

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

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

“Diseño de un secador de flujo cruzado para uso de laboratorio”

PROYECTO INTEGRADOR

Previo la obtención del Título de:

Ingeniero Mecánico

Presentado por:

Steeven Bryan Suárez Pacheco

Walter Amadeo Almachi Aucaquizhpi

GUAYAQUIL - ECUADOR

Año: 2022

DEDICATORIA

Me gustaría dedicar mi trabajo a todas las personas que significan mucho para mí.

A mis padres Carla Pacheco y Luis Suárez por ser los pilares fundamentales de mi vida.

A mis hermanos Teddy, Carlos y Nikolay por su apoyo incondicional durante todos estos años.

A mis amigos Estrella, Diana, Ariana y Walter por haberme brindado una amistad verdadera.

Steeven Bryan Suárez Pacheco

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios por haberme otorgado una familia maravillosa que han estado en todo momento conmigo para apoyarme.

También quiero agradecer a nuestra tutora y profesora PhD. Emérita Delgado por habernos guiado en este proyecto, compartiendo su experiencia y brindando su infinita paciencia.

Steeven Bryan Suárez Pacheco

DEDICATORIA

El presente proyecto se lo dedicamos a nuestros padres por su apoyo incondicional, cariño y confianza durante nuestra etapa universitaria.

A mis hermanas quienes siempre confiaron en mí y me ayudaron emocionalmente en los momentos que más difíciles.

Walter Amadeo Almachi Aucaquizhpi

AGRADECIMIENTOS

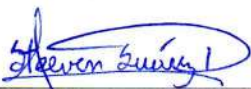
A mis padres y hermanas, quienes con su trabajo y esfuerzo hicieron posible mi continua preparación académica

Nuestros más sinceros agradecimientos a nuestra tutora y profesora PhD. Emérita Delgado por compartir sus conocimientos, mostrar paciencia y compromiso en el desarrollo de este trabajo.

Walter Amadeo Almachi Aucaquizhpi

DECLARACIÓN EXPRESA

"Los derechos de titularidad y explotación, nos corresponde conforme al reglamento de propiedad intelectual de la institución; Steeven Bryan Suárez Pacheco y Walter Amadeo Almachi Aucaquizhpi y damos nuestro consentimiento para que la ESPOI 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"



Steeven Bryan Suárez
Pacheco



Walter Amadeo Almachi
Aucaquizhpi

EVALUADORES

PhD. Emérita Delgado

PROFESOR DE LA MATERIA

PhD. Emérita Delgado

PROFESOR TUTOR

RESUMEN

Actualmente debido al recorte presupuestario en todas las universidades del Ecuador se está buscando alternativas para la implementación de equipos didácticos para laboratorio con la finalidad de fortalecer los conocimientos impartidos a los estudiantes. La FIMCP a través de la carrera de ingeniería en alimentos requiere equipos de laboratorio para análisis de diferentes pruebas de secado que permitan un escalonamiento de baja escala con viabilidad de construcción aplicando los conceptos fundamentales de economía circular.

Para el cumplimiento del presente proyecto se aplicaron los conceptos de mecánica de fluidos, transferencia de calor y masa para el diseño de un secador de bandeja tomando como referencia la norma técnica NTE INEN 2996 para productos deshidratados. El equipo está constituido por una cámara de calentamiento y una bandeja mallado para la deshidratación de alimentos de hasta 1.5 Kg de producto mediante flujo de aire cruzado.

Mediante las simulaciones CFD se ha comprobado que la energía necesaria para secar los 1.5 Kg de producto debe ser de 1.2 KW, adaptándole un ventilador centrífugo y una resistencia de 2 KW de potencia que garantiza alcanzar una temperatura de hasta 70°C y una velocidad de flujo de aire de 13 m/s. Finalmente en el análisis de costos se determinó su viabilidad para la implementación garantizando los requerimientos de diseño

Palabras Clave: Secador, Flujo Cruzado, Economía Circular, Deshidratación de alimentos

ABSTRACT

Currently, due to budget cuts in all universities in Ecuador, alternatives are being sought for the implementation of didactic equipment for the laboratory to strengthen the knowledge imparted to students. The FIMCP, through the food engineering career, requires laboratory equipment for the analysis of different drying tests that allow a small-scale scaling with construction feasibility applying the fundamental concepts of circular economy.

For the fulfillment of this project, the concepts of fluid mechanics, heat and mass transfer were applied for the design of a tray dryer, taking as reference the technical standard NTE INEN 2996 for dehydrated products. The equipment is made up of a heating chamber and a mesh tray for the dehydration of foods of up to 1.5 Kg of product by means of crossed air flow.

Through CFD simulations it has been verified that the energy needed to dry the 1.5 Kg of product must be 1.2 KW, adapting a centrifugal fan and a resistance of 2 KW of power that guarantees reaching a temperature of up to 70°C and a speed of 13m/s airflow. Finally, in the cost analysis, its viability for implementation was determined, guaranteeing the design requirements.

Keywords: Dryer, Cross Flow, Circular Economy, Food Dehydration

ÍNDICE GENERAL

EVALUADORES.....	7
RESUMEN	I
<i>ABSTRACT</i>	II
ÍNDICE GENERAL.....	III
ABREVIATURAS.....	VI
SIMBOLOGÍA.....	VII
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.....	2
1.4 Marco Teórico.....	3
1.4.1 Secado.....	3
1.4.2 Tipos de procesos de secado	3
1.4.3 Mecanismo de secado	4
1.4.4 Calentamiento Directo e Indirecto	4
1.4.5 Tipos de flujo en un secador	4
1.4.6 Clasificación de los secadores	6
CAPÍTULO 2	9

2.	Metodología	9
2.1	Diseño conceptual	10
2.1.1	Requerimientos del diseño	10
2.1.2	Alternativas de solución	10
2.1.3	Matriz de selección	12
2.1.4	Diseño de forma del secador	14
2.2	Diseño del secador	14
2.2.1	Materia Prima.....	14
2.2.2	Dimensionamiento del Secador.....	15
2.2.3	Cálculo de la malla de las bandejas	18
2.3	Simulación.....	25
2.3.1	Condiciones de Borde	25
2.3.2	Modelo de Turbulencia usado	27
2.3.3	Flujo másico Entrada y Salida	27
CAPÍTULO 3		29
3.	Resultados Y ANÁLISIS	29
3.1	Dimensionamiento del secador.....	29
3.1.1	Geometría del Volumen de Control	29
3.1.2	Análisis Térmico.....	29
3.1.3	Análisis de vórtices	31
3.1.4	Flujo másico de entrada y salida	32
3.1.5	Selección de malla y ventilador	33
3.2	Manufactura	34
3.3	Simulación CFD.....	35
3.4	Análisis de Costos	37
CAPÍTULO 4		38

4.	Conclusiones Y Recomendaciones.....	38
4.1	Conclusiones.....	38
4.2	Recomendaciones.....	39
	REFERENCIAS.....	42
	APÉNDICES.....	44

ABREVIATURAS

ESPOL	Escuela Superior Politécnica del Litoral
FIMCP	Facultad de Ingeniería Mecánica y Ciencias de la Producción
CDTS	Centro de Desarrollo Tecnológico Sustentable
IAL	Ingeniería en Alimentos
ODS	Objetivos de Desarrollo Sostenible
CFD	Flujo Dinámico Computacional
CAD	Diseño Asistido Computarizado
STEP	Standard for the Exchange of Product Data

SIMBOLOGÍA

I_{so}	Carga del solidos sobre la bandeja [Kg/m^2]
ρ_p	Densidad del banano [Kg/m^3]
t_p	Espesor del plátano [m]
A_{tba}	Área total de la bandeja [m^2]
γ_{ac}	Peso específico [g/cm^3]
C_{pAc}	Calor específico [J/kgk]
K_{Ac}	Conductividad térmica [w/mk]
Y_{Ac}	Módulo de elasticidad [N/m^2]
t_t	Resistencia a la tracción [N/m^2]
P_{max}	Fuerza máxima sobre la bandeja [N/m^2]
$C_{bandeja}$	Capacidad de bandeja [Kg]
$A_{bandeja}$	Área de la bandeja [m^2]
t_{Di}	Esfuerzo de diseño [N/ m^2]
t_{tr}	Resistencia a la tracción [N/m^2]
fse	Factor de seguridad
$t_{bandeja}$	Espesor de la bandeja [m]
m_{total}	Masa total [Kg]
$N_{bandejas}$	Numero de bandejas
m_{p-seco}	Masa producto seco [Kg]
$m_{agu-vapor}$	Masa vapor de agua [Kg]
m_{agua}	Masa del agua [Kg]
ϕ_{prod}	Diámetro promedio
$Capaci$	Capacidad de la cámara del secador [kg]
T_{BS}	Temperatura Bulbo Seco [$^{\circ}C$]
T_{BH}	Temperatura bulbo húmedo [$^{\circ}C$]
ϕ	Humedad Relativa [%]
T_w	Temperatura de Rocío [$^{\circ}C$]
H_{abs}	Humedad Absoluta [kg vapor de agua/kg aire seco]
h	Entalpía [KJ/kg aire seco]

h_c	Coeficiente de transferencia de calor por convección [Kcal/hm ² °C]
A	Área de las bandejas [m ²]
H_{bh}	Humedad inicial del producto (base seca)
m_{wa}	Porcentaje de humedad %
m_{se}	Porcentaje de producto seco %
H_{bse}	Humedad inicial del producto (base húmeda)
m_{banano}	Masa del banano [Kg]
ρ_{banano}	Densidad del banano [Kg/m ³]
V_{banano}	Volumen del banano [m ³]
V_{inicial}	Volumen antes después del proceso de secado [m ³]
V_{final}	Volumen final después del proceso de secado [m ³]
ΔV_{final}	Volumen final del producto deshidratado [m ³]
m_{se}	porcentaje de producto seco [%]
\dot{Q}_{aire}	Caudal del aire [m ³ /s]
\dot{m}_{aire}	Flujo masico del aire [Kg/s]
ρ_{aire}	Densidad del aire [Kg/m ³]
v_{aire}	Velocidad del aire [m/s]
A_{aire}	Área de la sección transversal de la cámara [m ²]
x_p	Distancia desde el borde principal [m]
$u_{\text{pro}\infty}$	Velocidad promedio de fluido [m/s]
ν	Viscosidad cinética [m ² /s]
Re_y	Numero de Reynolds.
Pr_a	Numero de Prandtl
X_c	Longitud característica [m]
h_{tc}	Coeficiente de transferencia de calor [W/m ² °C]
k_t	Conductividad térmica del fluido [W/m °C]

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Flujo de aire a contracorriente [Donald G., 2014].....	5
Figura 1.2 Flujo de aire paralelo [Donald G., 2014]	5
Figura 1.3 Flujo de aire de corriente cruzada [Donald G., 2014].....	6
Figura 2.1 Diagrama de metodología de diseño	9
Figura 2.2 Secador de bandeja (Suárez, Almachi, 2022).....	10
Figura 2.3 Secador de columna (Donald G. 2014).....	11
Figura 2.4 Secador de banda (Donald G. 2014)	11
Figura 2.5 Diseño de forma del secador de flujo cruzado	14
Figura 2.6 Isotherma del banano natural	16
Figura 2.7 Curva de Velocidades de secado del banano	17
Figura 2.8 Variación de Temperatura del respecto a la velocidad (Mérida D. 2017) .	18
Figura 2.9 Volumen de control para la cámara de secado	23
Figura 2.10 Configuración de velocidad del flujo de aire a la cámara	25
Figura 2.11 Configuración de temperatura en el interior de la cámara.....	26
Figura 2.12 Condiciones de salida para la simulación	26
Figura 2.13 Configuración K-épsilon del diseño.....	27
Figura 2.14 Configuración del flujo másico	28
Figura 3.1 Volumen de control del secador	29
Figura 3.2 Perfil de velocidad en el interior de la cámara	30
Figura 3.3 Perfil de temperatura en el interior de la cámara	31
Figura 3.4 Vórtices del sistema.....	31
Figura 3.5 Vórtices del sistema.....	32
Figura 3.6 Monitor serial de flujo másico	32
Figura 3.7 Mallado tetraédrico del secador.....	33
Figura 3.8 Simulación del contorno de velocidad.....	36
Figura 3.9 Simulación del contorno de temperatura.....	36

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Clasificación de secadores (G. NONHEBEL).....	6
Tabla 1.2 Clasificación de acuerdo con su producción (G. NONHEBEL).....	7
Tabla 1.3 Tiempo de exposición de solidos (Kimball, Chem. Eng, 2014).....	8
Tabla 2.1 Criterios de selección.....	12
Tabla 2.2 Matriz de decisión.....	13
Tabla 2.3 Especificaciones de cada rebanada de banano	15
Tabla 2.4 Dimensiones de las bandejas	15
Tabla 2.5 Parámetros determinados utilizando carta psicrométrica	17
Tabla 2.6 Distribución del porcentaje de humedad en el producto.....	18
Tabla 2.7 Distribución de la cantidad agua respecto a la cantidad de masa seca.....	19
Tabla 2.8 Dimensiones del mallado de acero inoxidable	20
Tabla 2.9 Condiciones de Humedad y Temperatura de la cámara de secado	21
Tabla 2.10 Propiedades del aire a 30°C	23
Tabla 3.1 Datos conseguidos mediante cálculos teóricos.....	29
Tabla 3.2 Distribución del calor neto del sistema.....	33
Tabla 3.3 Parámetros de ventilador centrífugo (4” BK-EB4).....	34
Tabla 3.4 Costo de construcción	37

ÍNDICE DE PLANOS

PLANO 1 Ensamblaje Secador Flujo Cruzado

PLANO 2 Estructura de Secado

PLANO 3 Bandeja Mallada

PLANO 4 Resistencia

CAPÍTULO 1

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Definición del Problema

La FIMCP a través de la carrera de ingeniería en alimentos requiere equipos de laboratorio para análisis de diferentes pruebas de secado específicamente que cumpla con el mecanismo de pasar aire caliente a manera de flujo cruzado. Actualmente en el mercado no se comercializan estos equipos específicos, encontrándose solo secadores de tipo bandeja, lo cual es importante en el diseño de un secador de flujo cruzado para la enseñanza educativa de los estudiantes de Alimentos.

1.2 Justificación del proyecto

La carrera de Ingeniería en Alimentos (IAL) se formó en base a la necesidad de satisfacer las necesidades del sector productivo alimentario del país. Mediante la administración de la facultad de Ingeniería Mecánica, se creó la carrera el 13 de agosto de 1996 para empezar el primer programa para profesionales vinculados al procesamiento de alimentos. Actualmente la carrera cuenta con 488 graduados, 21 docentes a servicio completo y con una amplia unidad de laboratorios al servicio de los estudiantes como son: Operaciones Unitarias, Investigación y desarrollo, Microbiología, Bromatología, Planta Piloto, Evaluación sensorial y un laboratorio de investigación avanzada de Análisis Físico Químico y Biológico de los Alimentos. Además de promover varios proyectos de investigación tales como el uso de harinas no tradicionales, migración de compuestos químicos desde envases de plásticos convencionales y biodegradables hacia aceites vegetales comestibles, valorización de la calidad nutricional y funcional de alimentos, caracterización tecnológica y nutricional de harinas y estudio y desarrollo de películas biodegradables [1].

Dentro de los procesos de la industria de alimentos se encuentra la etapa de secado, siendo la más importante para la conservación de los alimentos, lo cual en el área de laboratorios comúnmente se utiliza equipos de secadores de bandejas,

en ese sentido el laboratorio de operaciones unitaria necesita realizar análisis del secado de productos alimentarios con la finalidad de comparar tiempo de deshidratación y consumo de energético del proceso para fortalecer el conocimiento de los estudiantes de la carrera de alimento.

Para complementar es necesario indicar que el proyecto cumple con los objetivos de desarrollo sostenible ODS 4 educación de calidad donde establece “Garantizar una educación inclusiva, equitativa y de calidad y promover oportunidades de aprendizaje durante toda la vida para todos” con meta “De aquí asegurar el acceso igualitario de todos los hombres y las mujeres a una formación técnica, profesional y superior de calidad, incluida la enseñanza universitaria” [2], por otra el ODS 8 trabajo decente y crecimiento económico donde establece “promover el crecimiento económico inclusivo y sostenible, el empleo y el trabajo decente para todos”. [3]

Entre las líneas de actuación a nivel nacional se establece fomentar en las líneas de actuación sector productivo; y educación. Con este último se obtendrá un prototipo a menor escala, fácil manipulación para precautelar la seguridad íntegra del estudiante al momento de realizar sus prácticas de laboratorio.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

Diseñar un secador de flujo cruzado para uso de laboratorio que cumpla las condiciones de operatividad, seguridad y educativo.

1.3.2 Objetivos Específicos

1. Discriminar la tecnología de secadoras de tipo flujo cruzado a nivel industrial que permita un escalonamiento de baja escala de uso de laboratorio con viabilidad de construcción.
2. Diseñar un secador de baja escala que cumpla las condiciones de trabajo para el uso de productos agrícolas que trabajen con temperaturas entre 50°C a 60 °C, para lo cual se analizara el componente teórico y simulado.
3. Analizar la factibilidad económica de la construcción del equipo para enseñanza aplicando los conceptos fundamentales de economía circular.

1.4 Marco Teórico

La deshidratación de alimentos es una técnica utilizada comúnmente en la industria alimenticia utilizada para la conservación de alimentos. Es un proceso en el cual se trata de eliminar la mayor cantidad de agua de un alimento sólido o líquido a fin de extender la vida útil y que pueda conservar sus propiedades nutritivas, vitamínicas y minerales.

Para llevar a cabo la deshidratación de alimentos es necesario de equipos tecnológicos que pueden llevar a cabo la función de la eliminar el agua del producto a partir de varios métodos de transferencia de calor como conducción, convección y radiación.

1.4.1 Secado

El secado es una actividad de múltiples funciones cubriendo una amplia variedad de aplicaciones y productos. Por lo tanto, el secado se define como la eliminación de sustancias volátiles (humedad) mediante el suministro de calor que da como resultado un producto sólido y seco. Hay muchos tipos de diferentes secadores disponibles para el procesamiento de alimentos y otras aplicaciones.

