Economic Analysis of the implementation of a Dryer for MediumScale Biomass Combustion Plants*. Master thesis, Université libre de Bruxelles, Brussels faculty of engineering, Bruselas.
- ESIN, C. S. (2014). Atlas Bioenergético del Ecuador. (Primera). Ecuador. Recuperado el 2021, de <http://biblioteca.olade.org/opac-tmpl/Documentos/cg00194.pdf>

Fito, P. (2016). introduccion al secado de alimentos por aire caliente. Universitat Politècnica de València.

HARGASSNER. (2016). *HARGASSNER el especialista en biomasa*. Obtenido de <https://www.hargassner.es/>

JIMÉNEZ, A. M., & PINOS, A. A. (2014). *DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SECADOR TIPO BANDEJAS PARA BIOMASA REQUERIDO POR EL CESTTA-ESPOCH*. Tesis de grado, Escuela superior politécnica de Chimborazo, Escuela de ingeniería química, Riobamba. Obtenido de <http://dspace.esPOCH.edu.ec/bitstream/123456789/3412/1/96T00246.pdf>

Moreno M., R. (1991). Secado de aserrin en lecho fluidizado. *Revista Ciencia e Investigacion Forestal (CIFOR)*.

Neobisur. (s.f.). *NEOBISUR, Calefacción con Futuro*. Recuperado el 2021, de http://neobiosur.com/wp-content/uploads/2013/10/normativa_biocombustibles.pdf

Petterson, R. C. (1984). *The chemical composition of wood. Chapter 2*. Washington DC.: American Chemical Society. Recuperado el 2021

Piña, J., & Bucalá, V. (2013). Procesamiento de Sólidos, Procesamiento de alimentos II, Capítulo 5: Fluidización. Buenos Aires, Argentina. Obtenido de <http://www.criba.edu.ar/cinetica/solidos/Capitulo5.pdf>

Plastigama. (s.f.). *Plastigama wavin*. Recuperado el Agosto de 2021, de <https://bim.plastigama.com/es/Paginas/libreria.aspx?lineId=33>

SEI-CONTRERAS, I. (2021). *SEI CONTRERAS Ingeniería*. Obtenido de <http://ingcontreras.com.ar/index.php>

SODECA s.a. (2013). Veltidores centrifugos y extractore en linea para conductos. Barcelona, España. Obtenido de

https://www.sodeca.com/upload/imgCatalogos/ES/CT01_centrifugo_enlinea_2014ES.pdf

Solidworks Corporation, D. S. (2021). *Solidworks*. Obtenido de <https://www.solidworks.com/es/domain/simulation>

Vergara Alarcón, P. (2019). Estudio del fraccionamiento de la lignocelulosa mediante procesos con disolventes y los estudios para el análisis y aprovechamiento de las fracciones. Madrid.

APÉNDICES

APÉNDICE A

Resultados obtenidos de cálculos

Tabla A.1 Resultados obtenidos de los cálculos

Nombre	Símbolo	Valor	Unidad
Masa seca de la muestra	m_{sec}	3,2258	kg
Masa de agua en la muestra	m_{agua}	1,7742	kg
Diámetro esférico equivalente	d_p	0,0258	m
Velocidad mínima de fluidización	u_{mf}	1,9431	m/s
Flujo másico de aire	\dot{m}_{air}	0,1595	kg/s
Factor de fricción hidráulico	f	0,0189	-
Longitud de tubería	L_d	1,1000	m
Velocidad en la tubería	V_d	14,4527	m/s
Pérdidas hidráulicas totales	h_t	5,5716	m
Carga útil del ventilador	H_{vent}	77,6730	m
Flujo volumétrico de aire	\dot{V}	0,1373	m ³ /s
Coeficiente de transferencia de calor por convección forzada	h_i	8,2568	W/m ² °C
Coeficiente de transferencia de calor por convección libre	h_b	4,7937	W/m ² °C
Coeficiente de transferencia de calor radiante	h_r	0,0015	W/m ² °C
Coeficiente global de transferencia de calor	$\bar{U}A$	1,0774	W / °C
Temperatura a la entrada de la cámara de secado	T_{inc}	51,9536	°C

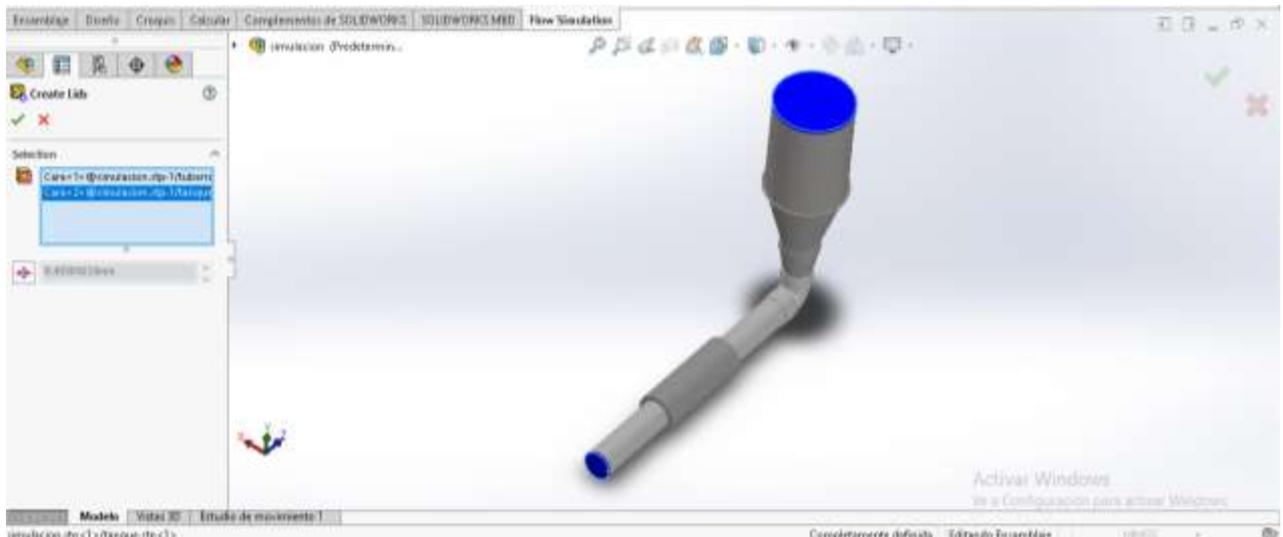
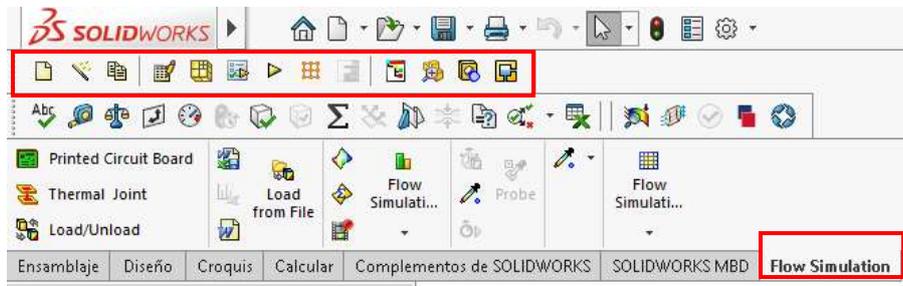
Temperatura de la pared de la cámara de secado	T_s	34,7906	°C
Tiempo teórico de secado	t_{sec}	33,6904	min
Flujo de calor requerido para el secado	q	3.99909	kW
Flujo de calor de aire en la cámara de secado	q_{air}	1915,75	W
Flujo de calor en la muestra solida	q_{sec}	49,4781	W
Flujo de calor transferido al agua	q_{agua}	47,6939	W
Flujo de calor de evaporación del agua	q_{vap}	1804,57	W
Flujo de calor estimado en pérdidas	q_{per}	14,0065	W

APÉNDICE B

Procedimiento de simulación

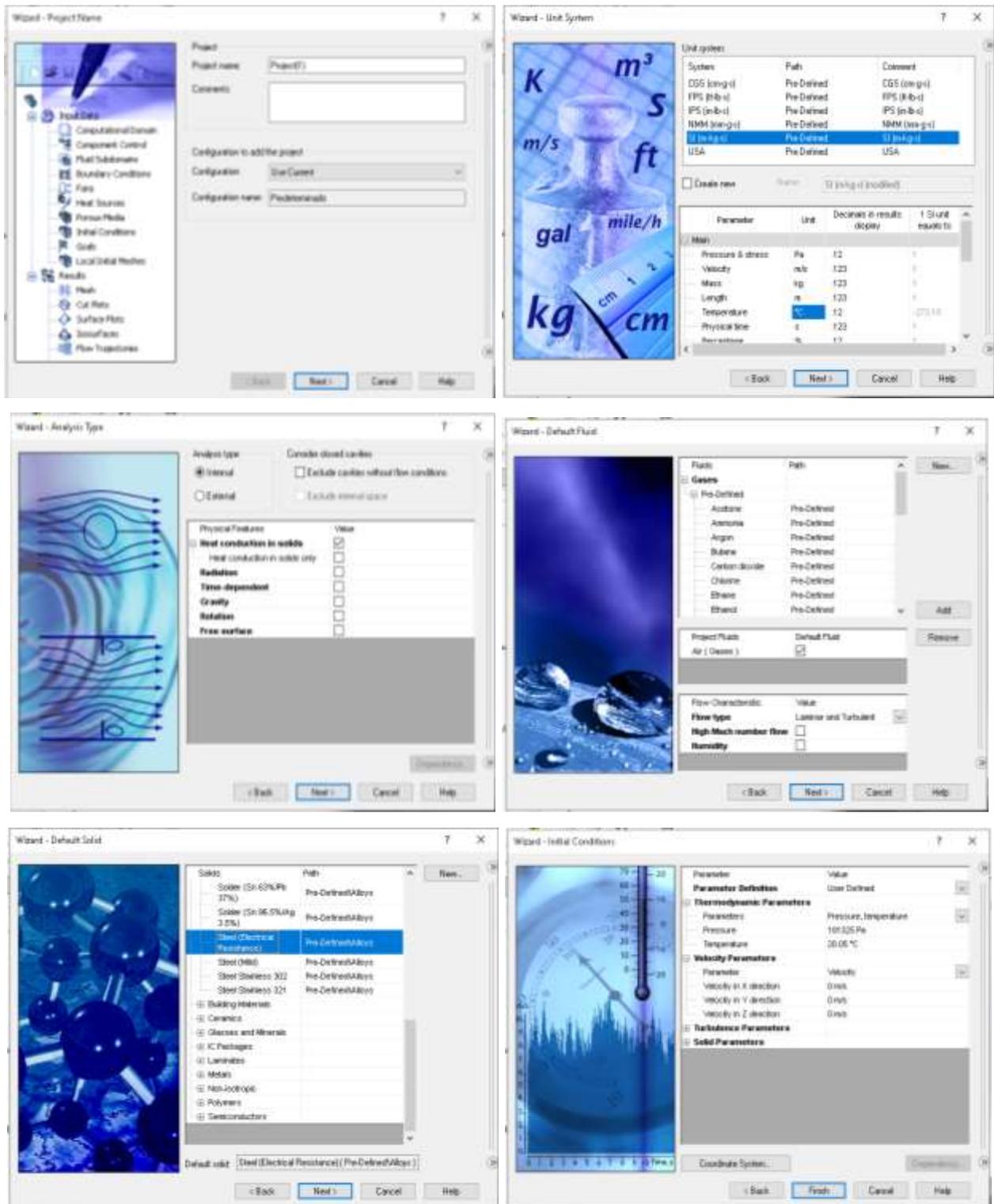
Para la ejecución de la simulación CFD del modelo del secador de biomasa lignocelulósica se ha presentado a continuación el procedimiento detallado para llevarlo a cabo.

