UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA Y AMBIENTAL
VALPARAÍSO - CHILE

PROPUESTA DE MEJORA Y CARACTERIZACIÓN DE UN INNOVADOR LIMPIADOR DE POLEN SEMI- INDUSTRIAL EN EMPRESA POLEN DE MONTE

FERNANDA HERRERA SÁNCHEZ

MEMORIA DE TITULACIÓN PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL AMBIENTAL

PROFESOR GUÍA: DANIEL RAMIREZ.

PROFESOR CORREFERENTE: KAREN YAÑEZ.

AGOSTO 2022

AGRADECIMIENTOS

Agradezco enormemente a mi familia por acompañarme y alentarme durante todos estos años. A mi madre por apoyarme en todas mis decisiones y confiar en mis habilidades, a mi padre el cual se fue al cielo al iniciar mi vida universitaria, pero que me acompañó en mi corazón y me dio las fuerzas para seguir cada vez que se me presentaban dificultades, a mi hermana por darme todo su amor y a mi hermano por darme su compañía cuando lo necesitaba.

Agradezco a mis grandes amigas del colegio por brindarme su amistad y a mis compañeras ambientales por hacer mi vida universitaria tan divertida en los momentos más aburridos.

Agradezco a cada profesor que fue parte de mi formación y sobre todo a aquellos que creyeron en mí y en mis habilidades y que me dieron más de una oportunidad para demostrarlas.

Finalmente, agradezco a mi gran amor por acompañarme en este proceso final y darme las últimas fuerzas que necesitaba para cerrar este proceso y por la gran familia que hemos formado junto a nuestro gatito y perrito.

RESUMEN EJECUTIVO

En Badani y Guevara Ltda. “Polen de Monte” se encargan de exportar grandes volúmenes de polen de abeja a México y España, principalmente para uso de consumo animal. Para ello poseen colmenas propias de abejas de donde obtienen el polen y además compran a otros productores de Chile.

Para exportar el polen debe pasar por un proceso de limpieza y envasado, el cual se realiza a través de un innovador limpiador de polen semi industrial desarrollado por Leonardo Badani Ingeniero Agrónomo y dueño de la empresa. El equipo se basa en la separación de sólidos por tamaño, ya que posee una criba rotatoria por la cual pasa el polen impulsado por un flujo de aire, permitiendo así que el polen caiga a las tolvas a través del mallado, mientras que los residuos (polvo, cría, partes de abejas, etc.) al ser más livianos son impulsados por el flujo de aire fuera del proceso.

Actualmente el equipo presenta como problemática una disminución en su eficiencia debido a la alta turbulencia que se produce en su interior producto del flujo de aire que se inyecta, por lo que se diseñó un nuevo cono de contracción mediante AutoCAD, el cual produce que el viento de la turbina salga con mayor velocidad y menos turbulencia disminuyendo que los residuos se devuelvan. Este fenómeno se estudió a través de COMSOL para determinar la mejor solución.

Además, el equipo se encontraba inconcluso, por lo que se desarrollaron los dibujos técnicos del equipo actual y de las mejoras mediante AutoCAD.

En la tercera visita a la planta se realizó limpieza de polen mediante el equipo y se obtuvieron los datos correspondientes para determinar que en condiciones normales el equipo tiene un 85% de eficiencia.

Se diseñó un nuevo post tratamiento que consiste en un separador ciclónico de partículas para poder separar el polen más liviano de los residuos y disminuir la cantidad de descarte que generaba el equipo para así aumentar su eficiencia. Se determinó que la eficiencia del ciclón diseñado es de un 98%.

Finalmente, mediante cálculos basados en la literatura estudiada se determinaron los parámetros óptimos de operación del equipo determinando que la velocidad óptima de

rotación de la criba es de 5,62 (rad/s), la potencia necesaria para que opere el equipo es de 0,105 (kW), se debe inyectar un flujo de aire con una velocidad igual o menor a 6 (m/s) y cargas de polen con un flujo másico de 140-150 (kg/h).

INDICE

AGRADECIMIENTOS 2
RESUMEN EJECUTIVO 3
INDICE 5
1. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN 11
2. OBJETIVOS 12
2.1 Objetivo general 12
2.2 Objetivos específicos 12
3. ANTECEDENTES 13
3.1 La Apicultura y su situación en Chile. 13
3.1.1 Polinización en Chile 19
3.1.2 Normativa necesaria para el procesamiento y exportación de polen 24
3.1.3 Demanda nacional e internacional de polen 29
3.2 Empresa Polen de Monte (Badani y Guevara Ltda.) 30
3.3 USM Bee lab 33
4. MARCO TEÓRICO 34
4.1 Tamizado o cribado 34
4.1.1 Tipos de tamizados 35
4.2 Teoría del equipo semi - industrial. 39
4.2.1 Principios físicos y parámetros necesarios para el diseño del equipo 39
4.3 Software para la simulación del equipo 59
4.3.1 Historia de la simulación computacional 59
4.3.2 Ventajas y desventajas de la simulación 60
4.3.3 COMSOL Multiphysics 61
4.4 Software para diseño 3D y dibujos técnicos 68
4.4.1 Software para modelación 2D y 3D (Autodesk AutoCAD) 68
4.5 Diseño del ciclón para el equipo semi – industrial 73
4.5.1 Principio de funcionamiento 73
4.5.2 Familias de ciclones 76
4.5.3 Mecánica del movimiento de las partículas 79
4.5.4 Velocidad de sedimentación y fuerzas de retardo 79

4.5.5 Cálculo de la eficiencia del ciclón 81
4.5.6 Contaminantes aplicables 84
4.5.7 Límites de emisión logrables/reducciones 84
4.5.8 Diseño de los ciclones 86
4.5.9 Criterios de mantenimiento y detección de fallas 89
4.5.10 Ventajas y desventajas de los ciclones 90
4.5.11 Eficiencia de los ciclones: 90
5. METODOLOGÍA 92
5.1 Visitas a planta Polen de Monte 92
5.1.1 Primera visita 92
5.1.2 Segunda visita 94
5.1.3 Tercera visita 96
6. DESARROLLO 97
6.1 Partes del Equipo Actual 97
6.2 Diseño de dibujos técnicos en AutoCAD 101
6.3 Cálculo de los parámetros de operación del equipo 102
6.3.1 Cálculo de los parámetros del equipo actual 102
6.3.2 Cálculos asociados a las mejoras 105
6.4 Simulaciones fenomenológicas en COMSOL 110
6.4.1 Cálculos necesarios para las simulaciones 110
6.4.2 Simulación fenomenológica en COMSOL del equipo actual 111
6.4.3 Solución a la alta turbulencia en el flujo de aire de entrada 115
6.4.4 Simulación fenomenológica en COMSOL del equipo mejorado 129
7. RESULTADOS OBTENIDOS 136
7.1 Dibujos técnicos en AutoCAD 136
7.1.1 Equipo actual 136
7.1.2 Dibujos técnicos de las mejoras 141
7.1.3 Dibujo técnico del equipo con las mejoras 145
7.2 Parámetros de operación recomendados 146
7.2.1 Equipo actual 146
7.2.2 Equipo con mejoras 147
7.3 Protocolo de operación 149

7.3.1 Condiciones de Operación 149
7.3.2 Condiciones de Mantenimiento 149
8. CONCLUSIONES 151
9. REFERENCIAS 152
10. ANEXOS 155

Índice de Ilustraciones

Ilustración 1: Distribución a nivel nacional de apiarios y colmenas. 17
Ilustración 2: Declaración de las actividades apícolas por región declaradas a septiembre de 2020. 18
Ilustración 3: Demanda máxima por servicios de polinización según fecha de floración de acuerdo a la superficie por cultivo y número de colmenas por hectárea 23
Ilustración 4: Ubicación de la planta Polen de Monte 30
Ilustración 5: Trabajadores de planta Polen de Monte 31
Ilustración 6: Polen envasado al vacío 32
Ilustración 7: Polen de abeja 32
Ilustración 8: Proceso de tamizado manual – artesanal. 36
Ilustración 9: Máquina tamizadora vibratoria, escala de laboratorio 37
Ilustración 10:Máquina tamizadora centrífuga para harina 38
Ilustración 11: Esquema de un trómel 41
Ilustración 12:El hundimiento de movimiento en un tambor rotativo. 42
Ilustración 13: Efecto catarata movimiento en tambor rotativo 43
Ilustración 14: La centrifugación de movimiento en el tambor rotativo. 44
Ilustración 15:Movimiento del agregado dentro de la criba – trommel. 45
Ilustración 16: Área de relleno de polen dentro del trómel 47
Ilustración 17: Representación de líneas de flujo laminar 51
Ilustración 18: Distribución de velocidades de un fluido a través de una tubería 51
Ilustración 19:Representación de líneas de flujo turbulento 52
Ilustración 20: Capa límite. Perfil de velocidades 54
Ilustración 21: Desarrollo de la turbulencia en la capa límite 55
Ilustración 22: Vórtices en el ciclón 74
Ilustración 23: Vórtices en el ciclón 74
Ilustración 24: Características de los ciclones de ala eficiencia 77
Ilustración 25: Relación general de la eficiencia de recolección frente al tamaño de las partículas 83
Ilustración 26: Ciclón con sus parámetros de diseño 88
Ilustración 27: Diseño ciclón alta y media eficiencia 89
Ilustración 28: Equipo limpiador de polen semi industrial 92
Ilustración 29: Tolva con polen limpio 93
Ilustración 30: Envasado del Polen 93
Ilustración 31: Ejemplo de harnero vibratorio 94
Ilustración 32: Primer diseño del equipo con cribas concéntricas 95
Ilustración 33: Vista lateral del equipo de limpieza 95