Cuando un sólido húmedo se somete a secado térmico, ocurren dos procesos simultáneamente:

1. Transferencia de calor del espacio adyacente a la superficie para eliminar la humedad mediante evaporación.
2. Filtración de la humedad interna del sólido a la superficie para su evaporación producto del proceso. [4]

1.4.2 Tipos de procesos de secado

Lote: El material se inserta en el equipo de secado y se procede al secado durante un período de tiempo determinado.

Continuo: El material se agrega continuamente a la secadora y cuando esta deshumidificado se elimina continuamente.

1.4.3 Mecanismo de secado

1.4.3.1 Evaporación

La evaporación es el proceso por el cual un líquido se convierte en gas producto del calentamiento cuando existe transferencia de energía. El proceso comienza cuando la presión de vapor de un cuerpo sólido alcanza la presión atmosférica, aumentando su temperatura hasta el punto de ebullición. [5]

1.4.3.2 Vaporización

Este proceso ocurre cuando aire caliente circula por los alrededores del producto en evaporación. Aquí la presión atmosférica es mayor a la presión de vapor del aire saturado en el sólido. [6]

1.4.4 Calentamiento Directo e Indirecto

En la industria de secado es importante conocer el modo por el cual se produce el calentamiento de un producto, lo cual determina que existan distintos tipos de secadores, dependiendo del método en el que transfiere calor al producto puede que se realice de forma directa o indirecta.

Directo

Los secadores que producen el calentamiento de forma directa trabajan de forma que se genera calor dentro del producto, el fluido caliente fluye en el exterior del producto alimentario a secar.

Indirecto

Los secadores que producen el calentamiento de forma indirecta trabajan de forma que transfiere el calor desde una fuente externa para calentar la superficie del producto aprovechando el contacto directo con el producto.

1.4.5 Tipos de flujo en un secador

Dado que existen diversos tipos de secador de alimentos, es importante mencionar los tipos de flujos más comunes por el cual el secador realiza el intercambio de calor para realizar el proceso de deshidratación.

1.4.5.1 Flujo de aire a contracorriente

Es cuando el producto húmedo ingresa de manera opuesta del flujo de aire caliente como se muestra en la Figura (1.1). Esta es una muy buena manera de maximizar la eficiencia de la operación de secado. [7]

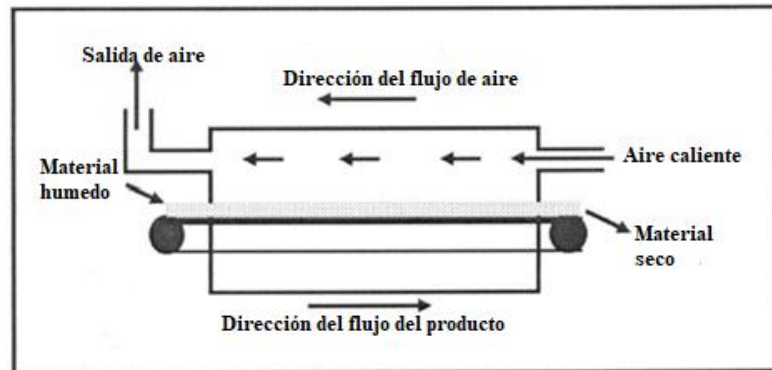


Figura 1.1 Flujo de aire a contracorriente [Donald G., 2014]

1.4.5.2 Flujo de aire paralelo

Es cuando el flujo de aire caliente y el material a secar se introducen al equipo y fluyen a través de la secadora en la misma dirección como se muestra en la figura (1.2). Con el flujo de aire en paralelo el aire se vuelve más caliente y seco cuando entra en contacto con un producto más frío y húmedo. Esta técnica evita el peligro de sobrecalentar el producto antes que salga del secador, por motivo que el calor excesivo puede dañar la calidad del producto. [8]

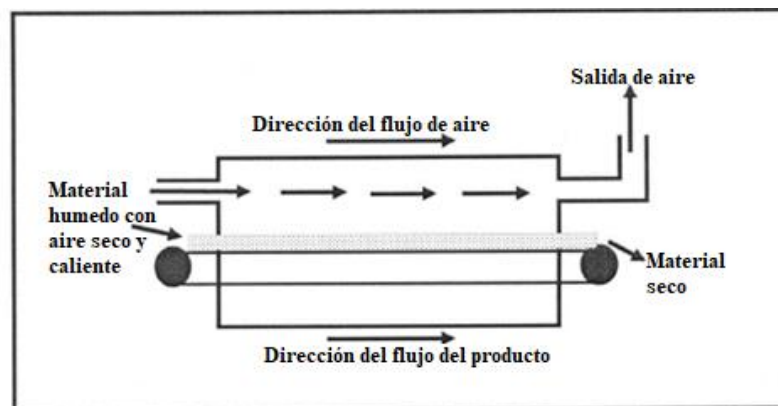


Figura 1.2 Flujo de aire paralelo [Donald G., 2014]

1.4.5.3 Flujo de aire de corriente cruzada

El flujo de aire cruzado consiste en todo aquel movimiento turbulento del producto de modo que el flujo de aire caliente pasa a través del producto de manera perpendicular y sus alrededores debido a las altas velocidades del flujo de aire, logrando que el producto levite momentáneamente por acción de las corrientes de aire caliente. Figura (1.3) [9]

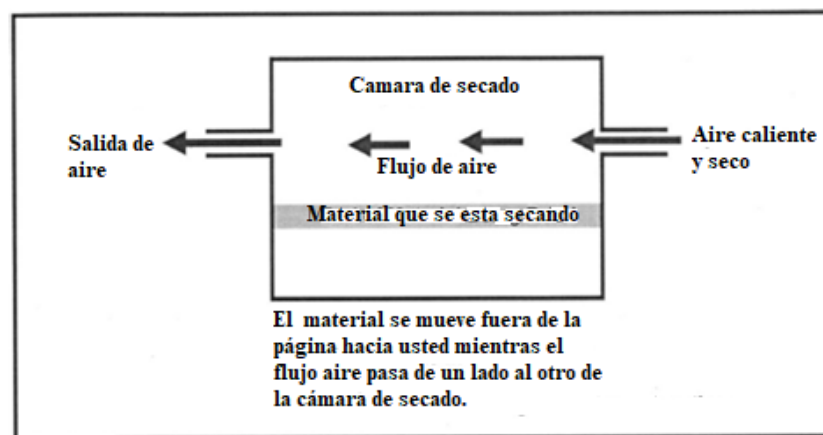


Figura 1.3 Flujo de aire de corriente cruzada [Donald G., 2014]

1.4.6 Clasificación de los secadores

Los alimentos al ser tratado en cualquier proceso de secado, necesita un riguroso y adecuado equipo según sus necesidades; por lo que es importante conocer el tipo de producto a secar debido a que este depende de los factores más críticos de considerar como son su método de operación y producción total. En la tabla (1.1) se ha elaborado una clasificación general de estos equipos. [10]

Tabla 1.1 Clasificación de secadores (G. NONHEBEL)

Operación	Tipo de Transferencia de calor	Secador	Producto	Adaptación a Flujo Cruzado
Secado	Conducción	Banda	Sedimentos, pastas	
		Tambor	Líquidos, sedimentos, pastas, hojuelas	
		Rotatorio Indirecto	Granulare fibrosos	✓

Convección	Pulverizador	Líquidos, sedimentos y pasta	
	Neumático	Pastas preformadas, granulares, fibrosos	
	Lecho Fluido	Pastas preformadas, granulares, fibrosos	✓
	Rotatorio Directo	Granulares fibrosos	
	Banda	Pastas preformadas duros, hojuelas	✓
	Bandeja	Pastas duras, granulares fibrosos, hojuelas	✓
	Circular Transversal	Pastas preformadas, granulares, fibrosos	

Por otra parte, en la tabla (1.2) se realiza la clasificación de los secadores a partir de su producción. Por lo tanto, los tipos de secadores que cumplen con los requerimientos a baja escala y que puedan adaptarse a flujo cruzado son los que realizan su producción de forma discontinua.

Según la tabla (1.1) y (1.2) los equipos que mejor se adaptan al concepto de flujo cruzado son los secadores de lecho fluidizado y de bandeja.

Tabla 1.2 Clasificación de acuerdo con su producción (G. NONHEBEL)

Proceso	Pequeña escala de 20 a 50 Kg/h	Discontinua	<ul style="list-style-type: none"> • Bandeja al vacío • Bandejas • Convectivo • Lecho fluido
	Mediana escala de 50 a 1000 Kg/h	Continua	<ul style="list-style-type: none"> • Banda al vacío • Rotatorio • Neumática • Banda • Bandeja
		Discontinua	<ul style="list-style-type: none"> • Agitado • Lecho fluido

	Gran escala > 1000 Kg/h	Continua	<ul style="list-style-type: none"> • Rotatorio • Lecho fluido • Neumática
--	-------------------------	----------	--

Cada equipo tiene distintos métodos de deshidratación lo que produce que en algunos secadores tarden más que otros en el proceso de secado. Existen equipos que deshidratan un producto en cuestión de minutos y otros pueden tardar hasta horas. En la tabla (1.3) se puede observar el tiempo de exposición promedio de los sólidos dentro de los equipos de secado para el proceso de deshidratación.

Tabla 1.3 Tiempo de exposición de sólidos (Kimball, Chem. Eng, 2014)

Tiempo de exposición de los secadores	10-30 min	10-60 min	1-6 h
Rotativo		✓	
Tambor	✓		
Bandeja por lotes			✓
Bandeja continua		✓	

Por otro lado, como se trata de un proyecto investigativo para uso de laboratorio, es importante considerar el tamaño del equipo debido a que el dimensionamiento depende del área de trabajo el cual será instalado. Finalmente, el tiempo de secado debe proporcionar las condiciones óptimas para la exposición tiempo-temperatura del producto a secar.

CAPÍTULO 2

2. METODOLOGÍA

El objetivo del proyecto es diseñar un equipo cuyo propósito sea factible su implementación para la producción a baja escala, económico, operativo y pedagógico para los estudiantes. La metodología especificada en la figura (2.1) comprende los principales pasos para el diseño del prototipo.

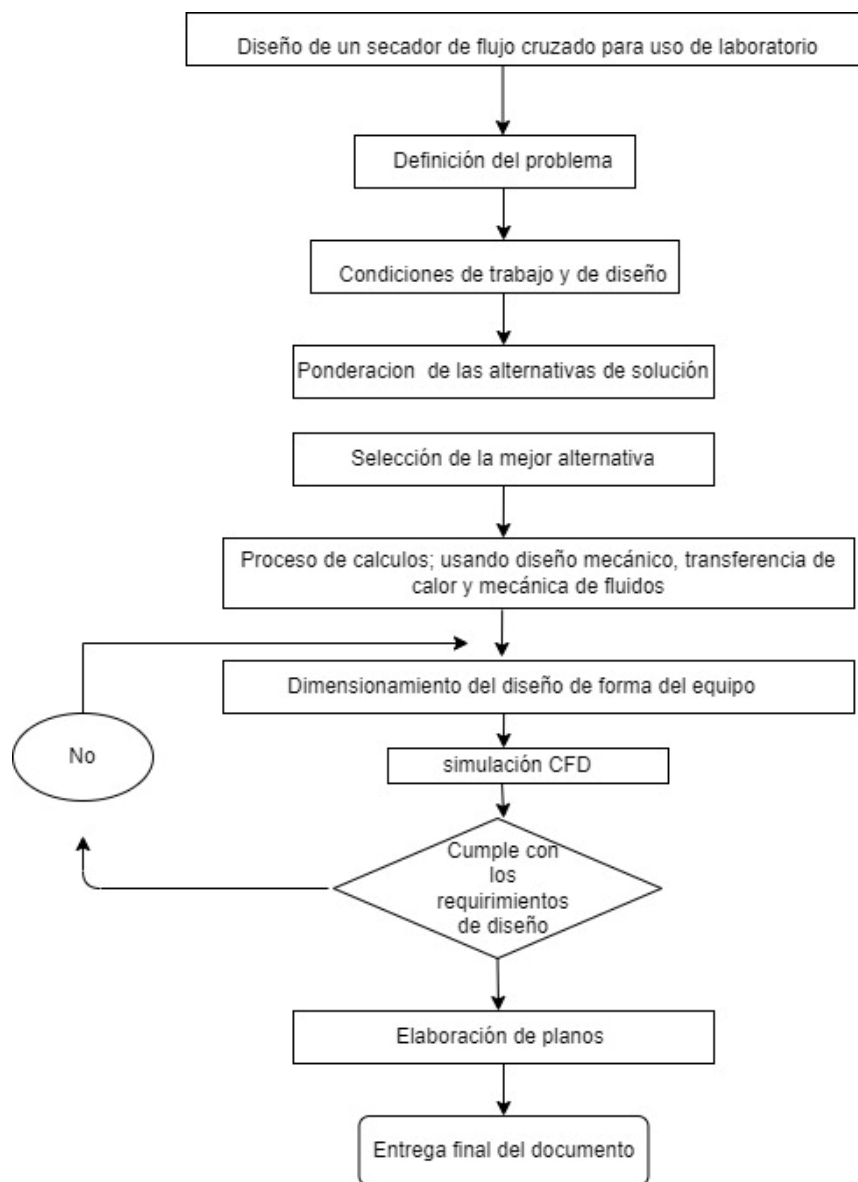


Figura 2.1 Diagrama de metodología de diseño

2.1 Diseño conceptual

2.1.1 Requerimientos del diseño

Un secador de flujo cruzado trabaja de manera que direcciona un fluido caliente de forma que atraviese un fluido frío o un producto de manera perpendicular o turbulenta. La elección de un secador generalmente está determinada por el material a secar, por lo tanto, tomamos como referencia la norma técnica ecuatoriana NTE INEN 2996 que es la encargada de establecer los requisitos para la deshidratación de ciertos productos. [11]

2.1.2 Alternativas de solución

Considerando que un secador de flujo cruzado se lo utilizará para fines educativos y pruebas experimentales, se analizó en tres diferentes alternativas de solución en base a los requerimientos mencionados anteriormente.

Secador de bandeja

Los secadores de bandeja son contenedores que contienen un determinado número de platos o bandejas, donde el producto va a estar colocado sobre ella para que el flujo de aire caliente atraviese las bandejas deshidratando al producto. Figura (2.2) [12]

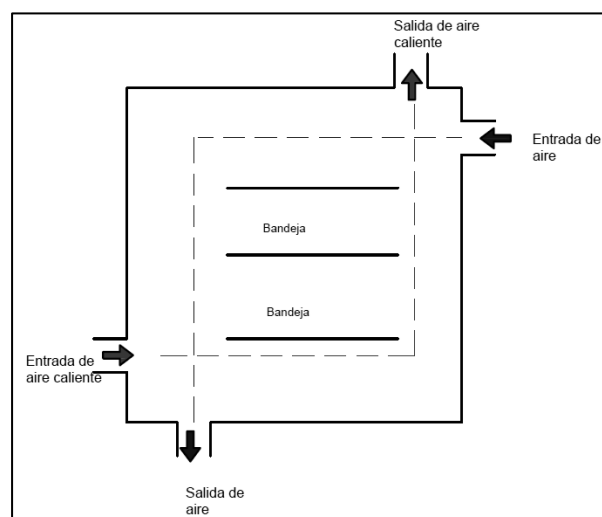


Figura 2.2 Secador de bandeja (Suárez, Almachi, 2022)

Secador de columna

Los secadores de columna son aquellos que están conformados por un conducto de gran altura de forma vertical, donde por dentro de esta columna circula el

grano por simple caída libre producto de la gravedad. Figura (2.3). Las paredes de las columnas presentan perforaciones por donde atraviesa el flujo de aire caliente o frío de manera perpendicular al espesor de la columna. [13]

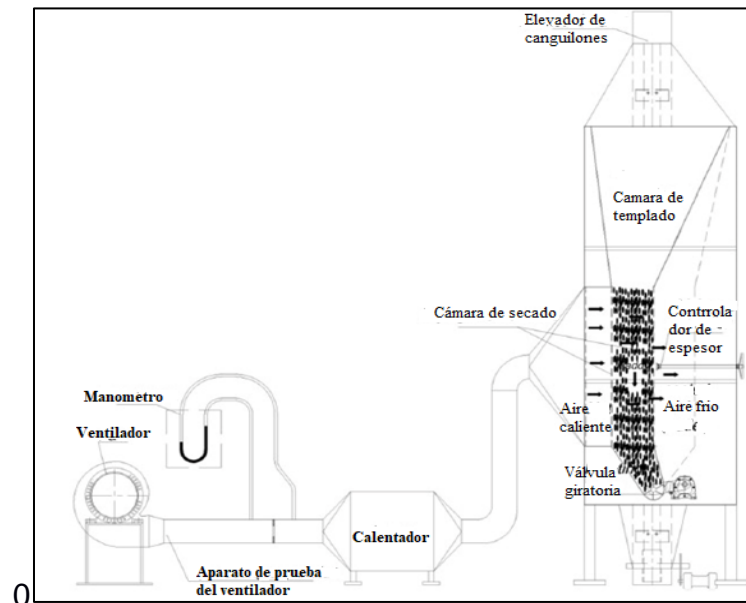


Figura 2.3 Secador de columna (Donald G. 2014)

Secador de banda

Los secadores de banda están constituidos por un suministro de flujo de aire donde el producto se deshidratará a través de un área de secado donde el aire caliente elimina el exceso de humedad del grano mientras se traslada sobre una banda o cinta perforada. Figura (2.4) [14]

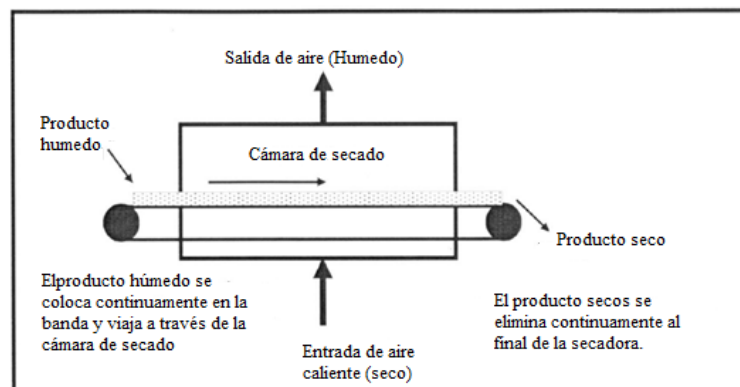


Figura 2.4 Secador de banda (Donald G. 2014)

2.1.3 Matriz de selección

2.1.3.1 Criterios de selección

Previo al inicio del diseño del secador, el cliente ha establecido la importancia de: manufactura, tiempo de secado y control de parámetros como los criterios más importantes del diseño; debido a la necesidad de parte del operador de controlar el rango de temperatura y velocidad de entrada del flujo de aire. Ver tabla (2.2). De igual manera se espera que el proceso de manufactura para la implementación del secador sea viable, dado que se aplicará el concepto de economía circular, es decir, reutilizando los materiales disponibles en bodega. El peso que obtuvo el criterio de manufactura se debe estrictamente a que se procederá a realizar su implementación dentro de los talleres que se encuentran disponibles para su manufactura. Luego se consideró el tiempo de secado es de igual de importante al de manufactura dado que el equipo será utilizado para fines pedagógicos, por lo que el cliente dispuso que el tiempo promedio de secado abarque alrededor del tiempo estimado de horas/clases dentro de la universidad. Así mismo el cliente enfatizó que dado que se desea trabajar bajo ciertas condiciones de temperatura y contenido de humedad de productos alimentarios, el equipo debe garantizar el control de parámetros en el proceso de secado. Por estas razones se consideró darle un peso del 20% a cada uno de estos criterios mencionados dado su importancia de implementación.