Como primer paso, y luego de haber realizado el modelo 3D (CAD) del equipo se procede a seleccionar la herramienta flow simulation del software de SOLIDWORK, para luego delimitar las superficies de entrada y salida del equipo y cerrar cualquier orificio que provoque una fuga de fluido con la herramienta 'Create Lids' ubicada en la parte superior de la ventana.

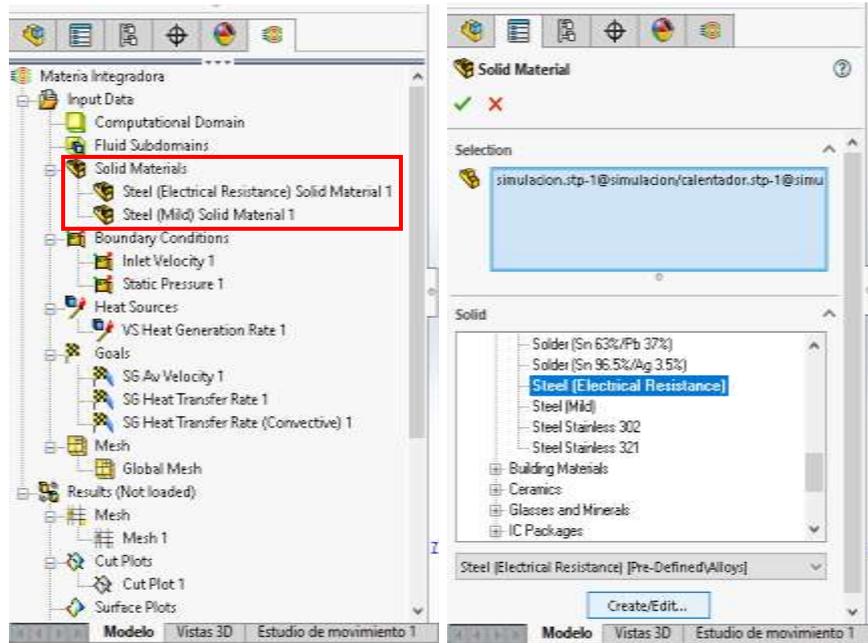


Si la creación de las caras de entrada y salida del equipo se realizó sin ningún problema, es decir sin dejar algún espacio que provoque derrames, se crea un nuevo proyecto de estudio dando clic en el botón 'Wizard'.

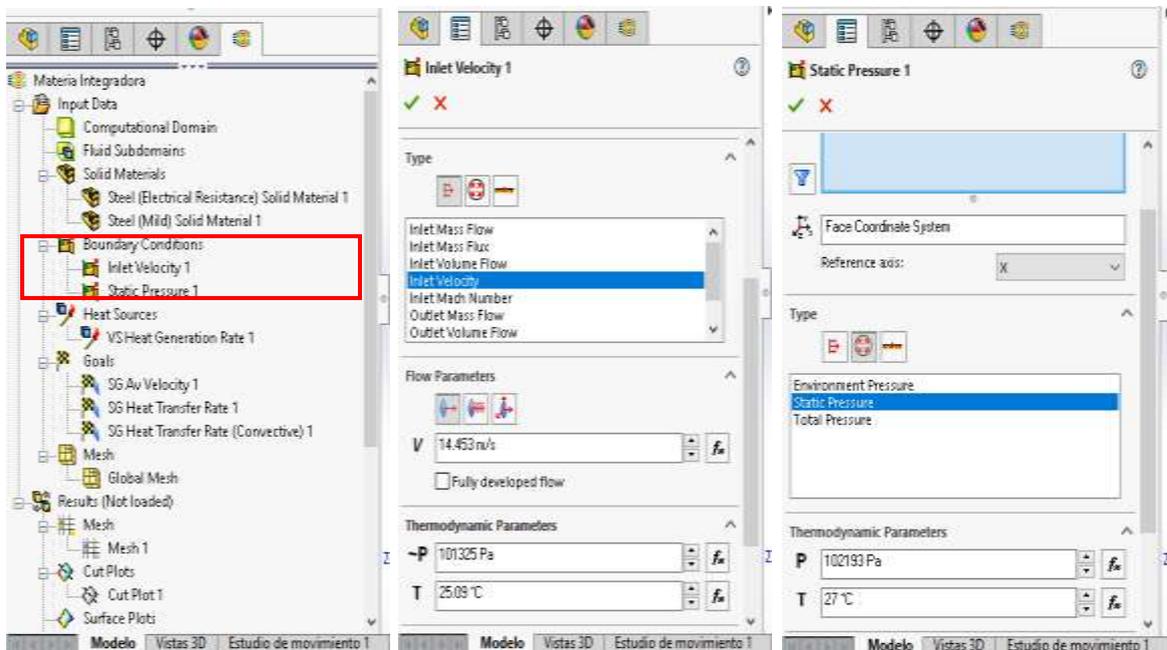
En la ventana de wizard se eligen los parámetros de estudio como: el sistema de unidades, tipo de análisis de estudio, fluido de trabajo, materiales y las condiciones iniciales del fluido y el equipo.



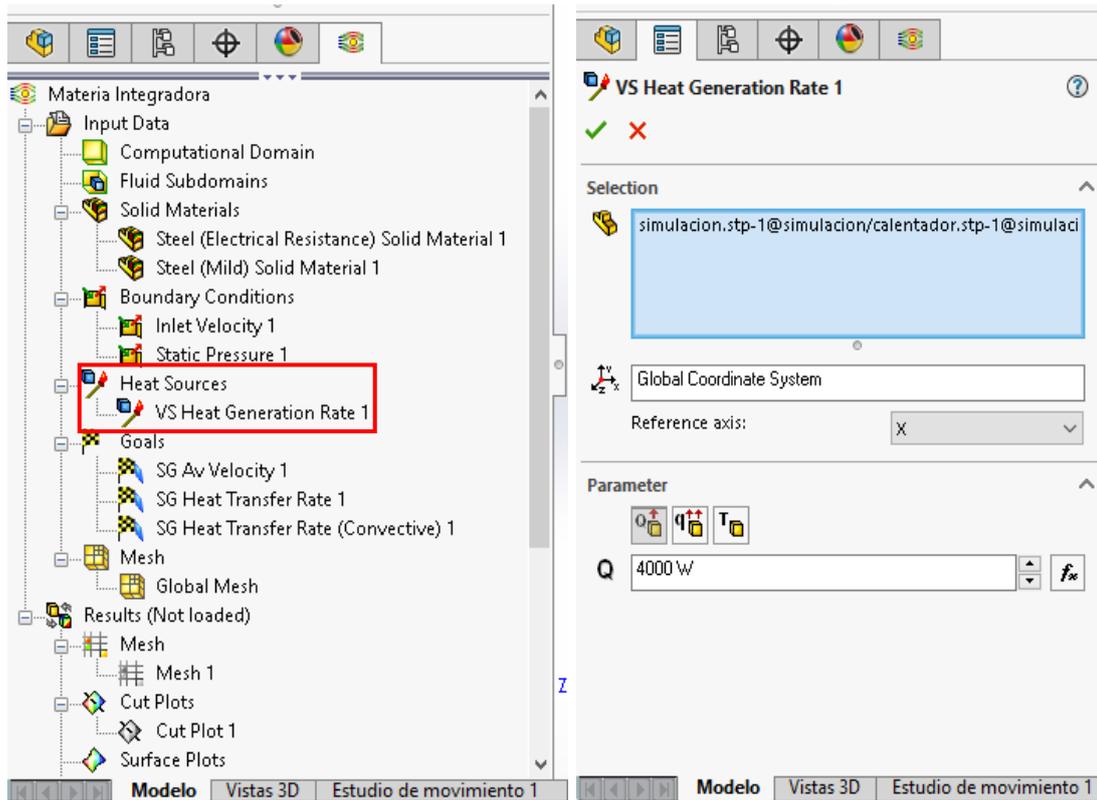
Consecuente a la ejecución del wizard, se generará automáticamente el dominio computacional y se procederá a establecer las condiciones para llevar a cabo la simulación, seleccionando primero los materiales sólidos presentes en el interior del equipo, correspondientes a las resistencias eléctricas y las mallas metálicas que servirán como filtro de astillas y distribuidores de flujo.



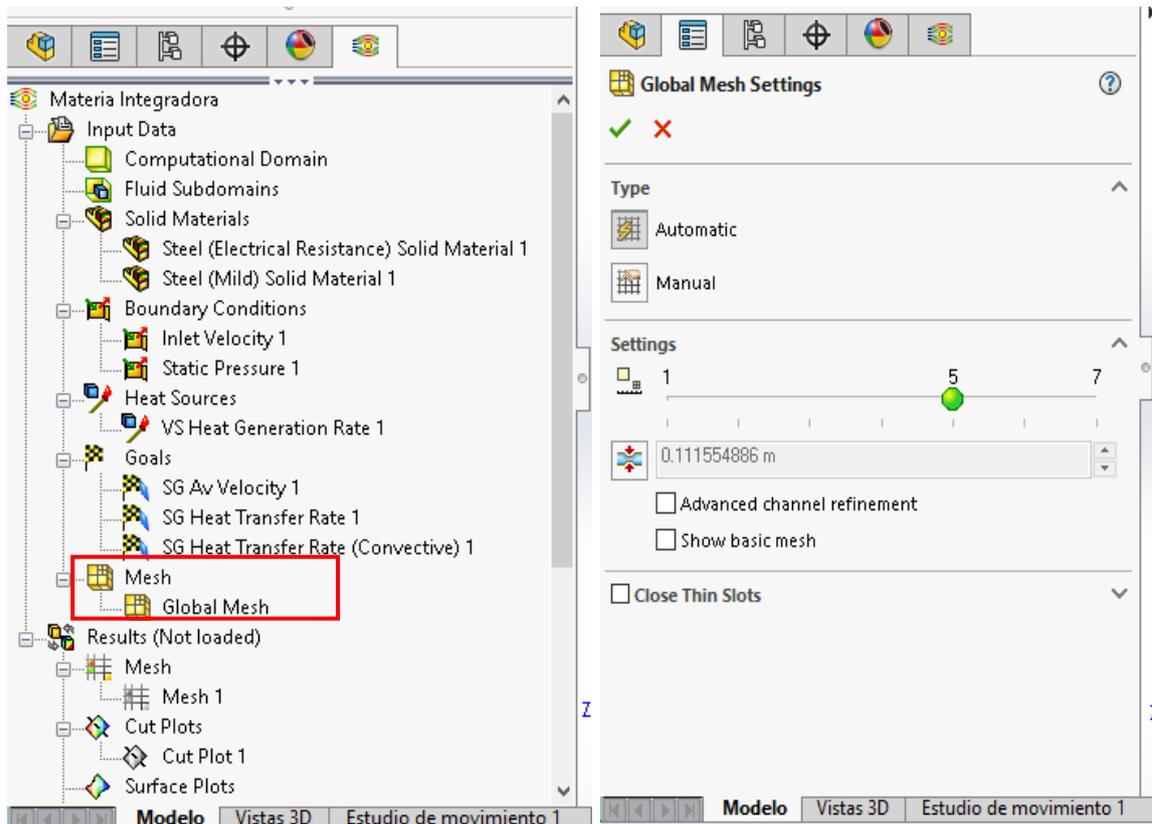
Se seleccionan después las condiciones de frontera para la entrada y salida del equipo como lo son: la velocidad de entrada del fluido y la presión estática a la salida del equipo.