Ilustración 34: Equipo de Limpieza de Polen..... 97
Ilustración 35: Estructura de soporte del equipo (1), criba (2), chumaceras (5) y rodachines (7)..... 98
Ilustración 36: Dos ejes (3), dos chumaceras (5), sistema de transmisión de potencia por bandas y poleas (6), rodachines (7,) tolvas de descargue (8), turbina de viento (10)..... 99
Ilustración 37: Tolva de carga (9), cubierta del equipo (13), motor (4) y bateas (12) 100
Ilustración 38: Manga de descarte e impurezas (14) 100
Ilustración 39: Frecuencímetro (10) 101
Ilustración 40: Ciclón con sus parámetros de diseño 106
Ilustración 41: Flujo de aire en el equipo actual..... 112
Ilustración 42: Parte inicial con mayor velocidad del viento en el equipo actual 113
Ilustración 43: Vista lateral del flujo de viento del equipo actual 113
Ilustración 44: Vista superior del flujo de viento del equipo actual 114
Ilustración 45: Representación del movimiento del flujo de aire a través del equipo actual 114
Ilustración 46: Perfil de velocidad del viento plano XY del equipo actual 115
Ilustración 47: Perfil de velocidad flujo turbulento velocidad 2 m/s 117
Ilustración 48: Perfil de velocidad por flechas flujo turbulento velocidad 2 m/s..... 118
Ilustración 49:Perfil de Velocidad por flechas normalizadas flujo turbulento velocidad 2 m/s 119
Ilustración 50: Perfil de velocidad flujo turbulento velocidad 4 m/s 120
Ilustración 51: Perfil de velocidad por flechas flujo turbulento velocidad 4 m/s..... 121
Ilustración 52: Perfil de velocidad por flechas normalizadas flujo turbulento velocidad 4 m/s 122
Ilustración 53: Perfil de velocidad flujo turbulento velocidad 6 m/s 123
Ilustración 54: Perfil de velocidad por flechas flujo turbulento velocidad 6 m/s..... 124
Ilustración 55: Perfil de velocidad por flechas normalizadas flujo turbulento velocidad 6 m/s 125
Ilustración 56: Perfil de velocidad del ciclón flujo turbulento velocidad 2 m/s..... 126
Ilustración 57: Perfil de velocidad por flechas del ciclón flujo turbulento velocidad 2 m/s 127
Ilustración 58: Perfil de velocidad del ciclón flujo turbulento velocidad 4 (m/s) 127
Ilustración 59: Perfil de velocidad por flechas del ciclón flujo turbulento velocidad 4 (m/s) 128
Ilustración 60: Perfil de velocidad del ciclón flujo turbulento velocidad 6 (m/s) 128
Ilustración 61: Perfil de velocidad por flechas del ciclón flujo turbulento velocidad 6 (m/s) 129
Ilustración 62: Perfil de velocidad del equipo con mejoras flujo turbulento velocidad (2 m/s)..... 130
Ilustración 63: Perfil de velocidad por flechas del equipo con mejoras flujo turbulento velocidad 2(m/s) 131
Ilustración 64: Perfil de velocidad por flechas normalizadas del equipo con mejoras flujo turbulento velocidad 2(m/s)..... 131
Ilustración 65: Perfil de velocidad del equipo con mejoras flujo turbulento velocidad 4(m/s) 132
Ilustración 66: Perfil de velocidad por flechas del equipo con mejoras flujo turbulento

4(m/s)..... 132
Ilustración 67: Perfil de velocidad por flechas normalizadas del equipo con mejoras flujo turbulento velocidad 4(m/s)..... 133
Ilustración 68: Perfil de velocidad del equipo con mejoras flujo turbulento velocidad 6 (m/s)..... 134
Ilustración 69: Perfil de Velocidad por Flechas del Equipo con Mejoras Flujo Turbulento Velocidad 6(m/s) 134
Ilustración 70: Perfil de velocidad por flechas normalizadas del equipo con mejoras flujo turbulento velocidad 6 (m/s)..... 135
Ilustración 71: Vista lateral equipo de limpieza de polen en centímetros 137
Ilustración 72: Vista frontal del equipo de limpieza de polen en centímetros..... 138
Ilustración 73: Vista Trasera del equipo de limpieza de polen en centímetros 138
Ilustración 74: Vista superior del equipo de limpieza de polen en centímetros 139
Ilustración 75: Cribas de 3 y 4 mm de mallado en centímetros 139
Ilustración 76: Tapa superior del equipo de limpieza de polen en centímetros..... 140
Ilustración 77: Vista isométrica del cono 141
Ilustración 78: Vista superior cono..... 141
Ilustración 79: Vista frontal cono 141
Ilustración 80: Vista lateral cono..... 142
Ilustración 81: Vista isométrica ciclón 142
Ilustración 82: vista frontal ciclón..... 143
Ilustración 83: vista superior ciclón..... 143
Ilustración 84: vista lateral ciclón..... 144
Ilustración 85: Vista lateral equipo de limpieza de polen con mejoras en centímetros..... 145

Indice de Tablas

Tabla 1: Declaración de las actividades apícolas 18
Tabla 2: Diferenciación del polen según origen botánico 20
Tabla 3: Superficie plantada con los principales cultivos frutales, semilleros y cultivos industriales que requieren de servicios de polinización y cantidad mínima de colmenas recomendadas por hectárea..... 21
Tabla 4: Estimación de producción total y mercados de destino 29
Tabla 5: Parámetros de diseño de un trómel..... 39
Tabla 6: Intervalo de eficiencia de remoción para tipos de ciclones..... 76
Tabla 7: Características de los ciclones convencionales 78
Tabla 8: Características de los ciclones de alta capacidad. 78
Tabla 9: Intervalo de porcentaje de eficiencias de remoción de materia..... 84
Tabla 10: Nomenclatura diseño ciclón 87
Tabla 11: Relación de las dimensiones de los ciclones 88
Tabla 12: Ejemplo de la tabla que se debe desarrollar con los datos tomados..... 96
Tabla 13: Datos obtenidos de los experimentos de limpieza de polen 105
Tabla 14: Relación de las dimensiones de los ciclones 106
Tabla 15: Cálculo de los parámetros de diseño del ciclón 107
Tabla 16: Datos para el cálculo de la eficiencia del ciclón..... 108

Tabla 17: Datos para el cálculo de la eficiencia del ciclón..... 109
Tabla 18: Cálculo del número de Reynolds del equipo para cada velocidad del viento 110
Tabla 19: Resultado de los cálculos de flujo másico y eficiencia del equipo actual 147

1. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

Badani y Guevara Ltda. exporta grandes volúmenes de polen de abeja al extranjero. Para ello el polen debe limpiarse y envasarse en su planta ubicada en Quilpué antes de comercializarse (Reglamento de Alimentos para Animales, 2017) Comúnmente para limpiar el polen se utilizan tamizadoras con harneros vibratorios o tamizado manual, pero en esta empresa poseen un innovador limpiador de polen semi industrial, el cual permite limpiar volúmenes más grandes de polen en menos tiempo, a diferencia de los métodos de limpieza convencionales.

Este equipo permite producir una mayor cantidad de polen limpio que otros métodos, pero presenta algunas problemáticas que se pueden mejorar para que pueda aumentar aún más su eficiencia.

El primer problema se debe a que el cono de contracción que va ensamblado a la turbina que impulsa el polen a través del equipo genera turbulencias en el flujo del viento, haciendo que los residuos se devuelvan al inicio del proceso aumentando la probabilidad que caigan en el polen ya limpio y así disminuyendo la eficiencia del equipo.

La segunda problemática se encuentra en el final del proceso, ya que al salir el polen del equipo este es conducido mediante una manga, la cual acumula polen y residuos livianos, por lo que este descarte debe reingresarse al proceso para recuperar parte de ese polen, perdiendo tiempo y energía.