Después se estableció que la capacidad y tamaño del secador es un criterio sujeto a cambios debido a que se debe de garantizar el buen funcionamiento del equipo, sacrificando su peso en el diseño, dando un total del 30% entre los dos criterios.

Tabla 2.1 Criterios de selección

Criterio	Peso	Descripción
Manufactura	0.20	El equipo debe ser construido aplicando concepto de economía circular
Tiempo de secado	0.20	Duración del proceso de secado
Control de parámetros	0.20	Operador tiene el control del rango de temperatura y velocidad

Capacidad de secado	0.15	Masa de 1.5 kg del producto a secar
Tamaño del secador	0.15	Dimensionamiento en el espacio disponible para el laboratorio del equipo conforme al tamaño de laboratorio
Consumo energético	0.10	Potencia y fuente de calor requerida para que el tiempo de residencia del material de secado sea minimizado

Dado a que no existe mucha diferencia entre las funciones que realiza los secadores, se ha usado una escala de 1 a 3, siendo 3 la mejor opción y 1 la peor opción entre los criterios de evaluación. (Ver Tabla 2.3)

Tabla 2.2 Matriz de decisión

Criterio	Peso	Alternativas de secador					
		Bandeja		Banda		Columna	
Manufactura	0.20	3	0.60	2	0.40	1	0.20
Tiempo de secado	0.20	2	0.40	3	0.60	3	0.40
Control de parámetros	0.20	2	0.40	2	0.40	1	0.20
Capacidad de secado	0.15	2	0.30	1	0.15	3	0.45
Tamaño del secador	0.15	3	0.45	2	0.30	1	0.15
Consumo energético	0.10	1	0.10	2	0.20	2	0.20
TOTAL	1.00	2.25		2.05		1.80	

Se pudo determinar que el secador de bandeja es la mejor opción respecto a las otras alternativas, esto es debido a que el secador cumple principalmente con los criterios de manufactura y tamaño del equipo, dado que la secadora de bandeja puede ser construido con materiales aplicando el concepto de economía circular a una escala de laboratorio. Si bien el secador de banda transportadora es la mejor opción en cuanto tiempo de secado, tiene la desventaja que no cumple con los requerimientos de dimensionamiento de secado. Finalmente, queda descartado el secador de columna ya que es complicado controlar los parámetros de temperatura dentro del secador y la altura del secador sobrepasa las limitaciones del laboratorio.

2.1.4 Diseño de forma del secador

Inicialmente se había diseñado un secador de bandeja de la primera propuesta de secado, pero se determinó que no cumplía con los requisitos propuestos mencionados anteriormente; por lo que se rediseñó su estructura de manera que ahora una bandeja tipo caja mallada para el flujo de aire recorra por debajo de la caja y pueda elevar el producto dentro de esta caja sin caer al suelo.

Otro de los cambios realizado fue el de añadir una abertura de compartimiento en la parte superior entre las cabinas para que la circulación del flujo de aire caliente en su interior recorra la menor cantidad de bandejas logrando utilizar una temperatura de aire menor en la entrada como se puede apreciar en la figura (2.5).

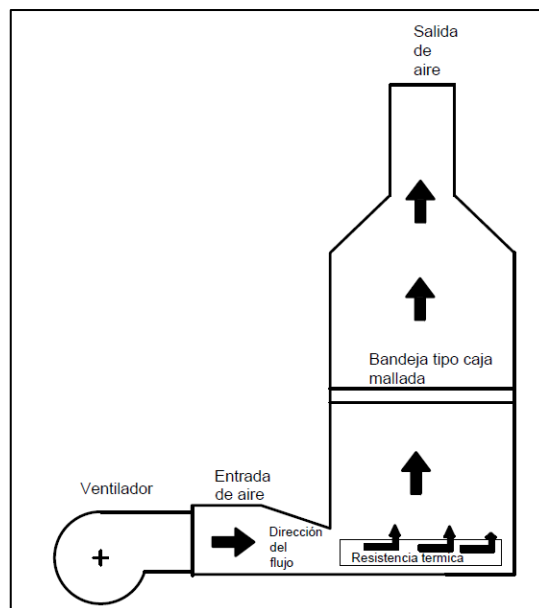


Figura 2.5 Diseño de forma del secador de flujo cruzado

2.2 Diseño del secador

2.2.1 Materia Prima

Uno de los requerimientos por parte del cliente es el de poder trabajar con diversos productos que puedan ser deshidratado en el equipo: cacao, plátano, guanábana, mango. Debido a que la carrera de ingeniería de alimentos ha trabajado con diversos proyectos de secado de banano se ha decidido trabajar de forma referente con el plátano fresco (Banano) como producto base. Las

especificaciones de cada rebanada de plátano esta dado en la tabla (2.3) para realizar los cálculos correspondientes de diseño.

Tabla 2.3 Especificaciones de cada rebanada de banano

Dimensiones	Nomenclatura	Medida
Diámetro	D_{banano}	3 cm
Espesor	t_{banano}	1 cm
Masa	m_{banano}	8 g
Densidad	ρ_{banano}	980 Kg/m ³

2.2.2 Dimensionamiento del Secador

Definido el diseño de forma del secador y el producto a secar, es importante realizar el dimensionamiento de la estructura del secador, así como también las dimensiones de las bandejas para determinar la cantidad de energía necesaria para realizar el proceso de secado.

2.2.2.1 Dimensiones de las Bandejas

A partir de la cantidad de producto para secar, se procede a determinar la carga que va a soportar cada bandeja a través de la densidad del banano y el espesor de cada rodaja. Luego se procede a calcular el dimensionamiento de las bandejas con las siguientes fórmulas de diseño donde la densidad y espesor del banano.

$$\frac{l_{so}}{A} = (\rho_{banano})(t_{banano}) \quad (2.1)$$

$$A_{tba} = \frac{m_{banano\ total}}{\frac{l_{so}}{A}} \quad (2.2)$$

De manera que reemplazando los datos existentes se ha obtenido una bandeja rectangular con un área de 0.143 m² donde se establece por propio criterio las siguientes dimensiones para su forma rectangular.

Tabla 2.4 Dimensiones de las bandejas

Dimensión	Medida (cm)
------------------	--------------------

Longitud	44.5
Ancho	32.5

2.2.2.2 Capacidad de absorción de agua del banano

El banano al ser un producto con alto grado de humedad se requiere analizar su comportamiento frente a la capacidad de reacción sobre el agua. A partir de los datos obtenidos de las isoterms se ha obtenido el valor de su monocapa. La monocapa es el contenido de humedad de agua que está en contacto con las moléculas del producto. Ver figura (2.6). Este valor representa la relación la estabilidad del producto en el proceso de secado. El banano natural sin ningún tratamiento es el que posee un mayor grado de monocapa entre las variantes del tratamiento del banano por lo tanto se puede estimar que el producto se estabilizará con mayor facilidad. [15]

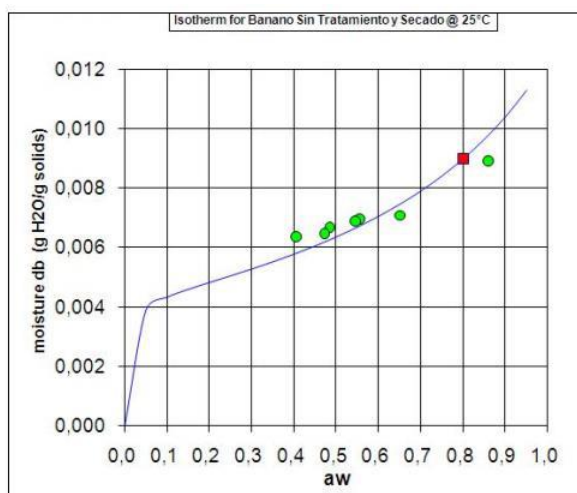


Figura 2.6 Isotherma del banano natural

Valor Monocapa	0.43
R^2	0.6432

Fuente: Israel Andrade, Paul Castro (2009)

2.2.2.3 Carta Psicrométrica

El proceso de secado se dará bajo las condiciones de temperatura ambiente a 1 atm de presión; con estos datos se determinará los factores de humedad relativa, presión de saturación del vapor y presión total de todo el sistema. De la figura 2.6 se podrá obtener los valores determinados en la tabla (2.5)

Tabla 2.5 Parámetros determinados utilizando carta psicrométrica

Parámetro	Nomenclatura	Valor
Temperatura Bulbo Seco	T_{BS}	70 °C
Temperatura Bulbo Húmedo	T_{BH}	64.09 °C
Humedad Relativa	ϕ	76%
Temperatura de Rocío	T_w	63.8 °C

2.2.2.4 Curva de Secado

Las curvas de secado son aquellas gráficas que están compuestas en base a datos experimentales y que nos brinda información acerca de la velocidad de secado de un producto bajo ciertos parámetros iniciales. Para determinar la velocidad de secado se estableció utilizar esta curva que está relacionado con la humedad libre del banano natural estableciendo una velocidad de secado de 0.0024 g/min. Ver figura (2.7).

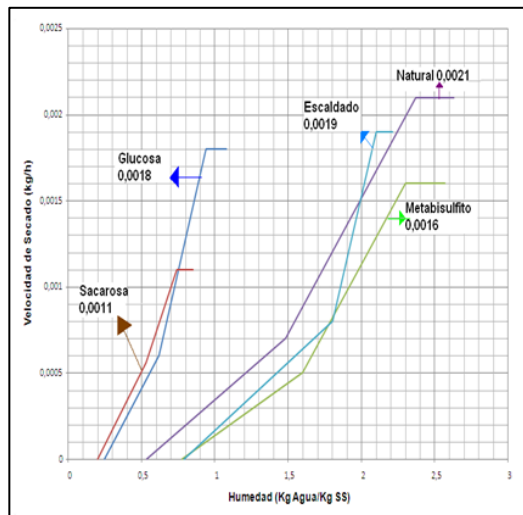


Figura 2.7 Curva de Velocidades de secado del banano

Israel Andrade, Paul Castro (2009)

2.2.2.5 Tiempo de secado

Para determinar el tiempo de secado a través de la implementación de flujo cruzado se debe de calcular el tiempo de deshidratación cuando la velocidad de secado es constante, así como también cuando la velocidad es decreciente. Como se puede observar en la figura (2.8), la velocidad del flujo de aire varía según la temperatura. Dado la complejidad de calcular el tiempo de secado del producto, solo se puede estimar su tiempo mediante datos

experimentales, lo que varía según la experimentación entre 0.30 a 1.5 horas (Mérida D. 2017).

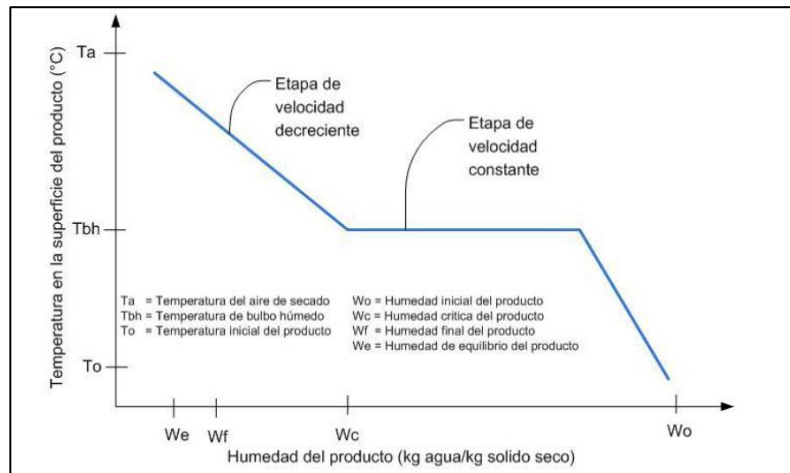


Figura 2.8 Variación de Temperatura del respecto a la velocidad (Mérida D. 2017)

2.2.3 Cálculo de la malla de las bandejas

El uso de bandejas con mallas metálicas facilitan la transferencia de calor entre el producto y el medio dentro del secador, lo que permite reducir el tiempo de secado y optimizar la distribución de la muestra con una efectiva distribución de temperatura.

2.2.3.1 Tamaño de la malla

El banano natural contiene un porcentaje de humedad del 76% al inicio del proceso y se desea que al finalizar el secado disminuya al 8% de humedad. La distribución de la humedad inicial y final del producto se los puede determinar a partir de las ecuaciones (2.3) y (2.4) utilizando la tabla (2.6)

Tabla 2.6 Distribución del porcentaje de humedad en el producto

Masa del producto	Proceso Inicial	Proceso Final
1.5 Kg de plátano	76% de agua (1.14 Kg)	8% de agua (0.112 Kg)
	24% de pulpa (0.36 Kg)	92% de producto seco (1.288 Kg)

$$H_{bhu} = \frac{m_{wa}}{m_{se}} \quad (2.3)$$

Donde:

H_{bh} : Humedad inicial del producto (base húmeda)

m_{wa} : Porcentaje de humedad antes del proceso

m_{se} : Porcentaje de producto seco antes del proceso

$$H_{bs} = \frac{m_{wa}}{m_{hu}} \quad (2.4)$$

Donde:

H_{bs} : Humedad final del producto (base seca)

m_{wa} : Porcentaje de humedad después del proceso

m_{se} : Porcentaje de producto seco después del proceso

Por lo tanto, la distribución de masa del producto seco y del porcentaje de humedad al inicio y al final del proceso queda distribuido a continuación de la tabla (2.8)

Tabla 2.7 Distribución de la cantidad agua respecto a la cantidad de masa seca

Distribución	Proceso Inicial	Proceso Final
Masa del Producto	$6.9272 \times 10^{-3} [Kg]$	$1.80709 \times 10^{-3} [Kg]$
Masa de Kg de agua	$5.2646 \times 10^{-3} [Kg]$	$1.4456 \times 10^{-4} [Kg]$
Masa de Kg de producto seco	$1.6625 \times 10^{-3} [Kg]$	$1.6625 \times 10^{-3} [Kg]$

Debido a que el producto pasará por un proceso de transferencia de calor de calor y masa, existirá un cambio de volumen respecto a la muestra inicial, lo que supondrá dicha diferencia de la siguiente forma:

$$\Delta V = \left(\frac{H_{bh}}{\rho_{H_2O}} - \frac{H_{bs}}{\rho_{H_2O}} \right) m_{se} \quad (2.5)$$

Realizando una comparación del proceso de secado de la muestra donde se hace evidente una reducción del volumen inicial con respecto al volumen final de la muestra de banano de aproximadamente un 27.6% del producto, lo que supondrá la disminución del radio de la muestra hasta 2.17 cm. Conociendo este valor, se debe seleccionar una malla de manera que el producto no salga

de la caja tipo malla (tabla 2.8). Dado que las dimensiones del radio de la muestra son mayores a los agujeros de las bandejas, se seleccionó la malla 4.36 mm de abertura debido a su alto grado de eficacia en su distribución.