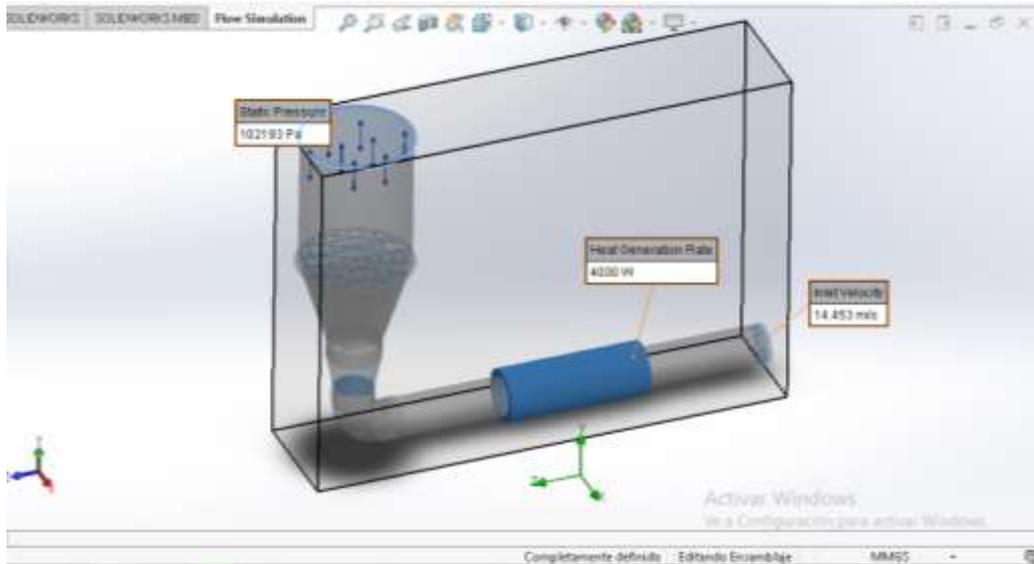


Para la simulación térmica del equipo, se inserta una fuente de calor, dando clic en insertar 'heat source' y seleccionando el tipo de fuente de volumen en como generador de calor dando clic en la pestaña 'Volumen Source', para luego establecer los parámetros de la fuente de generación de calor.

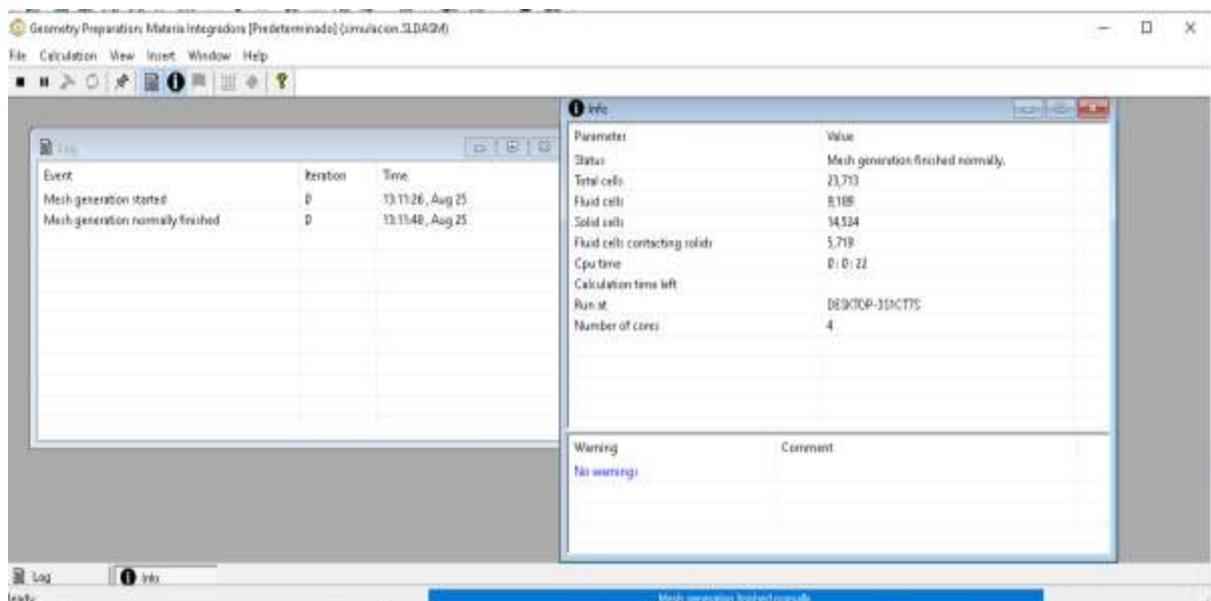
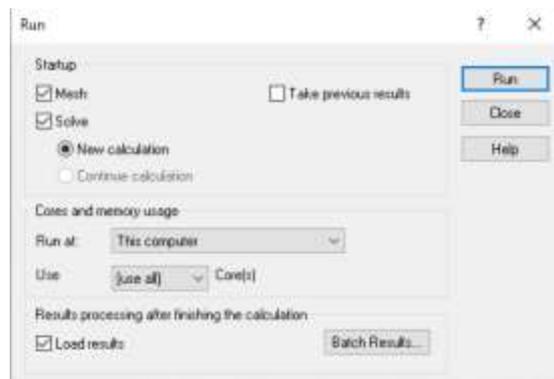


Se seleccionan las condiciones para la generación del mallado.





Finalmente se ejecuta el proyecto y se puede monitorear el desarrollo de la resolución de las ecuaciones llevadas a cabo para la simulación.



Resultados de la simulación:

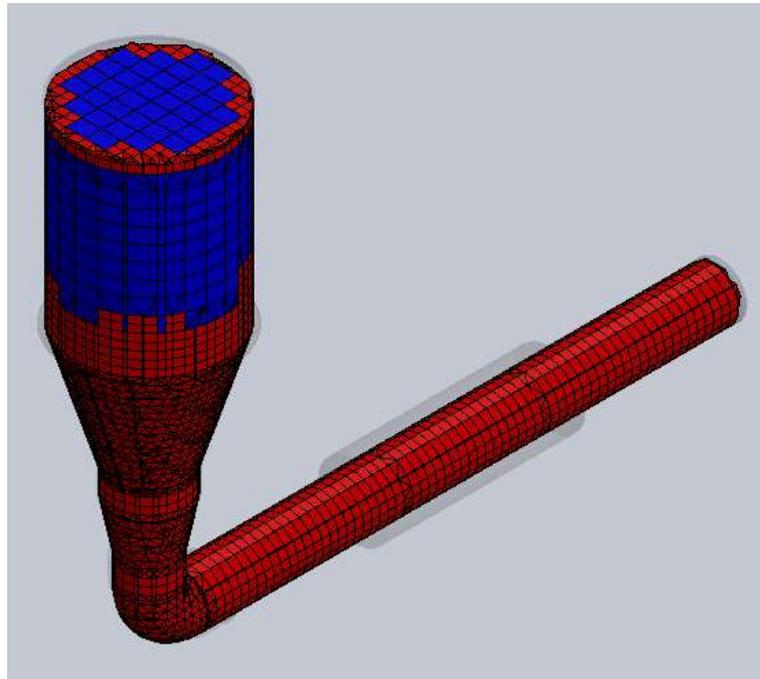


Figura B.4.1 Mallado del modelo del equipo de secado

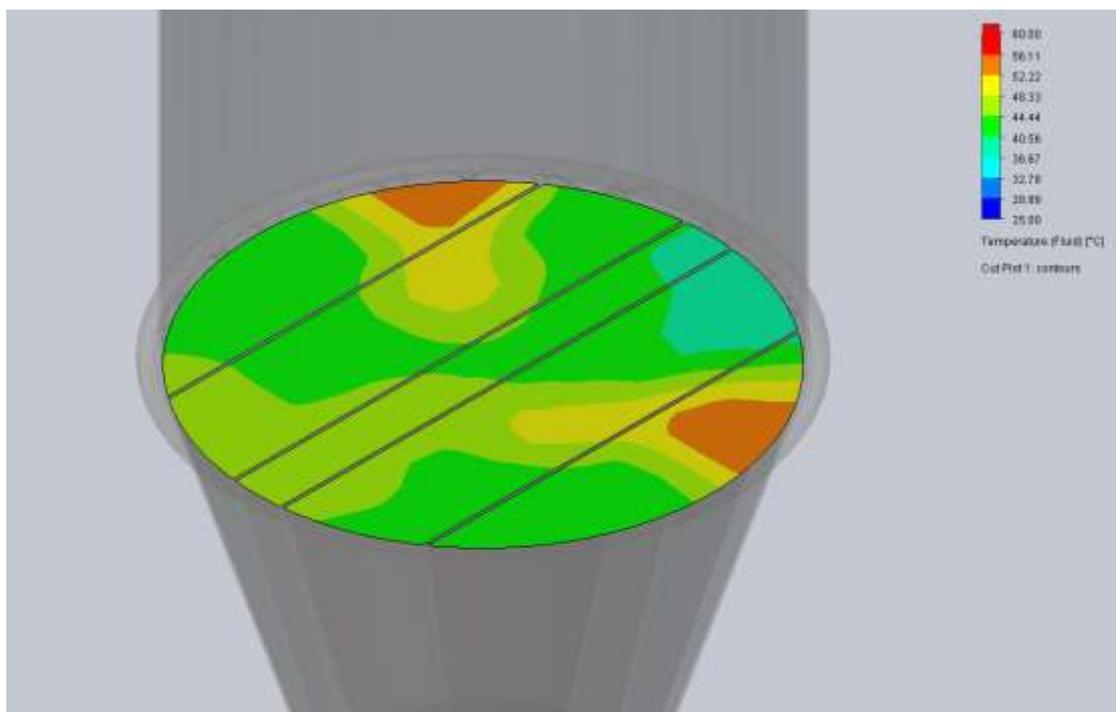


Figura B.4.2 Diagrama de la base de la cámara de secado con escala de colores representando la magnitud de la temperatura del fluido en [°C]