Para solucionar estas problemáticas, se obtendrán los parámetros actuales y los óptimos de funcionamiento del equipo mediante bibliografía, se desarrollarán los planos actuales del equipo mediante AutoCAD y se simulará a través de COMSOL el equipo actual para ver la problemática y poder generar una solución.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo general

Proponer mejoras operacionales y mecánicas para un innovador limpiador de polen semi industrial

2.2 Objetivos específicos

1. Desarrollar simulaciones computacionales para establecer las condiciones de operación del equipo actual para determinar mejoras.
2. Desarrollar los dibujos técnicos del equipo actual y con las mejoras:
    a. Cono de contracción para la turbina de aire
    b. Parte mecánica con harnero circular con dos cribas
    c. Ciclón para conducir las impurezas
3. Caracterizar mediante teoría y experimentos el equipo actual y con las mejoras.
4. Elaborar un protocolo de operación del equipo de limpieza.

3. ANTECEDENTES

3.1 La Apicultura y su situación en Chile.

La apicultura, la crianza de las abejas, representa una gran fuente de trabajo y economía por los múltiples beneficios que se pueden obtener a través de la explotación artesanal o industrial. Además de proporcionarnos miel como producto principal, con la apicultura también se puede producir polen, cera, jalea real, propóleos y veneno de abejas, pudiendo obtener ingresos adicionales en la venta de núcleos, colmenas, reinas y arriendo de colmenas para polinización. (Arguello Najera, Omar, 2010)

En Chile y en el mundo, se utiliza la abeja melífera (*Apis mellifera*) que pertenece a la orden de insectos Hymenóptera que incluye miles de especies de abejas, avispas, hormigas y otras especies. La principal característica de este orden de insectos es que poseen un par de alas membranosas, siendo el par delantero mucho mayor que el posterior. La mayoría mantiene sus crías en celdas, poseen un aguijón abdominal con el cual son capaces de inyectar un veneno poderoso en el cuerpo de sus enemigos o víctimas, siendo esta arma más frecuente en abejas y avispas. Si bien existen especies de abejas solitarias, la vida en sociedad de la abeja melífera es una de sus particularidades, formando grandes colonias para subsistir. (Fica Arnoldo, 2012)

La colonia se comporta como una unidad, regulando su temperatura interior, controlando la humedad dentro de la colmena, y desarrollando una serie de comportamientos como el higiénico, que permite que la colonia mantenga su salud y el defensivo, que evita la muerte al ser atacado por otras especies. Los miembros de una colonia se diferencian de otras colonias por su olor, del cual es responsable en parte por las feromonas emitidas por la abeja Reina. (Lesser, R, 2004)

Dentro de la colonia, existen castas que cumplen funciones diferentes. La conducta de cada casta está determinada por la dotación genética, el estado de madurez y funcionamiento de su cuerpo y por estímulos externos a la familia de abejas. La casta de las obreras corresponde al componente más importante de la colonia. Todas son hembras que constituyen la casi totalidad de la población y cumplen diversas funciones en la colmena son el elemento productor y directivo de la colmena. Se llaman así porque son las que realizan el trabajo:

producen miel y cera, fabrican panales, colectan polen, limpian la colmena, cuidan las crías, defienden la colmena de sus enemigos, alimentan y cuidan de la reina y mantienen el orden. Son infértiles pues su aparato reproductor está atrofiado y también son las más pequeñas del enjambre. (Lesser, R, 2004)

Entre las labores específicas de las obreras se encuentran las nodrizas, que alimentan las larvas de la colmena, al principio con una sustancia glandular lechosa conocida como jalea real y más tarde con una mezcla de miel y polen. Las obreras aseadoras que limpian la colmena sacan las larvas y abejas muertas, eliminan de la colmena cualquier objeto raro que en ella encuentren. Las obreras ventiladoras que al ventilar la colmena mantienen estables la humedad y la temperatura interna de la colmena. Las crías para desarrollarse necesitan entre 34 y 36 °C y humedad de 65 a 75%. Las obreras constructoras que fabrican panales. La construcción de panales tiene dos etapas: operculado a cargo de las obreras constructoras jóvenes y la construcción de panales a cargo de obreras más viejas. La cera de construcción de panales es producida por las glándulas cereras, ubicadas en el abdomen de las abejas. Las obreras guardianas protegen la colmena siendo esta una etapa previa al pecoreo, su función es evitar la entrada de abejas de otras colmenas, insectos y otros animales ajenos a la colmena. Las obreras pecoreadoras (recolectoras) salen de la colmena a colectar polen, néctar, agua y propóleos. El polen y el propóleos lo acarrean en una cestilla ubicada en las patas traseras y el néctar en su estómago. Las obreras exploradoras buscan fuentes de alimento y nuevas casas, son las obreras más viejas de la colmena. Cuando encuentran alimento, agua o nueva morada, regresan a la colmena y avisan a sus semejantes por medio de danzas. (Lesser, R, 2004)

La producción de miel y la polinización se consideran hoy día las actividades más importantes para el hombre. Chile presenta una gran diversidad de especies vegetales endémicas y nativas que pueden potencialmente ser utilizadas por la abeja melífera (*Apis mellifera*) para la obtención de polen, miel y propóleos. (Montenegro Gloria, 2016)

Por otro lado, el desarrollo de algunos sectores de la agricultura, especialmente el frutícola y la producción de semillas, se encuentra estrechamente relacionado con la actividad apícola, ya que lograr una polinización efectiva de sus cultivos depende, en gran medida, de la disponibilidad de un número suficiente de colmenas en buen estado sanitario. La abeja es

esencial en la producción de dos de cada tres alimentos que consumimos diariamente. Esta constatado que de los 100 cultivos que proveen el 90% de los alimentos del mundo, 71 de ellos son polinizados por abejas. Además, su contribución ecológica y económica no puede ser medida en ningún tipo de moneda. Por ello, se debe establecer una alianza estratégica entre agricultores y apicultores para que la demanda de polinización sea adecuadamente cubierta y represente un beneficio tanto para las partes directamente involucradas como para los consumidores que reciben finalmente los productos generados. (Montenegro Gloria, 2016)

La importancia que tienen las abejas en las especies cultivadas radica en que gracias a sus estructuras morfológicas y su capacidad de comunicarse entre ellas son muy eficientes en la colecta de los recursos florales que desean y por tanto generar una polinización efectiva. Sin embargo, hay que entender que el sólo hecho de colocar cajones de abejas dentro de un huerto, no asegura la polinización eficiente del cultivo. Por ejemplo, en la producción de manzanas, para producir una manzana de calidad, esa flor debe ser visitada al menos 68 veces por abejas. Por ello el número de abejas que visitan las flores es crucial en la polinización comercial. Además, está comprobado que las primeras flores son más productivas, por lo que el momento en que las abejas llegan al huerto debe ser parte importante de nuestro manejo apícola. (Montenegro Gloria, 2016)

Las abejas melíferas salen de la colmena con la misión de obtener algún recurso en particular. Es así como aproximadamente el 75% de las abejas pecoreadoras, sale en busca de néctar y un 25% se concentra en la búsqueda de polen. Una abeja que busca polen se llena el cuerpo de granos de polen y los guarda en las corbículas, donde lo transporta hasta la colmena. Esta abeja que transporta polen en la corbícula tiene un su cuerpo miles de granos de polen, mucho más que una abeja que colecta néctar y por eso que las abejas transportadoras de polen son mucho mejores en la polinización. (Montenegro Gloria, 2016)

Una abeja que busca polen, llena su cestilla (llamada corbícula) de granos de polen, ubicada en el tercer par de patas, donde lo transporta hasta la colmena. Esta abeja que transporta polen en la corbícula tiene un su cuerpo miles de granos de polen, mucho más que una abeja que colecta néctar, y por eso que las abejas transportadoras de polen son mucho mejores en la polinización. Respecto a la población de abejas, hay datos que muestran que, a mayor

población de colmenas, la cantidad de recolectoras aumenta exponencialmente. Como las recolectoras son las que hacen el trabajo de polinización, mantener poblaciones adecuadas de abejas genera mejores polinizaciones. Y esto va referido no solo a abejas adultas. La cantidad de crías es un factor crítico, ya que entre más crías tenga una colmena, sus requerimientos de polen serán mayores, por lo que la cantidad de abejas que se dedicarán exclusivamente a la colecta de polen son mayores. (Montenegro Gloria, 2016)

La oferta apícola de Chile está compuesta por una multiplicidad de productos derivados de las abejas, que incluyen las mieles (a granel y envasadas), el polen (seco o fresco) y los propóleos (a granel o envasados). Del mismo modo, las reinas y paquetes de abejas pueden ser exportadas a todo el mundo. La miel, por su gran valor nutricional y sabor único, está siendo cada vez más aceptada por los consumidores, utilizándose muchas veces en lugar de otros edulcorantes. (Corfo, 2012)

Los colores de la miel y el polen varían según su origen botánico, el procesamiento al que haya sido sometida y el tiempo y condiciones de almacenaje. Cuando la miel es guardada a 25° C, la decoloración es más pronunciada y es aún más severa si el periodo de almacenamiento es superior a dos años y a temperaturas de 36,5° C. Por otro lado, su transparencia o claridad depende de la cantidad de las partículas en suspensión, tales como el polen. Las mieles no son brillantes ni translúcidas, sino más bien turbias, siendo difícil poder ver a través de ellas (Villena et al., 2003).