Tabla 2.8 Dimensiones del mallado de acero inoxidable

ESPECIFICACIONES DEL ACOPLAMIENTO DE ALAMBRE DE ACERO INOXIDABLE PARA MALLA.						
Acoplamiento		S.W.G	Abertura milímetro	Diámetro milímetro del alambre	% eficaces	Peso Kg/m ²
Pulgada	Cm					
3mesh	1.18	14	6.27	2.2	62	7.0
3mesh	1.2	18	7.25	1.219	70	2.5
3.5mesh	1.4	20	6.34	0.914	66	1.8
4mesh	1.57	16	4.72	1.63	58	5.0
4mesh	1.6	20	5.45	0.914	76	2.1
4.5mesh	1.8	22	4.93	0.711	71	1.2
5mesh	1.97	18	3.86	1.22	57	3.6
5mesh	2	22	4.36	0.711	76	1.3
6mesh	2.36	18	3.04	1.22	50	4.3
6mesh	2.36	22	3.52	0.711	63	1.6
8mesh	3.15	20	2.26	0.91	43	3.2
8mesh	3.15	24	2.50	0.559	67	1.5
10mesh	3.94	20	1.63	0.91	41	4.0
10mesh	3.94	26	2.080	0.46	67	1.1
12mesh	4.72	22	1.41	0.71	43	2.9
12mesh	4.72	26	1.74	0.457	68	1.4
14mesh	5.52	26	1.36	0.46	57	1.4
16mesh	6.30	28	1.21	0.376	55	1.2
18mesh	7.09	30	1.10	0.315	60	0.85
20mesh	7.87	30	0.95	0.315	58	0.95
22mesh	8.66	32	0.88	0.274	57	0.80
24mesh	9.45	32	0.78	0.274	55	0.85

2.2.3.2 Cálculo de la velocidad del aire

Con la implementación de un extractor de aire se facilita la depuración del exceso de humedad en la cámara de secado. Para el siguiente proceso el flujo másico que entra a la secadora tiene que ser igual al flujo de aire que pasa entre las bandejas y el producto a deshumidificar.

$$\dot{Q}_{aire} = \frac{\dot{m}_{aire}}{\rho_{aire}} \quad (2.6)$$

Donde:

\dot{Q}_{aire} : Caudal del aire [m^3/s]

\dot{m}_{aire} : Flujo masico del aire [Kg/s]

ρ_{aire} : Densidad del aire [Kg/m^3]

Lo que nos servirá para calcular la velocidad del aire para que el producto levite durante el secado

$$\dot{Q}_{aire} = V_{aire} A_{aire} \quad (2.7)$$

Donde:

\dot{Q} : Caudal del aire que ingresa a la cámara de secado [m^3/s]

V_{aire} : velocidad del aire [m/s]

A_{aire} : área de la sección transversal de la cámara [m^2]

$$V_{aire} = \frac{\dot{Q}_{aire}}{A_{aire}}$$

Tabla 2.9 Condiciones de Humedad y Temperatura de la cámara de secado

Datos de la Cámara de secado	
Temperatura inicial del aire (°C)	80
Temperatura final del aire (°C)	70
Temperatura inicial del agua en el producto (°C)	30
Temperatura final del agua en el producto (°C)	70
Humedad inicial	0.76
Humedad final	0.08
Calor específico del aire (KJ/Kg°K)	1.00822
Calor específico del agua (KJ/Kg°K)	4.179

2.2.3.3 Cálculo de calor producido en el sistema

La cantidad de calor necesario para calentar una masa de 1.5 kg de banano se lo determina mediante un balance energético:

$$Q_{carga} = Q_{banano} + Q_{bandeja} + Q_{aire} + Q_{evaporizacion}$$

Donde:

Q_{carga} : Calor requerido para calentar el banano

Q_{banano} : Calor que absorbe el banano

$Q_{bandeja}$: Calor que absorbe la bandeja

Q_{aire} : Calor que necesita para calentar el aire circundante

$Q_{evaporacion}$: Calor de evaporación

Debido a que la cantidad de producto a deshidratar es para ensayos de laboratorio se tomará una masa total de 1.5 kg.

$$Q_{banano} = m_{banano} C_{p_{banano}} \Delta T$$

La bandeja absorbe calor del ambiente, por lo tanto, el calor absorbido será:

$$Q_{bandeja} = m_{bandeja} C_{p_{bandeja}} \Delta T$$

El calor que se requiere para calentar el aire circundante del secador se debe considerar las propiedades del fluido y el cambio de entalpia junto el aire seco en el proceso de secado. Utilizando las entalpías del aire para calentar la cámara antes y durante el proceso de secado.

$$Q_{aire} = \frac{q_{1,aire} + q_{2,aire}}{2}$$

El producto se encuentra húmedo después del proceso de deshidratación y es necesario eliminar la humedad retenida en el producto.

$$Q_{evap} = q_{sensible} + q_{latente}$$

2.2.3.4 Coeficiente de convección libre de pared plana vertical.

Para el modelado de nuestra cámara de secado tenemos que la temperatura interior debe ser de 70°C ya que es un promedio entre la entrada y salida del secador. Por consiguiente, se considera una temperatura exterior de 31 °C y una temperatura ambiente de 26°C en donde se establece una temperatura promedio de 30°C.

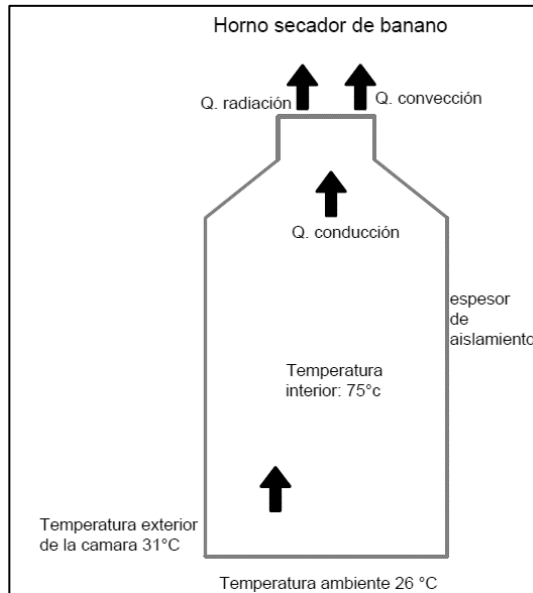


Figura 2.9 Volumen de control para la cámara de secado

A partir de las tablas de propiedades del aire se establece la temperatura promedio para el cálculo de las propiedades del aire. Por consiguiente, se trabajará con las propiedades establecidas en la tabla (2.10)

Tabla 2.10 Propiedades del aire a 30°C

Propiedades del aire	
Densidad del aire [Kg/m^3]	1.1514
Viscosidad Dinámica $Kg/m s$	186.016×10^{-7}
Numero de Prandtl	0.70658
Conductividad Térmica [$W/m K$]	26.522×10^{-3}

Para facilidades de cálculo se considerará la bandeja como una especie de placa plana para calcular el número de Reynold, Nusselt y la conductividad térmica del fluido a través de las ecuaciones (2.9), (2.10) y (2.11).

$$Re = \frac{u_{\infty} x}{\nu} \quad (2.8)$$

$$Nu_s = 0.453 Re_x^{\frac{1}{2}} Pr_x^{\frac{1}{3}} \quad (2.9)$$

$$Nu_s = \frac{h_x X_c}{k_t} \quad (2.10)$$

Donde:

x_p : Distancia desde el borde principal [m]

$u_{pro\infty}$: velocidad promedio de fluido [m/s]

ν : viscosidad cinética [m^2/s]

Re_y : Numero de Reynolds.

Pr_a : Numero de Prandtl (0.07658)

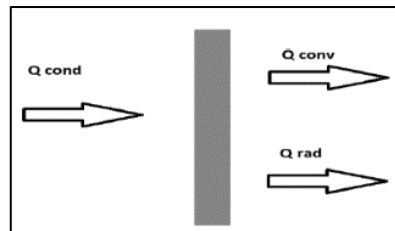
h_{tc} : Coeficiente de transferencia de calor [$W/m^2\text{ }^\circ C$]

X_c : Longitud característica [m]

k_t : Conductividad térmica del fluido [$W/m\text{ }^\circ C$]

2.2.3.5 Balance energético

Para disminuir las pérdidas de calor dentro de la cámara con el entorno, se ha establecido cubrir las paredes con una capa de lana de vidrio, ya que este actúa como un aislante térmico que nos ayudará a controlar el flujo de calor dentro de la cámara.



La conductividad térmica promedio de la lana de vidrio es de $0.0655\text{ }W/m\text{ }^\circ C$ y la emisividad térmica de la superficie es de 0.95 con estos valores determinamos el espesor de aislamiento para el secador.

$$Q_{cond} = Q_{conv} + Q_{rad}$$

Desarrollando tenemos lo siguiente:

$$K A_s \frac{T_1 - T_2}{\Delta x} = h A_s (T_s - T_\infty) + \epsilon \sigma A_s (T_s^4 - T_\infty^4)$$

$$\Delta x = \frac{k(T_1 - T_2)}{h(T_s - T_\infty) + \epsilon \sigma (T_s^4 - T_\infty^4)} \quad (2.11)$$

2.3 Simulación

Para verificar los resultados teóricos del diseño del secador es necesario simular el modelo donde se estudiará el comportamiento dinámico usando las ecuaciones de Navier Stokes de mecánica de fluidos. Para fines prácticos se ha realizado la simulación CFD usando 'Ansys fluent' versión estudiantil, programa que ayudará simular el proceso de secado bajo las condiciones iniciales propuestos. Para realizar la simulación es necesario realizar el diseño en 3D de la cámara de secado y de la bandeja tipo caja mallada, para su posterior ensamblaje y que el programa realice el análisis de elementos finitos.

2.3.1 Condiciones de Borde

Entrada

Las condiciones de borde para la velocidad de entrada son de 13.74 m/s debido a que se desea comparar con los cálculos teóricos realizados, se obtuvo dicho valor para mantener la temperatura de 70°C en todo el secador.

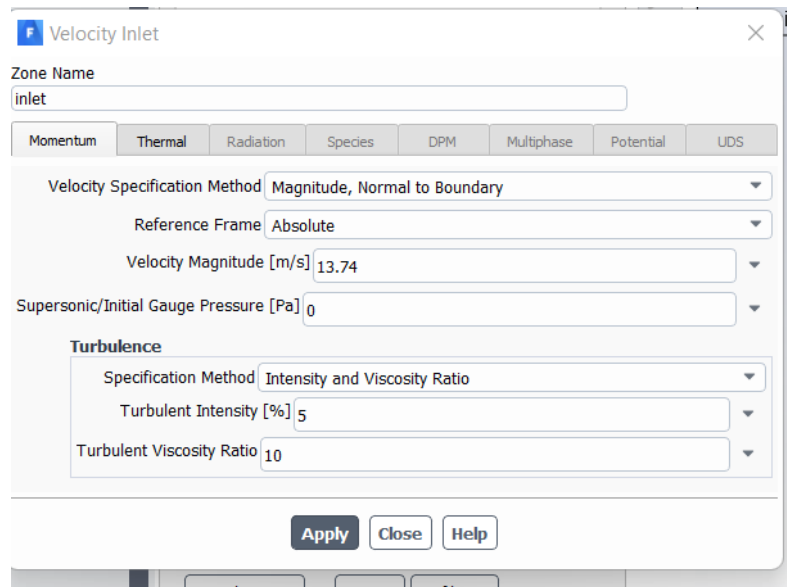


Figura 2.10 Configuración de velocidad del flujo de aire a la cámara

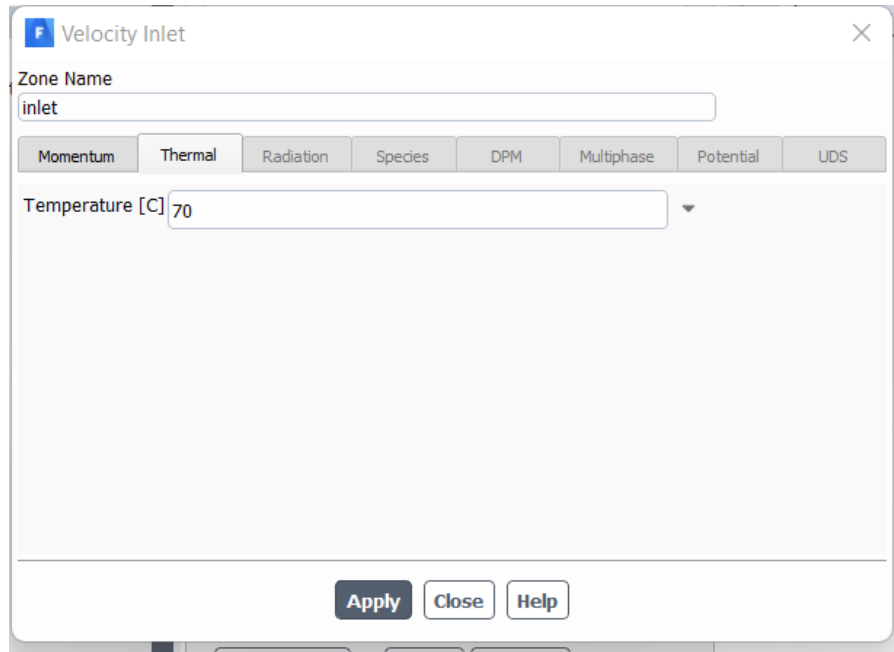


Figura 2.11 Configuración de temperatura en el interior de la cámara

Salida

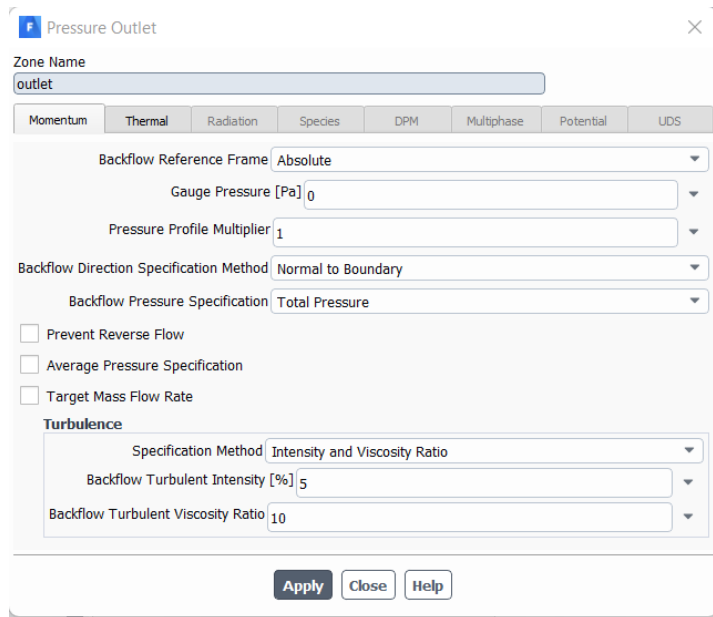


Figura 2.12 Condiciones de salida para la simulación

2.3.2 Modelo de Turbulencia usado

Al momento de exportar la malla fluent, el programa lo realiza a través de un modelo automático. Al momento de usar el modelo de turbulencia, se usó el modelo K-epsilon debido a que es el mejor se adapta a las condiciones de transferencia de calor. Este es caracterizado por realizar simulaciones que permite obtener escalas de longitud y velocidad de turbulencia en flujos de aire ya que optimiza las simulaciones transitorias donde la gravedad está presente. Además, que ayuda a la visualización de los efectos que tiene al momento de la simulación con el paso del tiempo para que sea el adecuado.

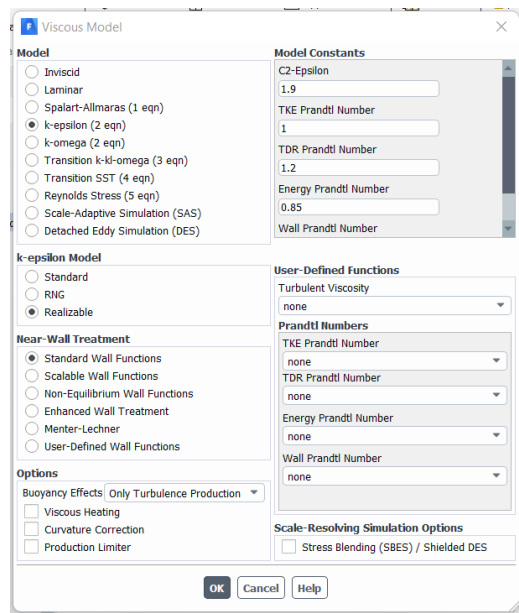


Figura 2.13 Configuración K-épsilon del diseño

2.3.3 Flujo másico Entrada y Salida

Para el flujo másico, Ansys resuelve CFD, dinámica de fluidos computacionales resolviendo las ecuaciones de Navier stock aplicando simulación de flujo de fluidos, donde la transferencia de calor tiene una similitud bastante cercana a la mecánica de fluidos.

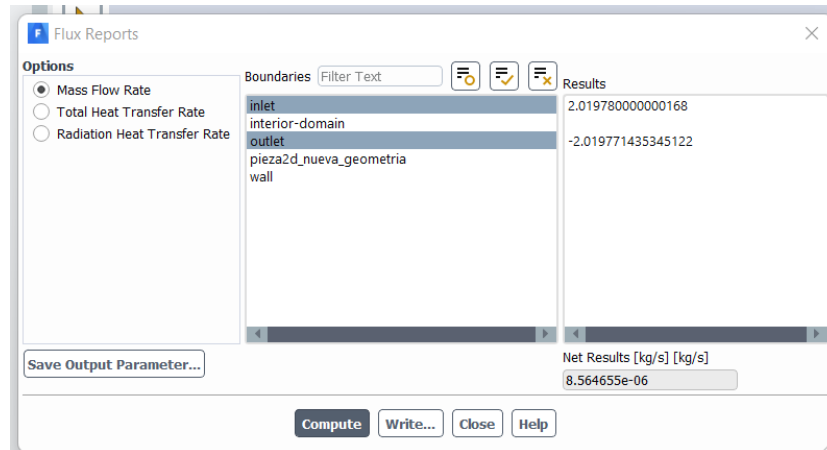


Figura 2.14 Configuración del flujo másico

CAPÍTULO 3

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

3.1 Dimensionamiento del secador

3.1.1 Geometría del Volumen de Control

Para poder realizar una simulación de CFD es necesario definir el volumen de control del diseño del secador debido a que el aire que se encuentra adentro de la cámara de secado es el encargado de interactuar con el modelado en las condiciones térmicas y dinámicas del fluido.

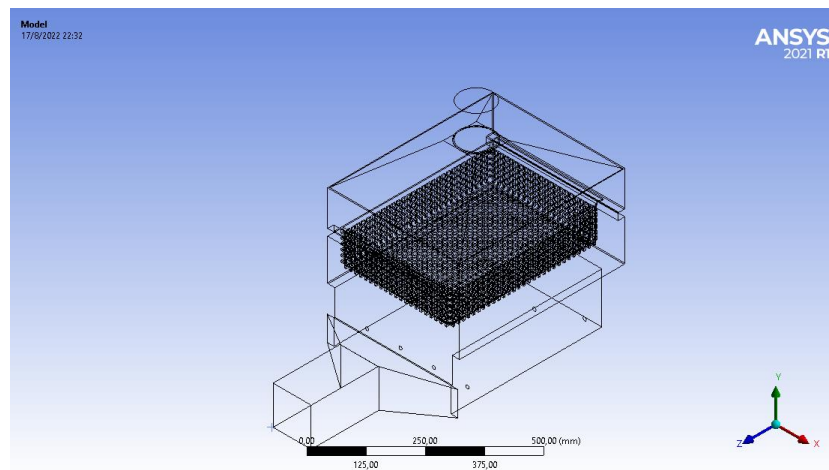


Figura 3.1 Volumen de control del secador

3.1.2 Análisis Térmico

A partir de los cálculos realizados en el capítulo dos, se dispondrá de analizar los valores obtenidos que se encuentran detallados en el apéndice “A”, mediante la simulación del proceso de secado para comprobar el análisis térmico y dinámico del sistema. De la tabla 3.1 se resumen los principales parámetros obtenidos para el análisis de resultados.