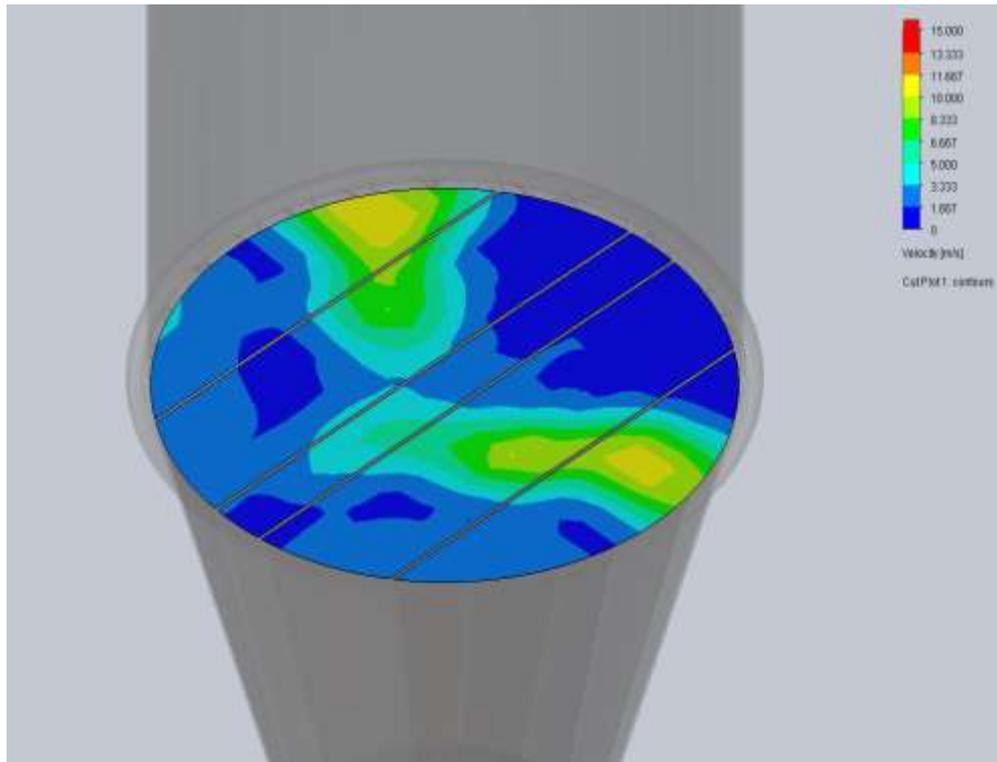


Figura B.4.3 Diagrama de la base de la cámara de secado con escala de colores representando la magnitud de la velocidad del fluido en [m/s]

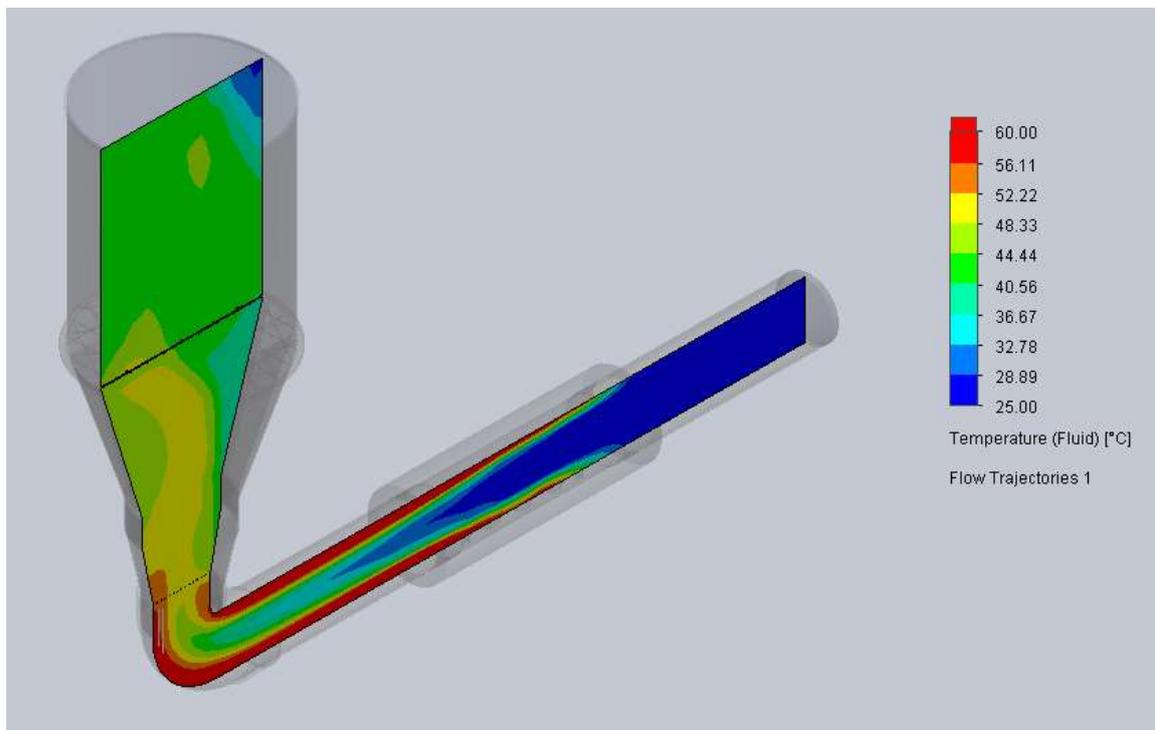


Figura B.4.4 Perfil de temperatura del equipo de secado con escala de colores representando la magnitud de la temperatura del fluido en [°C]

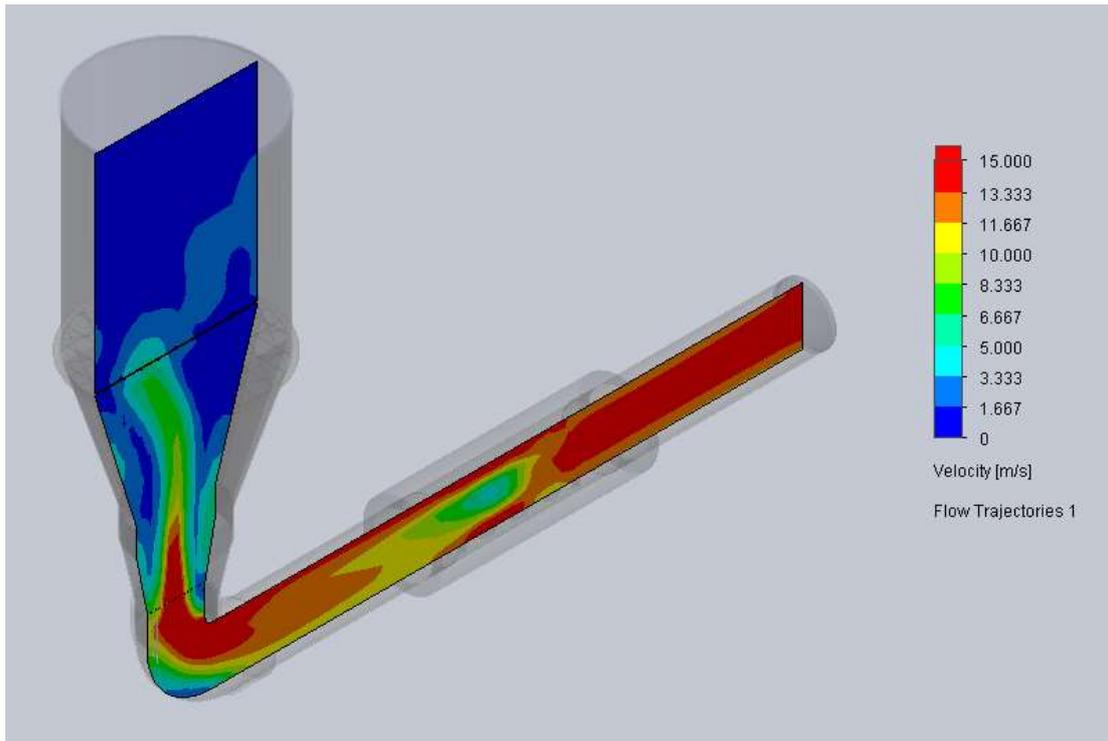


Figura B.4.5 Perfil de velocidad del equipo de secado con escala de colores representando la magnitud de la velocidad del fluido en [m/s]

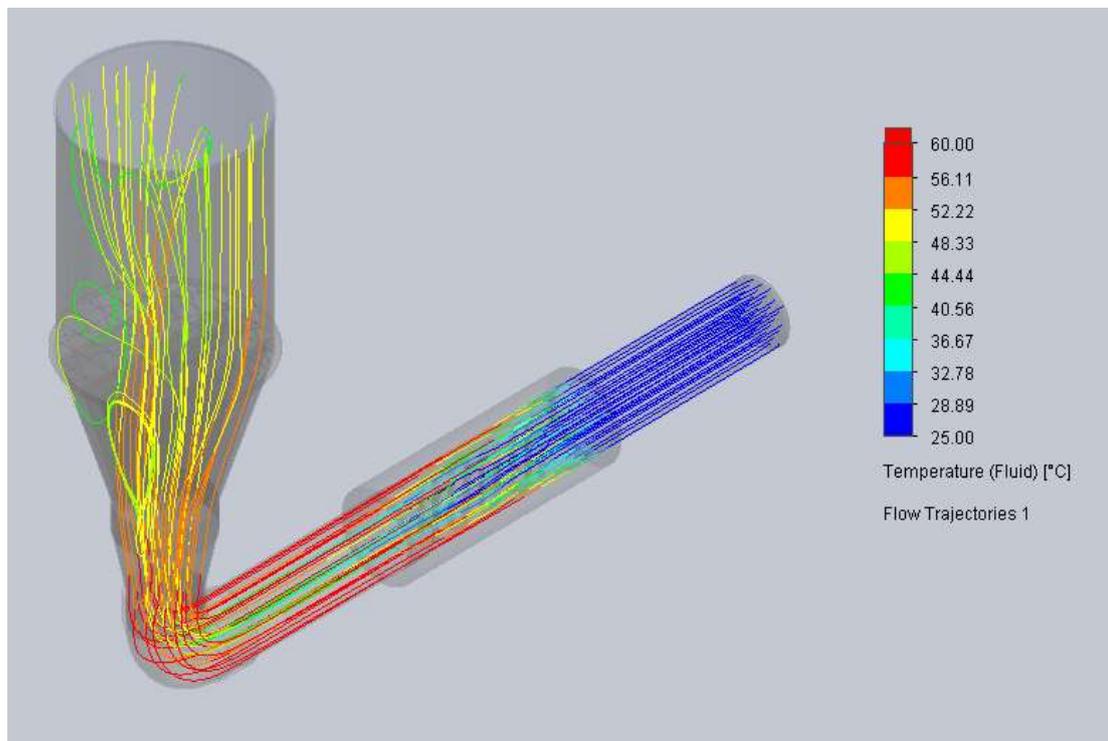


Figura B.4.6 Líneas de flujo con escala de colores representando la magnitud de la temperatura del fluido en [°C]

