



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE QUITO

CARRERA DE MECÁNICA

**DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UN SEPARADOR CICLÓNICO CON CAPACIDAD
DE HASTA 0.5 M³/S DE AIRE PARA LA ELIMINACIÓN DE IMPUREZAS EN EL
CACAO EN LA FUNDACIÓN FAMILIA SALESIANA SALINAS "EL SALINERITO"
DE GUARANDA**

Trabajo de titulación previo a la obtención del
Título de Ingenieros Mecánicos

AUTORES: KEVIN SEBASTIAN CRUZ IZA

BRYAN ALEXIS QUINGA LUGMAÑA

TUTOR: LUIS FERNANDO TOAPANTA RAMOS

Quito – Ecuador

2023

CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Nosotros, Kevin Sebastian Cruz Iza con documento de identificación N° 1751195981 y Bryan Alexis Quinga Lugmaña con documento de identificación N° 1722819016; manifestamos que:

Somos los autores y responsables del presente trabajo; y, autorizamos a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo de titulación.

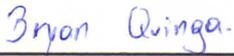
Quito, 18 de septiembre del año 2023

Atentamente,



Kevin Sebastian Cruz Iza

1751195981



Bryan Alexis Quinga Lugmaña

1722819016

CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

Nosotros, Kevin Sebastian Cruz Iza con documento de identificación No. 1751195981 y Bryan Alexis Quinga Lugmaña con documento de identificación No. 1722819016, expresamos nuestra voluntad y por medio del presente documento cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores de la Propuesta Tecnológica: "Diseño y simulación de un separador ciclónico con capacidad de hasta $0.5 \text{ m}^3/\text{s}$ de aire para la eliminación de impurezas en el cacao en la Fundación Familia Salesiana Salinas "El Salinerito" de Guaranda", el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingenieros Mecánicos, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribimos este documento en el momento que hacemos la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, 18 de septiembre del año 2023

Atentamente,



Kevin Sebastian Cruz Iza

1751195981



Bryan Alexis Quinga Lugmaña

Bryan Alexis Quinga Lugmaña

1722819016

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Luis Fernando Toapanta Ramos con documento de identificación N° 1721113759, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UN SEPARADOR CICLÓNICO CON CAPACIDAD DE HASTA 0.5 M³/S DE AIRE PARA LA ELIMINACIÓN DE IMPUREZAS EN EL CACAO EN LA FUNDACIÓN FAMILIA SALESIANA SALINAS "EL SALINERITO" DE GUARANDA, realizado por Kevin Sebastian Cruz Iza con documento de identificación N° 1751195981 y por Bryan Alexis Quinga Lugmaña con documento de identificación N° 1722819016, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción Propuesta Tecnológica que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, 18 de septiembre del año 2023

Atentamente,



Ing. Luis Fernando Toapanta Ramos, PhD

1721113759

DEDICATORIA

Este trabajo de titulación va dedicado a mis padres por haberme dado la oportunidad de seguir formándome, sin duda, fueron mi apoyo moral durante esta ajetreada, pero provechosa vida estudiantil, así como, a mis amigos que levantan el ánimo por más enfadado o desmotivado me haya encontrado. Gracias a su motivación, me han enseñado a luchar por lo que me apasiona y no darme por vencido.

Me gustaría finalizar este apartado con la siguiente frase, que resume de forma simple y concisa cómo fue mi trayectoria dentro de la universidad:

"Life is just an elevator ride"

Kevin Sebastian

El presente trabajo lo dedico a mis padres quienes, con su paciencia y esfuerzo me ha permitido llegar hasta esta última etapa de mi vida universitaria y a mi hermano por ser un apoyo incondicional durante este proceso y ser un modelo a seguir. Y gracias a mi familia que estuvieron siempre apoyándome en los momentos buenos y malos en el transcurso de mi vida. Me han enseñado a ser la persona que soy hoy en día, siempre dándome consejos que he sabido acatar y me ha ayudado a sobrellevar las dificultades.

Bryan Alexis

AGRADECIMIENTO

Estoy agradecido con la Universidad Politécnica Salesiana por darme la oportunidad de obtener conocimientos durante mi desarrollo tanto personal como profesional. A mis padres por su amor, trabajo y horas de sacrificio para que me forme e inculcarme con buenos valores como el esfuerzo, gratitud y perseverancia que me ayudaron mucho al desarrollar este trabajo de titulación. Agradezco a los héroes anónimos que suben contenido a Library Genesis, por hacer más fluido el leer y aprender sobre los diversos temas que encontré a lo largo de la carrera.

Finalmente, agradezco especialmente al Ing. Fernando Toapanta quien nos supo guiar y brindar apoyo en aquellas dudas que teníamos al avanzar con el documento, siempre orientándonos hacia los senderos en lugar de revelarnos las soluciones con el fin de hacernos crecer y estar orgullosos de haber podido terminar el trabajo de titulación de forma satisfactoria.

Kevin Sebastian

Agradecer a Dios ya que él nos da un día más vida y la salud para seguir adelante. Luego agradecer a Universidad Politécnica Salesiana, a todos los Ingenieros e Ingenieras que fueron parte de mi formación académica y futuro profesional. A todos mis compañeros que supieron ayudar cuando se necesitaba y gracias por todos los momentos que se pasó con cada uno de ellos.

A mi familia que supieron estar en los momentos que se necesitaba ya que sé que siempre van estar pendientes de mí y sé que puedo confiar plenamente cuando los necesite. A mi tío Edwin que supo ayudarme y enseñarme sobre la mecánica y mi tío Mario que en paz descanse, gracias por ser como un segundo padre y por todos los consejos que nos has dado a mí y mi hermano y siempre guiarnos por el buen camino.

Dar las gracias a nuestro tutor Fernando Toapanta por saber guiarnos en este proceso y guiarnos en lo que teníamos dudas, gracias también por darnos ánimo durante este proceso y así poder lograr finalizar el trabajo de titulación.

Bryan Alexis

ÍNDICE DE CONTENIDO

CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN	ii
CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA	iii
CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN	iv
DEDICATORIA	v
AGRADECIMIENTO	vi
RESUMEN	xiii
ABSTRACT	xiv
INTRODUCCIÓN	1
Antecedentes	1
Planteamiento del problema	1
Justificación	1
Objetivos	2
Objetivo general	2
Objetivos específicos	2
Metodología	2
Descripción breve de cada capítulo	2
Capítulo I Estado del arte y aspectos teóricos de un separador ciclónico	4
1.1 Estado del arte del separador ciclónico	4
1.2 Aspectos teóricos de la investigación	6
1.2.1 El cacao	6
1.2.2 Orígenes del cacao	7
1.2.3 Tipos de cacao	7
1.2.4 El cacao en Ecuador	7
1.2.5 Separador ciclónico	8
1.2.6 Principio de funcionamiento de un separador ciclónico	9
1.2.7 Partes de un separador ciclónico	9
1.2.8 Tipos de separadores ciclónicos	11
1.2.9 Características del flujo	14
1.2.10 Caída de presión	15
1.2.11 Rendimiento de los separadores ciclónicos	15
1.2.12 Ventajas y desventajas del separador ciclónico	15

1.2.13	Sistemas de transporte por presión de vacío	16
1.2.14	Elementos impulsores de aire.....	17
1.3	Descripción de la situación actual	18
1.4	Conclusiones del capítulo.....	19
Capítulo II Diseño del separador ciclónico		20
2.1	Ubicación geográfica.....	20
2.2	Parámetros para dimensionar un separador ciclónico	20
2.2.1	Diámetro del separador ciclónico.....	21
2.2.2	Dimensiones del separador ciclónico.....	22
2.2.3	Velocidad de saltación	22
2.3	Diseño de la tubería	23
2.3.1	Diámetro de la tubería.....	24
2.3	Caída de presión en el sistema.....	24
2.3.1	En el interior del separador ciclónico.....	24
2.3.2	En la línea de transporte	25
2.4	Diseño del ventilador.....	26
2.4.1	Caudal de aire requerido	27
2.4.2	Potencia requerida	27
2.5	Diseño de la campana.....	27
2.6	Conclusiones del capítulo.....	28
Capítulo III Análisis del separador ciclónico		29
3.1	Datos generales para el diseño.....	29
3.2	Alternativas de diseño por módulos	29
3.2.1	Opciones del módulo 1.....	30
3.2.2	Opciones del módulo 2.....	30
3.2.3	Opciones del módulo 3.....	31
3.2.4	Opciones del módulo 4.....	31
3.3	Selección de alternativas	32
3.3.1	Selección de la alternativa del módulo 1.....	32
3.3.2	Selección de la alternativa del módulo 2.....	33
3.3.3	Selección de la alternativa del módulo 3.....	33
3.3.4	Selección de la alternativa del módulo 4.....	33
3.4	Interpolación de la densidad del aire	34
3.5	Interpolación de la viscosidad dinámica del aire.....	34

3.6	Cálculo del diámetro del separador ciclónico.....	34
3.7	Selección de las medidas del separador ciclónico	35
3.8	Selección del espesor de la chapa metálica	35
3.9	Cálculo del área del separador ciclónico	36
3.10	Cálculo de la velocidad de saltación.....	36
3.11	Selección de la tubería	37
3.12	Cálculo de la caída de presión interna en el equipo	38
3.13	Cálculo de las pérdidas de carga en la línea de transporte	38
3.14	Cálculo de la caída de presión total	39
3.15	Selección del ventilador.....	39
3.16	Diseño del soporte	40
3.15.1	Cálculo de la carga actuante.....	40
3.15.2	Resultados del análisis estructural.....	41
3.17	Conclusiones del capítulo.....	41
Capítulo IV Simulación numérica y análisis financiero del separador ciclónico.....		42
4.1	Ecuaciones gobernantes en la simulación	42
4.1.1	Ecuación de la conservación de la masa	42
4.1.2	Conservación de momento	42
4.1.3	Modelo de turbulencia.....	43
4.1.4	Modelo de fase discreta.....	45
4.2	Datos utilizados para la simulación	45
4.3	Procedimientos para la simulación	46
4.1.5	Geometría	46
4.1.6	Mallado.....	47
4.1.7	Configuración.....	48
4.1.8	Solución.....	49
4.4	Análisis de resultados	51
4.4.1	Análisis de la velocidad.....	51
4.4.2	Análisis de la presión	51
4.4.3	Análisis de la turbulencia	52
4.4.4	Predicción de la trayectoria de los residuos	53
4.4.5	Comparación de los resultados.....	54
4.5	Análisis financiero	54
4.1.9	Costos de materia prima	54

4.1.10	Costos indirectos para la fabricación	55
4.1.11	Costos mano de obra	55
4.1.12	Costos indirectos	56
4.1.13	Costos totales.....	56
4.6	Análisis de rentabilidad	56
4.6.1	Valor actual neto	57
4.6.2	Tasa interna de retorno	57
4.6.3	Relación costo - beneficio	58
4.6.4	Periodo de recuperación de la inversión	58
4.7	Conclusiones del capítulo	59
	CONCLUSIONES GENERALES	60
	RECOMENDACIONES GENERALES	61
	LISTA DE REFERENCIAS.....	62
	ANEXOS	67

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Cacao ecuatoriano.....	6
Figura 2. Esquema de un separador ciclónico.....	8
Figura 3. Esquema del funcionamiento de un separador ciclónico.....	9
Figura 4. Secciones importantes del separador ciclónico.	10
Figura 5. Esquema de uso de un separador ciclónico en el proceso de cortado de madera. ...	10
Figura 6. Tipos de ciclones según su forma.	11
Figura 7. Esquema de la vista superior y frontal de las cuatro configuraciones de un ciclón. 12	
Figura 8. Esquema de la base cónica y una cilíndrica de un separador ciclónico.....	13
Figura 9. Esquemas del tubo interno de descarga cónico y cilíndrico de un ciclón.	13
Figura 10. Esquema de un a) flujo inverso y un b) flujo directo.	13
Figura 11. Colectores ciclónicos típicos.	14
Figura 12. Transporte mediante presión de vacío típico.	16
Figura 13. Transporte mediante presión de vacío con manguera.....	17
Figura 14. Diagrama del flujo de proceso para la pasta de cacao.	18
Figura 15. Esquema del estado actual en la empresa "El Salinerito".....	18
Figura 16. Esquema de la implementación del separador ciclónico.	19
Figura 17. Ubicación del proyecto.	20
Figura 18. Medidas principales de un separador ciclónico en metros.	21
Figura 19. Geometría de la campana.....	27
Figura 20. Composición química del acero inoxidable 304.....	36
Figura 21. Geometría de la estructura metálica.	40
Figura 22. Análisis del soporte: (a) deformación total y (b) esfuerzo de Von-Misses.	41
Figura 23. Modelos de turbulencia.....	44
Figura 24. Subprocesos para la simulación CFD-DPM en ANSYS Fluent.....	46
Figura 25. Geometría interna del equipo.....	47
Figura 26. Métrica de calidad skewness.	47
Figura 27. Métrica de calidad orthogonal.	48
Figura 28. Condiciones de frontera.	48
Figura 29. Parámetros del modelo DPM.....	49
Figura 30. Métodos de solución.	50
Figura 31. Método de inicialización del solver.....	50
Figura 32. Contorno de velocidad.....	51
Figura 33. Contorno de presión.....	52
Figura 34. Viscosidad turbulenta del aire: (a) renderizado de volumen y (b) vortex core.	53
Figura 35. Trayectoria de los residuos.	53

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Especificaciones técnicas para el diseño del separador ciclónico.....	29
Tabla 2. Alternativas del material de construcción.....	30
Tabla 3. Alternativas del elemento impulsor del aire.....	30
Tabla 4. Alternativas de equipos.....	31
Tabla 5. Alternativas de tuberías.....	31
Tabla 6. Escala de calificación de menor a mayor.....	32
Tabla 7. Matriz de decisión del módulo 1.....	32
Tabla 8. Matriz de decisión del módulo 2.....	33
Tabla 9. Matriz de decisión del módulo 3.....	33
Tabla 10. Matriz de decisión del módulo 4.....	34
Tabla 11. Densidad del aire a 18 °C.....	34
Tabla 12. Viscosidad dinámica del aire a 18 °C.....	34
Tabla 13. Dimensiones del separador ciclónico.....	35
Tabla 14. Área de las secciones del separador ciclónico.....	36
Tabla 15. Parámetros para el setup de la simulación.....	45
Tabla 16. Comparación de resultados.....	54
Tabla 17. Costos de la materia prima.....	54
Tabla 18. Costos indirectos de fabricación.....	55
Tabla 19. Costos por mano de obra.....	55
Tabla 20. Costos de los servicios básicos.....	56
Tabla 21. Costos totales.....	56
Tabla 22. VAN del proyecto.....	57
Tabla 23. TIR del proyecto.....	57
Tabla 24. B/C del proyecto.....	58
Tabla 25. PRI del proyecto.....	58

RESUMEN

La finalidad del presente trabajo fue diseñar y simular un separador ciclónico con una capacidad de hasta $0.5 \text{ m}^3/\text{s}$ para reducir los tiempos muertos y tener un control en el proceso de remoción de residuos de las pepas de cacao. Para ello el diseño partió de los siguientes parámetros: el caudal mencionado previamente, velocidad en la entrada de 15 m/s , tamaño promedio de los residuos de 0.03 m y la temperatura ambiente de $18 \text{ }^\circ\text{C}$ que fue obtenida de la parroquia Salinas ubicada en la ciudad de Guaranda.

A su vez, se estableció una selección de alternativas en cuanto al material, equipo que actúe como bomba de vacío, tipo de separador ciclónico y la geometría de la tubería para así proceder con los cálculos de pérdidas de carga, dimensiones del equipo, selección del ventilador, entre otros. Se destaca que se escogió un ciclón del tipo Zenz por tener la geometría más adecuada para la capacidad de diseño propuesta.

Como último punto se presenta una simulación numérica en el módulo Fluent de ANSYS, obteniendo en los contornos de velocidad y presión valores que se encuentran dentro del margen de error menor al 10% demostrando la validez de los datos calculados de forma analítica.

Palabras claves: separador ciclónico, caudal, ventilador, potencia, DPM

ABSTRACT

This work aimed to design and simulate a cyclone separator with a capacity of up to 0.5 m³/s to reduce downtime and control the process of removing residues from cocoa nibs. The design was based on the following parameters: the previously mentioned flow rate, an inlet velocity of 15 m/s, an average residue size of 0.03 m, and an ambient temperature of 18 °C, which was obtained from the "El Salinerito" area.

Likewise, a selection of alternatives was established with respect to the material, equipment that acts as a vacuum pump, type of cyclone separator, and geometry of the pipe to proceed with the calculations of load losses, equipment dimensions, and selection of the fan, among others. It is highlighted that a Zenz cyclone was selected as it has the most adequate geometry for the proposed design capacity.

Lastly, the Fluent module of ANSYS is used to conduct a numerical simulation, yielding velocity and pressure values on the contours that fall within a margin of error below 10 %. This serves as evidence to validate the analytically calculated data.

Keywords: cyclone separator, volume flow rate, fan, power, DPM

INTRODUCCIÓN

Antecedentes

Entre los productos exportados tradicionalmente en Ecuador destacan: el camarón, banano, pescado y café en grano, siendo este último el más apreciado mundialmente por sus grandes características organolépticas [1].

Para el procesamiento del cacao se realizan operaciones de limpieza, pilado, tostado y molturación [2]; obteniendo una especie de pasta de cacao que es vital para la elaboración del chocolate. No obstante, al ser un producto con el cual se trabaja desde hace un tiempo atrás implica que se lo haya hecho artesanalmente, y al día de hoy algunas empresas sigan usando equipos obsoletos e ineficientes.

Planteamiento del problema

El problema de estudio se presenta debido a que la mayoría de las empresas chocolateras que empezaron desde un nivel artesanal, a pesar de que, algunas han crecido e incrementado su nivel de producción por la demanda, siguen utilizando maquinaria antigua y deficiente que dan como resultado la liberación de material particulado y pérdidas de materia prima en el entorno que por consiguiente genera una subida en los costos de fabricación.

Justificación

El estudio está enfocado en la eliminación de impurezas en el cacao, mediante el diseño y simulación de un separador ciclónico de hasta una capacidad de $0.5 \text{ m}^3/\text{s}$, para la Fundación Familia Salesiana Salinas "El Salinerito" de Guaranda, equipo adecuado para solucionar la problemática, puesto que, se encargará de separar las partículas sólidas o restos que las zarandas o cribas presentes en el procesamiento del cacao no pueden separar de forma correcta de las pepas de cacao, lo que conlleva al personal a recurrir a la separación de los restos de forma manual e infructuosa para la obtención del producto final que es el cacao procesado, la implementación de un ciclón resultaría bastante conveniente, puesto que, a lo largo de los años ha demostrado ser un equipo con alto rendimiento, fácil construcción y se lo puede colocar en cualquier sitio.

Objetivos

Objetivo general

Diseño y simulación de un separador ciclónico con capacidad de hasta 0.5 m³/s de aire para la eliminación de impurezas en el cacao en la Fundación Familia Salesiana Salinas "El Salinerito" de Guaranda

Objetivos específicos

- Identificar el estado actual en la Fundación Familia Salesiana Salinas "El Salinerito" de Guaranda y el proceso de separación en el grano de cacao.
- Determinar los parámetros de diseño de un separador ciclónico que cumpla las condiciones productivas de la empresa.
- Validar mediante simulación con software especializado el proceso de separación ciclónico.
- Evaluar la factibilidad económica del proyecto mediante el análisis de indicadores financieros.

Metodología

Se evaluará el estado de la empresa para comprender el procesamiento del cacao y se pueda adecuar el diseño del ciclón con base en los requerimientos. Además, que con la recolección de datos como la temperatura, presión y velocidad se podrá realizar un dimensionamiento del ciclón de acuerdo con las condiciones operativas del lugar.

Mientras que para comprobar el diseño del mismo se hará uso de un software especializado para visualizar la separación de partículas sólidas no deseadas (cáscaras, polvo y otros elementos) de las pepas de cacao. Por último, se analizará la rentabilidad del equipo tomando en cuenta factores como los costos de construcción del ciclón, que permitirán determinar el VAR, TIR y PRI de la propuesta tecnológica.

Descripción breve de cada capítulo

Iniciando con el capítulo 1, se menciona el estado del arte y todo lo relacionado con el aspecto teórico sobre el cacao, tipos de separadores ciclónicos y el principio de funcionamiento del

separador ciclónico, además se describe la situación actual de "El Salinerito" y para acabar con el capítulo se menciona las aplicaciones e investigaciones con ciclones.

Así en el capítulo 2, se presentan tanto las variables como las ecuaciones necesarias para el análisis y dimensionamiento del ciclón tomando en cuenta variables y datos como la temperatura, la humedad, y área donde se colocará el mismo. Con lo que en la parte final del capítulo se plantea las opciones de diseño de acuerdo con los requerimientos de la empresa y materiales existentes en el mercado.

Continuando con el capítulo 3, se presenta un análisis térmico de la separación del material particulado de los granos de cacao mediante una simulación del diseño final escogido en el capítulo anterior.

Para finalizar, en el capítulo 4 se determina la viabilidad del equipo para la empresa y como esta sería una inversión necesaria para tener una mejora significativa en el procesamiento del cacao.

CAPÍTULO I

ESTADO DEL ARTE Y ASPECTOS TEÓRICOS DE UN SEPARADOR CICLÓNICO

En esta sección se expone los conceptos alrededor del separador ciclónico, de manera que, se comprenda su principio de funcionamiento, tipos, ventajas y desventajas. Por otra parte, se mencionan datos sobre el cacao, para así relacionar el producto con los beneficios de incluir el equipo en el procesamiento del cacao para la obtención del chocolate y otros derivados; se adicionarán antecedentes históricos que ayuden a abordar el tema en su totalidad.

1.1 Estado del arte del separador ciclónico

Los separadores ciclónicos o centrífugos han tenido una gran aplicación en áreas del campo industrial como generadores de energía, turbinas de vapor y en procesos químicos [3]. McCarthy [4] manifiesta que, se pueden separar hasta 5 tipos de mezclas que incluyen separación de fluidos y sólidos:

- Líquido-líquido (separación de la leche entera)
- Líquido-sólido (queso de suero)
- Gas-líquido (grasa láctea anhidra)
- Gas-sólido (aire proveniente de un secador y leche en polvo)
- Líquido-líquido-sólido (nata, leche descremada y restos de materia insoluble)

De acuerdo con Zhou y Soo [5] han pasado más de cien años desde que se ha usado el principio de un ciclón para la construcción del primer separador ciclónico, su extenso uso y ventajas ha permitido que se siga investigando a detalle los fenómenos que tienen lugar durante el proceso de separación de partículas. En los últimos años se han realizado investigaciones para mejorar el diseño de los ciclones y optimizar su rendimiento en el proceso de separación, centrandose en analizar cómo las dimensiones de los diferentes componentes del ciclón afectan a ella [6].