Tabla 3.1 Datos conseguidos mediante cálculos teóricos

Nombre	Símbolo	Valor	Unidad
Velocidad de secado	v	13.74	m/s
Flujo de calor requerido para el secado	Q	3018.42	KJ
Temperatura de entrada en la cámara	$T_{entrada}$	27	$^{\circ}C$
Tiempo teórico de secado	$t_{teórico}$	45	$min.$

Para examinar la velocidad del flujo de aire, se analiza la distribución del aire a través de la cavidad. Como se puede observar en la figura (3.1) en cuanto al contorno de la cámara, existe puntos de estancamiento y puntos de recirculación debido a la geometría rectangular de la cavidad, sin embargo, lo importante es que exista una circulación de aire través de la bandeja lo que se puede comprobar en la simulación, entonces se establece que el modelo es el adecuado.

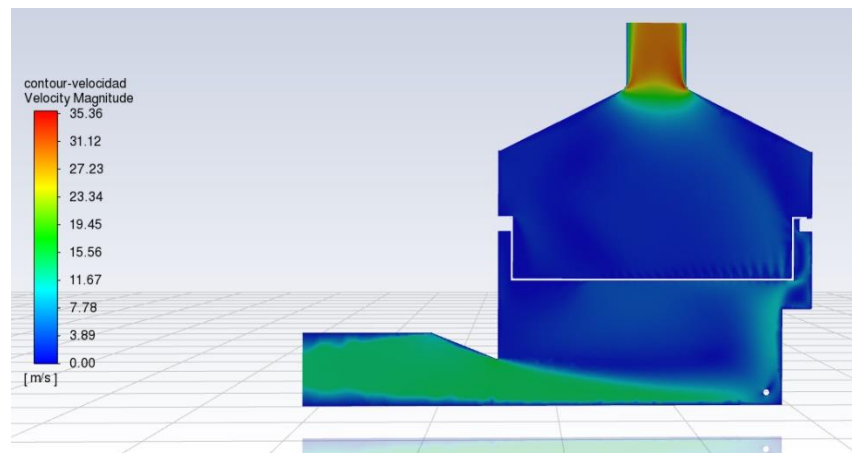


Figura 3.2 Perfil de velocidad en el interior de la cámara

Además, al analizar el perfil de temperatura de la cámara de secado a través de toda la cavidad (figura 3.2) se puede observar que existen contornos de temperatura bastante uniformes donde existen puntos fríos o de recirculación, esto se lo puede visualizar con los puntos azules que se presenta en la gráfica, pero se establece que el diseño es el adecuado puesto que el flujo alcanza una temperatura de 70°C

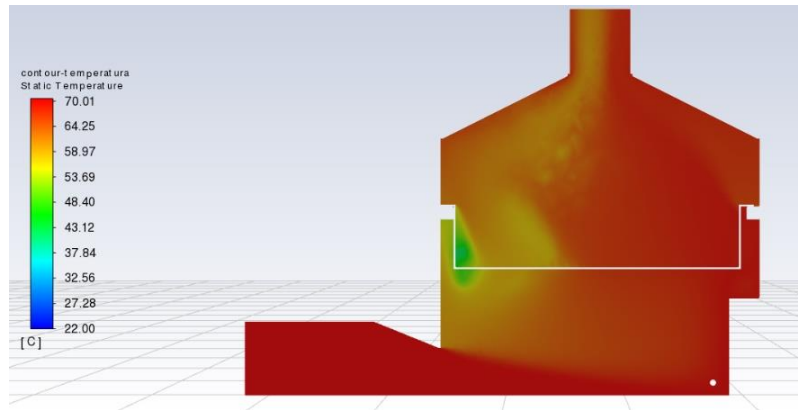


Figura 3.3 Perfil de temperatura en el interior de la cámara

3.1.3 Análisis de vórtices

A través de la simulación CFD se verificó la presencia de pequeños vórtices en la distribución de calor y velocidad, esto es debido a la configuración estructural del secador donde no se presentan esquinas redondeadas. Los límites de la cámara de secado presentan principalmente esquinas donde provocan puntos de estancamientos en la distribución del flujo de aire, lo que supondrá dificultades en la aerodinámica y análisis de la distribución de calor del equipo como se observa en las figuras (3.4) y (3.5) dando como resultado una leve diferencia de temperatura dentro de la cámara.

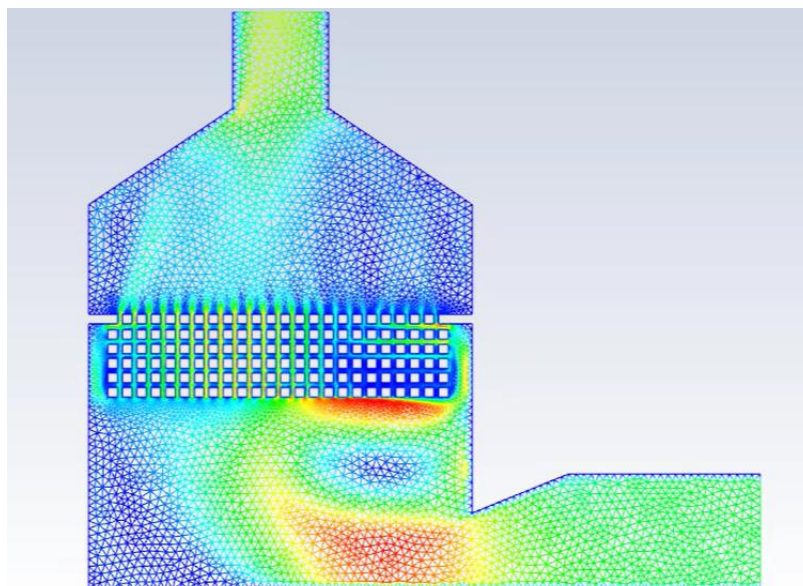


Figura 3.4 Vórtices del sistema

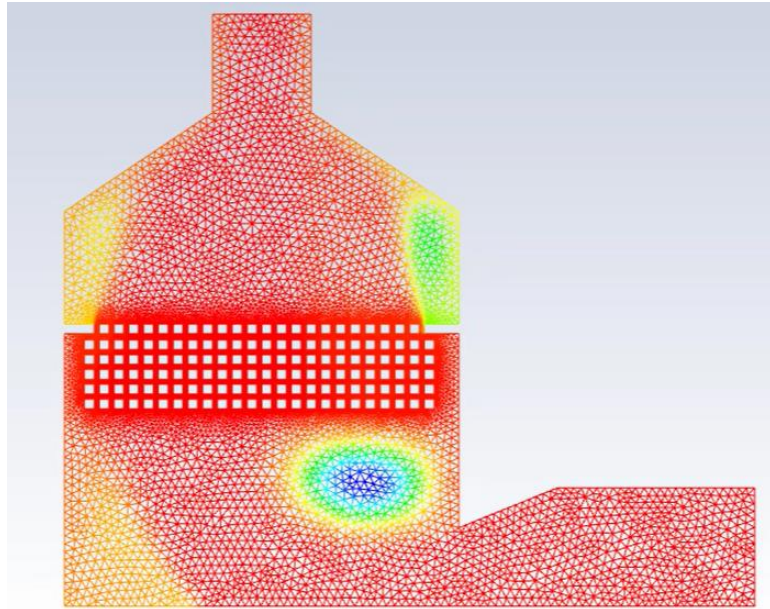


Figura 3.5 Vórtices del sistema

3.1.4 Flujo másico de entrada y salida

Mediante la simulación se requiere determinar el flujo másico del sistema. En nuestro caso nos dio una diferencia de $1.5 \times 10^{-7} \text{ Kg/s}$ de flujo másico en la entrada y la salida.

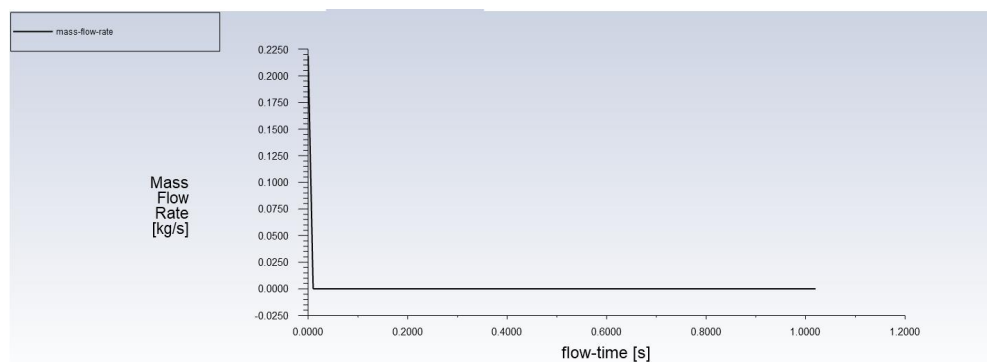


Figura 3.6 Monitor serial de flujo másico

Como se puede observar en la figura (3.4), el monitor serial nos sirve para identificar la convergencia del flujo másico, es decir nos muestra que no existen pérdidas de masa en todo el dominio de la convergencia en estado estable cumpliéndose la ley de conservación de la masa.

Finalmente, en la tabla (3.2) se ha detallado la distribución de energía suministrado por la resistencia eléctrica implementado al secador, por lo que se

debe de considerar de implementar una resistencia de 2000 KW para que la correcta distribución de calor dentro de la cámara de secado.

Tabla 3.2 Distribución del calor neto del sistema

Calor	KJ	KWh
Calor entregado al aire	101.19	0.0275
Calor que absorbe la bandeja	48.94	0.0136
Calor para la evaporación del agua	2659.22	0.1398
Calor entregado al producto	211.05	0.0586
Calor perdido por transferencia de calor	2.0	0.0005

3.1.5 Selección de malla y ventilador

3.1.5.1 Mallado

Para la creación del mallado se usó un modelo tetraédrico debido a la complejidad de la geometría dado que existen protuberancias que no permiten una concentración de mallado constante. La mínima ortogonalidad que recomienda ANSYS es un valor mayor a 0.5 y en la simulación del diseño se presentó una cálida de malla de 0.77, dando establecer que nuestra malla es la correcta y aceptable en cuanto a los cálculos.

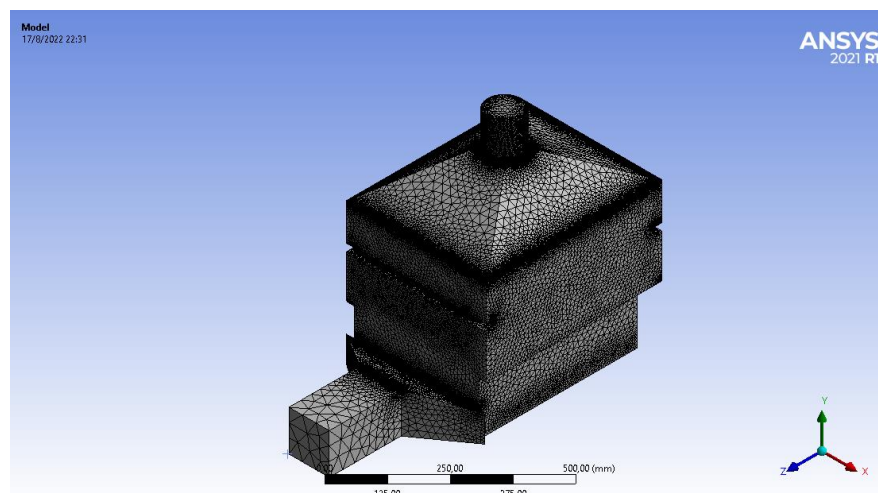


Figura 3.7 Mallado tetraédrico del secador

3.1.5.2 Ventilador

El equipo establecido para generar el flujo de aire a través de la cámara de secado es un ventilador centrífugo (4" BK-EB4). Las características del ventilador se encuentran en la tabla (3.3), lo sirvió para conocer las limitaciones de operación respecto al caudal de flujo de aire necesario para mantener la temperatura dentro de la cámara de secado debido a su potencia instalada de 450W de funcionamiento.

Tabla 3.3 Parámetros de ventilador centrífugo (4" BK-EB4)

Parámetros	Valor	Unidad
Tamaño	4	<i>in</i>
Velocidad	3000/3600	<i>RPM</i>
Amperaje	8	<i>A</i>
Presión	885	<i>Pa</i>
Caudal	0.140	<i>m³/s</i>
Eficiencia	37	%
Potencia	3/4	<i>HP</i>

3.2 Manufactura

Para construir el secador se necesita principalmente de un habitáculo cerrado para el cual se soluciona ocupando un secador de bandeja en desuso que podemos encontrar en el CDTS o también se puede adquirir 2 planchas de acero inoxidable AISI 304 para la construcción del secador. Con una amoladora se cortará pedazos de plancha de acero con medidas de 50 x 40 cm para la parte de la base inferior y posterior de la cámara; además de una de 40 x 40 cm para la parte lateral, para el parte lateral izquierdo se necesita dimensiones de 40 x 30 cm. Posteriormente se une estas planchas cortadas a través de soldadura. Para hacer la campana extractora de la parte superior se lo arma como una pirámide de base rectangular, cortamos dos pedazos con medidas de 50 cm para la base mayor, 10 cm para la base menor y 10 cm de altura; para los lados laterales corresponde a 2 cortes de 40 cm de base mayor con 10 cm de base menor y 10 cm de altura al igual que el anterior se lo une con soldadura.

Las persianas que van en el interior del secador que sirve de soporte a la bandeja mallada con forma de tubos cuadrados tienen una medida de 35 cm de largo por 5 cm de ancho ubicado en las dos caras laterales. Esto se lo aplica realizando corte de la plancha de acero inoxidable con la amoladora con medidas de 20 x 35 cm y con la

dobladora se lo dobla cada 5 cm, dándole forma como un tubo cuadrado; después de ello se le suelda para que posteriormente se perfora y se emperna cada 7 cm en las caras laterales a 25 cm arriba con respecto a la base del secador.

Para la bandeja mallada, se lo construye a través de la plancha de acero con las medidas correspondientes que están los planos, con la maquina perforadora se realizan los agujeros de las planchas cada 0.2 cm de espacio y el diámetro del agujero debe de ser 2cm para que el producto deshidratado no caiga en la parte inferior del secador.

Para construir el ducto de aire, tomamos la lámina de acero inoxidable y marcamos todas las líneas de los dobles, en este caso las dimensiones seria 20 cm por 55 cm quedando 5 cm para el doblez, una vez marcada toda la lámina utilizaremos el disco de corte pasándolo superficialmente para marcar bien la lámina posterior a ello utilizaremos el disco de desbaste para pasar nuevamente la esmeriladora por todas las marcas de la lámina, aquí tenemos que observar que las líneas quede más grande en forma de V; con una brocha limpiamos bien desechado las virutas y con ello se procede a doblar la lámina quedando perfectamente a 90°, por ultimo soldamos internamente.

Por otro lado, tenemos el Blower eléctrico $\frac{3}{4}$ HP (4") la cual debe de ser desmontada y acoplarlo en el secador de flujo cruzado, de igual forma la bandeja tipo malla se lo construye con las planchas de acero inoxidable AISI 304 cuyas dimensiones son 44.5 cm de frente por 32 cm de ancho por 10 cm de altura. Seguidamente la resistencia térmica con aletas de 1 KW debe ser en forma de M y con dimensiones de 40 cm por 30 cm como se lo muestra en la sección de planos.

3.3 Simulación CFD

A partir de la simulación CFD se obtuvieron los resultados del perfil de velocidad y temperatura del flujo de aire dentro de la cámara de secado, así como también la visualización de las zonas críticas.

En la simulación del contorno de velocidad (figura 3.6) se puede observar que la velocidad promedio del flujo de aire se mantiene alrededor de los 13.74 m/s en el centro de la cámara, pero se visualiza zonas donde la velocidad del aire aumenta. Este aumento de velocidad se localiza justamente en la entrada y salida de la cámara de secado debido a que existen cambios de sección donde el área transversal por donde fluye el aire disminuye, provocando que aumente la velocidad del aire hasta los 30 m/s.

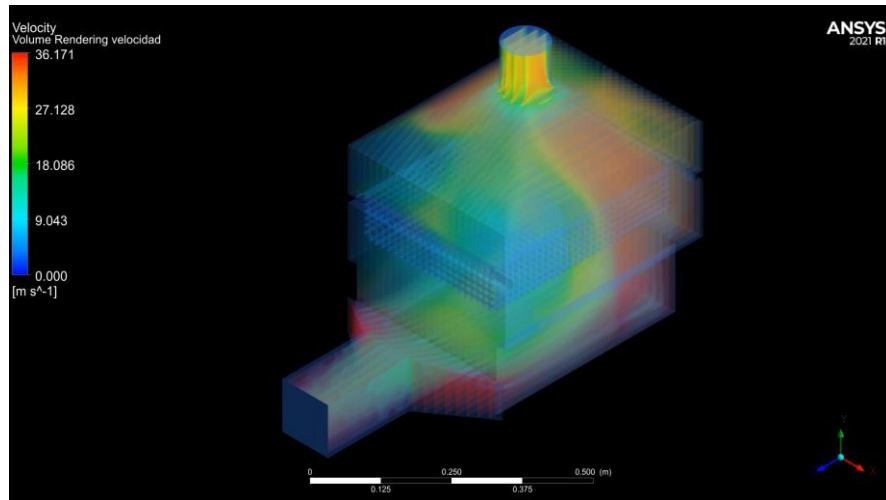


Figura 3.8 Simulación del contorno de velocidad

En la simulación del contorno de temperatura (figura 3.7) se puede observar que la temperatura promedio dentro de la cámara alcanza los 70 °C, pero se puede observar que la temperatura no es uniforme totalmente dentro de la cámara. Existe una pequeña zona donde la temperatura disminuye hasta los 60 °C, esto es debido a que la velocidad del flujo de aire resultó muy alta, provocando que la resistencia de 1000 W no logre mantener la temperatura homogénea total dentro de la cámara.