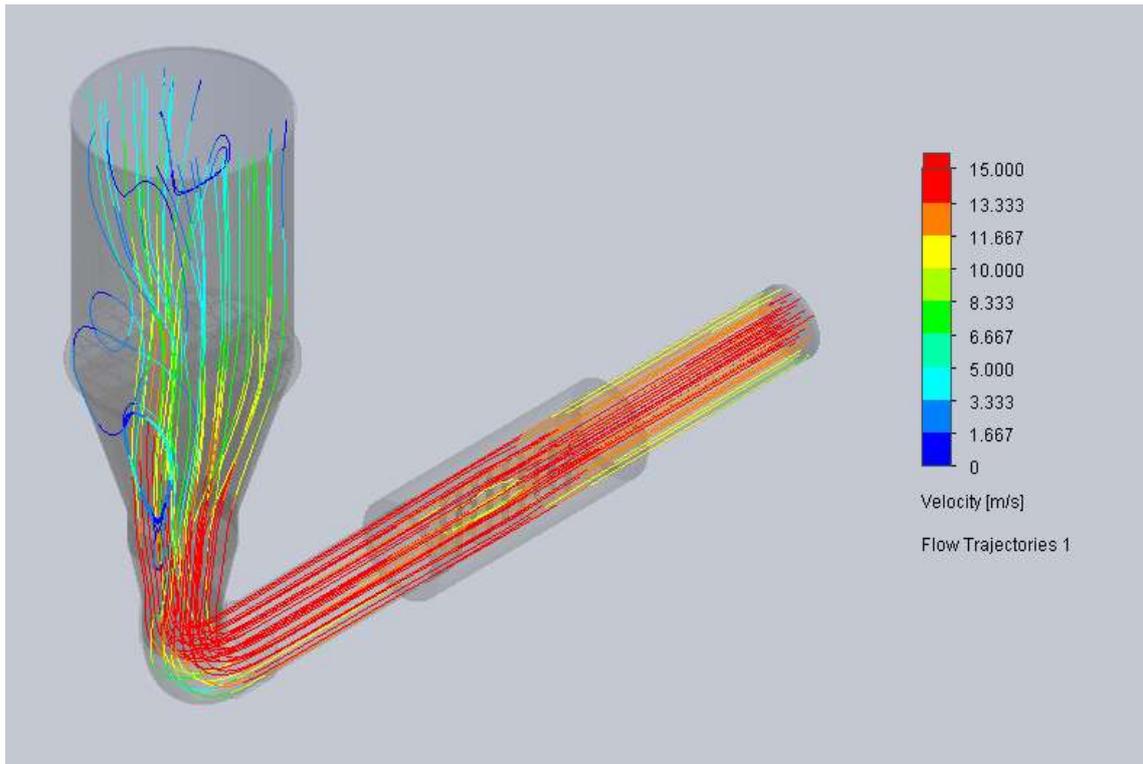


Figura B.4.7 Líneas de flujo con escala de colores representando la magnitud de la velocidad del fluido en [m/s]

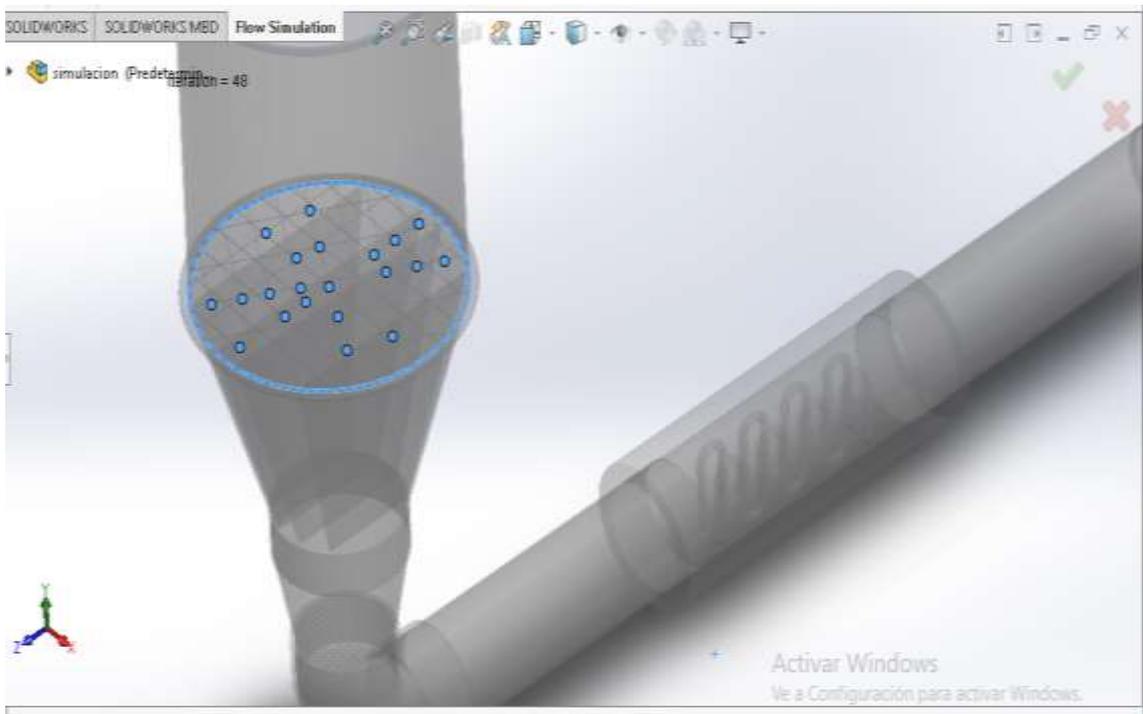


Figura B.4.8 Puntos aleatorios para estimación de valor promedio de temperatura y velocidad

Point Parameters [Materia Integradora [Predeterminado]]

Global Coordinate System

Medium –Fluid/Solid; Iteration = 48

Tabla B.1 Valores de temperatura y velocidad de puntos aleatorios en la base de la cámara de secado

X [m]	Y [m]	Z [m]	Temperature (Fluid) [°C]	Velocity [m/s]
0.305596437	1.078364965	0.768520107	48.04633224	7.882511413
0.395663079	1.078364965	0.820520107	46.78975464	6.584758989
0.398219186	1.076364965	0.709856695	41.72565892	0.440174585
0.349661497	1.072517707	0.72907646	42.07485445	1.145712234
0.381219186	1.076364965	0.739301559	41.88175615	1.656271123
0.334219186	1.076364965	0.820707947	44.10530604	3.392907218
0.349661497	1.072517707	0.85707646	47.90549444	5.034145736
0.454543445	1.074517707	0.793961081	46.76791487	6.613864686
0.302219186	1.076364965	0.876133573	44.41017119	1.332397602
0.285219186	1.076364965	0.905578437	45.93856596	2.14417271
0.349661497	1.072517707	0.92107646	47.06557408	0.831425689
0.317219186	1.076364965	0.850152811	44.04436464	2.494216058
0.349661497	1.072517707	0.82707646	46.04612859	4.468824676
0.438964349	1.078364965	0.845520107	43.09415525	1.511625061
0.258831065	1.078364965	0.741520107	50.62428484	9.018993686
0.246543445	1.074517707	0.793961081	42.47732889	2.308414255
0.349661497	1.071594632	0.793961081	43.28287871	2.242115194
0.349661497	1.072517707	0.66507646	40.48706536	1.113745979
0.296543445	1.074517707	0.793961081	44.59467112	5.22027991
0.349661497	1.072517707	0.69907646	41.41787601	0.918823223
0.413219186	1.076364965	0.683875933	38.26118154	0.333403213
PROMEDIO			44.33530085	3.175656345
ERROR			14.74%	58.78%

APÉNDICE C

Código de Matlab

Script 1: Cálculos

```
%% Velocidad de Fluidización
D=0.30;           % diámetro de la cámara de secado [m]
Rhos=435;        % densidad del solido (pino) [kg/m3]
d=0.11;         % diámetro de la tubería [m]
Rhof=1.1614;    % densidad del fluido [kg/m3]
mu=1.846*10^-5; % viscosidad del aire [Ns/m2]
g=9.8;         % aceleración de la gravedad [m/s2]
L=0.4;         % longitud de la cámara de secado [m]

syms Umf
%diámetro esférico equivalente
seccion=5*10^-4; % sección máxima [cm2]
tam=18*10^-3;   % tamaño promedio [mm]
Vsol=seccion*tam;% volumen de la partícula
Vesf=Vsol;
dp=2*((3*Vesf/(4*pi))^(1/3));

Re=dp*Umf*Rhof/mu;           % número de Reynolds
Ar=(Rhof*(Rhos-Rhof)*g*dp^3)/(mu^2); % número de Arquimedes
Ergun= 24.5*(Re^2) + 1650*Re == Ar; % ecuación de Ergun
Umf=double(solve(Ergun, Umf));
Vmf=Umf(2);                 % velocidad mínima de fluidización [m/s]

%% Longitud de tubería
Vi=Vmf*(D/d)^2;           % velocidad de entrada [m/s]
Ai=(pi*d^2)/4;           % área de sección de entrada [m2]
Q=Ai*Vi;                  % caudal [m3/s]
Re_tub=Rhof*Vi*d/mu;
L_tub=10*d;

%% Balance de energía
syms ms
Ho=0.55;                 % humedad inicial
M=5;                    % capacidad de secado [kg]
Tf=40;                  % temperatura de secado [°C]
Cpf=1005;               % calor específico del aire J/kg K
Cps=2385;               % calor específico de la madera J/kg K
Cpw=4180;               % calor específico del agua J/kg K
hfg=2406*10^3;         % calor de evaporación del agua [J/kg]
mw=Ho*ms;
mf=Rhof*Q;
dT=Tf-27;
dTf=51.95-Tf;

%% pérdidas térmicas
Kac=15.1;               % coeficiente de conductividad acero inoxidable
K=27.78*10^-3;         % coeficiente de conductividad aire a 320K
Pr=0.7042;             % número de Prandlt aire a 320K
Tamb=27;
muD=194.04*10^-7;      %viscosidad del aire a 320K
v=16.544*10^-6;        %viscosidad cinemática del aire a 306.5K
Re_D=4*mf/(pi*D*muD);
Nu_D=0.023*(Re_D^0.8)*(Pr^0.3);
```

```

hi=K*Nu_D/D;
B=1/306.5;
Gr=(B*g*(Tf-Tamb)*L^3)/(v^2);
Ra=Gr*0.7061;
Nu=0.59*(Ra^0.25);
ho=(26.78*10^-3)*Nu/D;
UA=1/((log(0.15/0.1492)/2*pi*Kac*L)+(1/(2*hi*pi*0.15*L))+(1/(2*ho*pi*0.1492*L)));
qL=UA*(Tf-Tamb);
Ts=Tf-qL*((log(0.15/0.1492)/2*pi*Kac*L)+(1/(2*hi*pi*0.15*L)));
hr=0.22*(5.67*10^-8)*((Ts^2)+(Tamb^2))*(Ts+Tamb); % Emisividad 0.22 aceroinox
UA=1/((log(0.15/0.1492)/2*pi*Kac*L)+(1/(2*hi*pi*0.15*L))+(1/(2*(ho+hr)*pi*0.1492*L)));
qL=UA*(Tf-Tamb);

qs=ms*Cps*dT; % calentamiento de la biomasa [W]
qw=mw*Cpw*dT; % calentamiento del agua [W]
qv=ms*(Ho-0.08)*hfg; % calor de evaporación [W]
qf=mf*Cpf*dTf; % calentamiento del aire [W]
Ec_energia=qf==qs+qw+qv+qL; %balance de energía
Ms=solve(Ec_energia,ms);
ms=double(Ms);
m_biomasa=(Ho*ms)+(ms);
t=(M/m_biomasa)/60; % tiempo de secado [min]

Qs=t*60*ms*Cps*dT; % calentamiento de la biomasa [J]
Qw=t*60*Ho*ms*Cpw*dT; % calentamiento del agua [J]
Qv=t*60*ms*(Ho-0.08)*hfg; % calor de evaporación [J]
Qf=t*60*mf*Cpf*dTf;
QL=t*60*qL;

%% Ecuación de Bernoulli
syms f
E=0.0015*10^-3; % rugosidad de la tubería
Z=0.53886; % altura de la cámara de secado
Pa=101.5*10^3; % presión atmosférica
Ec_Colebrook=1/(f^0.5)==-2.0*log10((3.7*E/d)+(2.51/(Re_tub*(f^0.5))));
Ffr=double(solve(Ec_Colebrook, f));
hL1=(Ffr*L_tub*Vi^2)/(2*d*g); % perdidas hidráulicas mayores
KL=0.0067+0.0267+0.3; % coeficientes de pérdida
hL2=(KL*Vi^2)/(2*g); % perdidas hidráulicas menores
P2=(M*g/(0.25*pi*D^2))+Pa; % presión en la cámara de secado
Pvent=P2-Pa+0.5*Rhof*Vi^2+Rhof*g*(Z+hL1+hL2);
Wvent=(Pvent*Q)/0.35; % potencia del ventilador