En 2000, Yoshida et al. [7] analizaron el efecto de la forma de la entrada del separador ciclónico. Los autores realizaron tres simulaciones a diferentes diámetros de partículas y con dos tipos de entradas, donde se concluyó que la eficiencia de recolección el tubo curvado es del 80 %, lo cual supera la eficiencia del recto, esta mejora se atribuye al efecto de la fuerza centrífuga. También se observó que esta eficiencia aumenta en los dos perfiles proporcionalmente al incrementar la velocidad de entrada.

En 2011, un análisis sobre la mejora de la eficiencia a bajas velocidades en un separador ciclónico fue realizado por Itoh et al. [8], por medio de la variación del diámetro base y la forma del rompedor de vórtice. Se encontró que para el rompedor de 120 mm la eficiencia mejora en un 25 % mientras que para los rompedores de 80 y 40 mm aumentan al 95 % con velocidades de la tobera de agua de 0.7 m/s o superiores.

Un estudio sobre los efectos en el diámetro del buscador de vórtice y la longitud del limitador de vórtices fue presentado por Yohana et al. [9], realizaron tres simulaciones usando tanto los modelos de esfuerzo de Reynolds (RSM) y de partícula discreta (DPM). Los resultados encontrados indican que al disminuir dicha dimensión se genera un aumento de la velocidad tangencial, en contraste, al aumentar la longitud del limitador de vórtices esta disminuye.

Li et al. [10] realizaron un modelo de caída de presión del ciclón. Los autores diseñaron un modelo experimental con el cual pueda variar las concentraciones de sólidos en la entrada y compararlos con datos de experimentos antiguos. Los resultados muestran una mejora, ya que, la pérdida de carga en el sistema hace que exista una presión de 1200 Pa con respecto a antiguos modelos que entregan un valor de 2220 Pa.

En 2018, Noh et al. [11] evaluaron la mejora del rendimiento de un separador ciclónico al usar múltiples ciclones auxiliares. Los autores realizaron tanto un análisis experimental como numérico siendo este último basado en un modelo de esfuerzo de Reynolds (RMS) dado que se analizaría un flujo turbulento e incomprensible. Tanto los resultados de la simulación como teóricos señalan que los ciclones auxiliares permiten incrementar la eficiencia de recolección a cambio de trabajar con tamaños de partículas mayores a 1 μm .

En 2021, Liang et al. [12] llevaron a cabo una investigación para desarrollar un nuevo tipo de separador ciclónico, el cual tiene un objeto cónico en el interior del separador convencional con el propósito de reducir la pérdida de carga e incrementar la eficiencia de separación. Para ello se simuló tanto el modelo tradicional de ciclón como el nuevo para comparar los índices de rendimiento a parámetros específicos. Los resultados señalan que el nuevo ciclón puede trabajar con partículas de 1 a 3 μm , así como, reduce las pérdidas de energía en un 11.42 %.

Por otro lado, una investigación sobre la variación de parámetros como el flujo volumétrico y velocidad en la entrada en el ciclón fue realizada por Dong et al. [13] basada en un método CFD-DEM señala que las pérdidas de energía mecánica se incrementan proporcionalmente con

la velocidad en la entrada, puesto que esta incrementa la turbulencia en el equipo. Con lo que, para reducir de manera significativa estas pérdidas, es conveniente aumentar la rugosidad de la pared en el ciclón.

En 2023, Li et al. [14] optaron por cambiar las dimensiones del techo en forma de cuña del ciclón donde se concluyó que al variar el diámetro superior y la altura del techo se logra optimizar la separación en contraste con el diámetro inferior del techo se reduce el rendimiento de separación del ciclón, además, se notó que la variación de estas dimensiones afecta significativamente a la eficiencia de colección.

1.2 Aspectos teóricos de la investigación

La sección actual se dedicará a una investigación teórica exhaustiva de los conceptos y conocimientos más importantes sobre el tema en cuestión. La elaboración de este equipo se basa en la necesidad de una mayor eficiencia en la producción de cacao, y en la importancia de un proceso de separación eficiente para lograr una calidad óptima del producto final.

1.2.1 El cacao

El fruto del cacao tiene una forma esférica fusiforme que recubre los granos o semillas en su interior. Dependiendo del área de cultivo, su tiempo de maduración puede variar entre 150 y 180 días después de la polinización. En la Figura 1 se aprecian las tonalidades del cacao que van desde el verde hasta el anaranjado, y en ocasiones tonos rojizos con amarillo, puesto que, varía a medida que madura.



Figura 1. Cacao ecuatoriano [15].

1.2.2 Orígenes del cacao

En el pasado, se reconocía a México y Centroamérica como zonas de cultivo, así como de consumo del cacao, por el hecho de haberse encontrado evidencia de su uso a partir de los 4000 A.C. [16]. Sin embargo, investigaciones recientes señalan que parte del cacao de fino aroma proviene de la región Amazónica de Ecuador, puesto que se confirmó que los primeros humanos en utilizar el cacao como parte de sus alimentos rutinarios fueron los nativos de la cultura Mayo – Chinchipe, hace unos 5300 años [17], [18].

Cuando los conquistadores españoles llegaron a América notaron que los pueblos originarios utilizaban los granos de cacao como medio de intercambio y para preparar una bebida deliciosa; con lo que decidieron llevar los granos a Europa donde luego de un siglo, gracias a los suizos se podría degustar de un chocolate con leche por primera vez.

1.2.3 Tipos de cacao

Por lo general, la clasificación solo toma en cuenta tres tipos de cacao, a pesar de que, se han logrado identificar cerca de 10 grupos [19], [20]:

- *Criollo*: este cultivo destacó en el mercado del siglo XVIII por su calidad y aroma característico, así como, por su lento crecimiento.
- *Forastero*: también conocido como cacao amazónico por encontrarse en la Amazonia ecuatoriana, es reconocido por su resistencia a las plagas y cambios climáticos.
- *Trinitario*: resulta de una mezcla de los dos tipos de cacao que adquiere las características de los anteriores tanto la resistencia como su aroma.
- *Cacao nacional*: también conocido como de fino aroma, se caracteriza por su equilibrada combinación de sabores ácidos y dulces, así como por su suave tostado [21].

1.2.4 El cacao en Ecuador

Es una fruta perteneciente a los climas húmedos y cálidos, su árbol cacaotero tiene el nombre científico de "Theobroma cacao" que tiene su origen griego y se traduce como "alimento de los dioses" [22]. En Ecuador, la comercialización del cacao de forma internacional se dio antes del boom petrolero y tuvo un gran impacto positivo en la economía del país, sin embargo, tuvo un declive a finales del siglo XIV a causa de otros países productores [17].

La situación cambiaría en la década de 1920 gracias a las nuevas variedades y técnicas de cultivo en el cacao. Según datos del año 2020 del Instituto Nacional de Estadísticas y Censos (INEC), la región Litoral y Amazónica ocupan el 77 y 10 % del total, respectivamente, de la superficie plantada de cacao a nivel nacional, porque el clima favorece el crecimiento del fruto [19].

1.2.5 Separador ciclónico

También denominados como ciclones se utilizan ampliamente en la regulación de la contaminación del aire, así como, la remoción de residuos en mezclas sólido-gas, como se ve en la Figura 2. Al tener ventajas como la relativa simplicidad de fabricación, bajo costo de operación y buena adaptabilidad a condiciones extremadamente duras, los separadores ciclónicos se han convertido en uno de los dispositivos de eliminación de partículas más importantes que se ocupan en varias áreas de la industria.

Además, se caracterizan por manejar una amplia variedad de combinaciones de presión de gas, temperatura y carga de sólidos muy alta, su rendimiento es tolerable en comparación con equipos de separación más eficientes (filtros cerámicos), siendo a la vez mucho más simples, robustos y confiables [23].

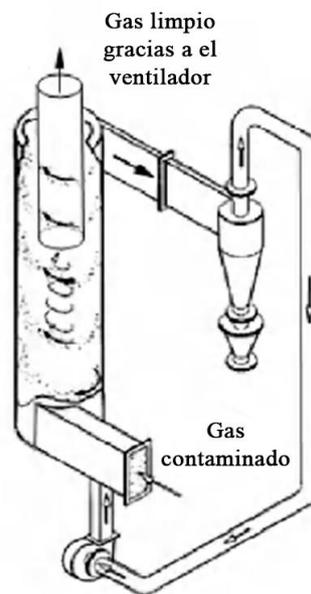


Figura 2. Esquema de un separador ciclónico [24].

1.2.6 Principio de funcionamiento de un separador ciclónico

Como tal el ciclón inicia su proceso desde la aspiración del aire contaminado [25] y al ingresar la fuerza centrífuga actúa sobre las partículas contaminantes suspendidas que tienden a precipitarse al fondo del mismo o hacia las paredes por ser más densas que el aire. El gas sin residuos se libera por lo general por el techo en los diseños tradicionales, como se muestra en la Figura 3, también existen diseños que hacen que la salida del gas ocurra en la sección inferior.



Figura 3. Esquema del funcionamiento de un separador ciclónico [26].

Dado que los ciclones se han utilizado ampliamente en diversas industrias, hasta el presente se ha realizado un número considerable de investigaciones experimentales, numéricas y teóricas sobre ellos. Entre ellos, el modelo Stairmand presentó una de las pautas de diseño más populares que sugería que la altura del cilindro y el largo del tubo de salida deberían ser, respectivamente, 1.5 y 0.5 veces el diámetro del cuerpo para tener un ciclón de alta eficiencia.

1.2.7 Partes de un separador ciclónico

El separador ciclónico tiene una entrada en donde ingresa el aire contaminado por un conducto con una velocidad ya definida, luego ingresa a la sección cónica o barril del equipo donde empieza un movimiento en espiral descendente, generando un campo centrífugo a las paredes haciendo que la suciedad caiga al final del cono por inercia.

En la Figura 4 se logra observar que la fuerza centrífuga hace que el aire ya limpio ascienda por el interior del cono del equipo hasta la salida.

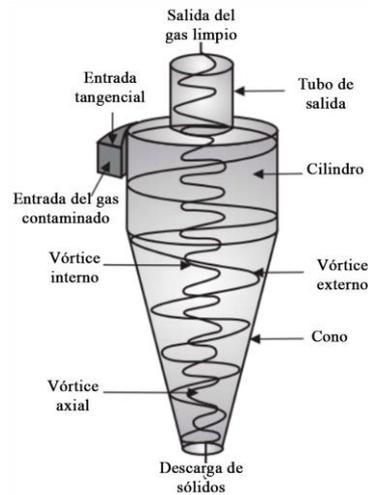


Figura 4. Secciones importantes del separador ciclónico [27].

Aparte de estar conformado por esas secciones, un ciclón puede tener otros elementos o accesorios adicionales como: ventiladores, colectores, filtros y entradas cónicas. Puesto que, la mayoría de las veces el aire a tratar presenta una alta concentración de partículas que impide el uso de este aire, ayudando así a su depuración. Como se ve en la Figura 5, la mayor parte de las empresas usan los ciclones en los procesos que tienen una alta concentración de impurezas como cuando se trabaja con madera, metales, químicos y otros materiales de la industria.

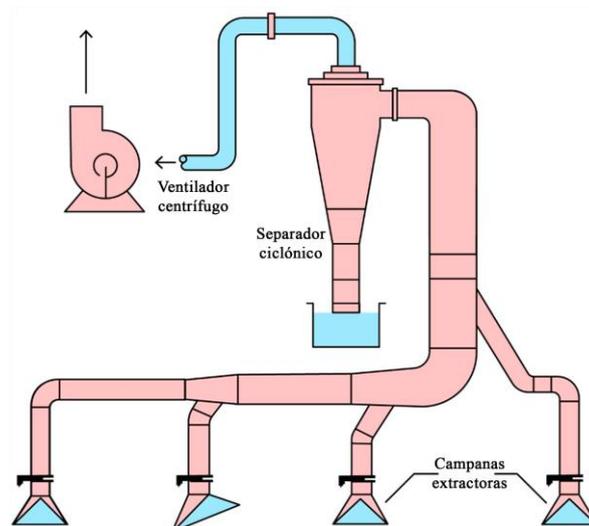


Figura 5. Esquema de uso de un separador ciclónico en el proceso de cortado de madera [28].

1.2.8 Tipos de separadores ciclónicos

Existen diversas formas para clasificar a los ciclones teniendo los siguientes criterios:

- Por su construcción
- Por su disposición en la entrada
- Por la forma de la base
- La dirección del flujo que entra y sale de ellos
- Por su eficiencia

En la Figura 6 se visualizan los diferentes tipos de separadores ciclónicos existentes según la forma en que el fluido entra al ciclón [29], [30]:

- De diámetro grande con entrada tangencial y descarga axial:* suele tener un diámetro entre los 600 y 915 mm, además de ser el ciclón más convencional en la Industria.
- De tubo pequeño con entrada tangencial y descarga periférica:* se caracteriza por no remover por completo el polvo o material particulado, en su lugar concentra cerca del 10 %.
- De tubo pequeño con entrada y descarga axial:* tiene una gran eficiencia de recolección gracias a que su diámetro esta entre los 25 y 305 mm, sin embargo, al tener un diámetro menor su capacidad se reduce.
- De tubo pequeño con entrada axial y descarga periférica:* al mantener el flujo continuo se puede encargar de grandes volúmenes de gas sin presentar cambios en el mismo.

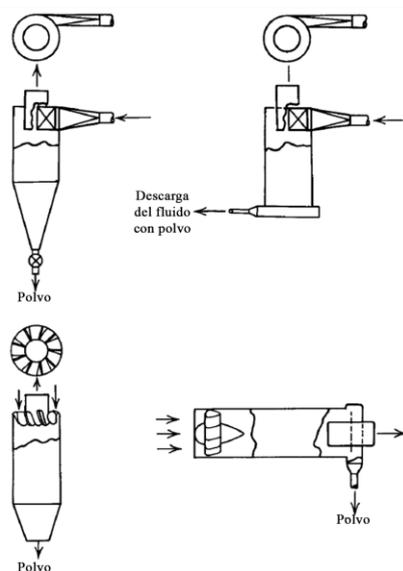


Figura 6. Tipos de ciclones según su forma [29].

Otro criterio es la configuración de la entrada teniendo los siguientes tipos [31]:

- *Entrada circular o de tubo:* ocupado en ciclones baratos construidos con chapa metálica donde no importa que el rendimiento se vea reducido, su entrada evita el construir una sección que pase de redonda a rectangular. Se suele ocupar este tipo de entrada en el procesamiento de granos y la madera.
- *Entrada de ranura o tangencial:* usualmente ocupada en las industrias que trabajan con químicos, minerales y de transformación del crudo. Debido a que la alimentación de los ciclones se la hace con tubos circulares es necesario construir una sección que conecte la entrada rectangular con la circular.
- *Entrada de voluta:* también denominada como entrada envolvente, puesto que a medida que el flujo del gas se contrae, a la par se reduce el área disponible, como se aprecia en la Figura 7. Esta configuración geométrica da como resultado una mayor velocidad de giro dentro del núcleo interno del vórtice, lo que permite trabajar mejor con mezclas de gas y sólidos.
- *Entrada axial con paletas de remolino:* con esta entrada se permite al gas entrar paralelamente al eje del ciclón, es decir, solo se puede ocupar en ciclones de geometría cilíndrica y no cónica.

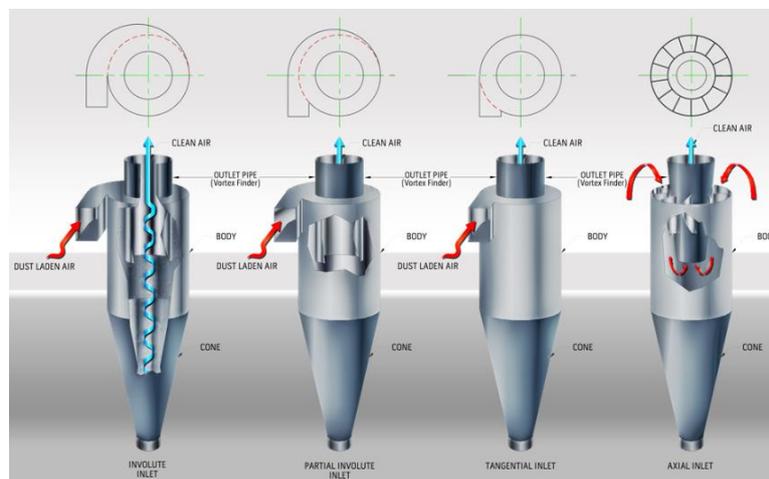


Figura 7. Esquema de la vista superior y frontal de las cuatro configuraciones de un ciclón [31].

Para el criterio de la forma del cuerpo existen dos tipos, como se ve en la Figura 8:

- Cilindro con cono o cónica
- Cilíndrica

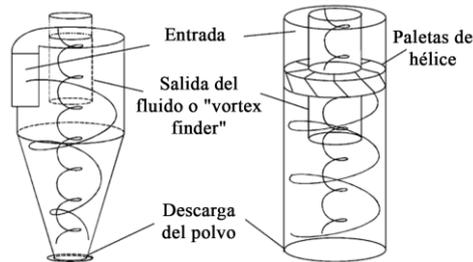


Figura 8. Esquema de la base cónica y una cilíndrica de un separador ciclónico [32].

De igual manera, en la parte interna del ciclón el tubo conectado con la entrada puede tener una descarga con tubo cónico o cilíndrico, como se presenta en la Figura 9:



Figura 9. Esquemas del tubo interno de descarga cónico y cilíndrico de un ciclón [31].

Según la dirección del flujo que puede tener existen, como se ilustra en la Figura 10:

- *Flujo inverso*: se da cuando el gas sale por el techo del ciclón
- *Flujo directo*: también denominado como continuo, ya que, el gas va en la misma dirección del material particulado.

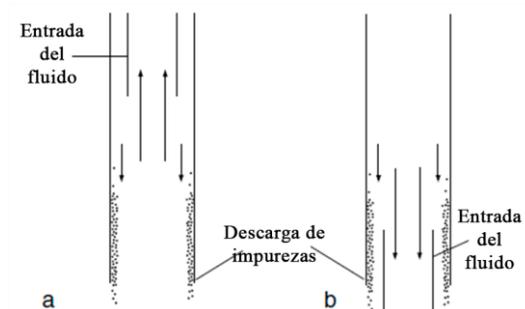


Figura 10. Esquema de un a) flujo inverso y un b) flujo directo [24].

Finalmente, para el criterio de la eficiencia, el cual se determina con base al tamaño de partículas que pueden separar [30], se tienen los siguientes:

- Muy eficientes (0.98 – 0.995)
- Moderadamente eficientes (0.7 – 0.8)
- De baja eficiencia (0.5)

Como se ve en la Figura 11, la configuración geométrica, patrón de flujo, y velocidad afectan totalmente a la eficiencia y rendimiento del ciclón, al momento de separar cualquier mezcla de fluidos.

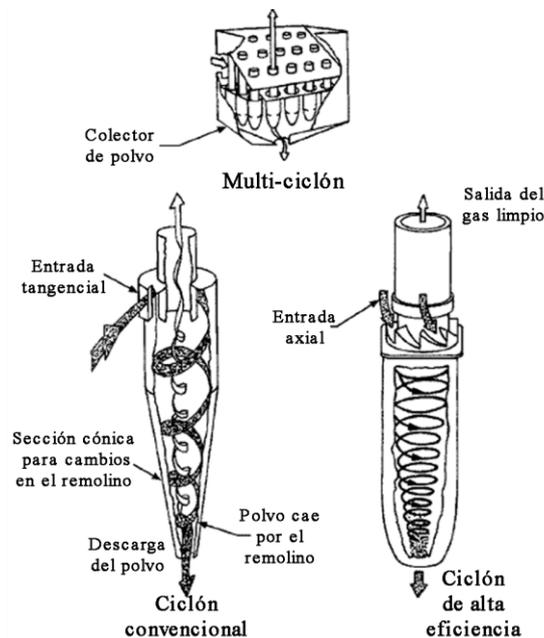


Figura 11. Colectores ciclónicos típicos [33].

1.2.9 Características del flujo

Los separadores ciclónicos, hidrociclones, separadores por pulverización y quemadores vortex se caracterizan por tener un flujo de torbellino o de vórtice. De manera que dicho flujo puede ser subdividido en los siguientes [24]:

- *Flujo de torbellino forzado:* donde el flujo tiene la misma velocidad tangencial que un sólido en rotación.
- *Flujo de torbellino libre:* es la forma ideal en la que un fluido giraría sin fricción. Al punto de que el momento de inercia de los elementos del fluido es igual en todos los radios.

1.2.10 Caída de presión

Engloba las presiones estática y dinámica. Para un ciclón se divide normalmente en tres secciones:

- 1) *Pérdidas en la entrada:* suelen ser despreciables en los separadores ciclónicos de entrada tangencial.
- 2) *Pérdidas en el espacio de separación:* son mayores, su importancia radica en limitar la intensidad del torbellino en el espacio de separación. Por lo que no dominan la caída de presión global.
- 3) *Pérdidas en la parte superior:* son considerablemente mayores con respecto a las dos anteriores, puesto que afecta tanto a los ciclones de flujo directo como los de flujo inverso. Se exceptúan los ciclones bastante cargados de sólidos o de corte rugoso donde las pérdidas son mayores a causa de la fricción en las paredes.

Dicho parámetro tiene una relación directamente proporcional al cuadrado del caudal. Por lo general, para medir las características de un determinado ciclón se suele expresar a la caída presión en una forma adimensional denominada 'número de Euler' [24].

1.2.11 Rendimiento de los separadores ciclónicos

Los separadores ciclónicos más utilizados son [34]:

- De alta eficiencia
- Convencionales
- De alta capacidad

Como se observa en el Anexo 4, los de alta eficiencia logran separar residuos de hasta 5 μm y llegar a una eficiencia del 90 % que puede aumentar si el tamaño de los residuos es mayor, por otra parte, esto hace que la caída de presión se eleve al mismo tiempo. Mientras que, para partículas superiores a 20 μm puede eliminarse con uno de alta capacidad.

1.2.12 Ventajas y desventajas del separador ciclónico

Un ciclón ubicado en un lugar estratégico puede presentar una alta eficiencia ante diversos agentes de material particulado según lo requerido, es así que presenta ciertas ventajas y desventajas.

El ciclón ofrece las siguientes ventajas [35]:

- Bajo costo de inversión.
- Capacidad de operar bajo altas temperaturas.
- Adecuado para sustancias neblinosas.
- Mantenimiento mínimo, puesto que, no tiene partes móviles.
- Ocupa un espacio reducido.

Mientras que las desventajas que presenta dicho equipo son:

- Mayores costos operativos debido a las pérdidas de carga (asumiendo que existe una gran caída de presión).
- Baja eficiencia ante material particulado menor a 10 μm .
- No apto para sustancias pegajosas o que se aglomeren.

1.2.13 Sistemas de transporte por presión de vacío

También conocidos como sistemas de transporte por presión negativa son utilizados habitualmente para extraer materiales de múltiples fuentes hacia un único punto [36]. En la Figura 12 se aprecia un sistema de transporte por presión común donde el diferencial de presión del dispositivo de alimentación es escaso o nulo, con lo que, el dispositivo puede ser un elemento mucho más barato y sencillo en un sistema de presión negativa que en un sistema de presión positiva.