La diversidad específica de la flora de Chile constituye un recurso que es utilizado por la abeja y, por lo tanto, es objeto de explotación económica por parte de los apicultores. Este hecho no significa un deterioro ecológico de estos recursos, sino que, por el contrario, la mantención de apiarios en comunidades nativas ayuda a optimizar la polinización cruzada, posibilitando así la mayor producción de semillas viables que aseguren la sobrevivencia de las especies (Montenegro et al., 2003).

Según el boletín apícola de 2021, los pequeños, medianos y grandes apicultores nacionales llegan a los 8.777 (SIPEC, 2020). La producción de miel se realiza en todo el país, salvo en las Regiones de Arica y Parinacota, Tarapacá y Magallanes, encontrándose en la Región del Maule y en la Región de O´Higgins el mayor número de colmenas con 223.453 y 239.716 respectivamente lo que representan el 37,3% del total del país, y a su vez la región de Los

Lagos representa el mayor promedio de colmenas por apicultor, registrando un promedio de 277,22 colmenas por apicultor, siendo el promedio nacional de 141,45 colmenas por apicultor, con un total de 1.241.504 colmenas a lo largo de todo Chile (SIPEC,2020).

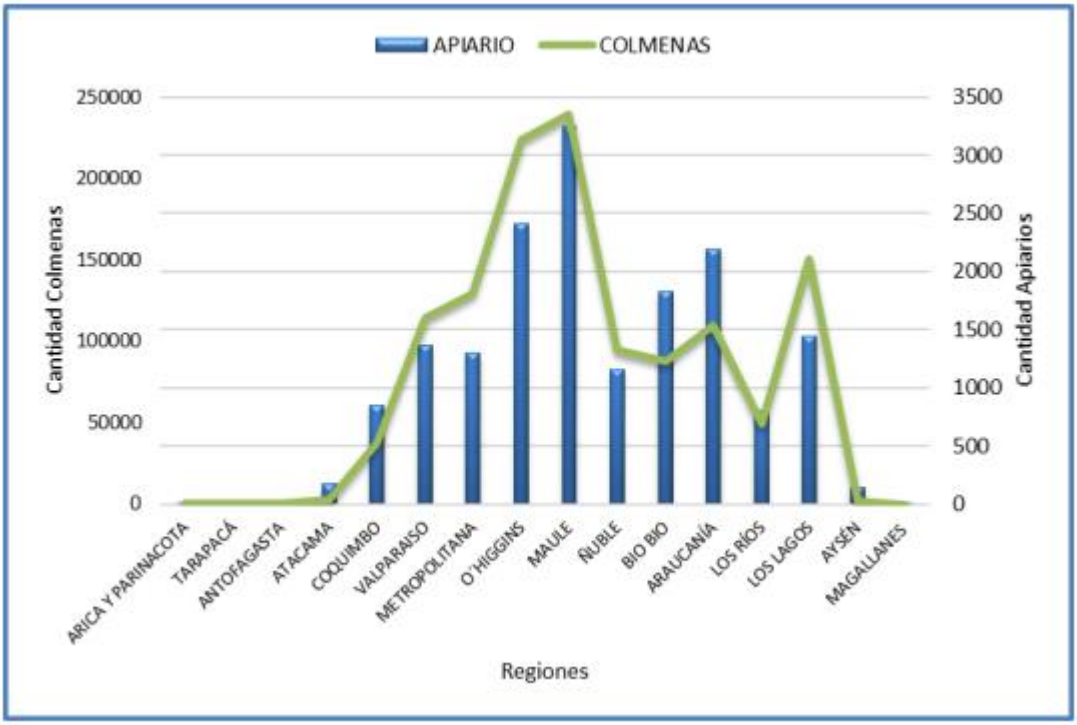


Ilustración 1: Distribución a nivel nacional de apiarios y colmenas.

Fuente: (SIPEC, 2020)

Los dos principales ejes de sustentación económica de la apicultura son la producción de miel y la polinización. Complementario a estos ejes, la apicultura nacional se está diversificando en forma creciente, incorporando otros productos como el polen, propóleos, producción de reinas, material vivo y apitoxina, entre otros. La apicultura en Chile se divide en dos grandes zonas geográficas; el Centro Norte (Región de Coquimbo hasta la Región del Maule), donde la actividad principal es la polinización y la producción de miel constituye un complemento, y el Centro Sur (Región del Biobío a la Región de Aisén), que se orienta principalmente a la producción de miel, con una incorporación de servicios de polinización para los frutales mayores y menores, así como para otros cultivos emergentes en la zona. En todo el país, están surgiendo territorios y apicultores que se destacan por su producción de mieles diferenciadas, polen y propóleos. De las principales actividades que se realizan en el

rubro apícola, de acuerdo con lo declarado anualmente por los apicultor/a, sigue siendo la producción de miel la más importante, alcanzando un 97,90%, luego viene la polinización y venta de material vivo con un 25,67% y 16,21% respectivamente. Lo comentado

REGIÓN	MIEL	MATERIAL VIVO	POLINIZACION	PROPOLEO	POLEN	PRODUCCIÓN CERA	JALEA REAL	APITERAPIA
ARICA Y PARINACOTA	13	-	6	1	1	1	-	-
TARAPACÁ	9	1	7	-	-	-	-	-
ANTOFAGASTA	27	-	-	-	-	-	-	2
ATACAMA	67	3	29	5	4	1	2	5
COQUIMBO	516	90	144	38	49	43	14	12
VALPARAISO	565	167	221	73	85	55	25	19
METROPOLITANA	672	176	263	74	65	55	34	25
O´HIGGINS	1.036	180	476	45	52	55	25	11
MAULE	1.527	185	642	120	71	66	31	12
ÑUBLE	597	120	126	36	36	31	17	11
BIO BIO	1.016	222	119	44	34	43	16	9
ARAUCANÍA	1.498	137	118	110	91	83	59	37
LOS RÍOS	413	47	37	12	3	22	4	1
LOS LAGOS	541	79	42	20	19	28	17	11
AYSÉN	95	16	23	1	1	2	1	4
MAGALLANES	1	-	-	-	-	-	-	1
TOTAL	**8.593**	**1.423**	**2.253**	**579**	**511**	**485**	**245**	**160**

Ilustración 2: Declaración de las actividades apícolas por región declaradas a septiembre de 2020.

anteriormente, se puede ver graficado en la siguiente imagen.

Fuente: (SIPEC, 2020)

Por ende, un 97,9% de los apicultores se dedica a la producción de miel, un 25,67% a la polinización y solo un 5,82% a la producción de polen.

Tabla 1: Declaración de las actividades apícolas

Actividades	Total	Porcentaje
Miel	8.593	97,90%
Material vivo	1.423	16,21%
Polinización	2.253	25,67%
Polen	511	5,82%

Propóleo	579	6,60%
Cera	485	5,53%
Jalea Real	245	2,79%
Apiterapia	160	1,82%

Fuente: (SIPEC, 2020)

Chile produjo casi 12.000 TON de miel en 2020, cantidad bastante menor en el contexto mundial. A nivel sudamericano, Chile es ampliamente superado por las producciones de Argentina con 75.000 TON y Brasil 51.000 TON (FAOSTAT, 2022).

3.1.1 Polinización en Chile

¿Qué es el polen?

De acuerdo con la norma chilena NCh 3255-2011, se define como polen a la microspora y luego al micro gametofito de las espermatofitas, que rodeado por una cubierta protectora de esporopolenina denominada exina, se libera al ambiente con el fin de fecundar el óvulo de la flor. La misma norma señalada con anterioridad, define como polen apícola a los cúmulos corbiculares cosechados mediante una trampa colocada en la entrada de la colmena. De acuerdo con el mismo instrumento legal, el polen es clasificable de acuerdo con el origen geográfico de las especies vegetales y según el origen botánico. Así para el primer criterio, es posible diferenciar: el polen endémico, polen nativo, polen no nativo y polen mixto. En el segundo, se encuentra: polen monofloral, polen bifloral y polen polifloral. A su vez, la diferenciación del polen puede expresarse de manera compuesta tal como lo muestra la Tabla N°2.