```

Script 2: Gráfico de potencia vs tiempo de secado

```
syms f(t,q)
syms f1(t,q)
syms f2(t,q)
%t=33.6904;
Ho=0.55;
M=5;
Cpf=1005;           % calor especifico del aire J/kg K
Cps=2385;           % calor especifico de la madera J/kg K
Cpw=4180;           % calor especifico del agua J/kg K
hfg=2406*10^3;     % calor de evaporación del agua [J/kg]
Rhof=1.1614;       % densidad del fluido [kg/m3]
Q=0.1373;
Tf=40;
m_biomasa=M/(60*t);
ms=m_biomasa/(Ho+1);
mw=Ho*ms;
mf=Rhof*Q;         % flujo másico de aire [kg/s]
dT=Tf-27;         % delta T de biomasa
dTf=51.95-Tf;     % delta T del aire
dTf1=57.53-Tf;
dTf2=46.60-Tf;
Qs=ms*Cps*dT;     % calentamiento de la biomasa [W]
Qw=mw*Cpw*dT;     % calentamiento del agua [W]
Qv=ms*(Ho-0.08)*hfg; % calor de evaporación [W]
Qf=mf*Cpf*dT;     % calentamiento del aire [W] G50
QL=14.0065;
Qf1=0.1303764*Cpf*dT; % calentamiento del aire [W] G30
Qf2=0.203074*Cpf*dT; % calentamiento del aire [W] G100

f=q==Qf+Qs+Qw+Qv+QL;
f1=q==Qf1+Qs+Qw+Qv+QL;
f2=q==Qf2+Qs+Qw+Qv+QL;

fimplicit (f1, [15 60 2500 6000]);
grid on
hold on
fimplicit (f, [15 60 2500 6000]);
fimplicit (f2, [15 60 2500 6000]);
xlabel("t [min]")
ylabel("Potencia [W]")
title("Potencia requerida vs Tiempo")
legend('G30', 'G50', 'G100')
```

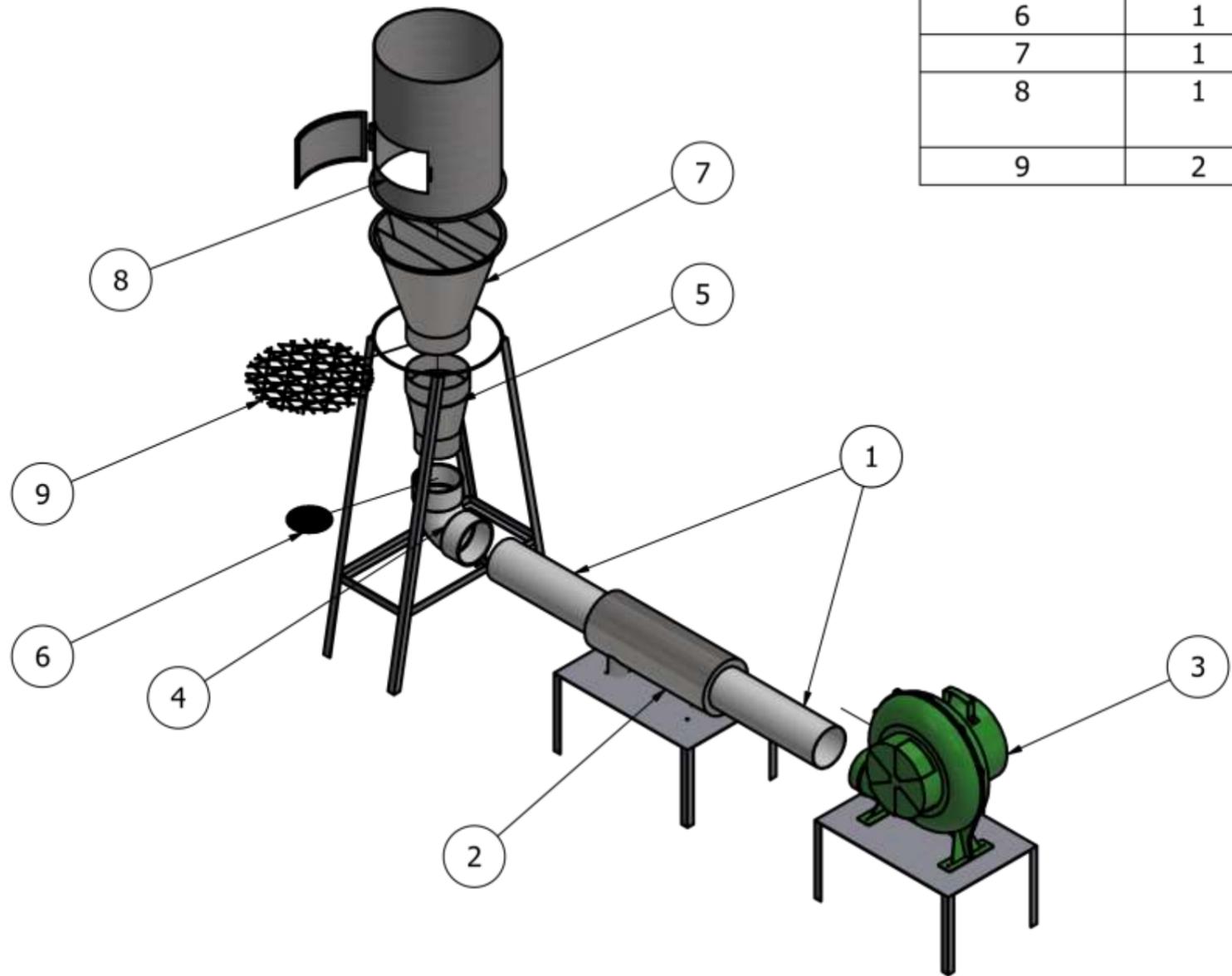
Script 3: Gráfico de temperatura de secado vs tiempo de secado

```
%Tf vs t
syms f(t,Tf)
syms f1(t,Tf)
syms f2(t,Tf)
Ho=0.55;
M=5;
Cpf=1005;          % calor especifico del aire J/kg K
Cps=2385;          % calor especifico de la madera J/kg K
Cpw=4180;          % calor especifico del agua J/kg K
hfg=2406*10^3;    % calor de evaporación del agua [J/kg]
Rhof=1.1614;      % densidad del fluido [kg/m3]
m_biomasa=M/(60*t);
ms=m_biomasa/(Ho+1);
mw=Ho*ms;
dT=Tf-27;         % delta T de biomasa
dTf=51.95-Tf;    % delta T del aire
dTf1=57.53-Tf;
dTf2=46.60-Tf;
Qs=ms*Cps*dT;     % calentamiento de la biomasa [W]
Qw=mw*Cpw*dT;     % calentamiento del agua [W]
Qv=ms*(Ho-0.08)*hfg; % calor de evaporación [W]
Qf=0.15946022*Cpf*dTf; % calentamiento del aire [W] G50
Qf1=0.1303764*Cpf*dTf1; % calentamiento del aire [W] G30
Qf2=0.203074*Cpf*dTf2; % calentamiento del aire [W] G100
QL=14.0065;
f=Qf==Qs+Qw+Qv+QL; %balance de energía
f1=Qf1==Qs+Qw+Qv+QL;
f2=Qf2==Qs+Qw+Qv+QL;

fimplicit (f1, [10 60 20 45]);
grid on
hold on
fimplicit (f, [10 60 20 45]);
fimplicit (f2, [10 60 20 45]);
xlabel("t [min]")
ylabel("Temperatura [°C]")
title("Temperatura de secado vs Tiempo")
legend({'G30','G50','G100'}, 'Location', 'southeast')
```