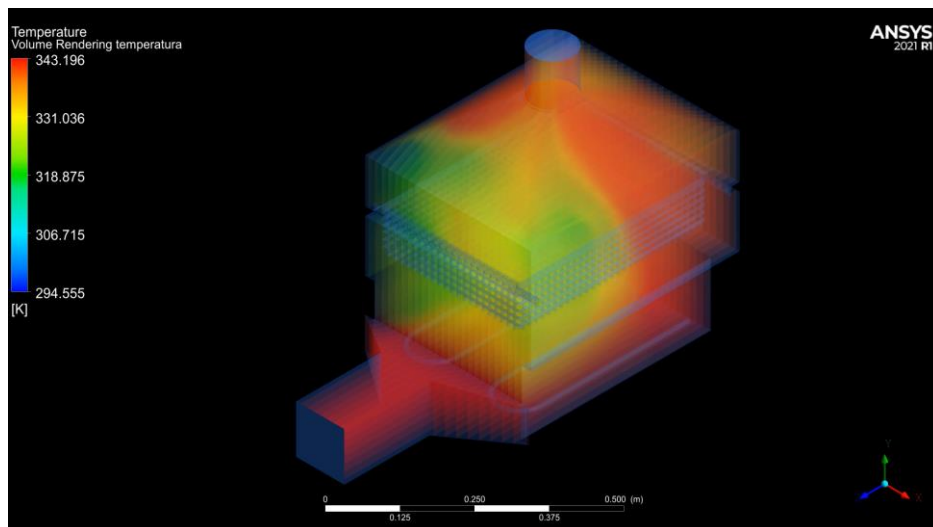


Figura 3.9 Simulación del contorno de temperatura

3.4 Análisis de Costos

Para realizar la estimación de costos se utilizaron solamente equipos y materiales relacionados al diseño de forma y funcionamiento del secador. En la tabla (3.4) se encuentra detallado el precio estimado de cada uno de los materiales a utilizar, sin embargo, los precios establecidos están sujetos de acuerdo con el proveedor de los materiales y el encargado de la fabricación del secador.

Tabla 3.4 Costo de construcción

Elemento	Costo
Manufactura del equipo	\$ 300,00
Resistencia térmica con aletas (2KW)	\$170,00
Blower eléctrico ¾ HP (4")	\$140,00
Planchas de acero inoxidable (3mm) (120cm x 240cm)	\$360,00
Bandeja tipo malla (35cm x 45cm)	\$40,00
Tubería para flujo de aire de 110mm x 3m (4")	\$22,50
Componentes y equipos eléctricos	\$100,00
Complementos de construcción (Tornillos, pernos, arandelas, soldadura)	\$30,00
Costo Total	\$1162,50

Como el diseño del equipo fue hecho tomando en consideración de los materiales disponible de la bodega del CDTs, el precio estimado podría reducirse hasta en un 25% siempre y cuando los equipos se encuentren en buen estado. Caso contrario habría que considerar un gasto adicional en el mantenimiento de los equipos para que puedan ser implementados al diseño del secador.

En cuanto al proceso de manufactura

CAPÍTULO 4

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 Conclusiones

- Se diseñó un secador de baja escala con escalonamiento para uso de laboratorio cumpliendo con los parámetros de velocidad, temperatura y tiempo de secado establecidos por el cliente. A través de los resultados obtenidos en la simulación se pudo comprobar una distribución relativamente homogénea de temperatura dentro de la cámara de secado y una velocidad del flujo de aire capaz de provocar la levitación del producto dentro de la caja mallada con la finalidad de optimizar el proceso de secado.
- El costo de fabricación del equipo se reduce hasta un 25% del valor total aplicando el concepto de economía circular debido a que se puede reutilizar materiales y componentes que se encuentran en buen estado y disponibles en el centro de desarrollo tecnológico sustentable (CDTS); el blower y las planchas de acero que se encuentran en el CDTS están disponibles para su reutilización para su manufactura e implementación del equipo.
- El tiempo de deshidratación del equipo fue de aproximadamente 45 minutos, pero dependiendo del producto, cantidad y velocidad del flujo de aire; el tiempo puede aumentar. Para nuestro producto base del banano natural, el tiempo de secado disminuyó un 15% comparado con otros tiempos de secado de hornos convencionales debido a que el equipo está sometido a flujo cruzado y por lo tanto alcanza velocidades altas; produciéndose un efecto de levitación en el producto logrando así conseguir una mayor remoción de humedad.
- Se ha establecido para el diseño de este equipo se utilizó un conjunto de resistencia térmicas para este proceso de deshidratación, produciendo una gran demanda energética, pero manteniendo una temperatura uniforme dentro de la parte interna del secador. Cualquier aumento dentro de los parámetros de velocidad y de la cantidad de producto a deshidratar es objeto de modificación de una resistencia térmica mayor a los 1000 W.

- En este trabajo no se presentó un análisis de estudio entre el calor teórico obtenido comparado con el software computacional dado que en el interior de la cámara de secado la energía térmica requerida involucra calor latente y sensible, de modo que involucra la representación de un modelo de producto deshidratado con sus propiedades termo físicas principales, por esta razón resulta de un análisis más complejo que sale de los objetivos del proyecto.
- A través de la simulación CFD se verificó la presencia de pequeños vórtices en la distribución de calor y velocidad, esto es debido a la configuración estructural del secador donde no se presentan esquinas redondeadas. Los límites de la cámara de secado presentan principalmente esquinas donde provocan puntos de estancamientos en la distribución del flujo de aire, lo que supondrá dificultades en la aerodinámica y análisis de la distribución de calor del equipo.
- Para el análisis de las pérdidas de calor del secador de flujo cruzado, se determinó que la potencia necesaria para mantener la temperatura de secado entre los rangos de operación deseados, su dimensionamiento, carga y porcentaje de humedad final del producto es aproximadamente de 1000 W para lograr deshidratar 1.5 Kg de producto. Además, es necesario mencionar que, si se desea mantener una temperatura homogénea dentro de la cámara, la velocidad del flujo de aire o la cantidad de producto debe ser menor al establecido en los objetivos del diseño del equipo para mantener un proceso de secado eficiente.

4.2 Recomendaciones

- Se recomienda no sobrepasar la carga recomendada del equipo de 1.5 Kg de producto para evitar pérdidas de calor, debido a que una mayor cantidad de masa de la muestra dentro de la cámara de secado provocará que la temperatura de secado no se mantenga uniforme, lo que afecta al producto para una deficiente deshidratación y provocando un mayor consumo de energía.

- Para realizar pruebas de secado con otros productos, se debe recalcular el flujo másico de aire mediante el cálculo de la masa del nuevo producto y el porcentaje de humedad que contiene, además de utilizar muestras con la misma forma y dimensiones debido a que la geometría del producto influye en el cálculo teórico del flujo másico para determinar la velocidad del aire para secar el producto y mantenerlo levitando para proceso de flujo cruzado.
- Para efectos prácticos del análisis del perfil de velocidad y temperatura se realizó la simulación del proceso de secado al vacío, por lo tanto, se recomienda considerar para futuras investigaciones usar pequeñas muestras de producto para determinar la disminución de temperatura experimental y considerar el valor de la velocidad del flujo de aire para la implementación del equipo. Es importante de considerar que al momento de realizar pruebas las experimentales es recomendable utilizar un blower con las mismas dimensiones físicas de salida de aire, pero con la capacidad de variar la potencia del ventilador para que se ajuste a los parámetros reales de presión y temperatura.
- Si bien el diseño del equipo cumple con los requerimientos de una distribución homogénea de flujo de aire y temperatura, se recomienda instalar deflectores o direccionadores de flujo de aire en la parte inferior e interna del secador para garantizar una distribución homogénea de aire para que remoción de humedad uniforme sea más regular en el proceso de secado.
- Debido a que en el diseño se utilizó resistencias con aletas para una efectiva distribución de calor y considerable aumento de temperatura de la cámara, se recomienda implementar una resistencia de 2000 W para suplir cualquier deficiencia de diseño o calor no considerado en distribución en las pérdidas de calor. Para la simulación se consideró una resistencia de 1000 W que dieron resultados al límite con los parámetros de diseño de temperatura y velocidad del aire.
- El tamaño de la muestra debe ser mayor al mallado de la caja debido a que realizando una comparación del proceso de secado de la muestra, se hace

evidente una reducción del volumen inicial con respecto al volumen final de la muestra de aproximadamente un 27.6% del producto, lo que supondrá la disminución del radio de la muestra y una caída del producto si es que los agujeros de la malla superan al tamaño final de la muestra deshidratada.

- A partir de la cantidad de producto para secar, se procede a determinar la carga que va a soportar cada bandeja a través de la densidad del banano y el espesor de cada rodaja para calcular el dimensionamiento de la bandeja mallada a través de las ecuaciones (2.1), (2.2) y (2.3) de manera que se establece por propio criterio las dimensiones rectangulares de la caja. Como el producto a deshidratar es de 1.5 Kg, realmente no existen grandes deformaciones y tensiones que provoquen fallas estructurales dado que la bandeja y la estructura en general se mantendrá estáticamente funcionando. Así mismo para las dimensiones de la cámara de secado fue necesario un análisis de escalonamiento de secadores de bandeja tradicionales teniendo como referencia la velocidad del flujo de aire y las dimensiones de la bandeja.

REFERENCIAS

- [1] Fimcp.espol.edu.ec. Historia de la Carrera | FIMCP, 2022. Disponible en: <<http://www.fimcp.espol.edu.ec/es/Pregrado/Ingenieria-Alimentos/Historia-Carrera>> [Accedido: 4-Jun-2022].
- [2] Desarrollo Sostenible. Educación - Desarrollo Sostenible, 2022. Disponible en: <<https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/education/>> [Accedido: 4-Jun-2022].
- [3] Desarrollo Sostenible. Crecimiento económico - Desarrollo Sostenible, 2022. Disponible en: <<https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/economic-growth/>> [Accedido: 4-Jun-2022].
- [4] A. S. Mujumdar, Handbook of Industrial Drying, Florida: CRS Press, 2015.
- [5] Y. CENGEL, Transferencia de calor y masa, Mexico: McGraw- Hill, 2011.
- [6] M. CABE, Operaciones unitarias en ingeniería química, Mexico: McGraw-Hill, 2002.
- [7] D. G. Mercer, «An Introduction to the Dehydration and Drying of fruits and Vegetables,» Canada, 2014.
- [8] F. P. Incropera, Fundamentos de transferencia de calor, Mexico: Prentice-Hall, 1996.
- [9] Brooker, D.B., Bakker-Arkema, F.W. and Hall, C.W. Drying and storage of grains and oilseeds. New York, Van Nostrand Reinhold, 1992.
- [10] NONHEBEL.G El secado de sólidos en la industria química Editorial Reverte s.a. Bogotá, 1979.
- [11] Geankoplis, C. J.: Mass Transport Phenomena Ohio State University Bookstore, 1982. - ISBN 10: 0960307001

- [12] L.R Ruiz, "Diseño de un secador de bandeja para la deshidratación de plátano en la parroquia de Vera Cruz cantón Pastaza", Tesis de Ingeniería Química, ESPOCH, Riobamba, Ecuador, 2016.
- [13] Hoffmann, C. T., Pra, J., Uhlemann, T. H. J., & Franke, J. Improving the energy efficiency of industrial drying processes: A computational fluid dynamics approach. *Procedia Manufacturing*, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.04.052>
- [14] M.T. Vargas, "Estudio del proceso de secado mecánico con giro continuo de granos de cacao y su incidencia en el tiempo de obtención del producto en la finca Inesita del cantón Naranjito", Univ. Tec. de Ambato, Ecuador, 2016.
- [15] C.I. P, "Influencia de Pretratamientos Convencionales en el Proceso de Secado de Banano y en las Características Físicas del Producto Final", Tesis de Ingeniería en Alimentos, Espol, Guayaquil, Ecuador, 2009.

APÉNDICES

APÉNDICE A

Resultados Obtenidos de los Cálculos

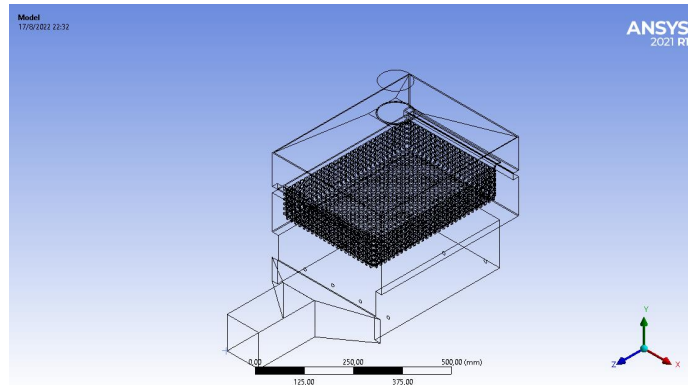
Nombre	Símbolo	Valor	Unidad
Carga del sólido sobre bandeja	$\frac{l_{so}}{A}$	9.8	Kg/m^2
Área total de bandeja	A_{tba}	0.143	m^2
Fuerza máxima sobre bandeja	P_{max}	96.04	N/m^2
Esfuerzo del diseño	t_{Di}	333.33	N/m^2
Espesor de bandeja	$t_{bandeja}$	0.0023	m
Humedad base húmeda	H_{bh}	3.167	-
Humedad base seca	H_{bse}	0.0869	-
Caudal del aire	\dot{Q}_{aire}	2.76	m^3/s
Flujo másico del aire	\dot{m}_{aire}	2.7675	kg/seg
Velocidad del aire	V_{aire}	13.74	m/s
Calor que absorbe el banano	Q_{banano}	211.05	KJ
Calor que absorbe la bandeja	$Q_{bandeja}$	48.94	KJ
Presión de vapor	Pv_1	3.1044	KPa
Presión de aire seco	Pa_1	98.22	KPa
Humedad específica del aire circundante	ω_1	0.0316	$\frac{Kg_{H2O}}{Kg_{aire\ seco}}$
Entalpía	h_1	106.9389	$\frac{KJ}{Kg\ aire\ seco}$
Presión de vapor	Pv_2	18.526	KPa

Presión de aire seco	P_{a_2}	82.799	KPa
Humedad específica del aire circundante	ω_2	0.76117	$\frac{Kg_{H_2O}}{Kg_{aire\ seco}}$
Entalpía	h_2	2081.0974	$\frac{KJ}{Kg\ aire\ seco}$
Calor	$q_{1,aire}$	197.343	KJ
Calor	$q_{2,aire}$	5.03	KJ
Calor necesario para calentar al aire	Q_{aire}	101.19	KJ
Calor sensible	$q_{sensible}$	199.386	KJ
Calor latente	$q_{latente}$	2459.836	KJ
Calor de evaporación	$Q_{evaporizacion}$	2659.22	KJ
Calor requerido para calentar el banano	Q_{carga}	3018.422	KJ
Potencia necesaria para calentar el banano	P_Q	1.12	KW
Número de Reynolds	Re	510265.34	-
Viscosidad cinética	ν	1.6155×10^{-5}	m^2/s
Número de Nusselt	Nu_x	137.4151	-
Coefficiente de transferencia de calor	h_{tc}	6.07	$\frac{W}{m^2 \cdot C}$
Espesor capa aislante	Δx	0.0693	m

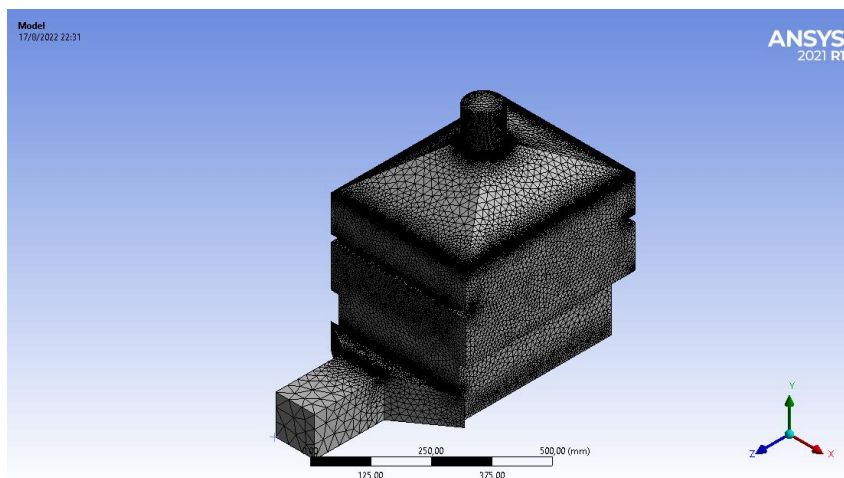
APÉNDICE B

Procedimiento de Simulación

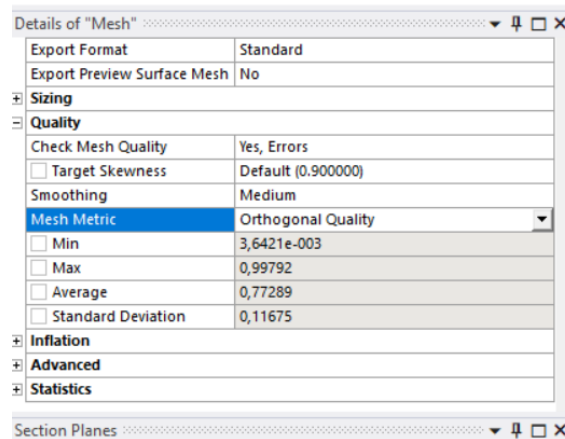
Para el proceso de simulación en CFD se realizó la extracción de la geometría del volumen de control con el mismo CAD de ANSYS denominado *Design Modeler*, que sirve para realizar la transparencia del diseño para poder visualizar el fluido que está dentro de la cavidad.



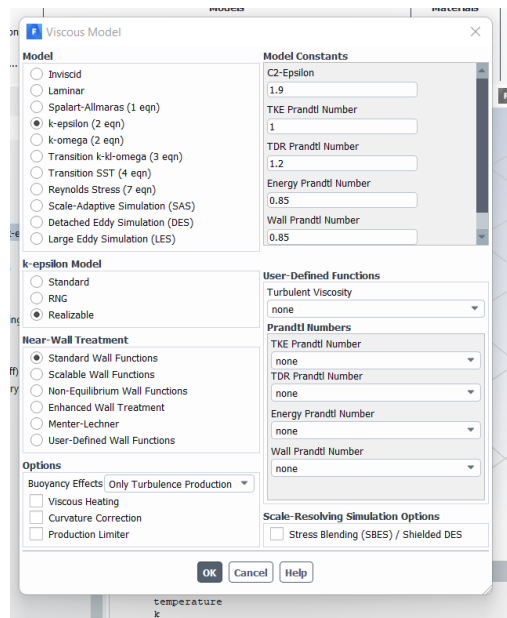
Seguidamente se realizó el proceso de mallado, donde se usó un modelo de malla tetraédrico; debido a la complejidad de la geometría. Este modelo tiene muchas protuberancias dificultando un mallado constante en estos puntos (ver partes de los fillos), ANSYS lo sombrea debido a que refina siempre los fillos.