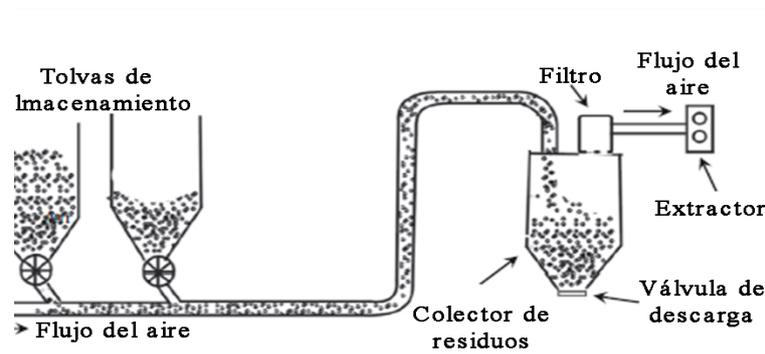


Figura 12. Transporte mediante presión de vacío típico [36].

Además del diseño mostrado anteriormente, suele utilizarse una alternativa en la que se sustituye la tubería fija por una manguera para absorber el material de determinada área, tal como se ilustra en la Figura 13.

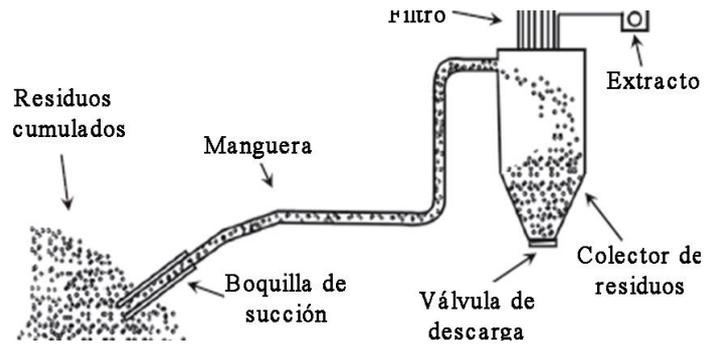


Figura 13. Transporte mediante presión de vacío con manguera [36].

1.2.14 Elementos impulsores de aire

Los sistemas de transporte neumático son bastante sencillos y resultan adecuados para el transporte de materiales particulados y granulados de fábricas, obras e instalaciones. Es vital que el sistema conste de una fuente de aire comprimido, una cámara de alimentación, una línea de transporte y filtros para separar los residuos de la materia prima [36].

- *Compresores:* son turbomáquinas térmicas análogas a los ventiladores, puesto que se encargan de aumentar la presión de un gas compresible. Su funcionamiento consiste en que el fluido a baja presión entra en los álabes y sale a una gran velocidad, que con ayuda del difusor esta velocidad se reduce y la presión se eleva [37]. Son adecuados para trabajos pesados.
- *Sopladores:* son bastante usados para el transporte de material en fase diluida puesto que ofrecen una buena relación entre la caída de presión y su capacidad. Su configuración geométrica le permite actuar tanto como bomba de vacío o extractor según sea el caso. Dado que el caudal no es dependiente de la presión entregada es poco probable que el material se deposite en las tuberías [38].
- *Ventiladores:* son turbomáquinas hidráulicas generadoras para gases, es decir, funcionan como bombas de gas. Este equipo tiene como función el absorber la energía mecánica y restituir esa energía al gas para así elevar su presión [39]. Para trabajos de remoción de residuos fibrosos, como paja, papel, plástico, película y recortes textiles, es posible incluso afilar las aspas del ventilador para que corten o trocean el material a su paso por el ventilador. Son adecuados para trabajar con presiones bajas y trabajos moderados.

1.3 Descripción de la situación actual

En la empresa "El Salinerito", se produce una variedad de artículos como: lácteos, confites, embutidos, deshidratados, textiles, entre otros, siendo el producto estrella o de mayor demanda el chocolate.

Para el procesamiento del cacao se inicia con el acopio del cacao con polvo y cáscaras, donde colocan alrededor de 30 kg cada 10 min en una tolva donde caen las pepas de cacao con residuos de polvo y cáscaras que deben ser separados de las pepas mediante una zaranda vibratoria compuesta por dos mallas: una gruesa y una fina, en el cual luego de ser separadas pasan por otros procesos que son presentados en la Figura 14.

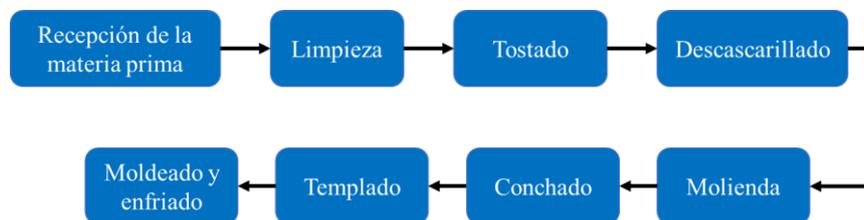


Figura 14. Diagrama del flujo de proceso para la pasta de cacao.

Sin embargo, la máquina encargada de realizar la limpieza de las pepas de cacao actualmente no se encuentra operando dado que no cumple al 100 % su propósito de remover los residuos, con lo que para evitar el traspaso de los residuos en el proceso de tostado se está haciendo la limpieza de forma manual como se visualiza en la Figura 15.

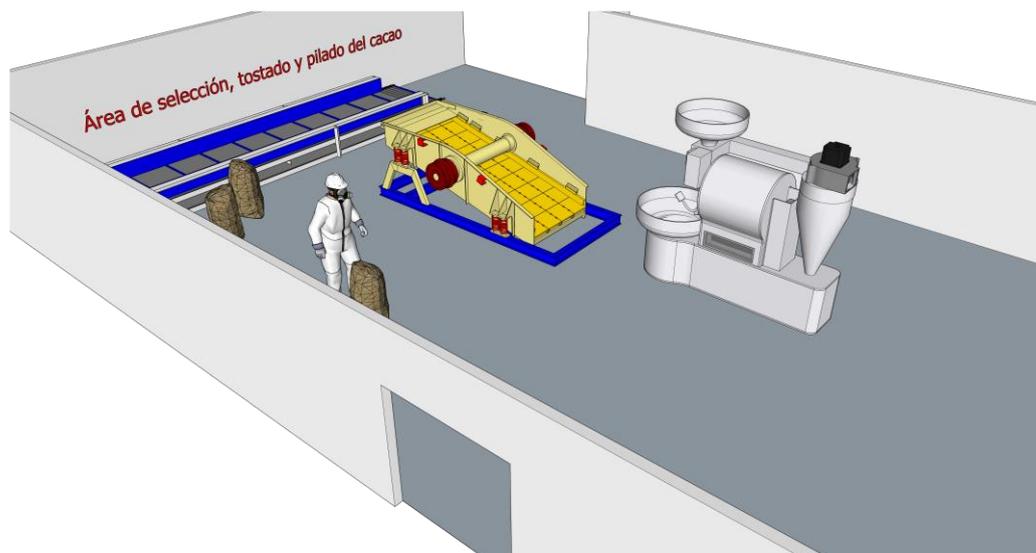


Figura 15. Esquema del estado actual en la empresa "El Salinerito".

Al momento de implementar el separador ciclónico dentro del proceso de limpieza se podría remover los residuos de las pepas de cacao, a la vez que, esto permitiría volver a poner en funcionamiento la zaranda vibratoria que ahora tendría unas mallas finas. En la Figura 16 se ilustra como el equipo intervendría dentro del área de selección, tostado, y pilado del cacao optimizando el proceso productivo.



Figura 16. Esquema de la implementación del separador ciclónico.

1.4 Conclusiones del capítulo

Se llevó a cabo una investigación detallada sobre el cacao y los aspectos clave del separador ciclónico para que el lector pueda familiarizarse con la temática central del proyecto. Se concluyó que el uso de los separadores ciclónicos es esencial en la remoción eficiente de impurezas en mezclas de fluidos gracias a las pruebas e investigaciones realizadas para mejorar su configuración geométrica.

No obstante, es importante destacar que no solo se requiere de un diseño adecuado, sino también de la correcta selección y ajuste de los parámetros de caudal, velocidad en la entrada y temperatura para garantizar el óptimo desempeño del separador ciclónico.

CAPÍTULO II

DISEÑO DEL SEPARADOR CICLÓNICO

En el capítulo 1 se detallaron los conceptos de un separador ciclónico, las partes, el funcionamiento, así como, las ventajas y desventajas del uso de este equipo. De modo que, en el capítulo 2 se analizará la información previamente investigada, con el objetivo de detallar las ecuaciones y relaciones para lograr un diseño eficiente.

2.1 Ubicación geográfica

En la parroquia de Salinas se encuentra la empresa "El Salinerito", como se muestra en la Figura 17 el lugar del proyecto a realizar con sus respectivas coordenadas de latitud y longitud de la zona. Cabe señalar que al ser una zona de gran altitud la temperatura suele variar entre rangos de 18 y 25 °C.

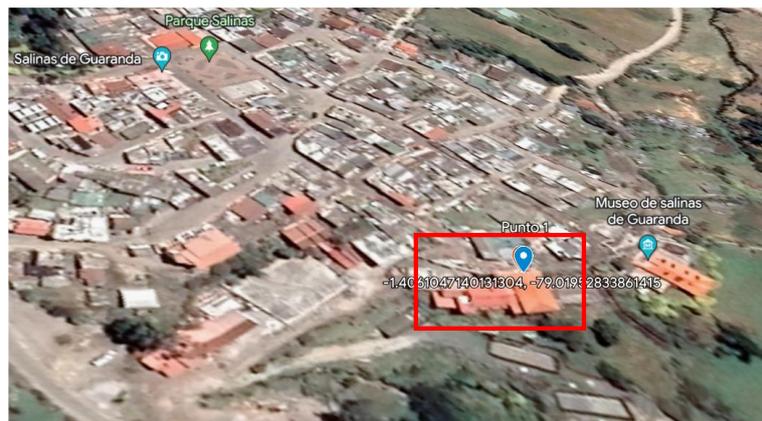


Figura 17. Ubicación del proyecto.

2.2 Parámetros para dimensionar un separador ciclónico

Es importante analizar las ecuaciones que se aplican a la configuración geométrica del separador ciclónico antes de proceder a su dimensionamiento con los parámetros recopilados de la empresa. La Figura 18 ilustra un diseño con las dimensiones de un separador ciclónico, las cuales van en función del diámetro.

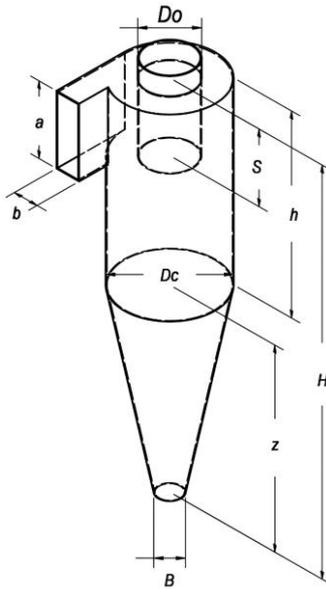


Figura 18. Medidas principales de un separador ciclónico en metros.

2.2.1 Diámetro del separador ciclónico

Se puede construir de diferentes materiales, dependiendo el lugar en donde se lo ubicaría y la función a la cual va a estar destinado el equipo, además, se debe considerar varios parámetros, donde la velocidad en la entrada resulta importante especificarla para el diseño. Para un correcto dimensionamiento del ciclón Torres [40] menciona que se debe tomar un rango de 15.2 a 27.4 m/s.

Por otro lado, Alcoser [41] señala que la velocidad debe estar entre los 12 y 15 m/s. Una vez establecido el caudal del fluido, se puede utilizar la ecuación (1) para calcular el área en la entrada del mismo:

$$Q_a = A_i \cdot V_i \quad (1)$$

Donde:

Q_a : Caudal del fluido, [m³/s]

A_i : Área en la entrada, [m²]

V_i : Velocidad de la entrada, [m/s]

Finalmente se relaciona el área de la entrada con los factores del ancho y altura del modelo que se haya escogido para el diseño del separador ciclónico como se ve muestra en la ecuación (2):

$$A_i = (f_a \cdot D_c)(f_b \cdot D_c) \quad (2)$$

Donde:

D_c : Diámetro del separador ciclónico, [m]

f_a : Factor para la altura de la entrada

f_b : Factor para el ancho de la entrada

2.2.2 Dimensiones del separador ciclónico

Se debe tomar en cuenta que existen 3 clasificaciones con base a su eficiencia, los cuales presentan determinados factores que toman al diámetro del ciclón como parámetro que rige todas las dimensiones. A continuación, se muestran los modelos de cada clasificación:

- *Separadores ciclónicos convencionales*: se caracterizan por no presentar una caída de presión alta en el sistema, así como, ofrecer una eficiencia de recolección de un 90 % en partículas mayores a los 10 μm .
- *Separadores ciclónicos de alta eficiencia*: su eficiencia es de alrededor del 99 %, debido a su diseño, estos equipos generan un elevado gasto energético.
- *Separadores ciclónicos de alta capacidad*: al trabajar con partículas mayores a los 20 μm pueden entregar una eficiencia del 95 %, aun así, al trabajar con partículas más pequeñas esta se ve reducida drásticamente.

2.2.3 Velocidad de saltación

Paul et al. [42] afirman que la velocidad en la entrada del ciclón influye demasiado en el equipo, con lo que, al usar velocidades altas, es muy probable que ocurra una sedimentación de los residuos, en contraste, con bajas velocidades se puede resuspender el material ya separado.

La ecuación (3) muestra que la velocidad equivalente está determinada por las propiedades intensivas tanto del fluido como del material particulado:

$$V_{eq} = \sqrt[3]{\frac{4 \cdot g \cdot \mu \cdot (\rho_m - \rho_a)}{3 \cdot \rho_a^2}} \quad (3)$$

Donde:

V_{eq} : Velocidad equivalente, [m/s]

g : Gravedad, [m/s²]

μ : Viscosidad dinámica del fluido, [Pa·s]

ρ_m : Densidad del material, [kg/m³]

Para explicar la relación entre la baja eficiencia con el aumento de la velocidad en el equipo se usa la correlación denominada como velocidad de saltación que se ve en la ecuación (4):

$$V_{sal} = \frac{4.913 \cdot V_{eq} \cdot K_D^{0.4} \cdot D_c^{0.067} \cdot (V_i^2)^{\frac{1}{3}}}{(1 - K_D)^{\frac{1}{3}}} \quad (4)$$

Donde:

V_{sal} : Velocidad de saltación, [m/s]

K_D : Cociente del ancho de la entrada y el diámetro

D_c : Diámetro del separador ciclónico, [m]

Alcoser [41], señala que, para obtener la máxima eficiencia del ciclón, el factor entre la entrada y el diámetro debe ser menor a 1.35, como se aprecia en la ecuación (5):

$$V_{sal} \cdot 1.35 < V_i \quad (5)$$

2.3 Diseño de la tubería

Para el transporte de los desechos es necesario realizar ciertos cálculos en base a los parámetros iniciales del caudal, densidad y diámetro de la muestra.

2.2.1 Diámetro de la tubería

Se debe conocer el caudal del fluido, con lo que se empleará el mismo valor usado en el diseño del separador ciclónico. Además de ello es necesario calcular la porosidad como se ve en la ecuación (6):

$$\varepsilon_1 = \frac{\rho_m}{\rho_m + \frac{\rho_a}{\rho_m}} \quad (6)$$

Donde:

ε_1 : Porosidad

Para obtener el diámetro de la tubería se utiliza la siguiente expresión:

$$Q_a = A_t \cdot V_i \cdot \varepsilon_1 \quad (7)$$

Donde:

A_t : Área transversal de la tubería, [m²]

2.3 Caída de presión en el sistema

Se debe a las pérdidas de carga en el interior del equipo y la generada por la fricción del fluido con la tubería.

2.3.1 En el interior del separador ciclónico

El ciclón puede tener un elevado consumo energético debido a que la potencia del ventilador, soplador o compresor depende de este parámetro. Asimismo, puede aumentar debido a fluctuaciones en la velocidad en la entrada. Para su cálculo es usual partir el modelo de Shepherd-Lapple [43] por su sencillez y exactitud, pero antes de describir esa ecuación es necesario ver la ecuación (8):

$$H_v = K \cdot \frac{a \cdot b}{D_o^2} \quad (8)$$

Donde:

H_v : Número de cabezas de velocidad

K : Constante de los ciclones

a : Alto de la entrada, [m]

b : Largo de la entrada, [m]

D_o : Diámetro de salida, [m]

El valor que puede tomar K varía entre 12 y 18 pero se recomienda usar el valor de 16, la anterior ecuación puede ser convertida en una de caída de presión estática, como se ve en la ecuación (9):

$$\Delta P_c = \frac{1}{2} \cdot \rho_a \cdot V_i^2 \cdot H_v \quad (9)$$

Donde:

ΔP_c : Caída de presión interna, [Pa]

2.3.2 En la línea de transporte

En la tubería se pueden generar pérdidas de presión a causa de la longitud del tubo, fricción de la mezcla gas-sólido y la pared del tubo, entre otros. En primer lugar, se parte del cálculo del número Reynolds como se ve en la ecuación (10):

$$Re = \frac{\rho_a \cdot V_{in} \cdot D_t}{\mu} \quad (10)$$

Donde:

Re : Número de Reynolds

Con el valor adimensional previamente calculado, se continua con el cálculo del factor de fricción entre el fluido y la línea de transporte mostrado en la ecuación (11):

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -1.8 \cdot \log \left[\frac{6.9}{Re} + \left(\frac{\varepsilon/D_t}{3.7} \right)^{1.11} \right] \quad (11)$$

Donde:

f : Factor de fricción

ε : Rugosidad

Luego se calculan las pérdidas mayores con la ecuación (12):

$$h_{mayores} = f \cdot \frac{V_{in}^2}{2 \cdot g} \cdot \left(\frac{L_h + L_v}{D_t} \right) \quad (12)$$

Dado que también pueden existir accesorios en el sistema como codos, válvulas, tes, expansiones entre otros. Se necesita calcular las pérdidas menores con la ecuación (13):

$$h_{menores} = f_T \cdot \frac{V_{in}^2}{2 \cdot g} \cdot \left(\sum \frac{L_e}{D} \right) \quad (13)$$

Donde:

$h_{menores}$: Pérdidas menores, [m]

L_e/D : Longitud equivalente en diámetros de tubería

Finalmente, la caída de presión dentro de la tubería se expresa en la ecuación (14):

$$\Delta P_{tub} = \rho_a \cdot g \cdot (h_{mayores} + h_{menores}) \quad (14)$$

Donde:

ΔP_{tub} : Caída de presión en la tubería, [Pa]

Por lo tanto, la caída de presión neta se expresa bajo la ecuación (15):

$$\Delta P_{total} = \Delta P_c + \Delta P_{tub} \quad (15)$$

Donde:

ΔP_{total} : Cauda de presión total, [Pa]

2.4 Diseño del ventilador

Es uno de los equipos claves en el diseño del sistema de eliminación de residuos, ya que se encarga de generar la presión negativa o de vacío, lo que consecuentemente entrega la potencia y caudal necesario al sistema.

2.4.1 Caudal de aire requerido

La ecuación (16) muestra que, para obtener el caudal necesario, se requiere conocer datos como la velocidad de diseño en la entrada del equipo y el área transversal de la tubería:

$$Q_v = A_t \cdot V_i \quad (16)$$

Donde:

Q_v : Caudal del ventilador, [m³/s]

2.4.2 Potencia requerida

Se la obtiene multiplicando la caída de presión total con respecto al valor del caudal del ventilador, como se muestra en la ecuación (17):

$$P_v = \Delta P_{total} \cdot Q_v \quad (17)$$

Donde:

P_v : Potencia del ventilador, [W]

2.5 Diseño de la campana

Tiene la función de captar la mezcla aire-residuos de un proceso industrial. Para el diseño de la campana se tomarán en cuenta los siguientes criterios [44]:

- Es recomendable situar la campana lo más cerca posible de la fuente de emisión.
- Los lados de la campana deben tener un ángulo mínimo de 45 grados.

En la Figura 19 se visualiza la geometría de la campana la cual estará conectada con las tuberías en la entrada:

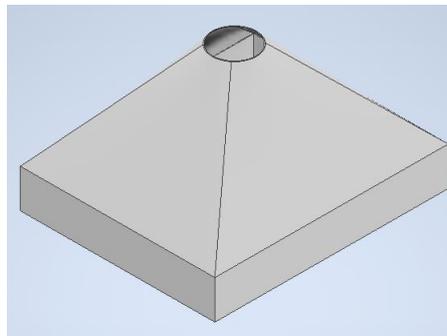


Figura 19. Geometría de la campana.

2.6 Conclusiones del capítulo

El capítulo destaca que los aspectos a considerar en el diseño del separador ciclónico son el diámetro, la pérdida de carga y la velocidad en la entrada. Una vez que estos parámetros se han calculado, es posible elegir los equipos y accesorios adicionales necesarios para que el sistema cumpla con su función. Es importante tener en cuenta que las tuberías que transportan el material a desechar también influyen en la caída de presión, por lo que se requiere un equipo generador de presión de vacío con una alta capacidad.

CAPÍTULO III

ANÁLISIS DEL SEPARADOR CICLÓNICO

En este capítulo se va a determinar cada uno de los parámetros a utilizar para verificar la configuración geométrica y el funcionamiento del separador ciclónico, mediante la utilización de las distintas ecuaciones explicadas en el capítulo 2. Los resultados conseguidos teóricamente permitirán realizar un análisis comparativo con respecto a los datos calculados mediante simulación numérica.

3.1 Datos generales para el diseño

Se recolectaron los datos mostrados en la Tabla 1, con el fin de que se adapte a las necesidades de la empresa, cabe destacar que el valor de la densidad del grano de cacao fue tomado de un estudio realizado por Ramos [45]:

Tabla 1. Especificaciones técnicas para el diseño del separador ciclónico.

Variable	Unidad	Especificación
Caudal del fluido	m^3/s	0.5
Masa del material	kg	30
Diámetro de la muestra	m	0.03
Densidad del material	kg/m^3	900
Tiempo de carga del material	s	600
Velocidad en la entrada	m/s	15 máx.
Temperatura ambiente	°C	18

3.2 Alternativas de diseño por módulos

Para seleccionar la alternativa de diseño más factible, se lleva a cabo el planteamiento de diversas opciones y se comparan las alternativas de los distintos módulos, dado que los factores que determinarán el diseño y composición del equipo son: material, elemento impulsor de aire, el tipo de separador ciclónico y la forma de la tubería al ingreso del material.

3.2.1 Opciones del módulo 1

El módulo comprende el material con el que se construirá el ciclón considerando que el equipo estará en contacto con alimentos, a pesar de que va a remover los residuos. En la Tabla 2 se indican las alternativas para realizar el correspondiente análisis.

Tabla 2. Alternativas del material de construcción.