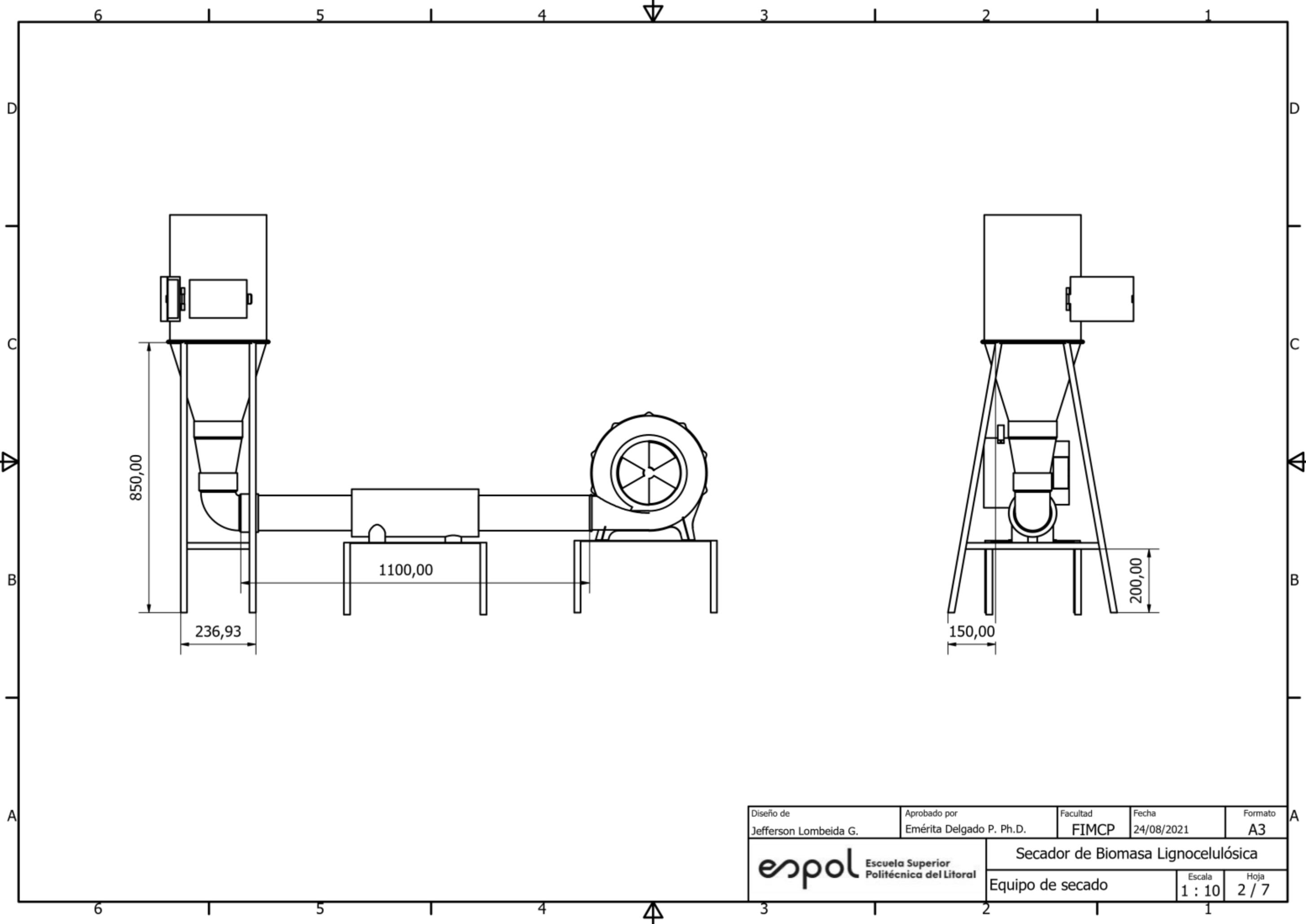
APÉNDICE D

Planos

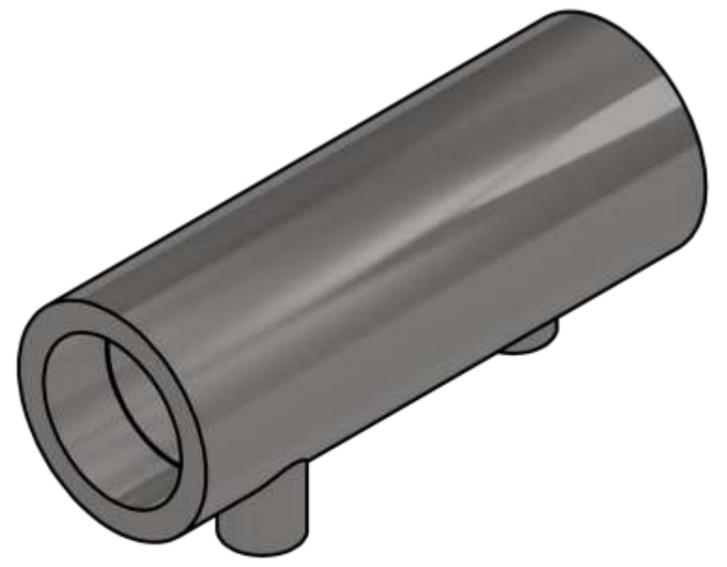
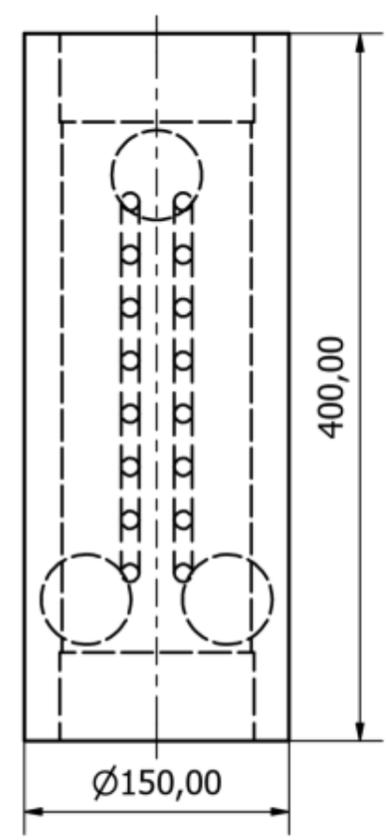
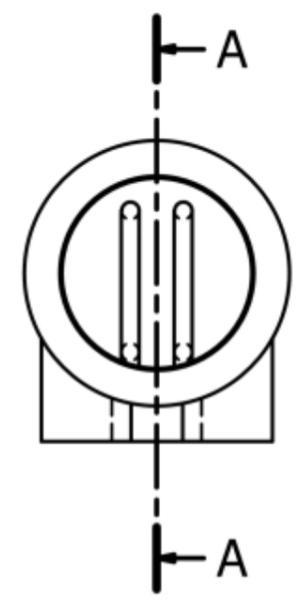
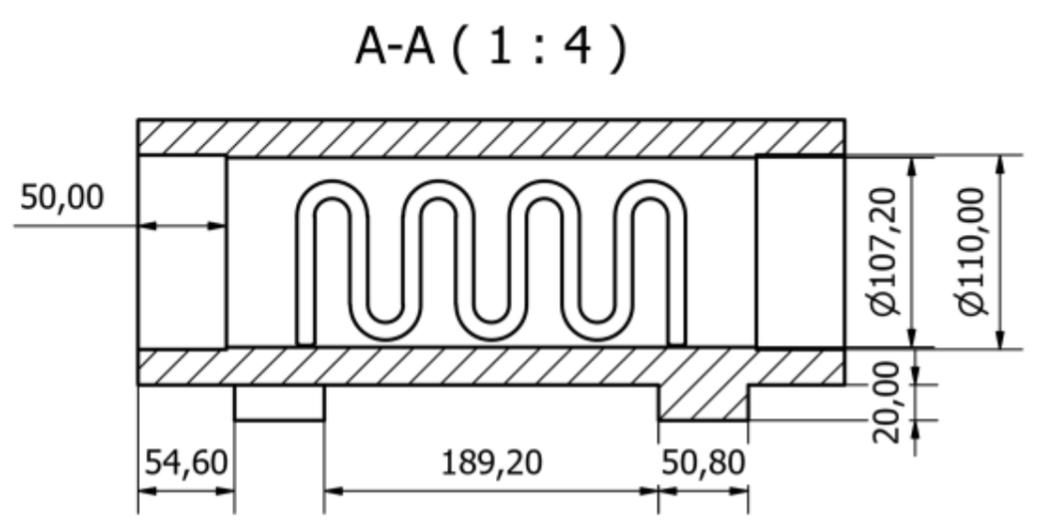


LISTA DE PIEZAS			
ELEMENTO	CTDAD	Nº DE PIEZA	DESCRIPCIÓN
1	2	ISO 3633 tubería (PVC-U)	Conducto del secador
2	1	Calentador de flujo	Resistencias térmicas de 4 kW
3	1	Electric blower (4 PULG.)	Generador de flujo
4	1	ISO 3633 codo 90º	Tubería curva
5	1	Expansión gradual	Acoplamiento del conducto
6	1	Malla plástica	Filtro de astillas
7	1	Cámara de distribución	Distribuidor de flujo
8	1	Cámara de secado	Almacenamiento de astillas
9	2	Malla metálica	Filtro de astillas

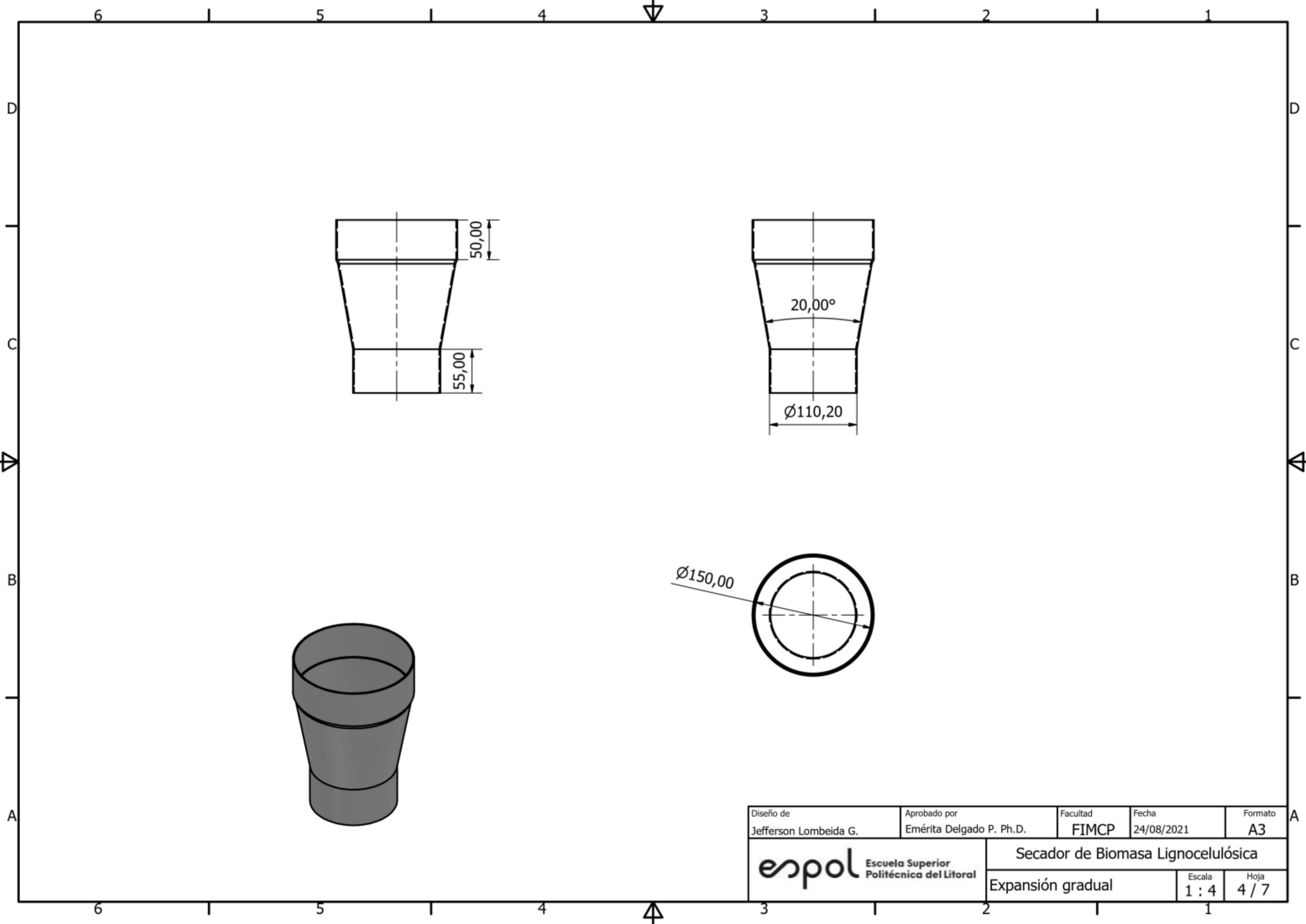
Diseño de Jefferson Lombeida G.	Aprobado por Emérita Delgado P. Ph.D.	Facultad FIMCP	Fecha 24/08/2021	Formato A3
		Secador de Biomasa Lignocelulósica		
		Lista de piezas	Escala 1 : 14	Hoja 1 / 7