Tabla 2: Diferenciación del polen según origen botánico

Clase de polen	Tipo monofloral	Tipo bifloral	Tipo polifloral
Endémico	Monofloral endémico	Bifloral endémico	Polifloral endémico
Nativo	Monofloral nativo	Bifloral nativo	Polifloral nativo
No nativo	Monofloral no nativo	Bifloral no nativo	Polifloral no nativo
Mixto	----------	Bifloral mixto	Polifloral mixto

Fuente: NCH 3255-2011

La polinización se define como el traslado del polen desde las partes masculinas de la flor a las partes femeninas de la misma. Esto puede suceder en la misma flor, entre flores de una misma planta o entre flores de distintas plantas de la misma especie (polinización cruzada). Una buena polinización culmina con una óptima producción de semillas y frutos bien formados y de buen calibre. (De la cuadra Sergio, Rodríguez Pamela. 2019)

Hay dos procesos de polinización: abióticos y bióticos. Abiótico es el proceso de la polinización sin el uso de otros organismos, por ejemplo, el viento fuerte o las hormonas del crecimiento vegetal. Sin embargo, la polinización biótica, es lo contrario, requiere que un organismo (también conocido como polinizadores, como mariposas, aves, insectos, abejas, etc.) para llevar o trasladar el polen de los carpelos o pistilos de la flor.

Alrededor del 78% de las especies de plantas con flor en climas templados y del 94% en climas tropicales se benefician del proceso de la polinización mediada por animales, lo que equivale a más del 87% de todas las especies de angiospermas conocidas (Bonilla, 2012; Mayer et al., 2011). En cultivos tropicales, el 70% de las 1.330 especies cultivadas se ve favorecido por estos polinizadores, mientras que en cultivos europeos el 84% de las 264 especies cultivadas dependen del proceso de polinización animal (Chautá-Mellizo et al., 2012; Klein et al., 2007). A nivel global, el 87% de las especies cultivadas, que

representan un 35% del suministro global de alimentos, se ven beneficiadas por este proceso (Klatt et al., 2014; Mallinger y Gratton, 2015).

Los cultivos que demandan de los servicios de polinización con abejas melíferas son:

- Frutales: la mayoría de los frutales con la excepción de algunas especies como nogales, vid, cítricos.
- Hortalizas: principalmente cucurbitáceas
- Cultivos industriales: principalmente raps, maravilla.
- Semilleros de hortalizas, flores y otros cultivos

Tabla 3: Superficie plantada con los principales cultivos frutales, semilleros y cultivos industriales que requieren de servicios de polinización y cantidad mínima de colmenas recomendadas por hectárea

Cultivo	**Superficie 2018**	**N° Colmenas recomendadas/ ha**	**Total Colmenas por cultivo**
Almendros	8.863	12	106.356
Cerezos	30.179	10	301.790
Ciruelo Japonés	4.800	10	48.000
Ciruelo Europeo	12.932	10	129.320
Manzanos	34.427	6	206.562
Perales	8.217	10	82.170
Paltos	29.166	10	291.660
Kiwis	9.193	15	137.895
Arándanos	15.815	6	94.890
Frambuesas y Moras	4.809	6	28.854
Raps	43.852	6	263.112

Crucíferas	1618	10	16180
Cucurbitáceas	1159	10	11590
Zanahoria	914	10	9140
Bunching	565	10	5650
Maravilla	3.988	10	39880
Canola	4314	10	43140
Otros	964	10	9640

Fuente: (ODEPA, ANPROS, de la Cuadra, S. 2018)

La demanda de colmenas de abejas para los servicios de polinización está dada por la suma de los requerimientos de cultivos frutales, hortalizas, semilleros y cultivos industriales. Sin embargo, existe una distribución en el tiempo, ya que todos los cultivos no florecen simultáneamente. Así, en la zona centro norte, cultivos como arándanos comienzan en junio sus floraciones y éstas se extienden según las diferentes especies hasta el verano, hasta marzo o incluso después. Pero el grueso de las floraciones y por lo tanto de la demanda por los servicios de polinización ocurre entre agosto y noviembre en las zonas centro norte a centro sur de Chile. Existe una demanda máxima en que coinciden muchas especies frutales, hortícolas y semilleros por su época de floración que sería el mes de octubre. Esta sería la demanda máxima y crítica, ya que la cantidad de colmenas para satisfacer esta demanda muchas veces no es suficiente. (De la cuadra Sergio, Rodríguez Pamela. 2019).

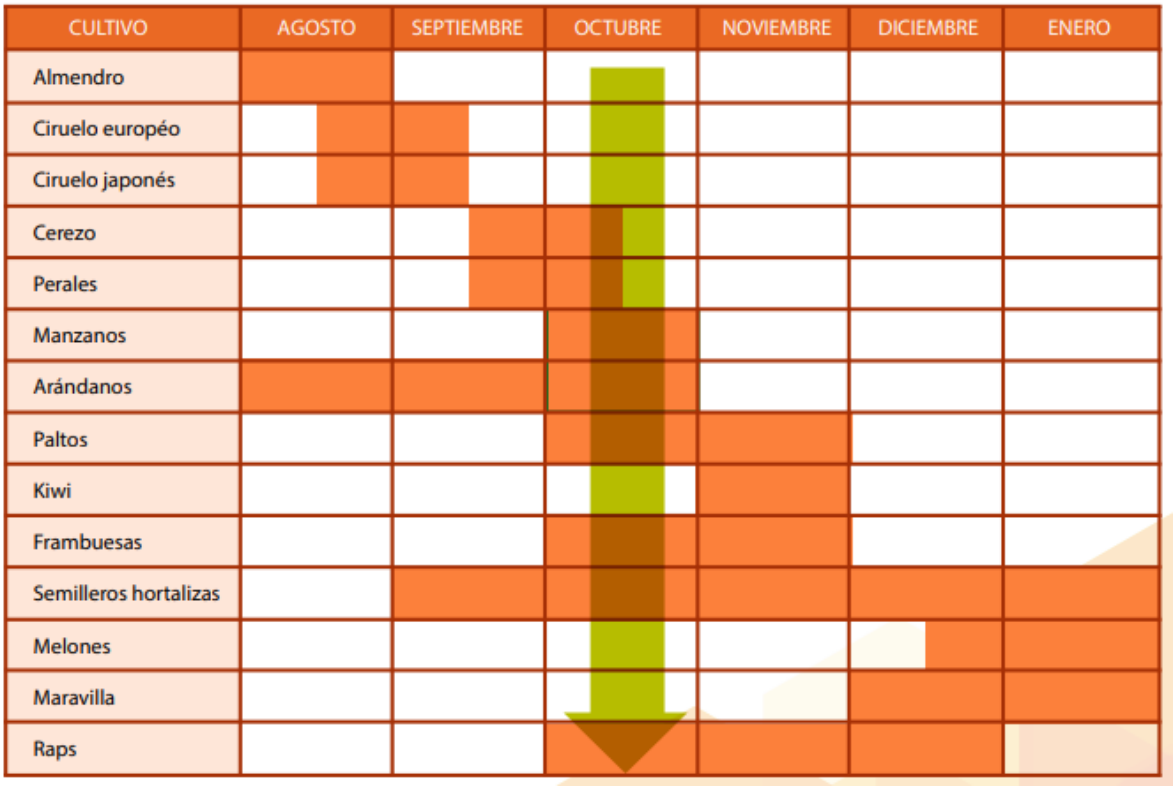


Ilustración 3: Demanda máxima por servicios de polinización según fecha de floración de acuerdo a la superficie por cultivo y número de colmenas por hectárea

Fuente: (ODEPA, ANPROS, de la Cuadra, S. 2018)

De acuerdo con el sistema de información pecuaria oficial (SIPEC) del SAG en Chile a marzo del 2019 hay un total de 985.466 colmenas. Existe un déficit de colmenas para suplir la demanda por polinización, ya que según el cuadro 2 la demanda máxima es en octubre y se necesitan un total de 1.088.800 colmenas.

Hay que considerar que muchas colmenas no se utilizan en la polinización agrícola lo que aumenta la brecha entre cantidad de colmenas que realizan polinización agrícola y la demanda por parte de la fruticultura, semilleros y cultivos agrícolas

En los últimos años dado la declinación de los agentes polinizadores, donde la abeja melífera es la más importante, por la población y distribución a nivel mundial, el servicio profesional de polinización prestados por las abejas es considerado una variable productiva. Hoy en día en países como EEUU el valor de una colmena para polinización, por ejemplo, en almendro en el Valle de California ha variado de USS$40 al año 1996 a USS$140 al año 2011 (Ellis,

2011). Esto porque los agricultores están conscientes del rol que tiene la abeja como factor productivo. Por otra parte, países competidores frutícolas de Chile, como Nueva Zelanda ha incrementado en 15 años, su demanda de colmenas de abejas para kiwi en un 5000%, las cuales son administradas por servicios profesionales de polinización. De acuerdo a Goodwin (2002), en Nueva Zelanda las dificultades para polinizar el kiwi, culminaron en el desarrollo de una industria apícola muy profesional y con un valor de arriendo de colmenas, que es superior al costo de adquirir una colmena con abejas. Allí todas las colmenas cumplen con un estándar mínimo, lo cual no es una imposición legal sino generada por los productores de kiwi del país, en conjunto con los apicultores y los investigadores. Otros países como Australia trabajan permanentemente en el Desarrollo de Servicios de polinización y mantienen el apoyo, actualización y protocolos para su uso por productores y servicios de polinización a través del Animal Research and Development Services a quién financia el estado en conjunto con los productores (Cannon, 2011). También en estos países (EEUU, Australia Nueva Zelandia), se ha establecido la necesidad que todo servicio de polinización debe realizar un manejo de las colmenas previo de por lo menos 10 semanas antes de su liberación. De esta manera, se asegura el que las colmenas lleguen a ser fuertes con un gran número de crías, con altos requerimientos de polen, todo lo cual permite una mejor polinización.