Alternativa	Ventajas	Desventajas
Acero galvanizado	<ul style="list-style-type: none">▪ Material reciclable▪ Económico	<ul style="list-style-type: none">▪ El recubrimiento de Zinc
Acero inoxidable 304	<ul style="list-style-type: none">▪ Presenta una alta durabilidad▪ Resistente a la corrosión	<ul style="list-style-type: none">▪ Imán de polvos
Aluminio	<ul style="list-style-type: none">▪ Impermeabilidad▪ Material reciclable	<ul style="list-style-type: none">▪ Se oxida fácilmente

3.2.2 Opciones del módulo 2

Este módulo comprende al equipo encargado de actuar como bomba de vacío del sistema, el cual permitirá el transporte de los materiales dentro de la tubería. En la Tabla 3 se indican las alternativas para realizar el correspondiente análisis.

Tabla 3. Alternativas del elemento impulsor del aire.

Alternativa	Ventajas	Desventajas
Compresor	<ul style="list-style-type: none">▪ Trabaja con presión media-alta	<ul style="list-style-type: none">▪ Depende de la presión en el sistema
Soplador	<ul style="list-style-type: none">▪ El caudal varía poco con la presión	<ul style="list-style-type: none">▪ Eficiencia relativamente baja
Ventilador	<ul style="list-style-type: none">▪ Alto caudal a baja presión	<ul style="list-style-type: none">▪ Tiene una curva característica casi plana

3.2.3 Opciones del módulo 3

Este módulo comprende al tipo de separador ciclónico con el cual se trabajará para ello es necesario saber la capacidad y el tamaño de los residuos con las cuales trabaja. En la Tabla 4 se indican las alternativas para realizar el correspondiente análisis.

Tabla 4. Alternativas de equipos.

Alternativa	Ventajas	Desventajas
Convencional	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Pérdidas de carga bajas ▪ Trabaja con un amplio rango de partículas 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Eficiencia máxima del 0.9
Alta capacidad	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Eficiencia del 0.99 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Elevadas pérdidas de carga
Alta eficiencia	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Eficiencia máxima del 0.95 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Baja eficiencia con partículas pequeñas

3.2.4 Opciones del módulo 4

Este módulo comprende al tipo de geometría que tendrá la tubería para el transporte de los residuos hacia el equipo. En la Tabla 5 se indican las alternativas para realizar el correspondiente análisis.

Tabla 5. Alternativas de tuberías.

Alternativa	Ventajas	Desventajas
Cuadrada	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Peso liviano 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ No trabajan a presiones altas
Circular	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Económico ▪ Gran resistencia a la presión 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Menor área transversal
Cuadrada y circular	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Se mantiene acorde al diseño original del equipo 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Resulta más trabajoso el adaptar las secciones

3.3 Selección de alternativas

La selección de las alternativas de cada módulo se las realizará con niveles de calificación del uno al cinco, como se observa en la Tabla 6.

Tabla 6. Escala de calificación de menor a mayor.

Calificación	Descripción
1	Inadecuado
2	Deficiente
3	Regular
4	Muy Bueno
5	Excelente

Los parámetros con los cuales se seleccionará la alternativa de cada módulo son:

- *Seguridad:* que sea resistente a la corrosión, así como, adecuado para trabajar con alimentos.
- *Costo:* el valor más bajo sin obviar su relación con la calidad del material para evitar gastos innecesarios.
- *Utilidad:* adecuado para los requerimientos mínimos de diseño del equipo.
- *Estética:* incidencia del deterioro y la visibilidad de los componentes.
- *Mantenimiento:* no debe requerir un control exhaustivo.

3.3.1 Selección de la alternativa del módulo 1

En la Tabla 7 se muestra la calificación de las siguientes alternativas: A es acero galvanizado, B es acero inoxidable 304 y C es aluminio, siendo el material más conveniente para la construcción del separador ciclónico la opción B por ser tener compatibilidad con los alimentos.

Tabla 7. Matriz de decisión del módulo 1.

Parámetros	Alternativas		
	Acero galvanizado	Acero inoxidable 304	Aluminio
Seguridad	3	4	2
Costo	4	3	4
Utilidad	4	4	4
Estética	4	5	3
Mantenimiento	4	5	3
Total	19	21	16

3.3.2 Selección de la alternativa del módulo 2

En la Tabla 8 se muestra la calificación de las siguientes alternativas: A es el compresor, B es el ventilador y C es el soplador, resultando que la opción B es la más adecuada para la generación del sistema de vacío por permitir trabajar con altos caudales.

Tabla 8. Matriz de decisión del módulo 2.

Parámetros	Alternativas		
	A	B	C
Seguridad	4	5	2
Costo	4	2	3
Utilidad	3	3	3
Estética	3	5	3
Mantenimiento	3	4	2
Total	17	19	13

3.3.3 Selección de la alternativa del módulo 3

En la Tabla 9 se muestra la calificación de las siguientes alternativas: A es un modelo convencional, B es uno de alta capacidad y C es uno de alta eficiencia, siendo el separador ciclónico del tipo convencional el más adecuado por tener los parámetros de geometría necesarios para abastecer la capacidad del equipo.

Tabla 9. Matriz de decisión del módulo 3.

Parámetros	Alternativas		
	A	B	C
Seguridad	3	4	4
Costo	4	2	2
Utilidad	4	3	3
Estética	3	4	5
Mantenimiento	4	3	3
Total	18	16	17

3.3.4 Selección de la alternativa del módulo 4

En la Tabla 10 se muestra la calificación de las siguientes alternativas: A es tipo cuadrada, B es circular y C es con adaptación, siendo el tubo circular el más adecuado por precio y facilidad de colocación en el equipo con respecto al de sección cuadrada.

Tabla 10. Matriz de decisión del módulo 4.

Parámetros	Alternativa		
	A	B	C
Seguridad	2	5	3
Costo	3	4	3
Utilidad	3	5	3
Estética	3	4	3
Mantenimiento	3	4	3
Total	14	22	15

3.4 Interpolación de la densidad del aire

En la Tabla 11 se presenta el valor de la densidad del aire a 18 °C:

Tabla 11. Densidad del aire a 18 °C.

Temperatura [°C]	Densidad [kg/m ³]
15	1.225
18	1.212
20	1.204

3.5 Interpolación de la viscosidad dinámica del aire

En la Tabla 12 se presenta el valor de la viscosidad dinámica del aire a 18 °C:

Tabla 12. Viscosidad dinámica del aire a 18 °C.

Temperatura [°C]	Viscosidad dinámica [Pa · s]
15	$1.802 \cdot 10^{-5}$
18	$1.816 \cdot 10^{-5}$
20	$1.825 \cdot 10^{-5}$

3.6 Cálculo del diámetro del separador ciclónico

Para realizar este cálculo se despeja el área de la ecuación (1):

$$A_i = \frac{0.5 \text{ m}^3/\text{s}}{15 \text{ m/s}}$$

$$A_i = 3.33 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2$$

Por último, se despeja el valor de la ecuación (2):

$$D_c = \sqrt{8 \cdot (3.33 \cdot 10^{-2}) m^2}$$

$$D_c = 0.51 m$$

3.7 Selección de las medidas del separador ciclónico

En la Tabla 13 se presentan las dimensiones del equipo relacionadas con el valor de 0.51 m.

Tabla 13. Dimensiones del separador ciclónico.

Dimensión	Valor [m]
Altura de la entrada (a)	0.26
Ancho de la entrada (b)	0.13
Altura de la salida (S)	0.39
Diámetro de salida (D_o)	0.26
Altura de la sección cilíndrica (h)	1.03
Altura de la sección cónica (z)	1.03
Altura total del equipo (H)	2.07
Diámetro en la descarga (B)	0.13

Con los valores de las dimensiones se tiene que la suma de h y z nos da una altura total del equipo de 2.07 m, lo cual resulta un inconveniente en el diseño, ya que, la altura del cuarto donde debe estar el equipo es de 1.6 m. De modo que, para cumplir con los requerimientos se reducirán en un 60 % los valores de la altura de la sección cilíndrica y cónica:

$$h = z = 0.6 \cdot (1.03 m)$$

$$h = z = 0.618 m$$

3.8 Selección del espesor de la chapa metálica

Para la construcción del separador ciclónico se utilizará tol de acero inoxidable 304 con un espesor de 1.5 mm con el fin de facilitar el doblado del material, así como, reducir costos al no requerir de una dobladora.

Además de que el material es resistente a la corrosión y presenta una gran durabilidad debido a su composición química como se visualiza en la Figura 20.

Tipo de estructura	Tipo de Composición	Descripción de acuerdo a JIS*	Descripción de acuerdo a AISI**	Descripción de acuerdo a DIN***	COMPOSICION QUIMICA %					
					C	Si max	Mn	P max	S max	Ni
Austenite	17 Cr-5Ni-7Mn	SUS 201	201		0,15 max	1,00	5,50 ~ 7,50	0,06	0,030	3,50 ~ 5,5
	18 Cr-6Ni-10Mn	SUS 202	202		0,15 max	1,00	7,50 ~ 10,00	0,06	0,030	4,00 ~ 6,00
	17Cr-7Ni	SUS 301	301	4310	0,15 max	1,00	2,00 - max	0,04	0,030	6,00 ~ 8,00
	18Cr-8Ni-highC	SUS 302	302	4300	0,15 max	1,00	2,00 - max	0,04	0,030	8,00 ~ 10,00
	18Cr-8Ni	SUS 304	304	4301	0,08 max	1,00	2,00 - max	0,04	0,030	8,00 ~ 10,50
	18Cr-8Ni-extra-low-C	SUS 304 L	304L	4306	0,030 max	1,00	2,00 - max	0,04	0,030	9,00 ~ 13,00
	18Cr-12Ni	SUS 305	305	3955	0,12 max	1,00	2,00 - max	0,04	0,030	10,50 ~ 13,00
	23Cr-12Ni	SUS 309 S	309 S	4845	0,08 max	1,00	2,00 - max	0,04	0,030	12,00 ~ 15,00
	25Cr-20Ni	SUS 310 S	310 S	4845	0,08 max	1,50	2,00 - max	0,04	0,030	19,00 ~ 22,00
	18Cr-12Ni-2,5Mo	SUS 316	316	4401	0,08 max	1,00	2,00 - max	0,04	0,030	10,00 ~ 14,00
	18Cr-12Ni-7,5Mo-extra-low-C	SUS 316 L	316 L	4404	0,030 max	1,00	2,00 - max	0,04	0,030	12,00 ~ 15,00
	18Cr-12Ni-2Mo-2Cu	SUS 316 J1		4505	0,08 max	1,00	2,00 - max	0,04	0,030	10,00 ~ 14,00
	18Cr-13Ni-3,5Mo	SUS 317	317	4402	0,08 max	1,00	2,00 - max	0,04	0,030	18,00 ~ 15,00
	18Cr-13Ni-3,5Mo-extra-low-C	SUS 317 L	317 L		0,030 max	1,00	2,00 - max	0,04	0,030	11,00 ~ 15,00
	18Cr-8Ni-Ti	SUS 321	321	4541	0,08 max	1,00	2,00 - max	0,04	0,030	9,00 ~ 13,00
	18Cr-9Ni-Nb	SUS 347	347	4550	0,08 max	1,00	2,00 - max	0,04	0,030	9,00 ~ 13,00

Figura 20. Composición química del acero inoxidable 304 [46].

3.9 Cálculo del área del separador ciclónico

Con el objetivo de calcular la cantidad de láminas de acero inoxidable 304 requeridas, es necesario determinar el área de la sección cilíndrica, cónica y la campana. Para obtener datos precisos, se utiliza el valor proporcionado por el software Inventor.

A continuación, se presenta en la Tabla 14 el valor del área correspondiente a cada geometría:

Tabla 14. Área de las secciones del separador ciclónico.

Geometría	Área
Sección cilíndrica	3.48 [m ²]
Sección cónica	1.31 [m ²]
Campana	1.3 [m ²]

3.10 Cálculo de la velocidad de saltación

Antes se necesita conocer el valor de la velocidad equivalente que se desarrolla a continuación:

$$V_{eq} = \sqrt[3]{\frac{4 \cdot (9.81 \text{ m/s}^2) \cdot (1.816 \cdot 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}) \cdot (900 - 1.212) \text{ kg/m}^3}{3 \cdot (1.212 \text{ kg/m}^3)^2}}$$

$$V_{eq} = 0.53 \text{ m/s}$$

Teniendo la velocidad equivalente se calcula finalmente la velocidad de saltación:

$$V_{sal} = \frac{4.913 \cdot (0.53 \text{ m/s}) \cdot 0.25^{0.4} \cdot (0.51 \text{ m})^{0.067} \cdot ((15 \text{ m/s})^2)^{\frac{1}{3}}}{(1 - 0.25)^{\frac{1}{3}}}$$

$$V_{sal} = 9.57 \text{ m/s}$$

Luego se verifica que no exista resuspensión del material dentro del separador ciclónico.

$$1.35 \cdot (9.57 \text{ m/s}) < 15 \text{ m/s}$$

$$12.91 \text{ m/s} < 15 \text{ m/s}$$

El valor de 12.91 m/s cumple con la relación, es decir, las dimensiones definidas para el separador ciclónicos cumplen con los requisitos de los datos generales.

3.11 Selección de la tubería

Se parte desde el cálculo de la porosidad, ya que, así se relaciona la interacción de los residuos con respecto a la tubería.

$$\varepsilon_1 = \frac{900 \text{ kg/m}^3}{900 \text{ kg/m}^3 + \frac{1.212 \text{ kg/m}^3}{900 \text{ kg/m}^3}}$$

$$\varepsilon_1 = 0.99$$

Luego se procede a sacar el valor del área de la tubería:

$$A_t = \frac{0.5 \text{ m}^3/\text{s}}{(15 \text{ m/s}) \cdot 0.99}$$

$$A_t = 3.37 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2$$

Como primera selección se escoge un tubo de 10 con un área de $5.09 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2$.

Sin embargo, para realizar una selección adecuada se revisan catálogos de empresas existentes en el Ecuador y el área por donde se ubicarán las tuberías en el equipo. A lo que se opta por escoger una tubería de acero galvanizado de DIPAC, pero de un diámetro de 4".

3.12 Cálculo de la caída de presión interna en el equipo

Antes de calcular ese valor es necesario conocer el número de cabezas de velocidad:

$$H_v = 16 \cdot \frac{(0.26 \text{ m}) \cdot (0.13 \text{ m})}{(0.26 \text{ m})^2}$$

$$H_v = 8$$

Finalmente se emplea la ecuación (9):

$$\Delta P_c = \frac{1}{2} \cdot (1.212 \text{ kg/m}^3) \cdot (15 \text{ m/s})^2 \cdot 8$$

$$\Delta P_c = 1091 \text{ Pa}$$

3.13 Cálculo de las pérdidas de carga en la línea de transporte

Es necesario conocer el valor del número de Reynolds:

$$Re = \frac{(1.212 \text{ kg/m}^3) \cdot (15 \text{ m/s}) \cdot (114.3 \cdot 10^{-3} \text{ m})}{1.816 \cdot 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}}$$

$$Re = 114425.88 \rightarrow \text{Flujo turbulento}$$

Con el valor ya obtenido se calcula el factor de fricción:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -1.8 \cdot \log \left[\frac{6.9}{114425.88} + \left(\frac{4.6 \cdot 10^{-5} \text{ m} / 114.3 \cdot 10^{-3} \text{ m}}{3.7} \right)^{1.11} \right]$$

$$f = 0.0196$$

Con el factor de fricción se pueden calcular las pérdidas mayores. Para ello se tomó que los valores de la longitud vertical y horizontal de la tubería en la succión del ventilador sean 2 m y 0.7 m, respectivamente:

$$h_{mayores} = 0.0196 \cdot \frac{(15 \text{ m/s})^2}{2 \cdot (9.81 \text{ m/s}^2)} \cdot \left(\frac{0.7 \text{ m} + 2 \text{ m}}{114.3 \cdot 10^{-3} \text{ m}} \right)$$

$$h_{mayores} = 5.31 \text{ m}$$

En cuanto a las pérdidas por accesorios se tiene lo siguiente:

$$h_{menores} = (2) \cdot (0.016) \cdot \frac{(15 \text{ m/s})^2}{2 \cdot (9.81 \text{ m/s}^2)} \cdot (30)$$

$$h_{menores} = 11 \text{ m}$$

3.14 Cálculo de la caída de presión total

Se calcula desde la tubería como se muestra a continuación:

$$\Delta P_{tub} = (1.212 \text{ kg/m}^3) \cdot (9.81 \text{ m/s}^2) \cdot (5.31 \text{ m} + 11 \text{ m})$$

$$\Delta P_{tub} = 193.92 \text{ Pa}$$

Finalmente, el valor de la caída de presión neta se obtiene mediante la ecuación (15):

$$\Delta P_{total} = 1091 \text{ Pa} + 193.92 \text{ Pa}$$

$$\Delta P_{total} = 1284.92 \text{ Pa}$$

3.15 Selección del ventilador

Es necesario conocer tanto la caída de presión total como el caudal o capacidad que será necesaria con lo que se partirá calculando este último dato:

$$Q_v = \left(\frac{\pi}{4} \cdot (113.4 \cdot 10^{-3} \text{ m})^2\right) \cdot (15 \text{ m/s})$$

$$Q_v = 0.15 \text{ m}^3/\text{s}$$

Para la potencia requerida para el ventilador se asume una eficiencia del 70 % con el fin de tener un rendimiento optimo:

$$P_v = \frac{(1284.72 \text{ Pa}) \cdot (0.15 \text{ m}^3/\text{s})}{0.7}$$

$$P_v = 274.14 \text{ W}$$

Teniendo ambos valores se procede a escoger un ventilador centrifugo de un catálogo en físico o con ayuda de un software, para lo cual se escogió fanware. Una vez ingresados los datos nos da las siguientes opciones como se aprecia en el Anexo 12.

De entre las opciones que nos muestra el software se seleccionó el modelo MTRM 250 1.5kW 4300 rpm por cumplir con los parámetros requeridos por el equipo, así como, entregar una eficiencia del 64.91 % de acuerdo con el fabricante.

3.16 Diseño del soporte

Ya que el separador ciclónico tiene que tener un espacio donde se depositen los residuos ya removidos del cacao, es necesario que exista una estructura metálica la cual soporte al equipo y a su vez la carga con la cual trabajará.

En la Figura 21 se presenta la estructura metálica conformada de tubos cuadrados de 50 x 50 x 1.5 mm que se encargará de la carga conjunta del equipo y la de los residuos.

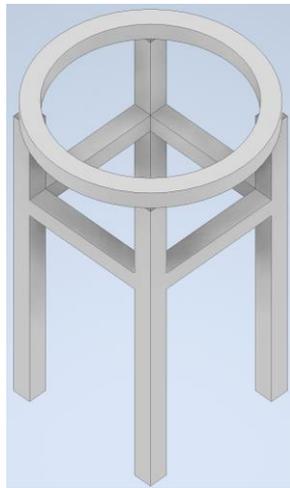


Figura 21. Geometría de la estructura metálica.

3.15.1 Cálculo de la carga actuante

En el Anexo 14 se presentan las propiedades físicas generales del separador ciclónico calculadas mediante el software Inventor, teniendo el valor del volumen se puede obtener la masa del equipo con la definición de densidad:

$$m_{eq} = (7900 \text{ kg/m}^3) \cdot (3.57 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3)$$

$$m_{eq} = 28.203 \text{ kg}$$

El valor obtenido se suma a la carga de 21 kg, equivalente al 60 % de los 30 kg, puesto que en la carga se incluye pepas y residuos del cacao, es decir, la carga total es de unos 50 kg que, bajo la influencia de la gravedad, equivale a 490.5 N.

3.15.2 Resultados del análisis estructural

En la Figura 22 (a) se presenta los resultados obtenidos del análisis estático en ANSYS Mechanical siendo que la deflexión máxima que sufre la estructura es de $3.82 \cdot 10^{-3}$ mm, mientras que en la Figura 22 (b) el indicador máximo es de 1.46 MPa valor que es menor al del esfuerzo máximo del acero galvanizado de 207 MPa, por tanto, la configuración geométrica es adecuada para soportar el peso del equipo cargado con los residuos a separar.

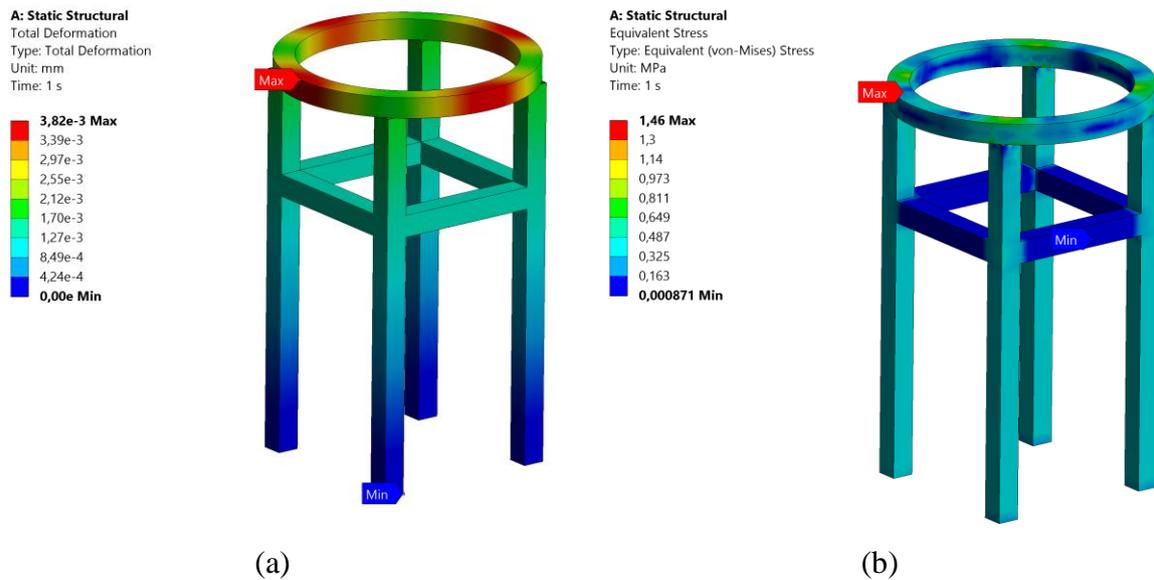


Figura 22. Análisis del soporte: (a) deformación total y (b) esfuerzo de Von-Misses.

3.17 Conclusiones del capítulo

En el capítulo 3 mediante cálculos se ha podido realizar el dimensionamiento de un separador ciclónico de tipo Zenz con una altura total de 1.24 m y un diámetro de 0.51 m. También se verifico el funcionamiento del equipo mediante relaciones establecidas que indican el comportamiento del material en su interior. Estos cálculos deben ser cercanos a la realidad para que exista un margen de error mínimo entre los valores numéricos y los que arroje la simulación en el capítulo 4.

CAPÍTULO IV

SIMULACIÓN NUMÉRICA Y ANÁLISIS FINANCIERO DEL SEPARADOR CICLÓNICO

En este capítulo se realizará la simulación del ciclón mediante el uso del software especializado ANSYS debido a la precisión de sus resultados, se tomará en cuenta los parámetros y cálculos previos realizados en el anterior capítulo. De igual manera, se presentará un análisis de costos y rentabilidad, para la cotización de dicha propuesta tecnológica.