Para la calidad de la malla se tiene como referencia la calidad de orthogonal quality, por lo general tiene que ser superior a 0.5, aquí obtenemos un promedio de 0.77, entonces se establece que el mallado es bastante consistente en la mayoría de la geometría.

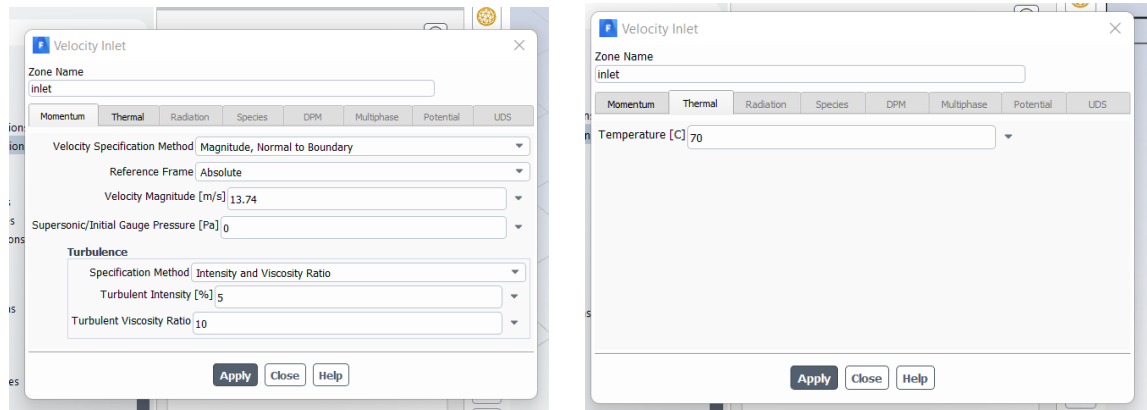


Para el modelo de turbulencia se escogió el modelo k-épsilon de tipo *realizable* debido al gran rango de operación de modelación de fluidos.



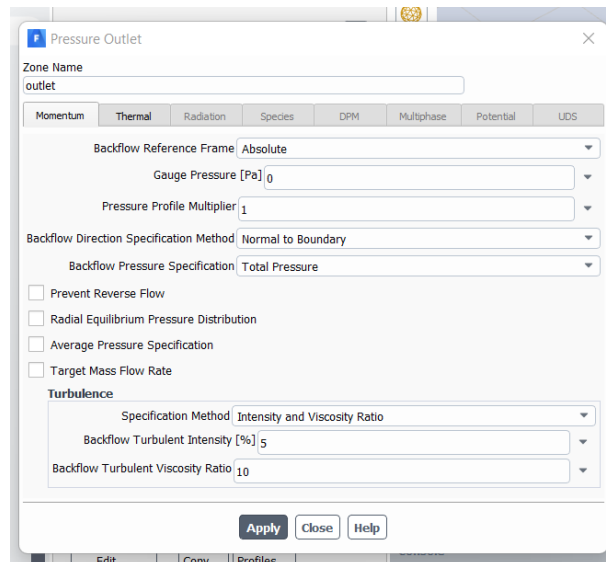
Las condiciones de borde para la entrada es 13,74 m/s en la velocidad con una temperatura de 70 °C para la entrada del aire

Entrada:

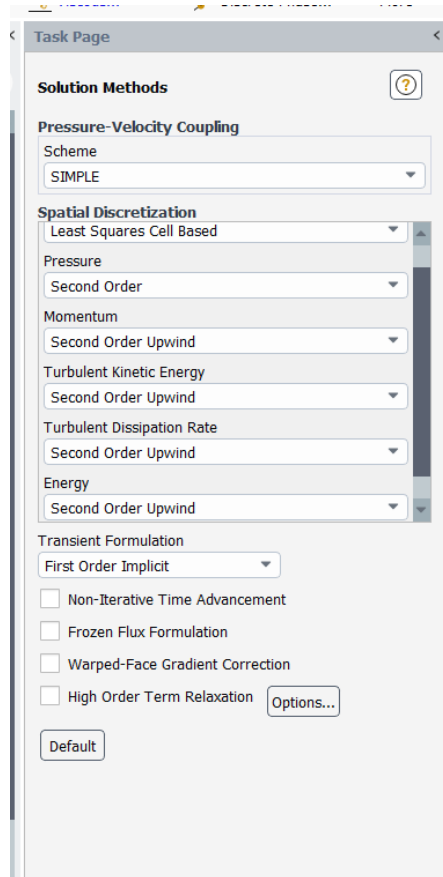


Salida:

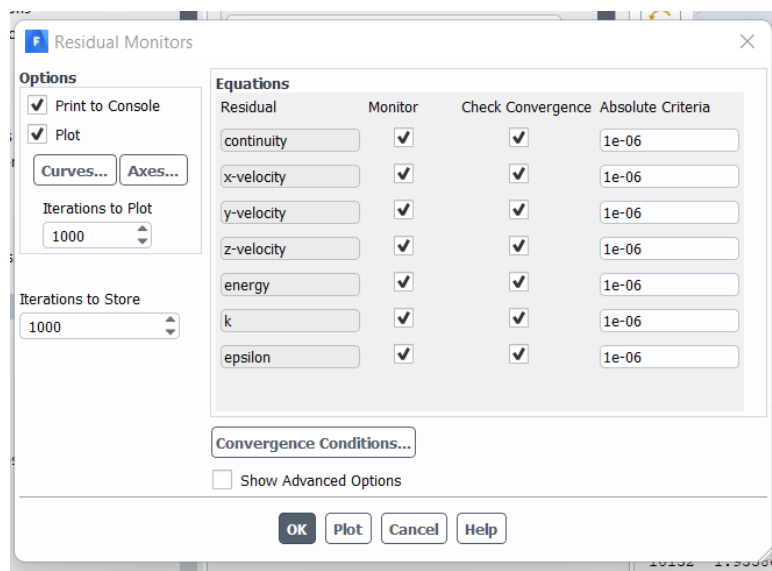
Para los parámetros de salida se colocó la temperatura al ambiente y con presión manométrica igual a cero.



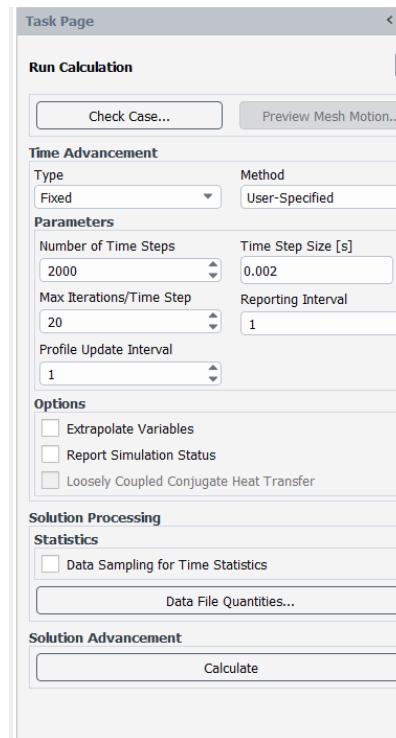
El método de solución utilizado fue un modelo simple con todas las variables de la ecuación de la conservación de la energía en segundo orden para alcanzar una precisión adecuada y se lo configuró en modo transitorio de primer orden debido a que no se está capturando fuerzas externas facilitando capturar pequeños instantes de tiempo para garantizar una simulación bastante acertada.



Para el criterio de la convergencia de la solución se aplica una iteración de almacenamiento de 1000 iteraciones; dado que en este caso se desea garantizar una convergencia de 1×10^{-6} de modo que ANSYS deja de simular cuando llega a ese error.



El número de iteraciones o simulación se ve afectado directamente con el *time step*; en este caso se escogió el time step de 20 donde se itera esa cantidad de veces, es decir el número total de iteraciones fueron 2000x20 esto depende del fenómeno físico de la simulación donde llega a un cierto tiempo en su estabilidad.



Resultados de la simulación:

Este monitor sirve para identificar en qué momento se llega a una convergencia, esto garantiza que no existe pérdidas de masa. El primer monitor siempre va a hacer flujo másico total; la diferencia entre flujo másico entre la entrada y la salida tiene que ser muy cercano a cero.

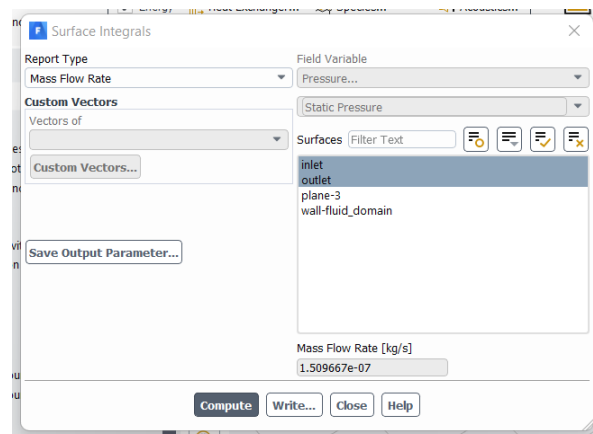


Figura B 4.1 Flujo masico de entrada y salida

Para la pérdida de entrada y salida en este monitor indica la presión total en otras palabras las pérdidas que tiene por todos los reflujos que tiene el modelo.

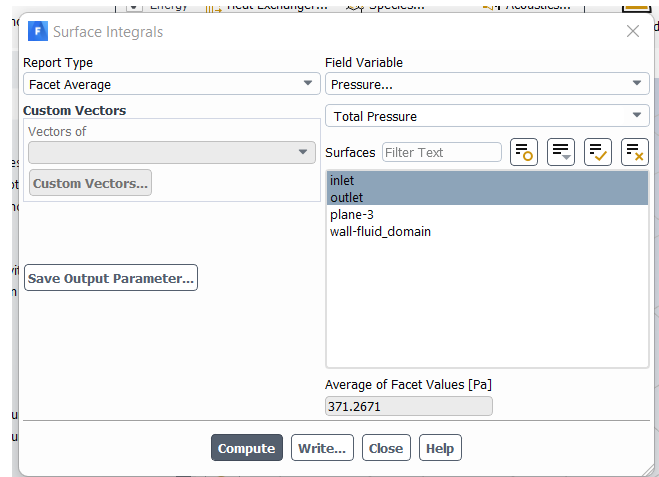


Figura B 4.2 Pérdida de presión entrada y salida

Para la temperatura de salida se demuestra cuanto es la temperatura del aire a la salida del secador, este valor se debe a los reflujos de aire, a los vórtices que se genera en las partes frías del deshidratador.

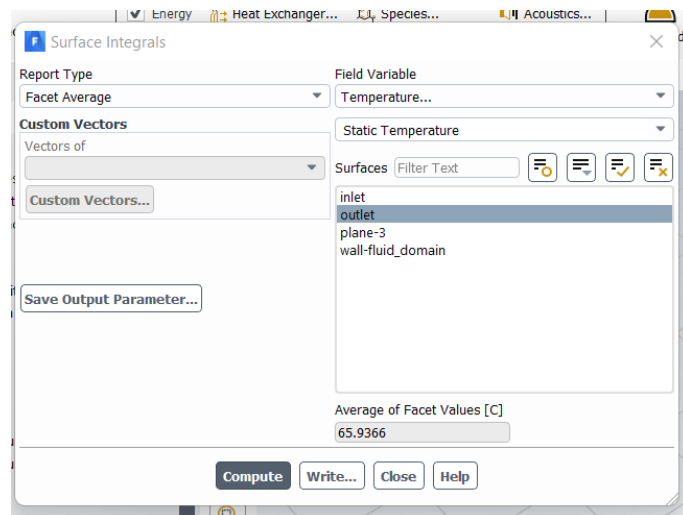


Figura B 4.3 Temperatura de salida

Para el contorno de temperatura se visualiza los contornos más fríos de modo que tiene coherencia física con los puntos de mayores pérdidas de presión.

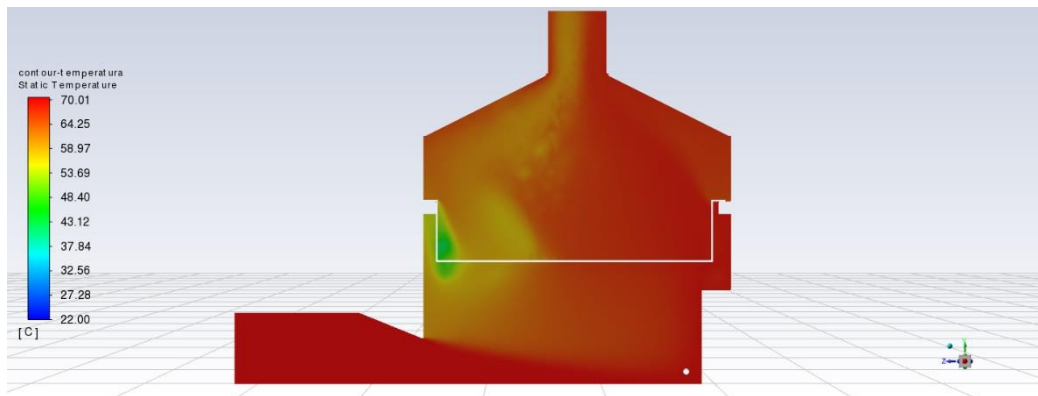


Figura B 4.4 Contorno de temperatura

Para el contorno de velocidad existe una entrada de 13 m/s, también se genera velocidades bajas de 7 m/s debido a que el aire tiene que pasar por medio de los conductos de la bandeja y en la parte superior la velocidad aumenta por la reducción del área transversal.

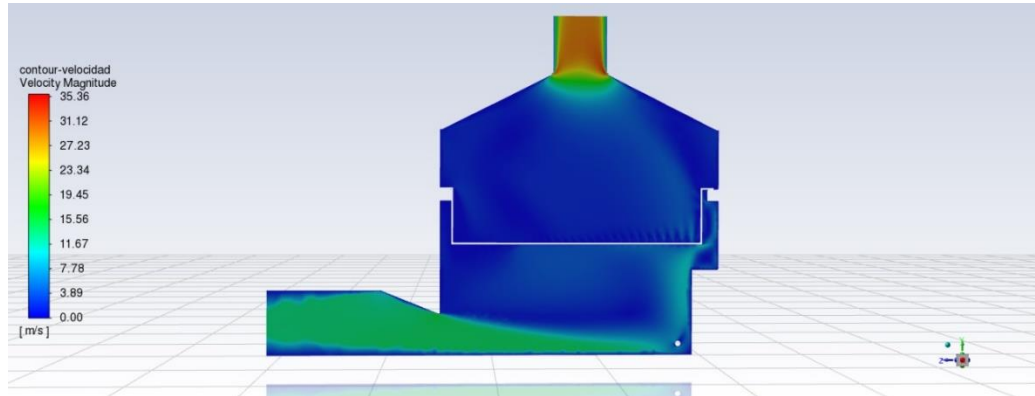


Figura B 4.5 Contorno de temperatura

Para el contorno de presión total donde se visualiza muy uniforme dicho contorno debido a que es la misma velocidad de modo que esto nos sirve para seleccionar el blower a utilizar.

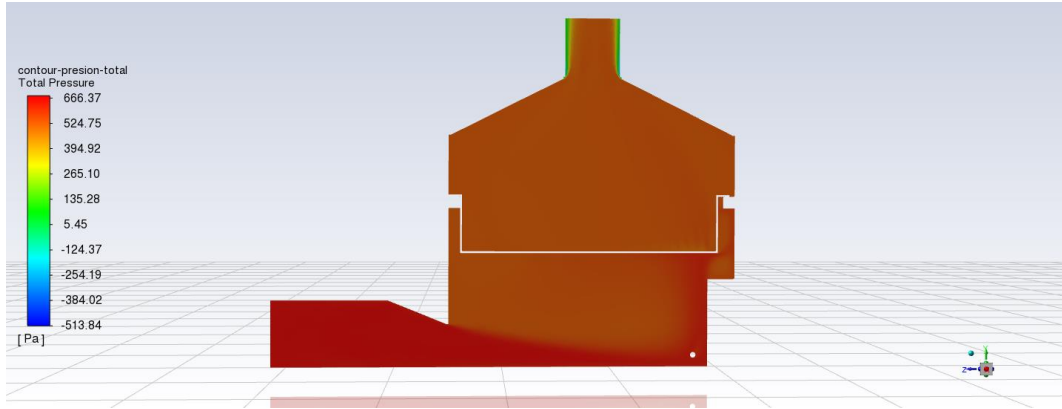


Figura B 4.6 Contorno de presión total

Para la gráfica presión total estable garantizamos la convergencia o la estabilidad de la simulación cuando todos los monitores tengan un comportamiento constante