3.1.2 Normativa necesaria para el procesamiento y exportación de polen

a) Resolución Exenta N°8.196 de 2015

En Chile las principales normas que rigen el sistema apicultor son la Resolución Exenta N°8.196 de 2015, que establece las obligaciones para registro de apicultores y sus apiarios y su modificación:

- Los apicultores deberán registrarse en cualquier oficina del Servicio declarando sus apiarios y colmenas, mediante el Formulario de Registro de Apicultores y Declaración de Apiarios, el cual, para esta especie, reemplazará al Formulario de Inscripción de Establecimientos (FIE).
- En el registro de apicultores se consignarán los siguientes antecedentes:

- Nombre, RUT y domicilio del apicultor; tipo de rubro o actividad apícola a la cual se dedica.
- En relación con la Declaración de Apiarios, se deberá consignar: cantidad de apiarios que posee el apicultor, la ubicación geográfica de éstos y si sus apiarios realizan trashumancia.
- El Servicio por razones sanitarias podrá registrar todos los apiarios que requiera identificar, debiendo completar el Formulario de Registro de Apicultores y Declaración de Apiarios sin la firma del Apicultor.

- Los apicultores registrados deberán efectuar la declaración de existencia de sus apiarios en el mes de octubre de cada año, en cualquier oficina del Servicio, mediante formato papel o por medio de la funcionalidad electrónica del Sistema de Información Pecuaria Oficial.

b) La Resolución N°851 de 2019

La Resolución N°851 de 2019 corrige la resolución anterior y establece:

- Los apicultores deberán registrarse y efectuar la declaración de existencia de sus apiarios en el mes de octubre de cada año, mediante formato papel en cualquier oficina del Servicio o por medio de la funcionalidad electrónica del Sistema de Información Pecuaria Oficial (SIPEC). No obstante, el apicultor deberá actualizar su declaración cada vez que incorpore o elimine un apiario, dentro del período de vigencia.
- Aquellos apicultores que realicen servicio de polinización deberán llevar un registro de control interno de todos los movimientos de sus colmenas, en el cual indique a lo menos: la identificación del o los apiarios de donde provienen las colmenas ocupadas para este servicio, región, comuna, localidad, fecha de inicio y fecha de término de la polinización. Este registro debe estar disponible cuando el Servicio lo requiera y debe tener información de a lo menos un año hacia atrás.

c) NCh 3255- 2011

Existe una norma elaborada por el Instituto Nacional de Normalización de Chile, NCh 3255-2011, que define lo que es una colmena apta para el servicio de polinización de manera de tener una referencia de la calidad.

Norma Chilena 3255 - 2011 (Colmena apta para polinizar)

1. Mínimo 8 marcos con abejas
2. Marcos con cría = 3,5 1,5 marcos con cría abierta 2 marcos con cría cerrada
3. Libre de enfermedades y plagas
4. Número de abejas por minuto entrando por la piquera igual o mayor a 50

La Norma Chilena fue elaborada el año 2011 y debe ser utilizada de manera referencial, ya que en la actualidad existen diversos parámetros de calidad de colmena para polinizar. La calidad de las colmenas es fundamental para lograr una buena polinización. Lo que interesa no es la cantidad de cajones por hectárea de cultivo, sino la cantidad de abejas que salen a trabajar y polinizan las flores. Estas son las abejas pecoreadoras, que recolectan néctar y polen desde las flores y lo llevan al interior de la colmena. El néctar se transforma en miel y es la fuente de carbohidratos de la abeja y el polen es la fuente de proteínas, grasas y otros nutrientes, principalmente para las crías de las abejas (larvas). Por lo tanto, también es fundamental la presencia de una reina vigorosa en postura lo cual no está definido en la Norma. Una abeja que recolecta polen es mejor polinizadora que aquella que recolecta néctar, debido a que para extraer el polen entra en contacto con las partes sexuales de la flor y garantiza mayor polinización. El tamaño de la colmena y su respectivo precio por el servicio es algo que debe ser acordado entre el agricultor y el apicultor. A mayor tamaño de colmena el precio debe ser mayor, por los costos más elevados en preparación y en fletes (las colmenas de 2 cuerpos ocupan el doble de volumen).

d) Resolución Exenta Nº:1069/2019

La Resolución Exenta Nº:1069/2019 otorga a Badani y Guevara Limitada la inscripción en lista pública de establecimientos nacionales productores de alimentos para animales y otorga número oficial que indica.

Según lo dispuesto en la Ley N° 18.755, Orgánica del Servicio Agrícola y Ganadero y lo dispuesto en los artículos 7° y 9° del Decreto N° 04 de 17 de febrero de 2016 que aprueba el Reglamento de Alimentos para Animales

1. Que el Servicio Agrícola y Ganadero es la autoridad encargada de la inscripción de establecimientos nacionales productores de alimentos para animales, entendiéndose por éstos los alimentos, suplementos, aditivos e ingredientes destinados al consumo animal.
2. Que los establecimientos nacionales productores de alimentos para animales deben comunicar por escrito al Servicio la actividad a desarrollar.
3. Que los antecedentes del establecimiento fueron presentados en la Oficina SAG Valparaíso e ingresada con fecha 08 de julio 2019.

e) Resolución Exenta 295

Otorga la autorización sanitaria del funcionamiento del local de distribución de alimentos. Declaración de cumplimiento de requisitos sanitarios propios de la modalidad tramite cero realizada por la empresa, lo dispuesto en el código sanitario aprobado por el ministerio de salud.

Autoriza el funcionamiento del local de distribución de alimentos Badani y Guevara Limitada con el fin de distribuir alimentos que no requieren refrigeración.

La resolución otorga poder optar a la patente de Distribución de miel y subproductos en la municipalidad de Quilpué

f) Ley 18.755 modificada, Resolución N° 55 de 1992, Resolución N°520 de 1996

Establecen la lista de inscripción de establecimientos exportadores de productos de alimentos para animales.

g) Resolución Exenta N°294

Autorización sanitaria para el funcionamiento del local de elaboración tipo procesadora. Procesar azúcar, miel y productos agrícolas.

h) Documentación y normativas para la exportación de polen

Los productos apícolas de consumo humano que se pueden certificar son la miel, la jalea real, el polen y el propóleos. El SAG participa en la apertura de un mercado y certificación, cuando el mercado de destino del producto tiene exigencias zoosanitarias. Si para exportar el producto apícola se requiere un CZE, previo a solicitar la certificación, el exportador debe verificar que se cumplen todos los requisitos del país de destino. Además, existen mercados a los que se exporta sin la emisión de un certificado zoosanitario (CZE).

En primer lugar, la normativa nacional, es el piso para cualquier certificación. En esta normativa, entre otras cosas, se debe verificar que el apicultor esté inscrito en RAMEX; que las salas de extracción primarias, comunitarias, bodegas de acopio y salas de homogenización cuenten con autorizaciones vigentes, y que el establecimiento del cual se va a exportar esté inscrito en el listado de establecimientos exportadores de productos pecuarios de consumo humano, LEEPP. En segundo lugar, debe cumplir con la normativa y exigencias del país de destino. (Boletín apícola, 2021).

La empresa Badani y Guevara Ltda (Polen de Monte) realiza exportaciones de polen a dos países principalmente, a México y a España por lo que debe considerar la siguiente documentación:

México

- Inscripción en el RFC.
- Encargo conferido.
- Certificado de origen.
- Factura comercial.
- Registro de temperatura del congelador
- Certificado fitosanitario
- Certificado de sanitización de plagas
- Análisis de polen en laboratorios certificados

España

- Certificado de origen.
- Factura comercial.
- Registro de temperatura del congelador
- Certificado zoosanitario
- Certificado de sanitización de plagas
- Análisis de polen en laboratorios certificados
- Reglamento 852/2004
- Reglamento 1169/2011 y con el Real Decreto 1334/1999.

3.1.3 Demanda nacional e internacional de polen

En el caso del polen, este se comercializa como polvo o granulado, solo o mezclado con miel, con propóleo, jalea real y otros productos dietéticos y cosméticos. También es posible encontrarlo como tabletas y cápsulas, congelado, en extractos, productos cosméticos como jabón y champú, té y productos de confitería. Uno de los usos más importantes es como ingrediente en formulaciones para complementos alimenticios, que es el sector que más demanda este producto. En su formato granulado, el más usual, se comercializa en distintos contenedores que van de frascos de vidrio hasta sobres, se puede encontrar tanto en supermercados como también en tiendas especializadas y farmacias. El precio es muy variado, pero oscila entre los $2.000 y los $6.000 por 200 gramos.