4.1 Ecuaciones gobernantes en la simulación

El software con el cual se realiza la simulación trabaja con ecuaciones y modelos ya investigados, de forma que, el usuario solo necesita ingresar los valores de las propiedades termodinámicas del fenómeno físico a analizar.

4.1.1 Ecuación de la conservación de la masa

También denominada como ecuación de la continuidad en mecánica de fluidos, menciona que cuando un elemento infinitesimal se desplaza en un fluido, su masa se mantiene constante, pero su forma y volumen experimentan cambios a medida que se mueve [47].

El principio implica que la variación infinitesimal de masa será nula a lo largo de toda su trayectoria. Según Pham et al. [48] la ecuación de la continuidad en forma vectorial viene dada por:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \rho \cdot V = 0 \quad (18)$$

4.1.2 Conservación de momento

También denominada como la ecuación de Navier-Stokes describe una aplicación de la segunda ley de Newton en los fluidos, la cual se calcula como el producto entre la masa y la aceleración del fluido.

$$\sum F = m \cdot a \quad (19)$$

Donde la aceleración viene expresada bajo la ecuación (20):

$$a = \frac{du}{dt} \quad (20)$$

Se debe tener en cuenta que hay fuerzas externas, las cuales se suman a las fuerzas superficiales. De acuerdo con Alberto et al. [49] para el caso de un fluido compresible bidimensional la ecuación de momento se compone por la aceleración local, advección, gradiente de presión y la difusión como se aprecia en la ecuación (21):

$$\begin{aligned} \frac{\partial(u, v)}{\partial t} + u \cdot \frac{\partial(u, v)}{\partial x} + v \cdot \frac{\partial(u, v)}{\partial y} \\ = -\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial P}{\partial y} + v \cdot \frac{\partial^2(u, v)}{\partial x^2} + v \cdot \frac{\partial^2(u, v)}{\partial y^2} \end{aligned} \quad (21)$$

4.1.3 Modelo de turbulencia

La dinámica de fluidos computacional emplea una aproximación para resolver las ecuaciones de Navier-Stokes, con el propósito de caracterizar el comportamiento de un flujo turbulento. Con lo que existen dos enfoques para resolver dichas ecuaciones [50]:

- *La resolución directa de las ecuaciones de Navier-Stokes (DNS):* requiere una gran cantidad de volúmenes finitos, es decir, incurre en un gran gasto computacional
- *Las ecuaciones de Navier-Stokes promediadas por Reynolds (RANS):* no requiere de una malla tan refinada para la correcta visualización de fluidos internos.

En la Figura 23 se muestran las subdivisiones por cada uno de esos métodos siendo la RANS la que posee más debido a que se parte desde cero ecuaciones hasta métodos híbridos para alcanzar valores aproximados del método DNS.

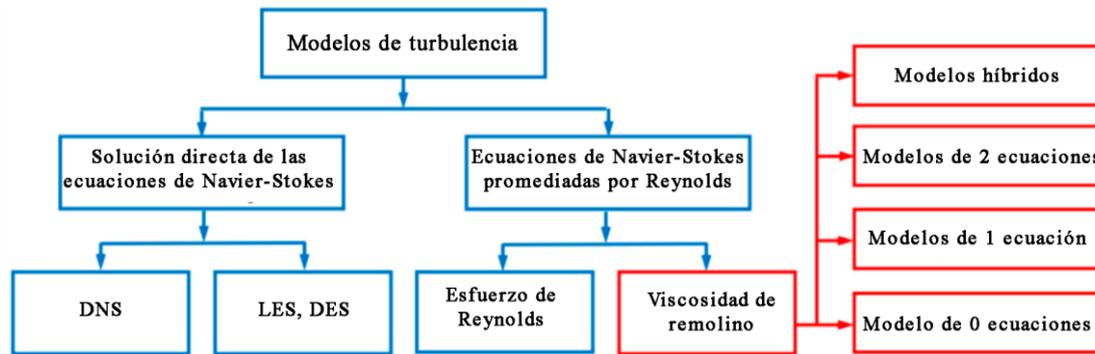


Figura 23. Modelos de turbulencia [51].

A continuación, se mencionan los modelos de turbulencia más usados en el módulo ANSYS Fluent [52]:

- *Spalart-Allmaras*: es un modelo que emplea una sola ecuación para resolver la ecuación de transporte modelizada. El modelo se diseñó específicamente para aplicaciones aeronáuticas y aeroespaciales que implican flujos limitados por paredes.
- $k - \varepsilon$: es ampliamente utilizado para la simulación de fluidos industriales, ya que, resuelve dos ecuaciones de transporte y modela los esfuerzos de Reynolds utilizando el enfoque de la viscosidad de Foucault.
 - o Standard
 - o Grupo de renormalización (RNG)
 - o Realizable
- $k - \omega$: este modelo ofrece varias ventajas en relación con la ecuación ε . La más destacada es que la ecuación puede integrarse sin términos adicionales a través de la subcapa viscosa.
 - o Standard
 - o Baseline
 - o Shear-Stress Transport
 - o Generalized (GEKO)
- *Esfuerzo de Reynolds (RSM)*: incluye varios factores que no son fácilmente manejables por los modelos de Foucault. Los modelos RSM exigen a menudo un aumento significativo del tiempo de cálculo, en parte debido a las ecuaciones adicionales.
 - o Linear pressure-strain
 - o Esfuerzo Omega
 - o Esfuerzo BSL

- *Detached eddy simulation (DES)*: El modelo selecciona el mínimo de espaciamiento entre los modelos RANS y LES.
- *Large eddy simulation (LES)*: el concepto de modelización de SRS (simulación a gran escala) más conocido es la simulación de grandes corrientes de Foucault (LES). Se basa en el planteamiento de resolver grandes estructuras turbulentas en el espacio y el tiempo hasta el límite de la malla en todas partes en el flujo.

4.1.4 Modelo de fase discreta

El software ANSYS Fluent utiliza un modelo específico para predecir la trayectoria de las partículas al calcular el equilibrio de fuerzas de cada partícula dispersa dentro del separador ciclónico, este balance se lo hace en base a un marco de referencia lagrangiano y un campo de flujo euleriano [53], como se ve en la ecuación (22):

$$\frac{du_{pi}}{dt} = F_D \cdot (u_i - u_{pi}) + \frac{\rho_p - \rho}{\rho_p} \cdot g + F_i \quad (22)$$

Donde: $F_D \cdot (u_i - u_{pi})$ es la fuerza de arrastre por unidad de masa de partículas, u_{pi} es velocidad de la partícula y F_i es un término de fuerza adicional.

4.2 Datos utilizados para la simulación

En la Tabla 15 se presentan los parámetros a ingresar en el setup del módulo ANSYS Fluent para la simulación CFD:

Tabla 15. Parámetros para el setup de la simulación.

Variable	Unidad	Especificación
Gasto másico del material	kg/s	0.05
Diámetro de la muestra	m	0.03
Densidad del material	kg/m ³	900
Densidad del fluido	kg/m ³	1.212
Viscosidad dinámica	Pa · s	$1.816 \cdot 10^{-5}$
Velocidad en la entrada	m/s	15 máx.
Temperatura ambiente	°C	18

Cabe destacar que la simulación es lo más cercana a la realidad ya que la temperatura con la cual se obtuvo las propiedades termodinámicas es la ambiente.

4.3 Procedimientos para la simulación

Para la simulación se ocupará el módulo ANSYS Fluent el cual permite generar la geometría del sistema a analizar o importar el archivo realizado en algún software CAD, al submódulo "Geometry", establecer un mallado y condiciones de frontera para luego solo seleccionar las ecuaciones que necesitará el solver para tener resultados con valores cercanos a los calculados de forma analítica. En la Figura 24 se ilustra un diagrama de los procesos que se deben seguir para llegar al submódulo de "Results".

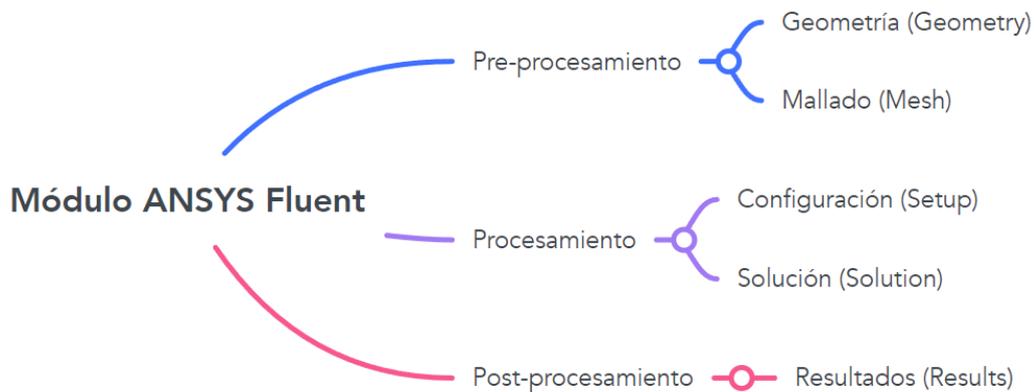


Figura 24. Subprocesos para la simulación CFD-DPM en ANSYS Fluent.

4.1.5 Geometría

En primera instancia se importó la geometría desde el software Autodesk Inventor tomando en cuenta que el espesor del material es de 1.5 mm. Dado que el fluido con los residuos se desplazara por el interior del sistema es necesario realizar un "Fill", ya sea en el submódulo de DesignModeler o en SpaceClaim, siendo que para facilidad del caso se optó por este último como se indica en la Figura 25.

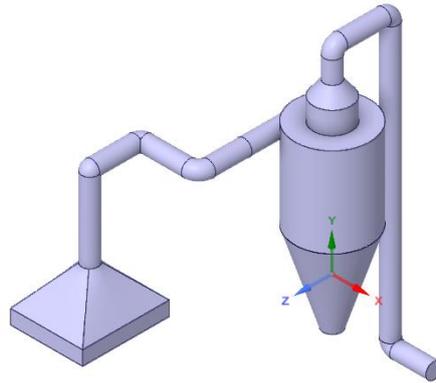


Figura 25. Geometría interna del equipo.

Cabe recalcar que para evitar un gasto computacional considerable solo se analizó la parte generada por la herramienta "Fill", es decir, solo el fluido que recorrerá el equipo.

4.1.6 Mallado

Para el mallado se partió de un enfoque por default para luego refinar la malla por un método de "body sizing" hasta llegar a una buena calidad tanto en el parámetro de skewness como con el de orthogonal quality. Como se ve en la Figura 26 a medida que se reduce el sizing de los volúmenes finitos el número de elementos aumento hasta llegar un valor de 0.21641 en la métrica de oblicuidad, lo cual indica que es una buena malla.

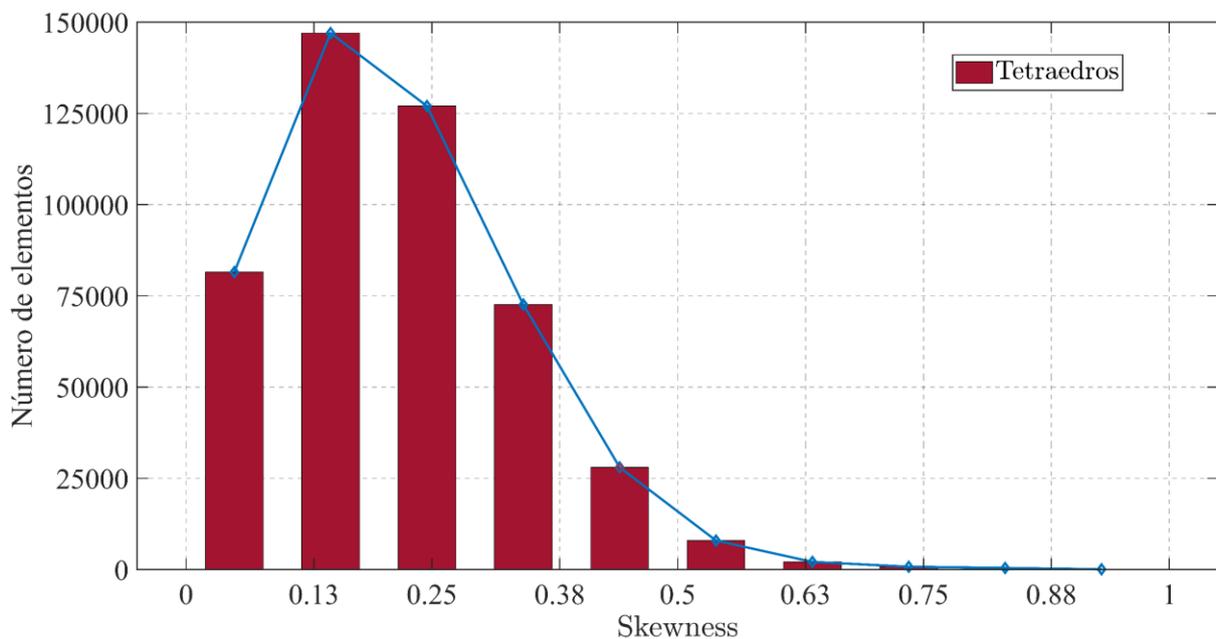


Figura 26. Métrica de calidad skewness.

También se verificó la calidad de la malla con la métrica ortogonal como se aprecia en la Figura 27 teniendo un valor promedio de 0.78233 que está cerca de 1.

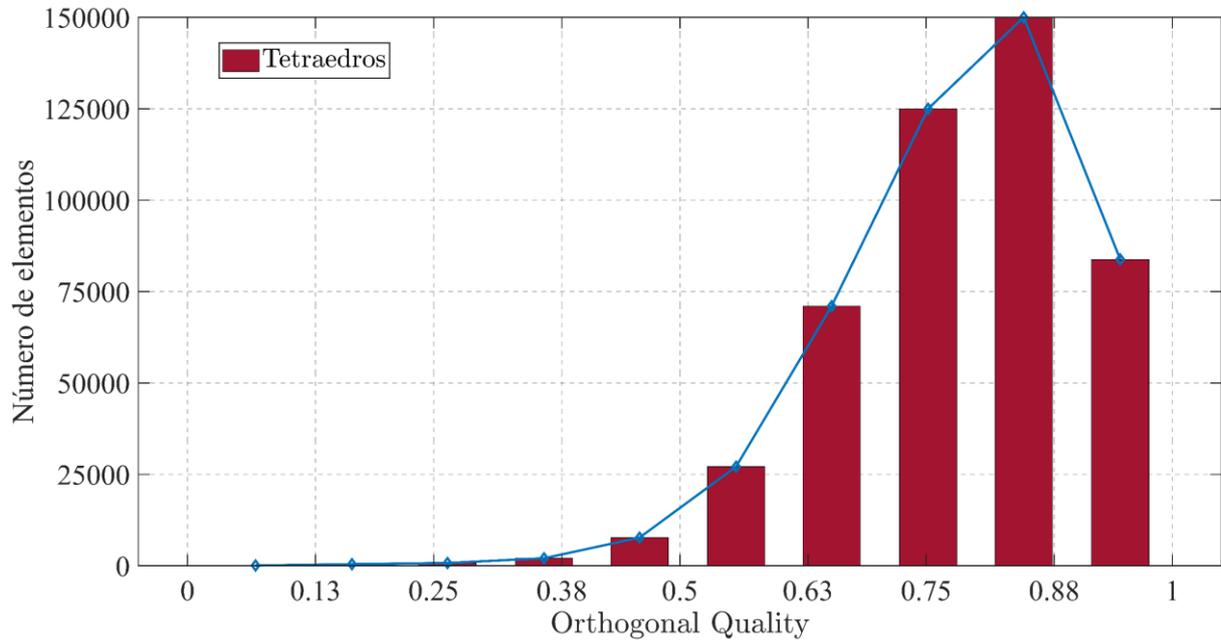


Figura 27. Métrica de calidad ortogonal.

A continuación, en la Figura 28 se presentan las condiciones de frontera del sistema removedor de residuos, siendo:

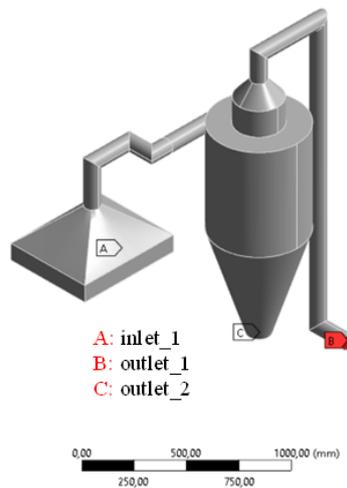


Figura 28. Condiciones de frontera.

4.1.7 Configuración

Para el setup se escogerá un análisis estacionario o "steady" y se activará los modelos físicos de energía, turbulencia $k - \epsilon$ standard para visualizar correctamente el torbellino que se

produce dentro del separador ciclónico. Para el modelo DPM se han seteado los datos que se visualizan en la Figura 29.

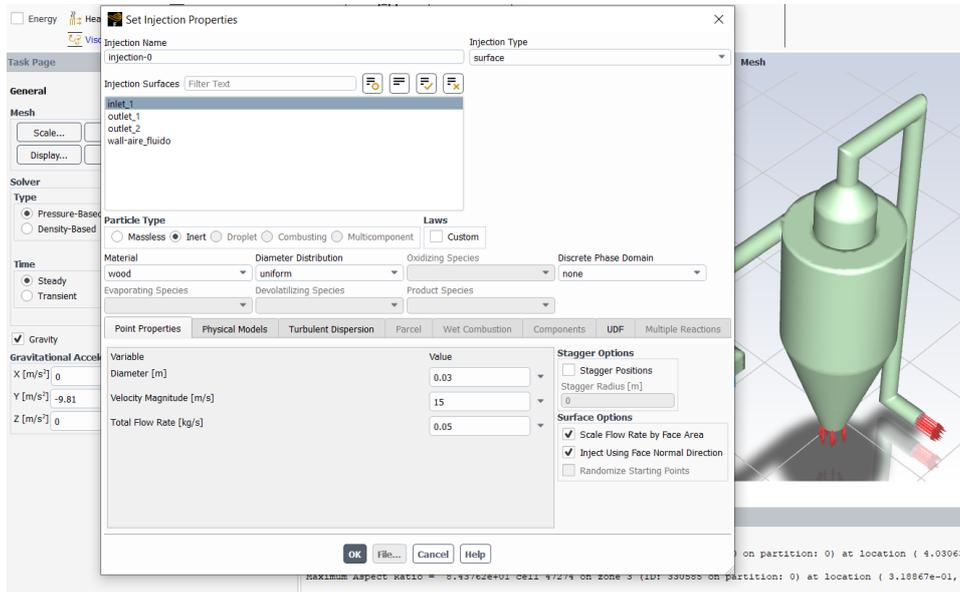


Figura 29. Parámetros del modelo DPM.

Para las condiciones de frontera se configuraron los siguientes valores:

- Inlet_1: velocidad de 15 m/s y en la sección DPM se estableció que sea "reflect" para que el solver interprete que desde esa cara son absorbidos los residuos.
- Outlet_1: en la sección DPM se estableció que sea "escaped" para que los residuos se dirijan ahí.
- Outlet_2: en la sección DPM se estableció que sea "escaped" para que los residuos se dirijan ahí.

4.1.8 Solución

Para facilitar el cálculo, así como, sea preciso se optó por un método de solución SIMPLE con todos los parámetros de las ecuaciones en un 2do orden, como se aprecia en la Figura 30.

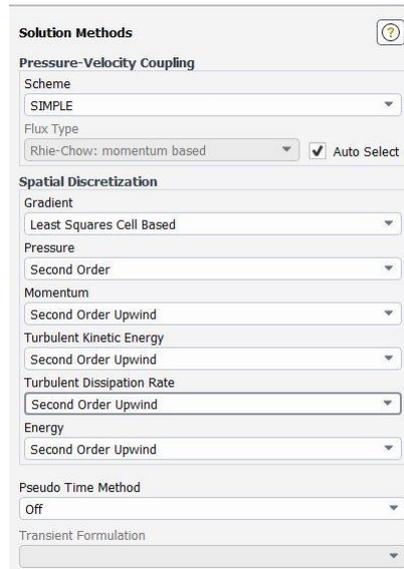


Figura 30. Métodos de solución.

Mientras que para la "inicialization" se estableció que el solver realice unos cálculos previos en la inlet_1 para poder apreciar cómo cambia la velocidad y presión en el sistema desde la entrada, como se visualiza en la Figura 31.

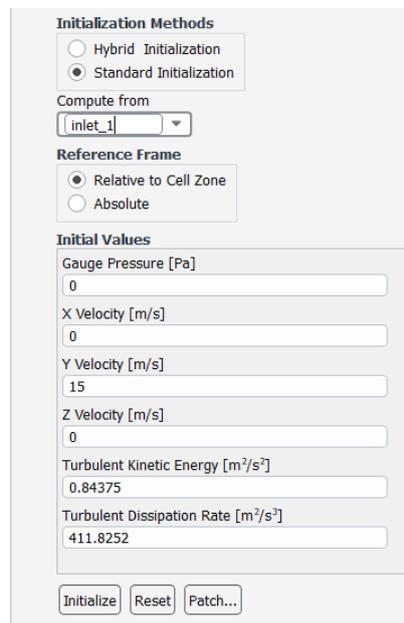


Figura 31. Método de inicialización del solver.

Finalmente, luego de establecer un numero de iteraciones de 1000 la solución converge a la iteración 800.

4.4 Análisis de resultados

Se destaca que se ha trabajado con dos componentes para mostrar el arrastre y trayectoria de los residuos con la ayuda del separador, de forma que se tiene como fluido al aire y los residuos como partículas a analizar su trayectoria dentro del equipo. Se realiza contornos de velocidad, presión y predicción de la trayectoria de los residuos entre otros gráficos.

4.4.1 Análisis de la velocidad

En la Figura 32 se visualiza el incremento de la velocidad en la región cilíndrica del separador ciclónica, siendo que entra al equipo con una velocidad de 15.5 m/s y debido al vórtice que se produce en su región intermedia llega a alcanzar un valor máximo de 32.83 m/s.

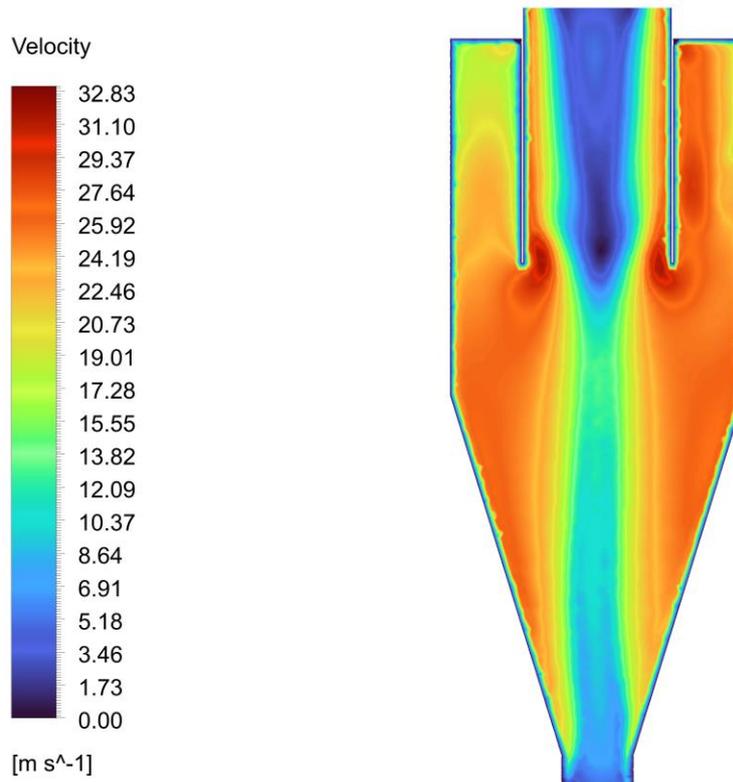


Figura 32. Contorno de velocidad.