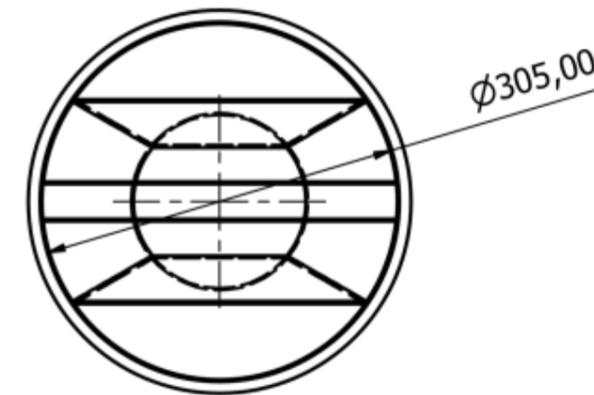
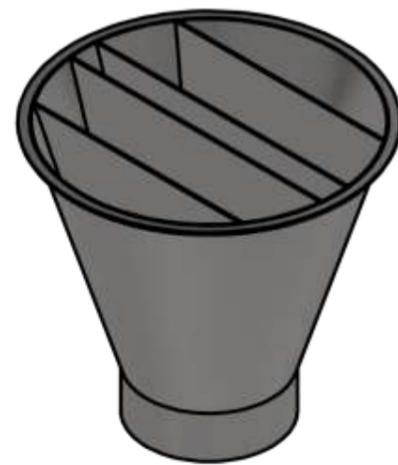
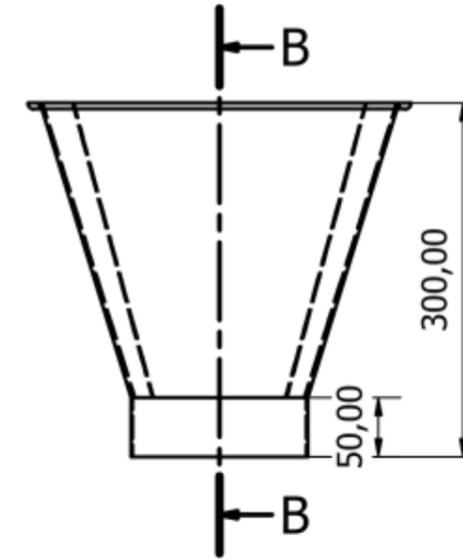
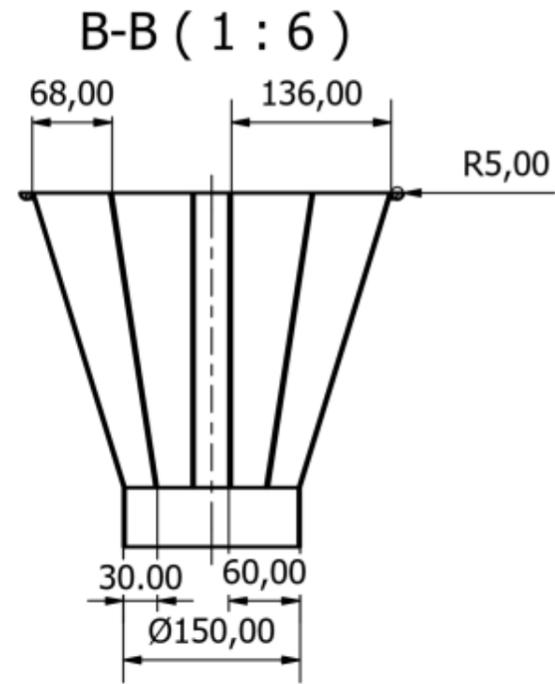
Diseño de Jefferson Lombeida G.	Aprobado por Emérita Delgado P. Ph.D.	Facultad FIMCP	Fecha 24/08/2021	Formato A3
		Secador de Biomasa Lignocelulósica		
		Equipo de secado	Escala 1 : 10	Hoja 2 / 7



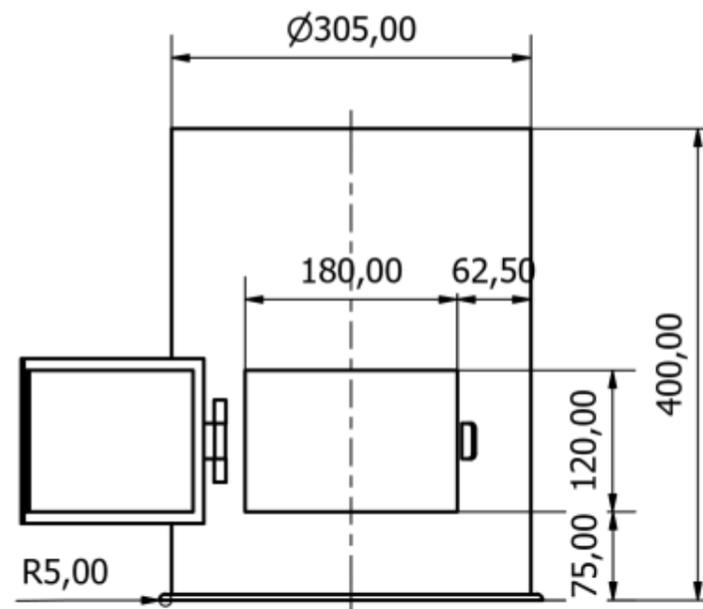
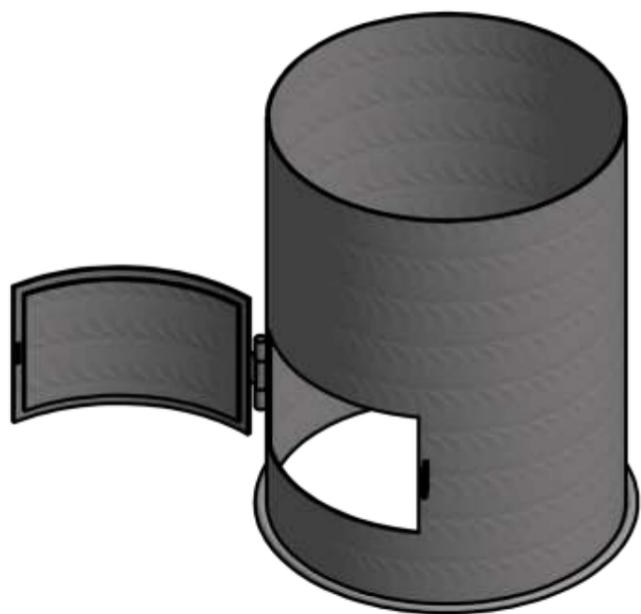
Diseño de Jefferson Lombeida G.	Aprobado por Emérita Delgado P. Ph.D.	Facultad FIMCP	Fecha 24/08/2021	Formato A3
		Secador de Biomasa Lignocelulósica		
		Calentador de flujo	Escala 1 : 4	Hoja 3 / 7



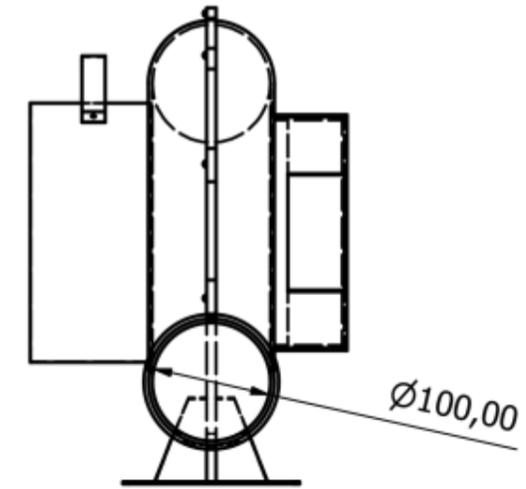
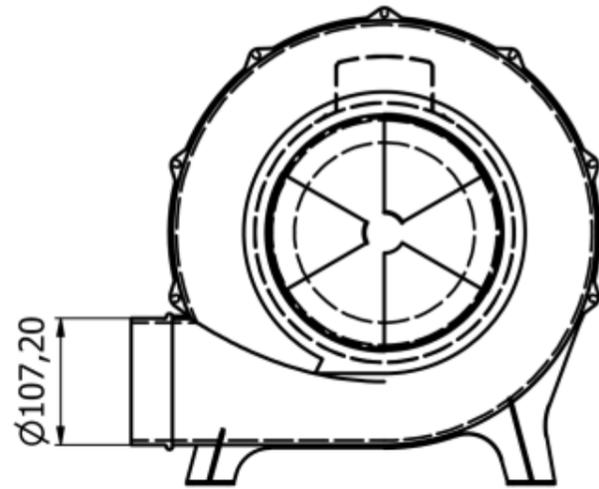
Diseño de Jefferson Lombeida G.	Aprobado por Emérita Delgado P. Ph.D.	Facultad FIMCP	Fecha 24/08/2021	Formato A3
		Secador de Biomasa Lignocelulósica		
		Expansión gradual	Escala 1 : 4	Hoja 4 / 7



Diseño de Jefferson Lombeida G.	Aprobado por Emérita Delgado P. Ph.D.	Facultad FIMCP	Fecha 24/08/2021	Formato A3
		Secador de Biomasa Lignocelulósica		
		Cámara de distribución	Escala 1 : 6	Hoja 5 / 7



Diseño de Jefferson Lombeida G.	Aprobado por Emérita Delgado P. Ph.D.	Facultad FIMCP	Fecha 24/08/2021	Formato A3
		Secador de Biomasa Lignocelulósica		
		Cámara de secado	Escala 1 : 6	Hoja 6 / 7



Diseño de Jefferson Lombeida G.	Aprobado por Emérita Delgado P. Ph.D.	Facultad FIMCP	Fecha 24/08/2021	Formato A3
		Secador de Biomasa Lignocelulósica		
		Electric blower (4 PULG.)	Escala 1 : 6	Hoja 7 / 7