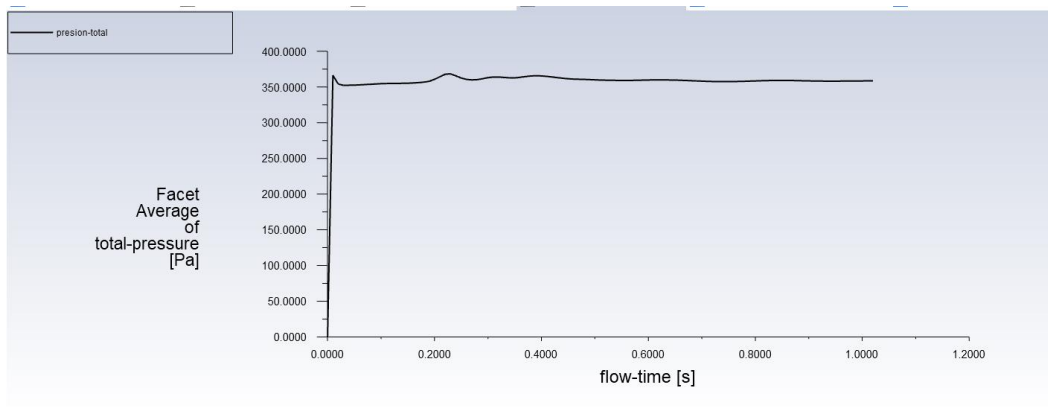


Figura B 4.7 presión total estable

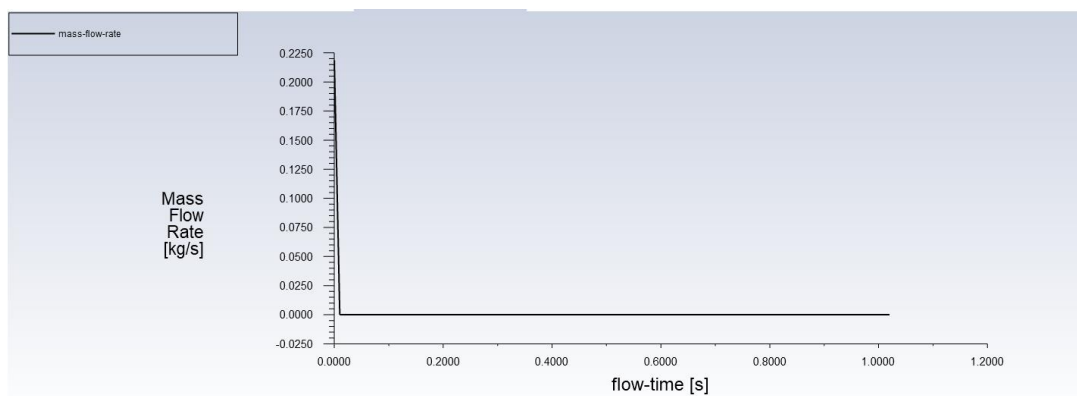
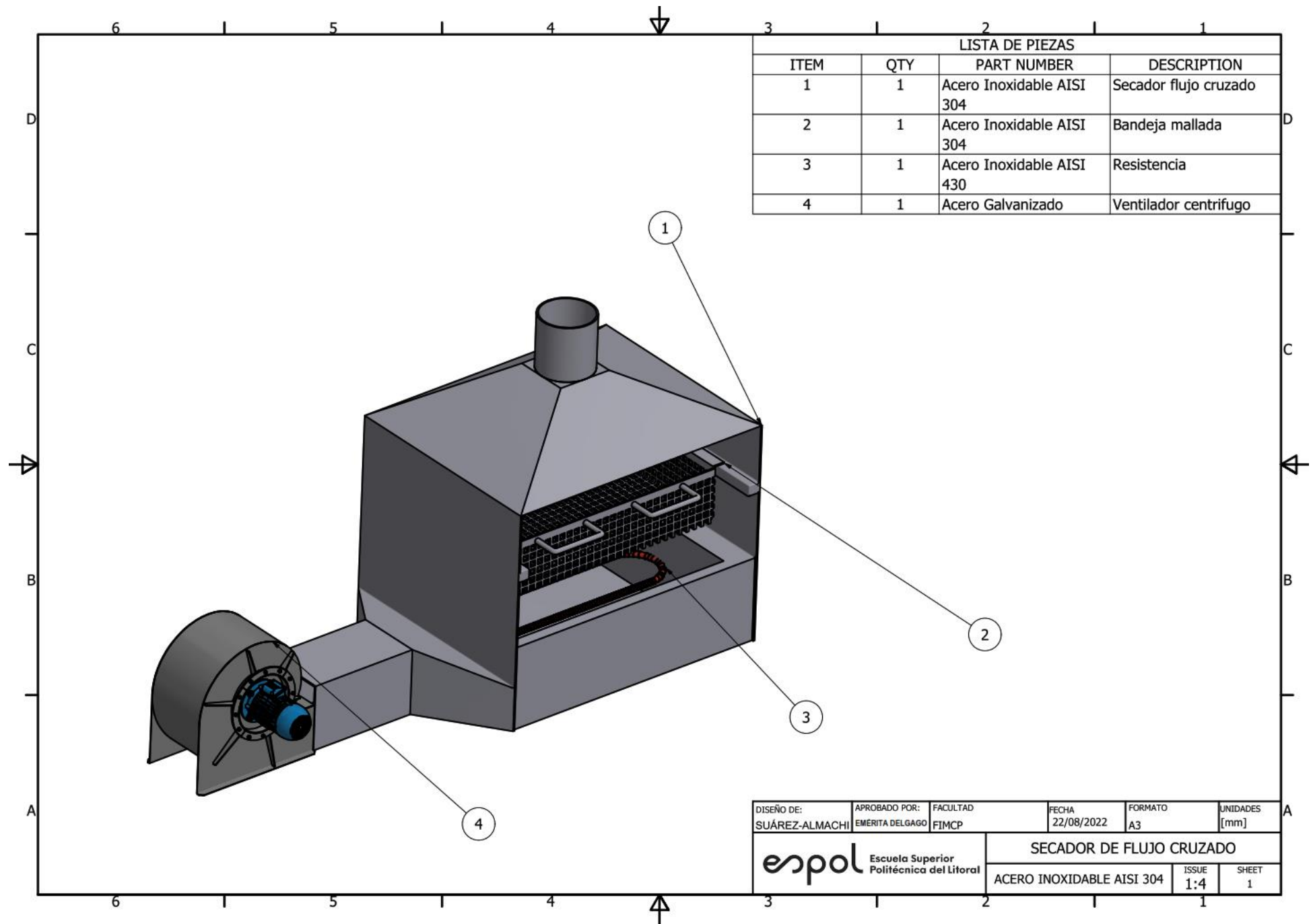


Figura B 8. Flujo masico entrada y salida estable

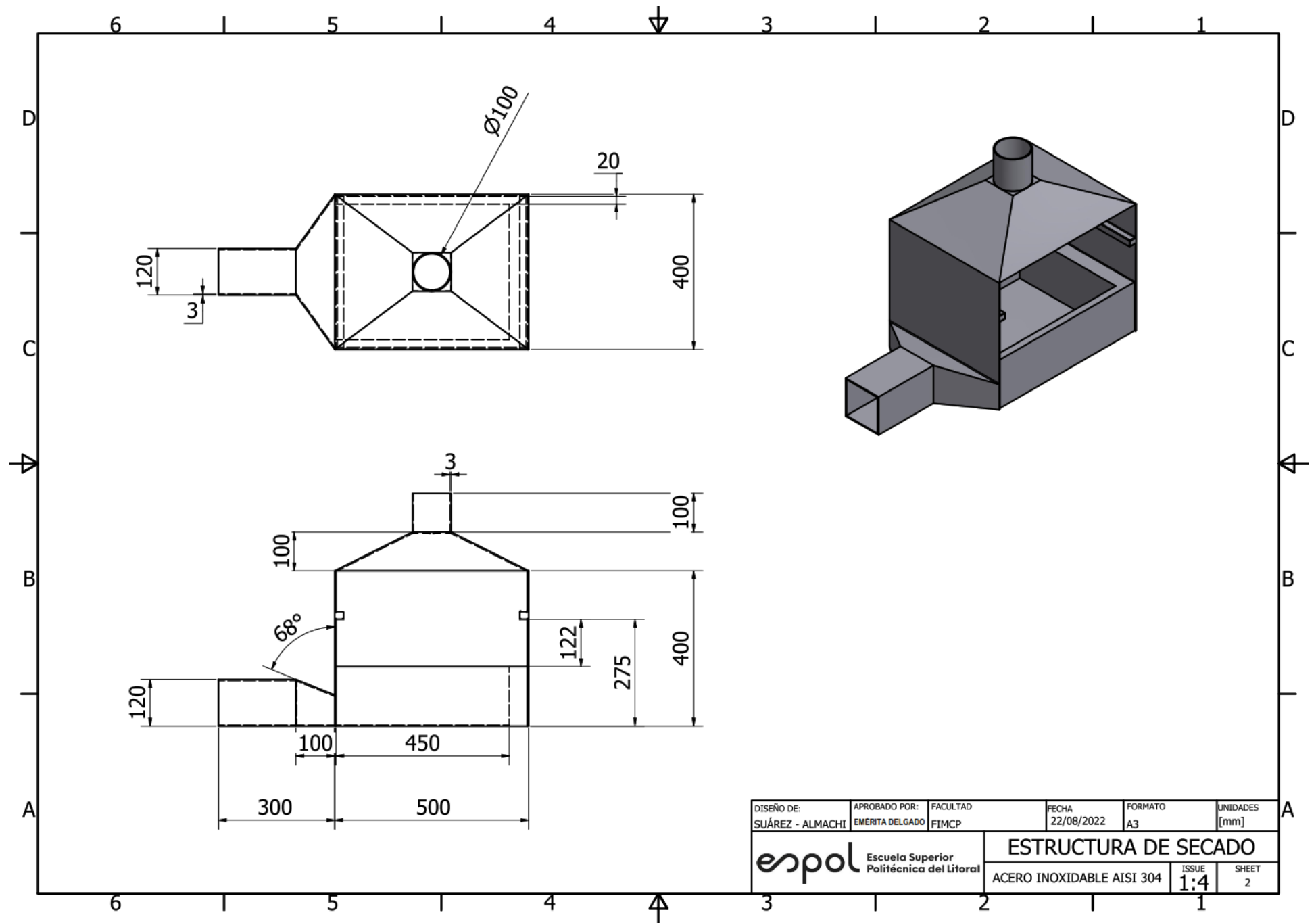
APÉNDICE C

Planos

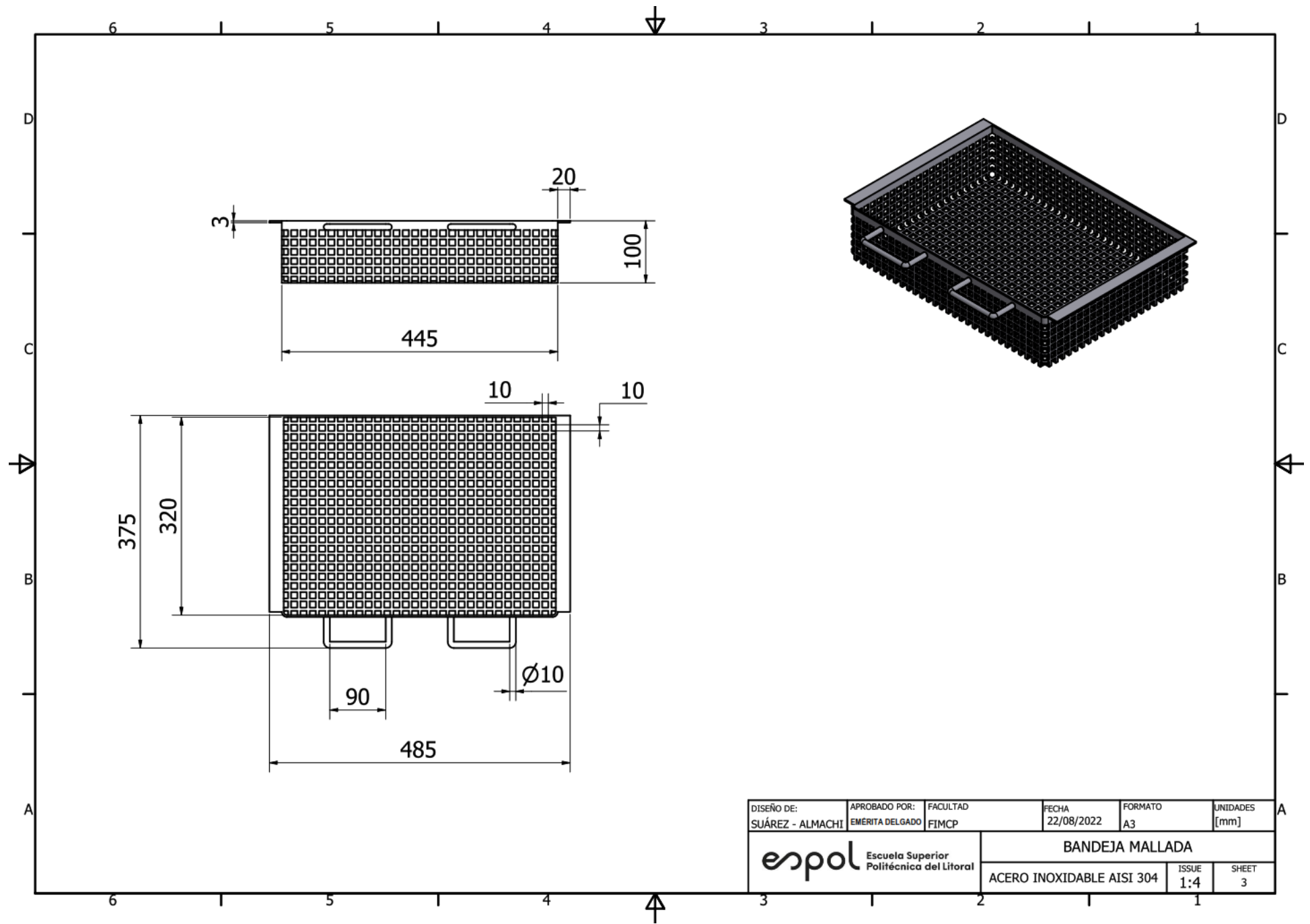


LISTA DE PIEZAS			
ITEM	QTY	PART NUMBER	DESCRIPTION
1	1	Acero Inoxidable AISI 304	Secador flujo cruzado
2	1	Acero Inoxidable AISI 304	Bandeja mallada
3	1	Acero Inoxidable AISI 430	Resistencia
4	1	Acero Galvanizado	Ventilador centrifugo

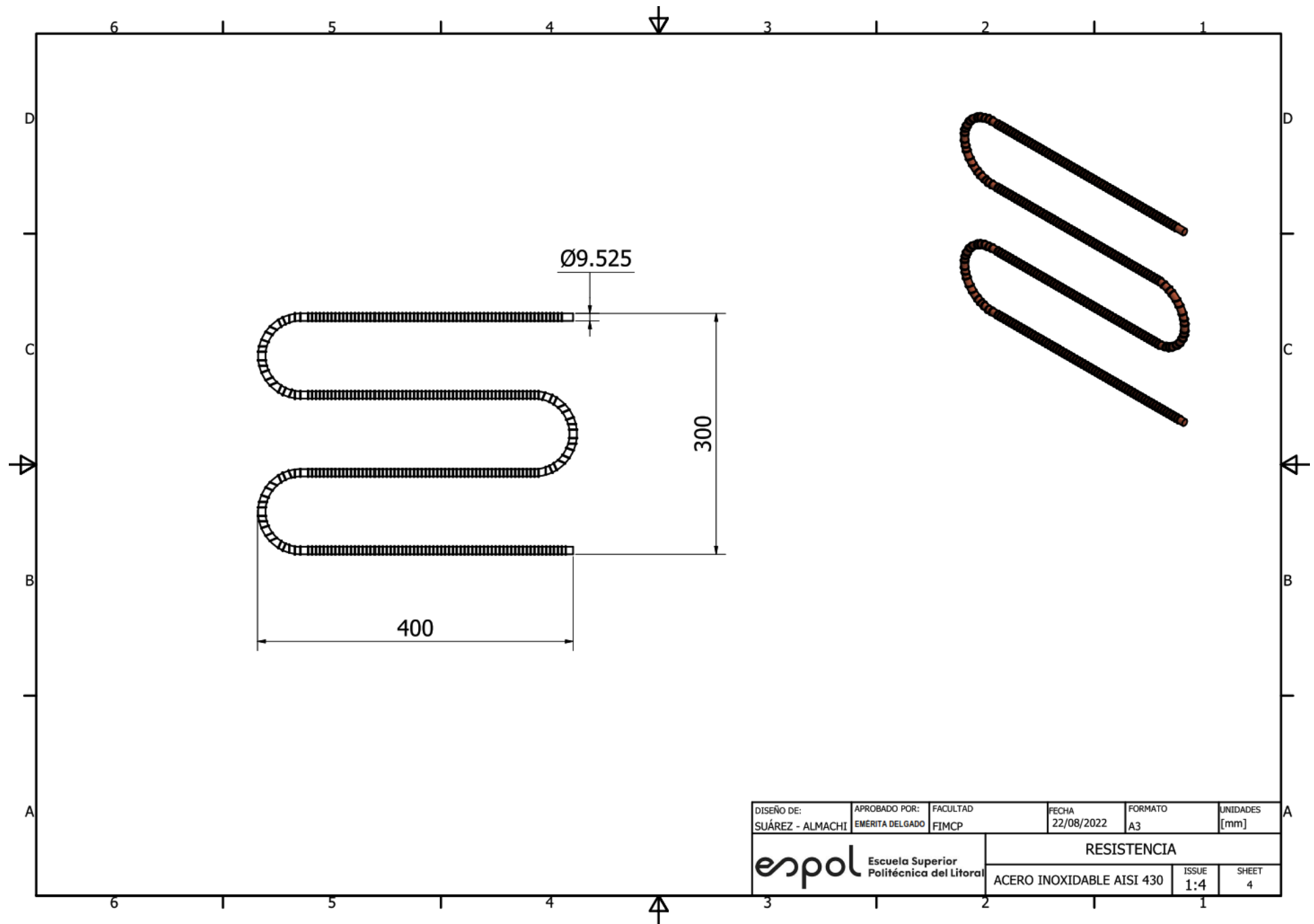
DISEÑO DE: SUÁREZ-ALMACHI	APROBADO POR: EMERITA DELGAGO	FACULTAD FJMCP	FECHA 22/08/2022	FORMATO A3	UNIDADES [mm]
espol Escuela Superior Politécnica del Litoral			SECADOR DE FLUJO CRUZADO		
			ACERO INOXIDABLE AISI 304	ISSUE 1:4	SHEET 1



DISEÑO DE: SUÁREZ - ALMACHI	APROBADO POR: EMERITA DELGADO	FACULTAD FIMCP	FECHA 22/08/2022	FORMATO A3	UNIDADES [mm]
espol Escuela Superior Politécnica del Litoral			ESTRUCTURA DE SECADO		
			ACERO INOXIDABLE AISI 304	ISSUE 1:4	SHEET 2



DISEÑO DE: SUÁREZ - ALMACHI	APROBADO POR: EMERITA DELGADO	FACULTAD FIMCP	FECHA 22/08/2022	FORMATO A3	UNIDADES [mm]
espol Escuela Superior Politécnica del Litoral			BANDEJA MALLADA		
			ACERO INOXIDABLE AISI 304	ISSUE 1:4	SHEET 3



DISEÑO DE: SUÁREZ - ALMACHI	APROBADO POR: EMÉRITA DELGADO	FACULTAD FIMCP	FECHA 22/08/2022	FORMATO A3	UNIDADES [mm]
			RESISTENCIA		
			ACERO INOXIDABLE AISI 430	ISSUE 1:4	SHEET 4