4.4.2 Análisis de la presión

En la Figura 33 se aprecia que existe un sistema de bomba de vacío, puesto que, se observa un valor mínimo de -200.84 Pa en la región donde el ventilador se encarga de absorber los residuos

para que luego sean removidos y caigan por la parte inferior del equipo, también se aprecia que la caída de presión máxima que puede tener el equipo es de 1195.46 Pa.

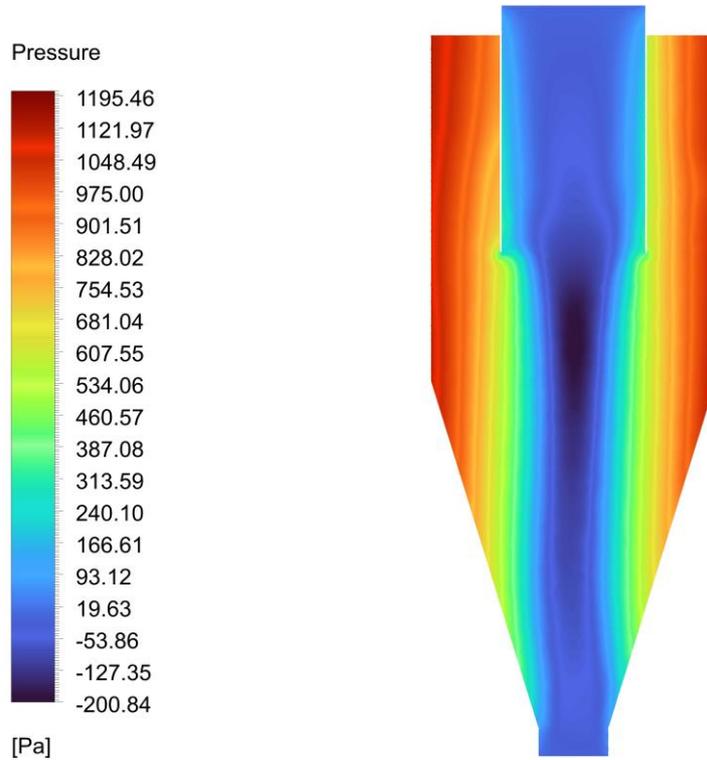


Figura 33. Contorno de presión.

4.4.3 *Análisis de la turbulencia*

En la Figura 34 (a) se muestra los cambios que experimenta la viscosidad turbulenta del aire, siendo que al pasar por los codos y a la salida del equipo se genera la mayor turbulencia de energía cinética con un valor de $1.32 \text{ Pa} \cdot \text{s}$. Debido a la fuerza centrífuga como se ve en la Figura 34 (b) el aire crea dos remolinos que permiten la remoción de los residuos de las pepas de cacao.

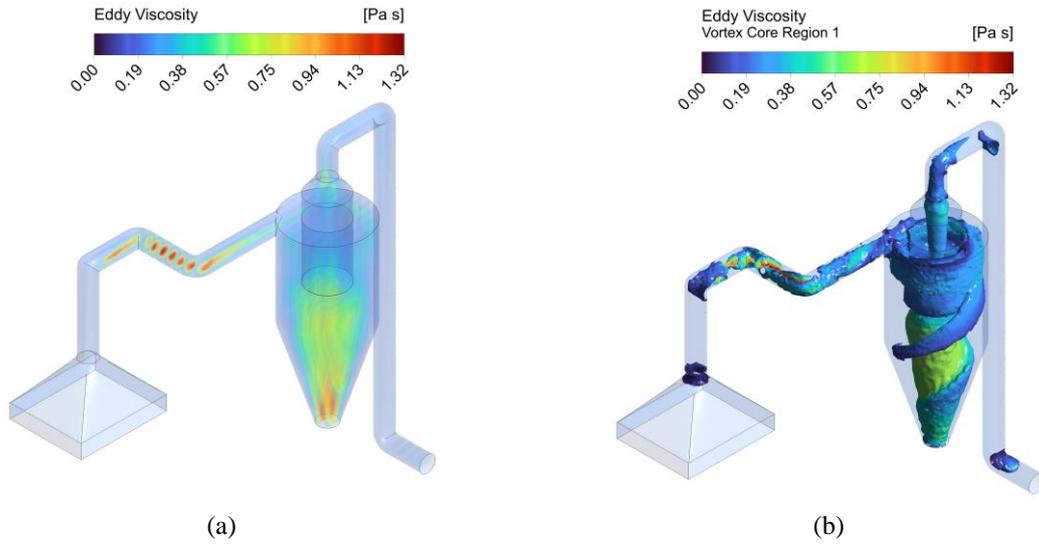


Figura 34. Viscosidad turbulenta del aire: (a) renderizado de volumen y (b) vortex core.

4.4.4 Predicción de la trayectoria de los residuos

En la Figura 35 se presenta la predicción de la trayectoria que tomarían los residuos del cacao al entrar y salir del equipo, como se observa los residuos se desplazan por el remolino generado por el ventilador en un tiempo de casi 0.35 s.

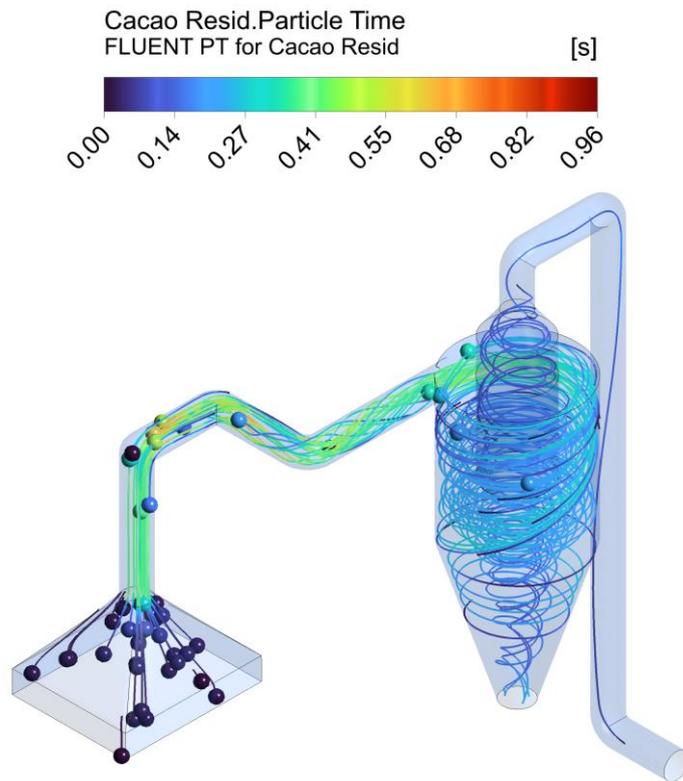


Figura 35. Trayectoria de los residuos.

4.4.5 Comparación de los resultados

Con los datos conseguidos de la simulación numérica se realiza una tabla comparativa para así contrarrestarlos con los obtenidos de forma teórica, con un margen de error menor al 10 %, tal como se aprecia en la Tabla 16.

Tabla 16. Comparación de resultados.

Variables	Resultados		Porcentaje de error
	Teórico	Simulación	
Velocidad de transporte	15 [m/s]	15.5 [m/s]	3.23 %
Caída de presión en el equipo	1284.92 [Pa]	1195.46 [Pa]	6.96 %

El error relativo de ambas variables es menor al margen de error establecido, con lo que se puede validar que el equipo está diseñado correctamente.

4.5 Análisis financiero

Con el diseño ya establecido es necesario indicar los valores de distribuidores e importadores de la materia prima que sea necesaria para la implementación del equipo.

4.1.9 Costos de materia prima

En la Tabla 17 se especifican los materiales necesarios para la construcción del separador ciclónico

Tabla 17. Costos de la materia prima.

Producto	Cantidad	Costo unitario [\$]	Costo total [\$]
Plancha de acero inoxidable AISI 304	4	75	300
Tubería circular 100 x 6000 mm	2	14	28
Tubo cuadrado	1	12	12
	Total		340

4.1.10 Costos indirectos para la fabricación

En la Tabla 18 se señalan los valores de los insumos o consumibles que se necesitan indirectamente para el proceso de construcción del equipo.

Tabla 18. Costos indirectos de fabricación.

Producto	Cantidad	Precio unitario [\\$]	Precio total [\\$]
Electrodos	3	3.55	10.65
Pernos	100	0.06	6
Pintura	3	14.6	43.80
Tijeras cortadoras de planchas	1	14.7	14.70
Dobladora de tol	4	18	72
Ventilador	1	256	256
Codos de acero inoxidable	6	12	72
	Total		475.15

4.1.11 Costos mano de obra

De acuerdo con los valores establecidos para el SBU, se determinó un valor mínimo de 450 USD en una jornada de 8 horas, con lo que se establecieron los costos de mano de obra según la Tabla 19.

Tabla 19. Costos por mano de obra.

Responsable	Tiempo promedio [h]	Precio por hora [\\$]	Costo total [\\$]
Diseñador	16	7	112
Soldador	24	6.5	156
Operador	36	4	144
Pintor	2	5	10
	Total		422

4.1.12 Costos indirectos

En la Tabla 20 se presenta un valor aproximado de los costos indirectos:

Tabla 20. Costos de los servicios básicos.

Aspectos	Tiempo [h]	Precio [\$]
Luz, agua, entre otros	15	33.50

4.1.13 Costos totales

Se resume los costos de toda la implementación adicionando un 20 % del total por cualquier imprevisto en la construcción del equipo, como se visualiza en la Tabla 21.

Tabla 21. Costos totales.

Parámetros	Valor [\$]
Materia prima	340
Costos indirectos de fabricación	475.15
Costo de mano de obra	422
Costos indirectos	33.50
Total	1270.65
Costo por eventualidades	254.13
Costo total	1524.78

4.6 Análisis de rentabilidad

En este apartado se presentan los cálculos de los indicadores de viabilidad del equipo, para estimar el "payback" de la inversión.

4.6.1 Valor actual neto

La Tabla 22 contiene los valores del estado financiero de la empresa, los cuales permitirán evaluar la rentabilidad del equipo mediante los flujos de caja.

Tabla 22. VAN del proyecto.

Año	Ingresos [\$]	Egresos [\$]	FNC [\$]	Denominador	VA [\$]
1	2533.70	1237.32	1296.37	1.104	1174.36
2	1908.85	1126.57	782.28	1.219	641.95
3	2290.62	1351.89	938.73	1.345	697.84
4	3206.87	1802.52	1404.35	1.485	945.71
5	2787.07	2163.02	624.05	1.639	380.69
Total					3840.54

4.6.2 Tasa interna de retorno

La Tabla 23 muestra el valor de la TIR cabe destacar que se tomó una tasa de interés activa efectiva del 10.13 %, valor que fue obtenido de una base del Banco Central del Ecuador.

Tabla 23. TIR del proyecto.

Inversión	-1.525
1	1296.37
2	782.28
3	938.73
4	1404.35
5	624.05
TIR	65 %

El valor del TIR es mayor que el TMAR con lo cual el proyecto es rentable.

4.6.3 Relación costo - beneficio

En la Tabla 24 se presenta los valores de los costos y beneficios del proyecto

Tabla 24. B/C del proyecto.

Año	Ingresos [\$]	Egresos [\$]	VAI	VAC
0		1525		1525
1	2533.70	1237.32	2295.22	1120.87
2	1908.85	1126.57	1566.43	924.48
3	2290.62	1351.89	1702.80	1004.97
4	3206.87	1802.52	2159.54	1213.84
5	2787.07	2163.02	1700.20	1319.51
		Sumatoria	9424.20	7108.66

4.6.4 Periodo de recuperación de la inversión

En la Tabla 25 se muestra un valor estimado del periodo de recuperación del capital invertido en el proyecto.

Tabla 25. PRI del proyecto.

Año	Ingresos [\$]	Egresos [\$]	FNC	FNC acumulado
1	2533.70	1237.32	1296.37	1296.37
2	1908.85	1126.57	782.28	2078.65
3	2290.62	1351.89	938.73	3017.39
4	3206.87	1802.52	1404.35	4421.74
5	2787.07	2163.02	624.05	5045.79

Con los valores de la tabla anterior se obtiene que el capital invertido se recuperaría en 1 año y 4 meses aproximadamente.

4.7 Conclusiones del capítulo

Después de analizar el costo total del equipo se pudo observar que el tiempo de recuperación es de 1 año y 4 meses, lo que señala que la implementación del separador ciclónico es favorable a la economía de "El Salinerito". Durante el proceso de simulación CFD-DPM se logró demostrar la eficiencia del equipo al separar residuos a la que se estudió su interacción con la presión, velocidad, temperatura, viscosidad y densidad.

CONCLUSIONES GENERALES

A través de esta investigación se logró establecer un equipo de remoción de residuos para la empresa "El Salinerito" el cual fue diseñado y validado en el software especializado ANSYS.

Mediante la observación del proceso productivo del chocolate se entendió a detalle cómo llega la materia prima con residuos que actualmente la empresa no puede remover de manera eficiente.

La recolección de datos permitió diseñar el equipo en función de las limitaciones en la empresa, puesto que, el valor de la temperatura ambiente determina las propiedades termodinámicas del aire. Además, con ello se adaptó los diseños ya establecidos con respecto al área donde se colocaría al separador ciclónico.

Con la simulación numérica se logra observar que debido a la trayectoria que deben seguir los residuos dentro del equipo, la velocidad llega a un máximo de 32.83 m/s, por otro lado, la caída de presión mínima es de -200.84 Pa, lo que indica que el ventilador si se puede encargar de producir la presión de vacío de este sistema.

Con el análisis financiero se obtuvo un valor bastante apegado a los precios del mercado actual de aproximadamente 1524.78 \$, que según el VAN, TIR y B/C calculados se puede concluir que el proyecto es factible, así como, se recuperaría la inversión en 1 año y 4 meses.

RECOMENDACIONES GENERALES

Es vital contar con buenos medios computacionales para así no incurrir en un gran gasto computacional, a la par que esto permite obtener resultados precisos con un margen de error mínimo.

Con la finalidad de tener al equipo en óptimas condiciones se sugiere estructurar un plan de mantenimiento para la inspección de los componentes internos del ventilador, así como, las líneas de transporte. Debido a que el ventilador requiere de controles como limpiar las aspas, lubricar el motor, revisión de conexiones eléctricas, entre otros.

Se recomienda implementar un sistema de control eléctrico, con instrumentos de medición electrónicos que reflejen el estado del proceso y analice las variables que intervienen en la marcha del equipo.

Diseñar un sistema mecánico de paro de emergencia en el equipo para evitar eventualidades y detenerlo en caso de que las pepas de cacao fueran absorbidas en lugar de las impurezas.

Se sugiere capacitar al personal para que pueda entender el principio de funcionamiento del equipo, así como, usarlo para mejorar el rendimiento de los procesos productivos en la empresa.

LISTA DE REFERENCIAS

- [1] A. E. Salous, J. J. M. García, J. A. G. Vargas, y F. R. M. Alcivar, “Mejoramiento de la calidad del cultivo de cacao en Ecuador”, *Rev. Venez. Gerenc.*, vol. 25, núm. 3, Art. núm. 3, ago. 2020, doi: 10.37960/rvg.v25i3.33375.
- [2] R. J. Liendo S, “Procesamiento del cacao para la fabricación de chocolate y sus subproductos”, *Rev. Difus. Tecnol. Agríc. Pecu. Pesq. Acuícola*, 2005, Consultado: el 19 de marzo de 2023. [En línea]. Disponible en: http://www.ceniap.gov.ve/pbd/RevistasTecnicas/inia_divulga/numero%206/liendo_r.pdf
- [3] O. Kitamura y M. Yamamoto, “Proposal of a Reynolds Stress Model for Gas-Particle Turbulent Flows and its Application to Cyclone Separators”, en *Engineering Turbulence Modelling and Experiments 4*, W. Rodi y D. Laurence, Eds., Oxford: Elsevier Science Ltd, 1999, pp. 893–902. doi: 10.1016/B978-008043328-8/50086-2.
- [4] O. J. McCarthy, “Plant and Equipment | Centrifuges and Separators: Applications in the Dairy Industry”, en *Encyclopedia of Dairy Sciences (Second Edition)*, J. W. Fuquay, Ed., San Diego: Academic Press, 2011, pp. 175–183. doi: 10.1016/B978-0-12-374407-4.00463-5.
- [5] L. X. Zhou y S. L. Soo, “Gas—solid flow and collection of solids in a cyclone separator”, *Powder Technol.*, vol. 63, núm. 1, pp. 45–53, oct. 1990, doi: 10.1016/0032-5910(90)80006-K.
- [6] W. L. Heumann, “Cyclone Separators: A Family Affair”, *Chem. Eng.*, vol. 98, núm. 6, p. 118, 1991.
- [7] H. Yoshida, A. Sugitate, K. Fukui, E. Shinoda, y J. Ma, “Effect of inlet duct shape on particle separation performance of cyclone separator”, *J. Chem. Eng. Jpn.*, vol. 33, núm. 2, pp. 273–276, 2000, doi: 10.1252/jcej.33.273.
- [8] T. Itoh, F. Inoue, y M. Osakabe, “Improvement of Separation Efficiency at Low Velocity Region of Liquid Cyclone Separator - Effect of Separator Size”, *Mar. Eng.*, vol. 46, núm. 5, pp. 763–768, 2011, doi: 10.5988/jime.46.763.
- [9] E. Yohana, M. Tauviquirrahman, A. R. Putra, A. E. Diana, y K.-H. Choi, “Numerical analysis on the effect of the vortex finder diameter and the length of vortex limiter on the flow field and particle collection in a new cyclone separator”, *Cogent Eng.*, vol. 5, núm. 1, p. 1562319, ene. 2018, doi: 10.1080/23311916.2018.1562319.
- [10] S. Li, H. Yang, Y. Wu, y H. Zhang, “An improved cyclone pressure drop model at high inlet solid concentrations”, *Chem. Eng. Technol.*, vol. 34, núm. 9, pp. 1507–1513, sep. 2011, doi: <https://doi.org/10.1002/ceat.201100087>.
- [11] S.-Y. Noh *et al.*, “Performance improvement of a cyclone separator using multiple subsidiary cyclones”, *Powder Technol.*, vol. 338, pp. 145–152, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2018.07.015>.

- [12] H. Liang, C. Huang, B. Zhao, H. Song, y X. Jiang, “Numerical simulation and performance evaluation of cyclone separator with built-in material for sand removal in gas well”, *Asia-Pac. J. Chem. Eng.*, vol. 16, núm. 4, p. e2648, jul. 2021, doi: <https://doi.org/10.1002/apj.2648>.
- [13] S. Dong *et al.*, “Numerical study of mean mechanical energy loss in a gas cyclone”, *Powder Technol.*, vol. 406, p. 117584, jul. 2022, doi: 10.1016/j.powtec.2022.117584.
- [14] W. Li, Z. Huang, y G. Li, “Improvement of the cyclone separator performance by the wedge-shaped roof: A multi-objective optimization study”, *Chem. Eng. Sci.*, vol. 268, p. 118404, mar. 2023, doi: 10.1016/j.ces.2022.118404.
- [15] “Ecuador avanza en tecnología para reconocer origen del cacao”, el 15 de diciembre de 2021. <https://www.larepublica.ec/blog/2021/12/15/ecuador-avanza-en-sistemas-tecnologicos-para-reconocer-el-origen-del-cacao/> (consultado el 29 de enero de 2023).
- [16] “El Cacao ecuatoriano Su historia empezó antes del siglo XV”. <http://www.revistalideres.ec/lideres/cacao-ecuatoriano-historia-empezo-siglo.html> (consultado el 28 de enero de 2023).
- [17] “El cacao en la Costa ecuatoriana: estudio de su dimensión cultural y económica”, *Estud. Gest. Rev. Int. Adm.*, pp. 59–83, jun. 2020, doi: 10.32719/25506641.2020.7.3.
- [18] “Ecuador se posiciona como ‘cuna de origen’ del cacao en el mundo | SELA”. <http://www.sela.org/es/prensa/servicio-informativo/20220913/si/83391/ecuador> (consultado el 10 de marzo de 2023).
- [19] N. Paredes Andrade *et al.*, *Manual del cultivo de cacao sostenible para la Amazonía Ecuatoriana. N°125*. 2022. Consultado: el 13 de abril de 2023. [En línea]. Disponible en: <http://repositorio.iniap.gob.ec/handle/41000/5833>
- [20] “Cacao Móvil”. <https://cacaomovil.com/site/guide/diseno-y-establecimiento-del-cacao/17/seleccion-de-la-variedad-y-material-de-siembra> (consultado el 22 de marzo de 2023).
- [21] “Cacao Nacional en la Tierra del Cacao”, *República del Cacao*. <https://republicadelcacao.com/es/blogs/news/cacao-nacional-in-the-motherland-of-cacao> (consultado el 24 de marzo de 2023).
- [22] “Origen y cultivo de la planta del cacao | Observatorio del Cacao”. <http://www.observatoriodelcacao.com/origen/> (consultado el 29 de enero de 2023).
- [23] C. Cortés y A. Gil, “Modeling the gas and particle flow inside cyclone separators”, *Prog. Energy Combust. Sci.*, vol. 33, núm. 5, pp. 409–452, oct. 2007, doi: 10.1016/j.pecs.2007.02.001.
- [24] A. C. Hoffmann y L. E. Stein, *Gas Cyclones and Swirl Tubes: Principles, Design and Operation*, 2nd ed. en Chemistry and Materials Science (Springer-11644; ZDB-2-CMS). Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg Springer e-books, 2007.
- [25] “Separadores Ciclónicos | Ciclones Industriales | MCAT®”, *MCAT*. <https://mcat.com.mx/separadores-ciclonicos/> (consultado el 29 de marzo de 2023).