A continuación, se detalla que de la demanda total de polen producido en Chile un 30% es para suplir el mercado interno, mientras que el 70% es exportado a distintos países, demostrando así que existe un mercado consolidado.

Tabla 4: Estimación de producción total y mercados de destino

Producto de la colmena	**Producción total**	**Mercado Interno**		**Exportación**	
	Vol TON	**Vol TON**	**%**	**Vol TON**	**%**
Miel	12.000	3.600	30%	8.400	70%
Polen	**60**	**18**	**30%**	**42**	**70%**

Jalea Real	No estimado	No estimado	100%	No estimado	0%
Propóleos	5	4,95	99%	0,05	1%
Abejas Reinas	No estimado	No estimado	50%	No estimado	50%

Fuente: (OPDEPA,2015)

3.2 Empresa Polen de Monte (Badani y Guevara Ltda.)

Badani y Guevara Ltda. (nombre de fantasía Polen de Monte) es una empresa de carácter familiar con más de 30 años de experiencia en el rubro apícola. Se caracterizan por tener un enfoque de máxima calidad en sus productos y servicios, siempre en busca de la mejora continua, enfatizando en la comercialización de productos 100% naturales y orgánicos con alto valor nutricional, proteico, vitamínico y mineralizado. Su casa matriz se encuentra ubicada en ubicada en Peyronet 1981, Quilpué, Región de Valparaíso.

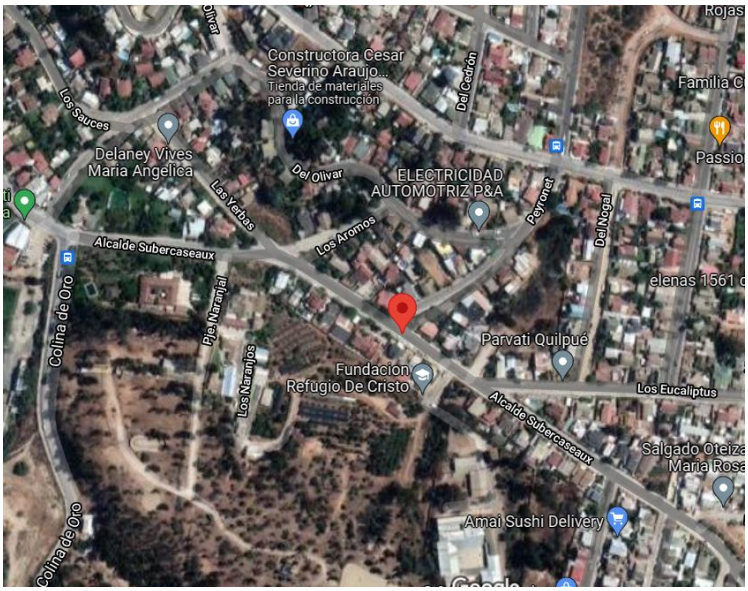


Ilustración 4: Ubicación de la planta Polen de Monte

Su principal producto es el polen de abeja, caracterizado por ser recolectado directamente desde bosques y flora nativa de chile.

Ilustración 5: Trabajadores de planta Polen de Monte

Su compañía está conformada por profesionales del área agroindustrial con vasta experiencia en el rubro apícola, altamente comprometidos con su misión y visión, junto con ello cuentan con mandos medios y trabajadores con alta experiencia y competencias en el rubro.

Misión: Producir y comercializar productos apícolas manteniendo y preservando sus cualidades orgánicas siempre teniendo presente la calidad del producto final, los requerimientos de nuestros clientes y la mejora continua de nuestros procesos.

Visión: Ser referentes a nivel nacional e internacional como productores de Polen de Monte 100% Natural, Libre de OGM y Residuos.

Cuentan con diversas opciones de embalaje y peso individual de acuerdo con los requerimientos del cliente final. Se enfocan en producir polen de monte en las versiones:

- Fresco.
- Fresco refrigerado.
- Fresco congelado y envasado al vacío.
- Polen de Monte Liofilizado y Nano- capsulación de Polen.

Ilustración 6: Polen envasado al vacío

Respetan el medio ambiente en todos sus procesos de recolección. Todos sus puntos de colecta se encuentran ubicados en lugares libres de carga agrícola (frutales, hortalizas y semillas) con presencia de bosques y flora nativa.

El polen de Monte es el elemento masculino de las flores recogido por las abejas obreras depositado en la colmena y se colecta antes de ingresar a la colmena. Es una proteína 100% vegetal, altamente vitaminizada y mineralizada. Polen de Abeja con 0% contenido de Gluten.

Ilustración 7: Polen de abeja

3.3 USM Bee lab

La Universidad Técnica Federico Santa María en un trabajo conjunto entre el Centro de Biotecnología Dr. Daniel Alkalay Lowitt, el Departamento de Ingeniería Química y Ambiental y de la iniciativa "Campus Sustentable" de la Dirección Campus Casa Central Valparaíso han implementado el primer "USM Bee Lab" en dependencias de la universidad para desarrollar diversos proyectos de investigación en torno a la apicultura y los productos de la colmena, así como también difundir la práctica de la apicultura urbana entre sus alumnos y funcionarios. El objetivo general del proyecto es aportar a la sostenibilidad de la apicultura desde la perspectiva de una universidad técnica líder en ingeniería y tecnología, posicionando a la Universidad Técnica Federico Santa María como el primer Bee Lab universitario del país. Como objetivos específicos del proyecto, se ha planteado:

– Implementar un apiario de 4 a 6 colmenas en la universidad, las que servirán como colmenas experimentales para proyectos en ejecución y para el desarrollo de futuros proyectos.
– Impartir talleres sobre apicultura para alumnos y funcionarios, además de participar en actividades de difusión para la comunidad universitaria y comunidad en general.
– Desarrollar la Línea de Investigación en Biotecnología y Sanidad Apícola

Patrocinadores:

- Dirección del Campus Casa Central: Iniciativa Campus Sustentable.
- Departamento de Ingeniería Química y Ambiental: Línea de Sustentabilidad.
- Centro de Biotecnología: Línea de Investigación en Biotecnología y Sanidad Apícola.

4. MARCO TEÓRICO

4.1 Tamizado o cribado

Es una operación básica en la que una mezcla de partículas sólidas, de diferentes tamaños, se separan dos o más, pasándola por un tamiz. Cada fracción es más uniforme en tamaño que la mezcla original. Un tamiz es una superficie que contiene cierto número de aperturas, de igual tamaño. La superficie puede ser plano horizontal, inclinada o cilíndrica. Los tamices planos, de pequeña capacidad, se denominan cedazos y cribas. En general, los tamices se usan mucho para separar mezclas de productos granulares o pulverulentos, en intervalos de tamaños. Hay cierto solapamiento entre el tamizado y otras operaciones básicas, ya que los tamices y rejillas se utilizan, en la filtración, en la industria alimentaria, en laboratorios; con el fin de separar productos sólidos de líquidos, por tamaños, para clasificar frutas y hortalizas, Además se separan industrialmente los productos alimenticios con dos o más categorías de tamaño de partícula, con fines industriales específicos, el tamizado o cribado se usa también con fines analíticos, para determinar el tamaño de partícula y la distribución por tamaño de los productos pulverulentos (COTECNO, 2020). Para que se realice el proceso de tamizado debe existir cierto movimiento entre la mezcla a separar y la superficie del tamiz. Así, se establecen coincidencias entre los poros o agujeros del tamiz con las partículas que los pueden atravesar, el objetivo del tamizado es realizar la separación de las partículas sólidas según su tamaño. El instrumento usado para separar partículas en diferentes tamaños es conocido como tamizador, el cual es un instrumento que se utiliza en el análisis de partículas en el que se agita una serie de tamices que se colocan en orden de mayor abertura en la parte superior hasta la más pequeña en la parte inferior, de modo que los materiales se separan de acuerdo con sus tamaños de partículas (COTECNO, 2020). Un tamizador con funcionamiento eléctrico puede substituir el trabajo por tamizado manual en la mayoría de los casos donde se requiera obtener grandes volúmenes de material tamizado en poco tiempo, gastando pocos recursos, por lo que, esta herramienta ofrece ventajas notorias donde el material puede ser reducido en tamaño usando diferentes tamaños de tamices al mismo tiempo sin la necesidad de recurrir a realizar la operación con tiempos muertos o pausando el trabajo para hacer el respectivo cambio. Entre otras, se encuentran una frecuencia vibratoria constante y la amplitud en el movimiento del tamizado es consistente lo que garantiza mejores resultados

cuando se requieren pruebas repetibles (COTECNO, 2020). Cuando se separan mezclas mediante un tamizador, se tienen dos tipos de separación que dependen de la humedad de la mezcla a separar. Se encuentra entonces, un tamizado por vía seca que consiste en separar aquellas mezclas de partículas que por naturaleza poseen escasa o nula humedad. También se encuentra el tamizado de sustancias o mezclas de partículas que fueron sometidas previamente a procesos de deshidratación. el segundo tamizado es por vía húmeda que consiste en agregar agua u otros fluidos a la mezcla. Esto se hace con el fin de facilitar el arrastre o paso de las partículas más finas a través del tamiz. El tamizado realizado por este método o vía es más eficiente; pero en general es el menos usado. Cuando este tipo de tamizado se emplea en productos cuya presentación final es seca, requieren de secado posterior al tamizado (Retsch GmbH, 2020).