- [26] “Separadores Ciclónicos”, *GRUPO IBERMAQ*. <http://www.ibermaq.es/producto/separadores-ciclonicos/> (consultado el 30 de marzo de 2023).
- [27] rajibray, “Cyclone Separator - Pharmacy Gyan Principle Construction Working”, *Pharmacy Gyan*, el 24 de noviembre de 2021. <https://pharmacygyan.com/principle-and-construction-of-cyclone-separator/> (consultado el 30 de marzo de 2023).
- [28] “Cyclone Separator Working Principle (Dust Separator) Explained - saVRee”. <https://savree.com/en/encyclopedia/cyclone-separator-working-principle-dust-separator> (consultado el 31 de marzo de 2023).
- [29] R. E. Kirk, D. F. Othmer, y J. I. Kroschwitz, Eds., *Concise encyclopedia of chemical technology*, 4th ed., [Paperback ed.]. New York: Wiley, 2001.
- [30] H. Aguilar Morales, “Efectos de la variación de la longitud del cono en la operación de un separador tipo ciclon”, jun. 2009, Consultado: el 1 de abril de 2023. [En línea]. Disponible en: <http://tesis.ipn.mx:8080/xmlui/handle/123456789/3918>
- [31] H. Environmental, “High-Efficiency Cyclone Features | Heumann Environmental”, el 18 de junio de 2016. <https://www.heumannenviro.com/high-efficiency-cyclone-features/> (consultado el 3 de abril de 2023).
- [32] W. Peng *et al.*, “Flowpattern in Reverse-Flow Centrifugal Separators”, *Powder Technol.*, vol. 127, pp. 212–222, nov. 2002, doi: 10.1016/S0032-5910(02)00148-1.
- [33] *2020 ASHRAE handbook: HVAC systems and equipment.*, SI edition. Atlanta: Ashrae, 2020.
- [34] C. A. Echeverri Londoño, “Diseño óptimo de ciclones”, *Rev. Ing. Univ. Medellín*, vol. 5, núm. 9, pp. 123–139, jul. 2006.
- [35] “Cyclone Separators Selection Guide: Types, Features, Applications | GlobalSpec”. https://www.globalspec.com/learnmore/manufacturing_process_equipment/air_quality/cyclone_separators (consultado el 21 de marzo de 2023).
- [36] D. Mills, *Pneumatic conveying design guide*, 3rd revised edition. Amsterdam Boston Heidelberg: Butterworth-Heinemann, an imprint of Elsevier, 2016.
- [37] O. Olivera y M. de Nazaret, “Diseño paramétrico de un compresor”, 2015. Consultado: el 21 de marzo de 2023. [En línea]. Disponible en: <http://tesis.ipn.mx/xmlui/handle/123456789/13532>
- [38] D. McGlinchey, Ed., *Bulk solids handling: equipment selection and operation*. Oxford; Ames, Iowa: Blackwell Pub, 2008.
- [39] C. Mataix, *Mecánica de fluidos y máquinas hidráulicas*, 2ª ed. (amp. y Puesta al día, rev.Redactada en el SI). México: Oxford Univ. Press; AlfaOmega, 2004.

- [40] S. R. Torres Jaramillo, “Diseño y construcción de un prototipo de una estación de limpieza mecánica mediante el proceso de sandblasting utilizando granalla mineral en ciclo continuo para una unidad de mantenimiento y transporte”, Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE. Carrera de Ingeniería Mecánica, 2013. Consultado: el 3 de mayo de 2023. [En línea]. Disponible en: <http://repositorio.espe.edu.ec/jspui/handle/21000/7440>
- [41] J. A. Alcoser Allauca, “Diseño y simulación de un sistema de transporte por vacío para la evacuación de desechos en el proceso de prensado de revestimientos cerámicos”, sep. 2021, Consultado: el 28 de abril de 2023. [En línea]. Disponible en: <http://dspace.espe.edu.ec/handle/123456789/17768>
- [42] C. I. Paulo, E. Borsa, y M. R. Barbosa, “Non-linear optimisation and energy integration of a particles separation–classification process”, *Int. J. Sustain. Eng.*, vol. 11, núm. 4, pp. 240–249, jul. 2018, doi: 10.1080/19397038.2017.1387185.
- [43] C. D. Cooper y F. C. Alley, *Air pollution control: a design approach*, 4th ed. Long Grove, Ill: Waveland Press, 2011.
- [44] E. Salvador, *Manual práctico de ventilación*, 2da ed. Barcelona – España: Editorial S&P, 2002.
- [45] C. E. Leon Ramos, “Diseño de secadora de cacao tipo discontinua transversal.”, Espol, 2015. Consultado: el 13 de mayo de 2023. [En línea]. Disponible en: <http://www.dspace.espol.edu.ec/handle/123456789/34988>
- [46] “Catalogos DIPAC”, *DIPAC*. <https://dipacmanta.com/catalogos-online/> (consultado el 15 de mayo de 2023).
- [47] I. Mancha de Pablos, “Análisis aerodinámico y ‘Recovery’ de un cohete sólido”, nov. 2019, doi: 10/36496.
- [48] D. A. Pham, Y.-I. Lim, H. Jee, K. Min, Y. Jung, y S.-K. Lee, “Effect of ship tilting on amine absorber with structured-packing for CO₂ removal from natural gas”, en *Computer Aided Chemical Engineering*, M. R. Eden, J. D. Siirola, y G. P. Towler, Eds., Elsevier, 2014, pp. 405–410. doi: 10.1016/B978-0-444-63433-7.50052-3.
- [49] M. B. Alberto, F. O. Jesús Manuel, y M.-F. Andrés, “Numerical methodology for the CFD simulation of diaphragm volumetric pumps”, *Int. J. Mech. Sci.*, vol. 150, pp. 322–336, ene. 2019, doi: 10.1016/j.ijmecsci.2018.10.039.
- [50] E. T. Dávalos Fassler, “Modelo numérico CFD del túnel de carga, tubería a presión y distribuidores utilizando el paquete computacional ANSYS Fluent. Caso de aplicación Proyecto Hidroeléctrico Sopladora”, EPN, 2020. Consultado: el 8 de junio de 2023. [En línea]. Disponible en: <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/20657>
- [51] X. Li y J. Tu, “Evaluation of the eddy viscosity turbulence models for the simulation of convection–radiation coupled heat transfer in indoor environment”, *Energy Build.*, vol. 184, pp. 8–18, feb. 2019, doi: 10.1016/j.enbuild.2018.11.043.
- [52] ANSYS, *Fluent User’s Guide*. Canonsburg: ANSYS, Inc., 2023.

- [53] S. Pandey y L. S. Brar, “Performance analysis of cyclone separators with bulged conical segment using large-eddy simulation”, *Powder Technol.*, vol. 425, p. 118584, jul. 2023, doi: 10.1016/j.powtec.2023.118584.
- [54] R. L. Mott, J. A. Untener, J. E. Murrieta Murrieta, y R. Hernández Cárdenas, *Mecánica de fluidos*, 7a ed. México D.F.: Pearson, 2015.
- [55] K. Gok, S. Inal, A. Gok, y E. Gulbandilar, “Comparison of effects of different screw materials in the triangle fixation of femoral neck fractures”, *J. Mater. Sci. Mater. Med.*, vol. 28, abr. 2017, doi: 10.1007/s10856-017-5890-y.
- [56] “Programa Selección Fanware | Casals”. <https://www.casals.com/es/programa-seleccion/> (consultado el 5 de mayo de 2023).
- [57] Y. A. Çengel y A. J. Ghajar, *Heat and mass transfer: fundamentals & applications*, Sixth edition. New York, NY: McGraw-Hill Education, 2020.

ANEXOS

Anexo 1. Factores de dimensionamiento de los separadores ciclónicos convencionales [34].

Dimensión	Nomenclatura	Modelo de ciclón			
		Lapple	Swift	Pheterson – whitby	Zenz
Altura de entrada	a/D_c	0.5	0.5	0.583	0.5
Ancho de entrada	b/D_c	0.25	0.25	0.208	0.25
Altura de salida	S/D_c	0.625	0.6	0.583	0.75
Diámetro de salida	D_o/D_c	0.5	0.5	0.5	0.5
Altura sección cilíndrica	h/D_c	2.0	1.75	1.33	2.0
Altura sección cónica	z/D_c	2.0	2.0	1.837	2.0
Altura total del ciclón	H/D_c	4.0	3.75	3.17	4.0
Diámetro de descarga	B/D_c	0.25	0.4	0.5	0.25
Factor de configuración	G	402.88	381.79	342.29	425.41
Número de cabezas de velocidad	N_H	8.0	8.0	7.78	8.0
Número de vórtices	N_V	6.0	5.5	3.9	6.0

Anexo 2. Factores de dimensionamiento de los separadores ciclónicos de alta eficiencia [34].

Dimensión	Nomenclatura	Modelo de ciclón		
		Stairmand	Swift	Echeverri
Altura de entrada	a/D_c	0.5	0.44	0.5
Ancho de entrada	b/D_c	0.2	0.21	0.2
Altura de salida	S/D_c	0.5	0.5	0.625
Diámetro de salida	D_o/D_c	0.5	0.4	0.5
Altura sección cilíndrica	h/D_c	1.5	1.4	1.5
Altura sección cónica	z/D_c	2.5	2.5	2.5
Altura total del ciclón	H/D_c	4.0	3.9	4.0
Diámetro de descarga	B/D_c	0.375	0.4	0.375
Factor de configuración	G	551.22	698.65	585.71
Número de cabezas de velocidad	N_H	6.4	9.24	6.4
Número de vórtices	N_V	5.5	6	5.5

Anexo 3. Factores de dimensionamiento de los separadores ciclónicos de alta capacidad [34].

Dimensión	Nomenclatura	Modelo de ciclón	
		Stairmand	Swift
Ancho de entrada	b/D_c	0.375	0.35
Altura de salida	S/D_c	0.875	0.85
Diámetro de salida	D_o/D_c	0.75	0.75
Altura sección cilíndrica	h/D_c	1.5	1.7
Altura sección cónica	z/D_c	2.5	2.0
Altura total del ciclón	H/D_c	4.0	3.7
Diámetro de descarga	B/D_c	0.375	0.4
Número de cabezas de velocidad	N_H	8	7.96
Número de vórtices	N_V	3.7	3.4

Anexo 4. Rango de eficiencia de remoción para los ciclones de entrada tangencial [34].

Tipos de ciclones	Eficiencia de remoción (%)		
	PST	PM ₁₀	PM _{2.5}
Convencionales	70 – 90	30 – 90	0 - 40
Alta eficiencia	80 – 99	60 – 95	20 - 70
Alta capacidad	80 – 99	10 – 40	0 - 10

Anexo 5. Catálogo de tuberías de acero cédula 40 [54].

TABLA F.1 Cédula 40										
Tamaño nominal de la tubería		Diámetro exterior		Espesor de pared		Diámetro interior			Área de flujo	
NPS (in)	DN (mm)	(in)	(mm)	(in)	(mm)	(in)	(ft)	(mm)	(ft ²)	(m ²)
1/8	6	0.405	10.3	0.068	1.73	0.269	0.0224	6.8	0.000 394	3.660 × 10 ⁻⁵
1/4	8	0.540	13.7	0.088	2.24	0.364	0.0303	9.2	0.000 723	6.717 × 10 ⁻⁵
3/8	10	0.675	17.1	0.091	2.31	0.493	0.0411	12.5	0.001 33	1.236 × 10 ⁻⁴
1/2	15	0.840	21.3	0.109	2.77	0.622	0.0518	15.8	0.002 11	1.960 × 10 ⁻⁴
3/4	20	1.050	26.7	0.113	2.87	0.824	0.0687	20.9	0.003 70	3.437 × 10 ⁻⁴
1	25	1.315	33.4	0.133	3.38	1.049	0.0874	26.6	0.006 00	5.574 × 10 ⁻⁴
1 1/4	32	1.660	42.2	0.140	3.56	1.380	0.1150	35.1	0.010 39	9.653 × 10 ⁻⁴
1 1/2	40	1.900	48.3	0.145	3.68	1.610	0.1342	40.9	0.014 14	1.314 × 10 ⁻³
2	50	2.375	60.3	0.154	3.91	2.067	0.1723	52.5	0.023 33	2.168 × 10 ⁻³
2 1/2	65	2.875	73.0	0.203	5.16	2.469	0.2058	62.7	0.033 26	3.090 × 10 ⁻³
3	80	3.500	88.9	0.216	5.49	3.068	0.2557	77.9	0.051 32	4.768 × 10 ⁻³
3 1/2	90	4.000	101.6	0.226	5.74	3.548	0.2957	90.1	0.068 68	6.381 × 10 ⁻³
4	100	4.500	114.3	0.237	6.02	4.026	0.3355	102.3	0.088 40	8.213 × 10 ⁻³
5	125	5.563	141.3	0.258	6.55	5.047	0.4206	128.2	0.139 0	1.291 × 10 ⁻²
6	150	6.625	168.3	0.280	7.11	6.065	0.5054	154.1	0.200 6	1.864 × 10 ⁻²
8	200	8.625	219.1	0.322	8.18	7.981	0.6651	202.7	0.347 2	3.226 × 10 ⁻²
10	250	10.750	273.1	0.365	9.27	10.020	0.8350	254.5	0.547 9	5.090 × 10 ⁻²
12	300	12.750	323.9	0.406	10.31	11.938	0.9948	303.2	0.777 1	7.219 × 10 ⁻²
14	350	14.000	355.6	0.437	11.10	13.126	1.094	333.4	0.939 6	8.729 × 10 ⁻²
16	400	16.000	406.4	0.500	12.70	15.000	1.250	381.0	1.227	0.1140
18	450	18.000	457.2	0.562	14.27	16.876	1.406	428.7	1.553	0.1443
20	500	20.000	508.0	0.593	15.06	18.814	1.568	477.9	1.931	0.1794
24	600	24.000	609.6	0.687	17.45	22.626	1.886	574.7	2.792	0.2594

Anexo 6. Catálogo de tuberías de acero galvanizado de DIPAC [46].

DIAMETRO		ESPESOR		PRESION/PRUEBA		PESO	
NOMINAL	EXTERIOR		e	pulg	kg/cm2	lb/pulg2	kg/mt
	mm	pulg	mm				
1/4"	13.70	0.54	2.24	0.08	49	700	0.63
3/8"	17.10	0.37	2.81	0.09	49	700	0.85
1/2"	21.30	0.84	2.77	0.10	49	700	1.27
3/4"	26.70	1.05	2.87	0.11	49	700	1.68
1"	33.40	1.31	3.38	0.13	49	700	2.50
1 1/4"	42.20	1.66	3.56	0.14	91	1300	3.38
1 1/2"	48.30	1.90	3.68	0.14	91	1300	4.05
2"	60.30	2.37	3.91	0.15	176	2500	5.44
2 1/2"	73.00	2.87	5.16	0.20	176	2500	8.62
3"	88.90	3.50	5.49	0.21	176	2500	11.29
4"	114.30	4.50	6.02	0.23	155	2210	16.07
5"	141.30	5.56	6.55	0.25	137	1950	21.78
6"	168.30	6.62	7.11	0.28	125	1780	28.26
8"	219.10	8.62	8.18	0.32	110	1570	42.53
10"	273.00	10.75	9.27	0.36	101	1430	60.29
12"	323.80	12.75	10.31	0.40	94	1340	79.65

Anexo 7. Rugosidad de la tubería [54].

TABLA 8.2 Rugosidad de la tubería —valores de diseño

Material	Rugosidad ϵ (m)	Rugosidad ϵ (ft)
Vidrio	Liso	Liso
Plástico	3.0×10^{-7}	1.0×10^{-6}
Tubo estirado; cobre, latón, acero	1.5×10^{-6}	5.0×10^{-6}
Acero, comercial o soldado	4.6×10^{-5}	1.5×10^{-4}
Hierro galvanizado	1.5×10^{-4}	5.0×10^{-4}
Hierro dúctil —revestido	1.2×10^{-4}	4.0×10^{-4}
Hierro dúctil —sin revestir	2.4×10^{-4}	8.0×10^{-4}
Concreto, bien hecho	1.2×10^{-4}	4.0×10^{-4}
Acero remachado	1.8×10^{-3}	6.0×10^{-3}

Anexo 8. Resistencia de accesorios expresada como la longitud equivalente en diámetros de tubería [54].

Tipo	Longitud equivalente en diámetros de tubería L_e/D
Válvula de globo —totalmente abierta	340
Válvula de ángulo —totalmente abierta	150
Válvula de compuerta —totalmente abierta	8
—abierta $\frac{3}{4}$	35
—abierta $\frac{1}{2}$	160
—abierta $\frac{1}{4}$	900
Válvula de retención —tipo oscilante	100
Válvula de retención —tipo bola	150
Válvula de mariposa —totalmente abierta, 2-8 in	45
—10-14 in	35
—16-24 in	25
Válvula de pie —tipo disco de vástago	420
Válvula de pie —tipo disco de bisagras	75
Codo estándar de 90°	30
Codo de 90° y radio largo	20
Codo de 90° para calle	50
Codo estándar de 45°	16
Codo de 45° para calle	26
Doble de retorno cerrado	50
Te estándar —con flujo por la línea principal	20
—con flujo por la ramificación	60

Anexo 9. Factor de fricción para los accesorios [54].

TABLA 10.5 Factor de fricción en la zona de turbulencia completa para tubería de acero comercial, cédula 40, nueva y limpia

Tamaño nominal de la tubería		Factor de fricción, f_f	Tamaño nominal de la tubería		Factor de fricción, f_f
Estados Unidos (in)	Métrico (mm)		Estados Unidos (in)	Métrico (mm)	
½	DN 15	0.026	3, 3½	DN 80, DN 90	0.017
¾	DN 20	0.024	4	DN 100	0.016
1	DN 25	0.022	5, 6	DN 125, DN 150	0.015
1¼	DN 32	0.021	8	DN 200	0.014
1½	DN 40	0.020	10-14	DN 250 a DN 350	0.013
2	DN 50	0.019	16-22	DN 400 a DN 550	0.012
2½	DN 65	0.018	24-36	DN 600 a DN 900	0.011

Anexo 10. Espectro de calidad de malla para métricas en fluidos [55].

Espectro de calidad de malla para la métrica: oblicuidad (skewness)



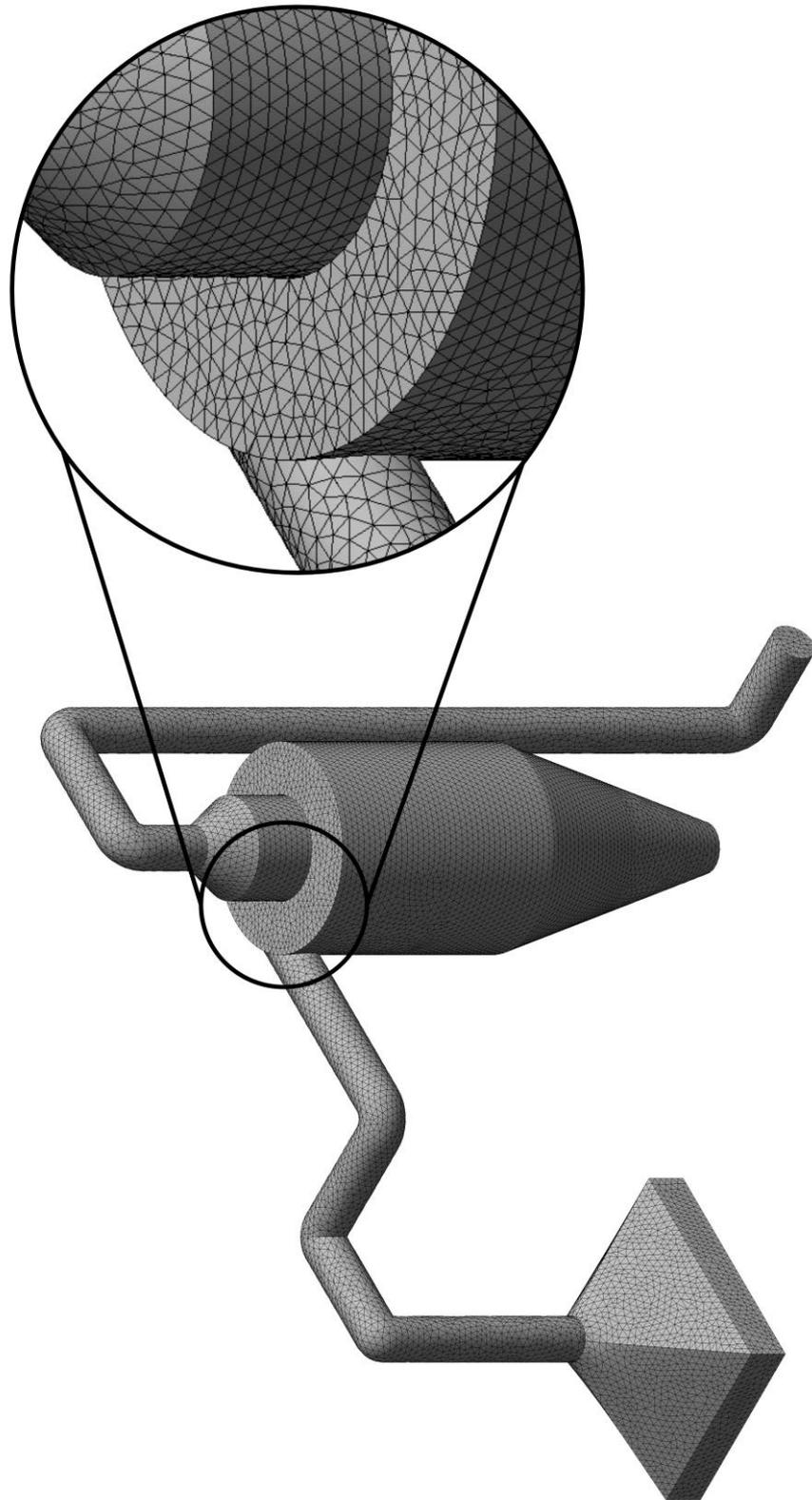
Excelente	Muy buena	Buena	Aceptable	Mala	Inaceptable
0-0.25	0.25-0.50	0.50-0.80	0.80-0.94	0.95-0.97	0.98-1.00

Espectro de calidad de malla para la métrica: ortogonal (orthogonal quality)



Inaceptable	Mala	Aceptable	Buena	Muy buena	Excelente
0-0.001	0.001-0.14	0.15-0.20	0.20-0.69	0.70-0.95	0.95-1.00

Anexo 11. Mallado del equipo removedor de residuos.



Anexo 12. Selección del ventilador en un catálogo online [56].

Selección avanzada

Datos caudal/presión

Caudal (m³/h)

540

Presión (Pa)

1284.72

Datos ambientales

Familia ventilador

Tolerancia caudal

5%

Características Ventilador

Serie ventilador

Selección por presión

Selección por caudal

Selección por caudal

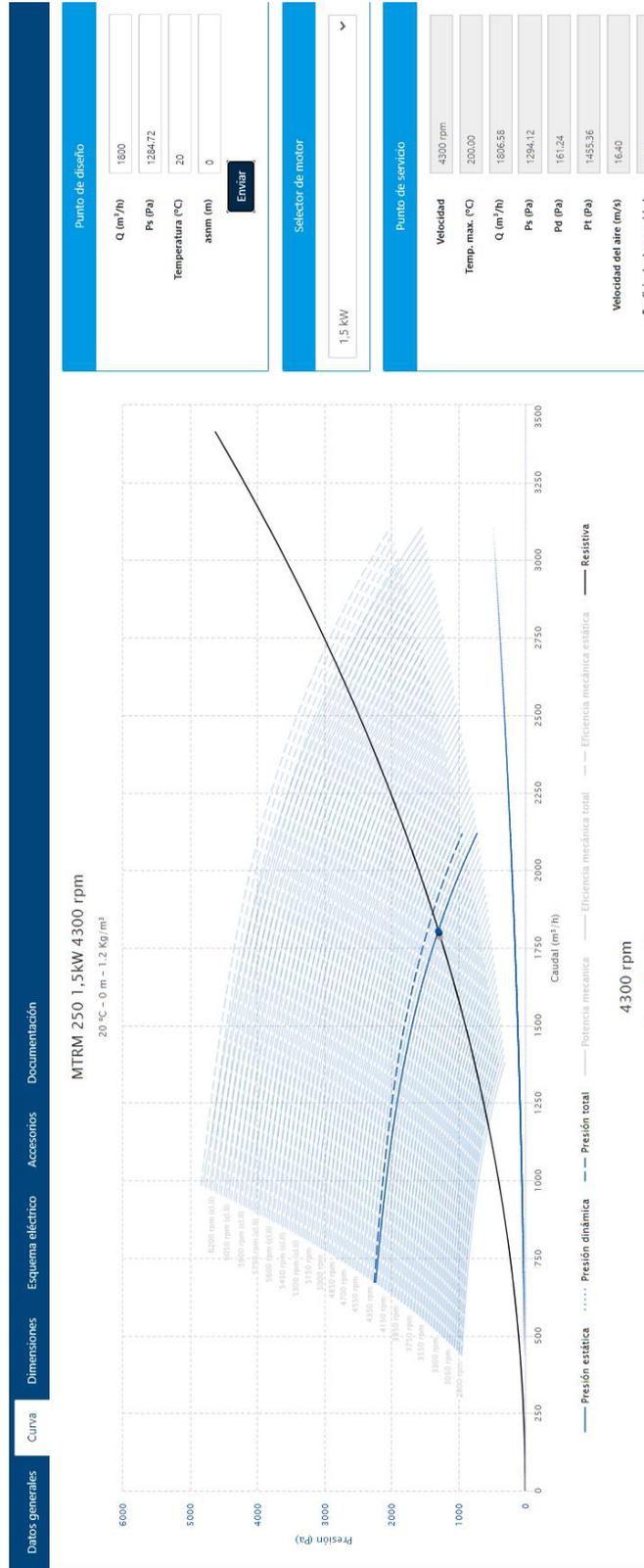
Reiniciar

Q Buscar

Ventiladores

Código	Nombre	Caudal (m ³ /h)	Presión (Pa)	Ángulo / RPM	Potencia (kW)	Eficiencia	Tipo de eficiencia
MTRM 220 0.37kW 4000 rpm		544.06	1304.13	4000 rpm	0.37	60.3	Mecánica total
MTRM 250 0.37kW 3300 rpm		543.92	1303.45	3300 rpm	0.37	57.6	Mecánica total
MTRU 250 0.37kW 3400		541.45	1291.62	3400	0.37	55.25	Mecánica total
AATVM 350 0.37kW 2300		542.02	1294.35	2300	0.37	67.48	Mecánica total
AATVM 400 0.55kW 2000		547.61	1321.18	2000	0.55	63.65	Mecánica total
AATZA 500 0.55kW 1900		566.96	1416.18	1900	0.55	48.72	Mecánica total
MTRM 220 ATEX 0.37kW 4000 rpm		544.06	1304.13	4000 rpm	0.37	60.3	Mecánica total

Anexo 13. Curva característica del ventilador centrifugo [56].



Anexo 14. Propiedades físicas de la geometría del equipo.

onlyciclono2.iam ([Primary]) iProperties

General Summary Project Status Custom Save Physical

Material

Density: 8,000 g/cm³ Requested Accuracy: Low

General Properties

Include Cosmetic Welds Include QTY Overrides

Center of Gravity

Mass	28,550 kg (Relative Error)	X	-3,340 mm (Relative Error)
Area	4791408,031 mm ²	Y	534,576 mm (Relative Error)
Volume	3568807,730 mm ³	Z	9,542 mm (Relative Error)

Inertial Properties

Principal Global Center of Gravity

Principal Moments

I1	4343984,162 kg·m ²	I2	1361921,147 kg·m ²	I3	4231569,141 kg·m ²
----	-------------------------------	----	-------------------------------	----	-------------------------------

Rotation to Principal

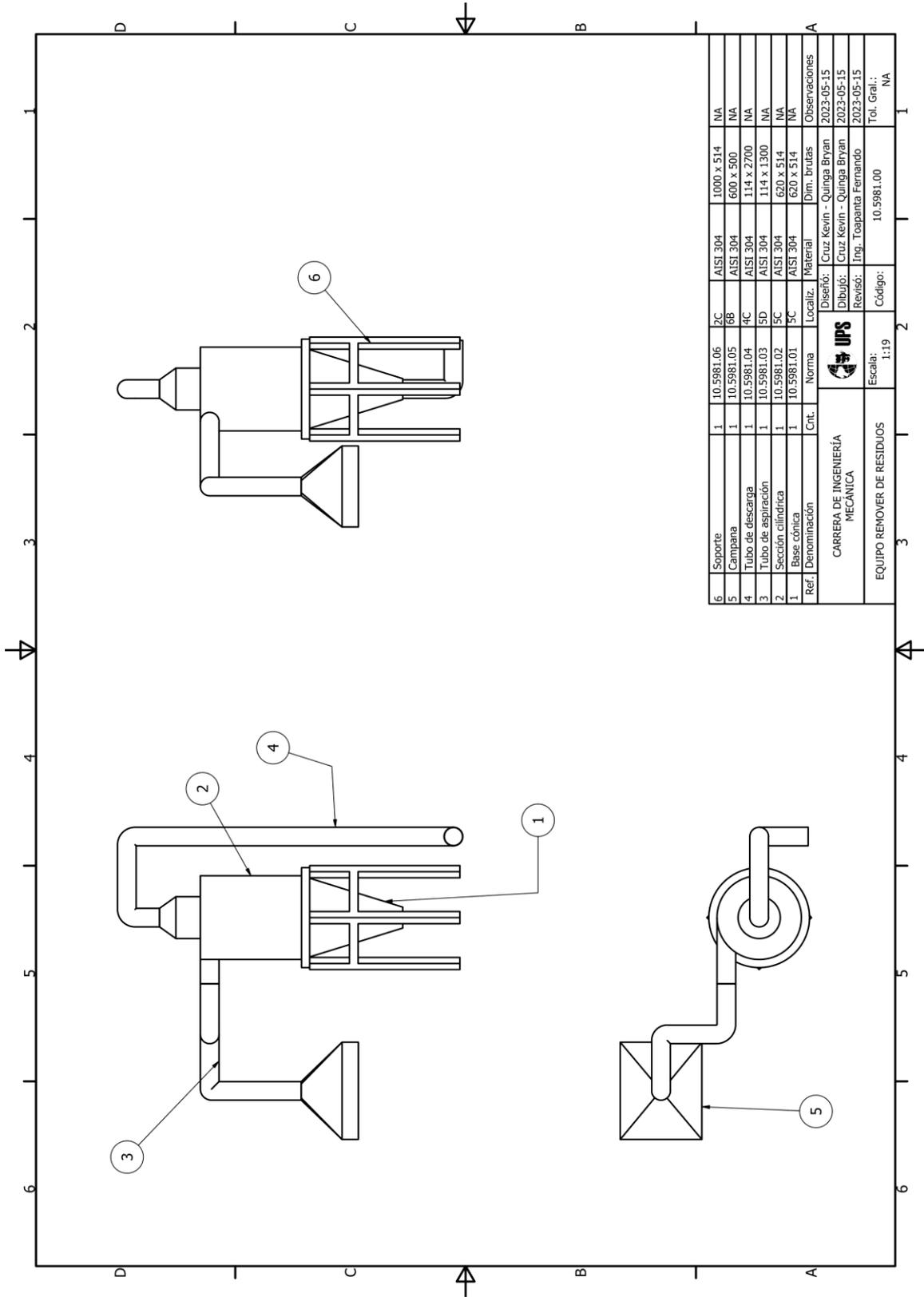
Rx	-2,66 deg (Relative Error)	Ry	34,27 deg (Relative Error)	Rz	-1,53 deg (Relative Error)
----	----------------------------	----	----------------------------	----	----------------------------

Close Cancel Aplicar

Anexo 15. Propiedades termodinámicas del aire a 1 atm [57].

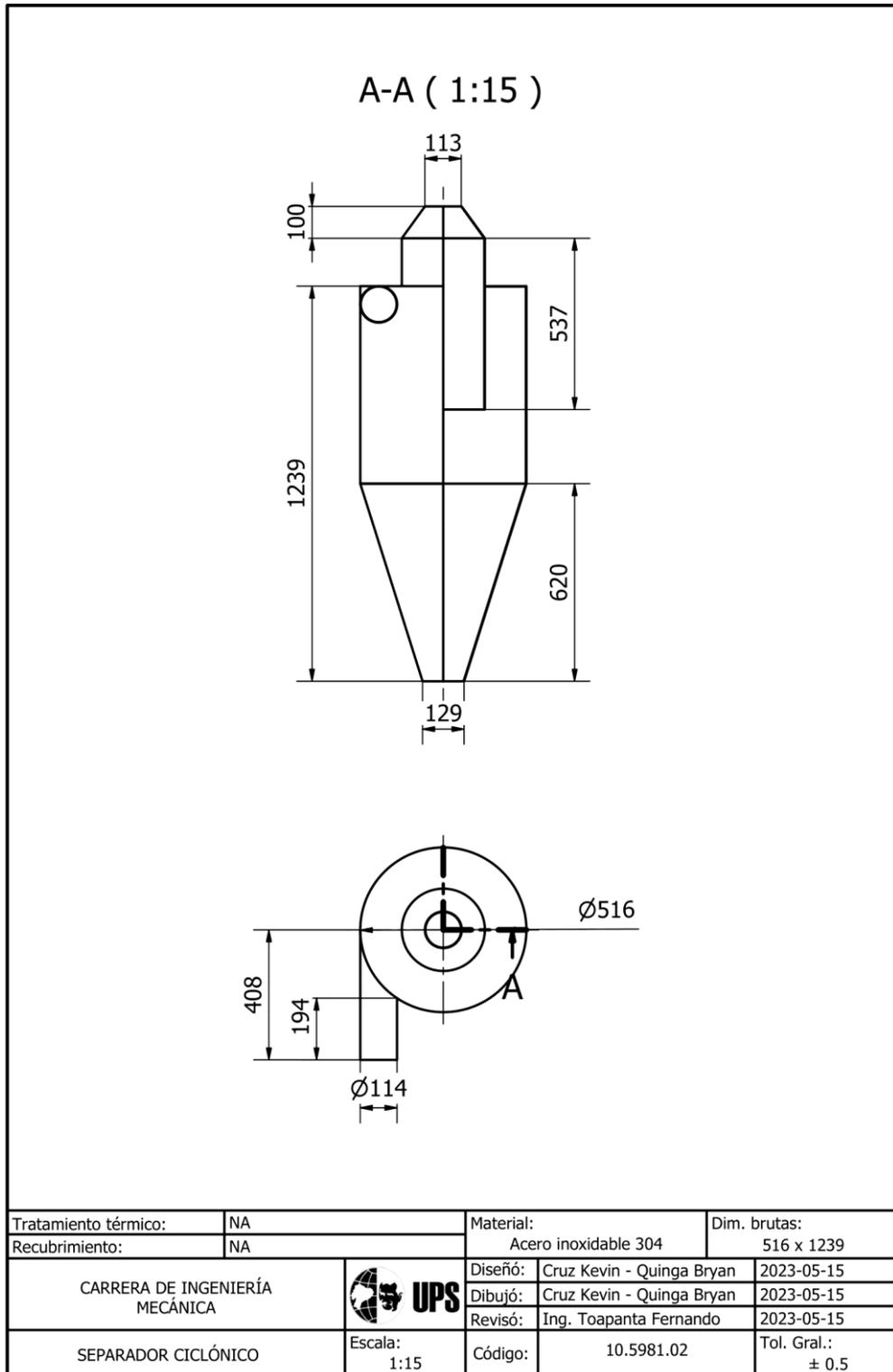
TABLE A-15							
Properties of air at 1 atm pressure							
Temp. <i>T</i> , °C	Density ρ , kg/m ³	Specific Heat c_p , J/kg·K	Thermal Conductivity k , W/m·K	Thermal Diffusivity α , m ² /s	Dynamic Viscosity μ , kg/m·s	Kinematic Viscosity ν , m ² /s	Prandtl Number Pr
-150	2.866	983	0.01171	4.158×10^{-6}	8.636×10^{-6}	3.013×10^{-6}	0.7246
-100	2.038	966	0.01582	8.036×10^{-6}	1.189×10^{-5}	5.837×10^{-6}	0.7263
-50	1.582	999	0.01979	1.252×10^{-5}	1.474×10^{-5}	9.319×10^{-6}	0.7440
-40	1.514	1002	0.02057	1.356×10^{-5}	1.527×10^{-5}	1.008×10^{-5}	0.7436
-30	1.451	1004	0.02134	1.465×10^{-5}	1.579×10^{-5}	1.087×10^{-5}	0.7425
-20	1.394	1005	0.02211	1.578×10^{-5}	1.630×10^{-5}	1.169×10^{-5}	0.7408
-10	1.341	1006	0.02288	1.696×10^{-5}	1.680×10^{-5}	1.252×10^{-5}	0.7387
0	1.292	1006	0.02364	1.818×10^{-5}	1.729×10^{-5}	1.338×10^{-5}	0.7362
5	1.269	1006	0.02401	1.880×10^{-5}	1.754×10^{-5}	1.382×10^{-5}	0.7350
10	1.246	1006	0.02439	1.944×10^{-5}	1.778×10^{-5}	1.426×10^{-5}	0.7336
15	1.225	1007	0.02476	2.009×10^{-5}	1.802×10^{-5}	1.470×10^{-5}	0.7323
20	1.204	1007	0.02514	2.074×10^{-5}	1.825×10^{-5}	1.516×10^{-5}	0.7309
25	1.184	1007	0.02551	2.141×10^{-5}	1.849×10^{-5}	1.562×10^{-5}	0.7296
30	1.164	1007	0.02588	2.208×10^{-5}	1.872×10^{-5}	1.608×10^{-5}	0.7282
35	1.145	1007	0.02625	2.277×10^{-5}	1.895×10^{-5}	1.655×10^{-5}	0.7268
40	1.127	1007	0.02662	2.346×10^{-5}	1.918×10^{-5}	1.702×10^{-5}	0.7255
45	1.109	1007	0.02699	2.416×10^{-5}	1.941×10^{-5}	1.750×10^{-5}	0.7241
50	1.092	1007	0.02735	2.487×10^{-5}	1.963×10^{-5}	1.798×10^{-5}	0.7228
60	1.059	1007	0.02808	2.632×10^{-5}	2.008×10^{-5}	1.896×10^{-5}	0.7202
70	1.028	1007	0.02881	2.780×10^{-5}	2.052×10^{-5}	1.995×10^{-5}	0.7177
80	0.9994	1008	0.02953	2.931×10^{-5}	2.096×10^{-5}	2.097×10^{-5}	0.7154
90	0.9718	1008	0.03024	3.086×10^{-5}	2.139×10^{-5}	2.201×10^{-5}	0.7132
100	0.9458	1009	0.03095	3.243×10^{-5}	2.181×10^{-5}	2.306×10^{-5}	0.7111
120	0.8977	1011	0.03235	3.565×10^{-5}	2.264×10^{-5}	2.522×10^{-5}	0.7073
140	0.8542	1013	0.03374	3.898×10^{-5}	2.345×10^{-5}	2.745×10^{-5}	0.7041
160	0.8148	1016	0.03511	4.241×10^{-5}	2.420×10^{-5}	2.975×10^{-5}	0.7014
180	0.7788	1019	0.03646	4.593×10^{-5}	2.504×10^{-5}	3.212×10^{-5}	0.6992
200	0.7459	1023	0.03779	4.954×10^{-5}	2.577×10^{-5}	3.455×10^{-5}	0.6974
250	0.6746	1033	0.04104	5.890×10^{-5}	2.760×10^{-5}	4.091×10^{-5}	0.6946
300	0.6158	1044	0.04418	6.871×10^{-5}	2.934×10^{-5}	4.765×10^{-5}	0.6935
350	0.5664	1056	0.04721	7.892×10^{-5}	3.101×10^{-5}	5.475×10^{-5}	0.6937
400	0.5243	1069	0.05015	8.951×10^{-5}	3.261×10^{-5}	6.219×10^{-5}	0.6948
450	0.4880	1081	0.05298	1.004×10^{-4}	3.415×10^{-5}	6.997×10^{-5}	0.6965
500	0.4565	1093	0.05572	1.117×10^{-4}	3.563×10^{-5}	7.806×10^{-5}	0.6986
600	0.4042	1115	0.06093	1.352×10^{-4}	3.846×10^{-5}	9.515×10^{-5}	0.7037
700	0.3627	1135	0.06581	1.598×10^{-4}	4.111×10^{-5}	1.133×10^{-4}	0.7092
800	0.3289	1153	0.07037	1.855×10^{-4}	4.362×10^{-5}	1.326×10^{-4}	0.7149
900	0.3008	1169	0.07465	2.122×10^{-4}	4.600×10^{-5}	1.529×10^{-4}	0.7206
1000	0.2772	1184	0.07868	2.398×10^{-4}	4.826×10^{-5}	1.741×10^{-4}	0.7260
1500	0.1990	1234	0.09599	3.908×10^{-4}	5.817×10^{-5}	2.922×10^{-4}	0.7478
2000	0.1553	1264	0.11113	5.664×10^{-4}	6.630×10^{-5}	4.270×10^{-4}	0.7539

Anexo 16. Plano general del equipo removedor de residuos del cacao.

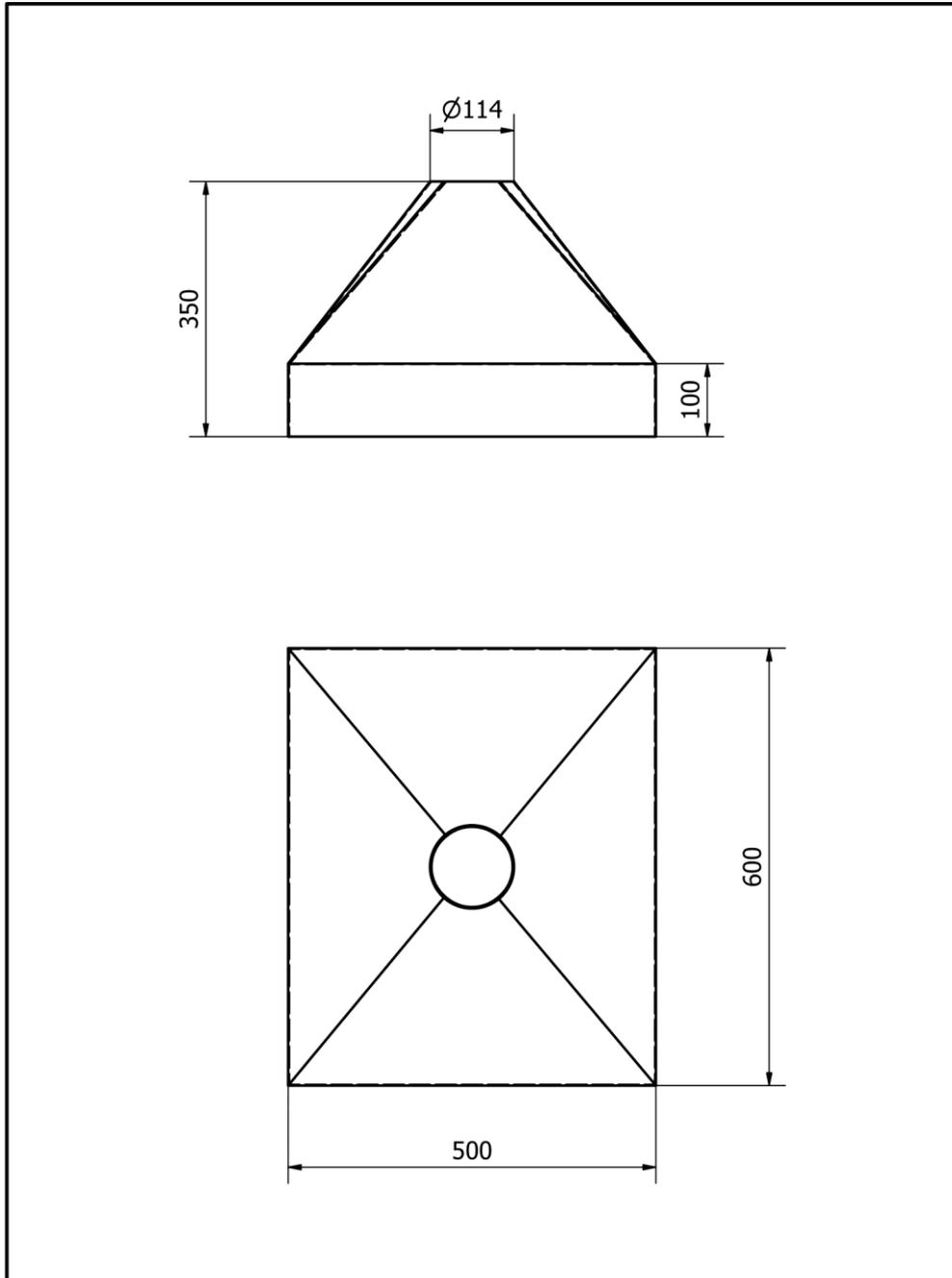


6	Soporte	1	10.5981.06	2C	AISI 304	1000 x 514	NA
5	Campana	1	10.5981.05	6B	AISI 304	600 x 500	NA
4	Tubo de descarga	1	10.5981.04	4C	AISI 304	114 x 2700	NA
3	Tubo de aspiración	1	10.5981.03	5D	AISI 304	114 x 1300	NA
2	Sección cilíndrica	1	10.5981.02	5C	AISI 304	620 x 514	NA
1	Base cónica	1	10.5981.01	5C	AISI 304	620 x 514	NA
Ref.	Denominación	Cnt.	Norma	Localiz.	Material	Dim. brutas	Observaciones
	CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA						Diseño: Cruz Kevin - Quiruga Bryan 2023-05-15
							Dibujo: Cruz Kevin - Quiruga Bryan 2023-05-15
							Revisó: Ing. Toapanta Fernando 2023-05-15
	EQUIPO REMOVER DE RESIDUOS						Tol. Gral.: NA
							Código: 10.5981.00
							Escala: 1:19

Anexo 17. Plano de detalle del separador ciclónico.



Anexo 18. Plano de detalle de la campana.



Tratamiento térmico:	NA	Material:	Acero inoxidable 304	Dim. brutas:	500 x 600
Recubrimiento:	NA				
CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA		Diseño:	Cruz Kevin - Quinga Bryan	2023-15-05	
		Dibujó:	Cruz Kevin - Quinga Bryan	2023-15-05	
		Revisó:	Ing. Toapanta Fernando	2023-15-05	
CAMPANA	Escala: 1:7	Código:	10.5981.03	Tol. Gral.:	± 0.5