4.1.1 Tipos de tamizados

Los tipos de tamizados pueden clasificarse según el proceso por el cual se separan mezclas heterogéneas, para así obtener distintos tamaños de partículas. Con base en esto, se tiene el tamizado manual o artesanal y el tamizado hecho mediante máquinas. Las máquinas que realizan estos tipos de procesos se clasifican en máquinas tamizadoras vibratorias o de movimiento reciprocante, giratorias y centrífugas, las cuales tienen su propio mecanismo de separación de mezclas. El mecanismo más importante para destacar y el que las diferencia en su proceso es el ángulo de inclinación predispuesto para la malla de tamizaje. Por tanto, es importante tener en cuenta los valores establecidos para cada una de éstas, debido que dictará sobre las dimensiones generales de cada máquina acorde a su capacidad y funcionamiento. El tamizado en máquinas se encuentra establecido por su principio de operación, mediante el cual se determina el tamaño de partícula deseado para la actividad posterior a realizar, por lo que para cada operación se debe utilizar un tipo de máquina específica y diseñada para su uso sobre un terreno o posición en particular. En resumen, se puede comprender cada tipo de tamizado, mencionado anteriormente, bajo los siguientes criterios. (Varela, E. 2019)

4.1.1.1 Tamizado manual

El tamizado manual es aquella actividad realizada por personas empleando un tamiz de geometría rectangular o circular con marco de madera. Este proceso lo pueden realizar una o dos personas que imparten movimiento lineal reciprocante o describiendo una trayectoria circular al tamiz forzando la arena a pasar a través de la malla. Como se observa en la Figura N°5 (J. Pérez Porto y A. Gardey, 2019).

Ilustración 8: Proceso de tamizado manual – artesanal.

4.1.1.2 Tamizado vibratorio

También conocidas como cribas vibratorias que trabajan en altas frecuencias y son principalmente utilizadas en la industria de procesamiento de minerales y alimentos. Lo que responde en sus dimensiones necesarias para el proceso realizado y un ángulo de inclinación que comprende un rango de variación de 0 y 25 grados llegando máximo a 45 grados, establecido en la literatura. La idea principal en esta tamizadora no necesariamente es clasificar el producto por tamaños, sino, separar las impurezas que puede tener el material de trabajo. El rango de frecuencias normalmente está entre 1500 a 7200 RPM para eliminar factores de riesgo provocados por los granos críticos, ya que, por su diámetro granular equivalente a 1,1 veces el orificio pasante en la malla tienden a causar taponamiento por obstrucción y a su vez esto origina saltos y golpes entre los granos. Por último, se debe tener presente que las vibraciones se generan a partir de una fuente eléctrica o por accionamiento mecánico y se ven reflejadas directamente en los tamices causando rapidez de vibración y pequeñas amplitudes. Ilustración N°9 (J. Pérez Porto y A. Gardey, 2019).

Ilustración 9: Máquina tamizadora vibratoria, escala de laboratorio

4.1.1.3 Tamizado centrífugo

Para este tipo de tamizado en particular existe un procedimiento previo en el que se debe tener en cuenta el material a tamizar, se puede utilizar seco o húmedo, pero, en condiciones no aglomeradas es necesario realizar un proceso de separación de cuerpos grandes por fuerza de impacto y así tener partículas que puedan desarrollar un mejor procedimiento, el cual, se puede ver reflejado en el rendimiento total del proceso de tamizado. El tamizaje por centrifugado se realiza introduciendo material a un barril o tanque mediante un dispensador o por acción manual, donde está girando a causa de un eje acoplado a la estructura y al sistema de transmisión. El material es distribuido por las paredes de las mallas cilíndricas mediante la aplicación de una fuerza centrífuga el material tamizado pasará a través de la malla y caerá a la tolva de descargar conectada a un tanque receptor en su defecto un balde. Los restos como lo son partículas de tamaño granular superior al orificio de la malla y otros cuerpos extraños son atrapados dentro del tanque para posteriormente ser expulsados por la salida posterior que a su vez puede ser equipado un tanque colector para permitir la utilización de este material en otros procesos de trabajo. Un ejemplo de la máquina se puede observar en la Ilustración N° 10 (J. Pérez Porto y A. Gardey, 2019).

Ilustración 10:Máquina tamizadora centrífuga para harina

4.2 Teoría del equipo semi - industrial.

4.2.1 Principios físicos y parámetros necesarios para el diseño del equipo

Un equipo de separación por tamaño conocido es el trómel, el cual se utilizará como base para estudiar la fenomenología del limpiador de polen. El trómel es un dispositivo de cribado que incorpora un tambor perforado giratorio como componente principal. Las perforaciones o los orificios permiten que según el tamaño de la partícula de polen caigan a lo largo del cilindro. Para diseño de separadores tipo trómel existen diferentes parámetros como son el diámetro, la longitud, la velocidad de giro, el ángulo de inclinación, la alimentación y la distribución de tamaños de partícula.

Los parámetros de diseño preliminares para el equipo se han obtenido de dos fuentes: Salvaje et al. (1986) y Cooper (2001). Estos parámetros se enumeran en la Tabla N°5:

Tabla 5: Parámetros de diseño de un trómel

Nomenclatura

A	Angulo de inclinación de la criba (°)	n_c	Velocidad de rotación crítica (rpm) (rev/s)
D	Diámetro de la criba (m)	Q_m	Rendimiento de la Criba (kg/h) (lb/s)
d_b	peso específico a granel del polen (lb/ft^3)	Q_1	caudal másico sobredimensionado (kg/h)
d	diámetro de los agujeros de la criba (mm)	Q_2	caudal másico subdimensionado (kg/h)
F	factor de relleno (%)	R_t	recuperación total a subdimensionado
g	Aceleración de Gravedad (ft/s^2)	R_u	recuperación a subdimensionado por metro
K_v	factor de corrección de velocidad, 1.35, cuando a = 3° y 1.85, cuando a = 5°	r	Radio de la criba (m) (ft)
L	Longitud de la criba (m) (ft)	T	tiempo de retención del Polen(s)
n	Velocidad de Rotación (rpm) (rev/s)	V	velocidad rotacional (m/s) (ft/s)

Fuente: (Sullivan,1992)

En general, la velocidad de rotación, n, es una función de la velocidad crítica, nc, (la velocidad de rotación a la que los materiales se adhieren a la superficie de la pantalla). La velocidad crítica es calculada por Sullivan et al. (1992):

$$\mathrm{nc} = \frac{42{,}2\pi}{30\sqrt{D}} \tag{1}$$

La velocidad óptima ocurre cuando los materiales caen en un movimiento de cataratas. Idealmente, la velocidad de rotación debe ser el 50 % de la velocidad crítica con elevadores y el 80 % sin ellos. Se han informado ángulos de inclinación comunes de 2 a 5 para los trómeles (Sullivan et al., 1992). Sullivan et al. (1992) sugirió un método de cálculo para el diámetro del trómel, D, se puede usar la siguiente ecuación:

$$D = \left[\frac{11.36Q_m}{d_b F K_v g^{0.5} tan\alpha}\right] \tag{2}$$

Sullivan et al. (1992) indicaron que la eficiencia general de la pantalla aumenta con la longitud; sin embargo, la cantidad de mejora disminuye a medida que aumenta la longitud total. Un trómel generalmente varía en longitud de dos a seis veces el diámetro de una unidad de una sola etapa. Como regla general, el material debe permanecer en el tambor por no menos de 2 min, siendo más comunes los tiempos de residencia de 3 a 5 min. El tiempo de residencia, T, se calcula a partir de la siguiente ecuación:

$$T = \frac{L}{V} \tag{3}$$

Aquí la longitud del trómel, L, se obtiene de la siguiente ecuación:

$$\mathrm{L} = 0.113\mathrm{TD}^{0.5} K_v g^{0.5} tan\alpha \tag{4}$$

Alternativamente, la longitud del trómel para una recuperación deseada puede ser estimada por Wheeler et al. (1989):

$$L = \frac{ln(1 - R_T)}{ln(1 - R_u)} \quad (5)$$

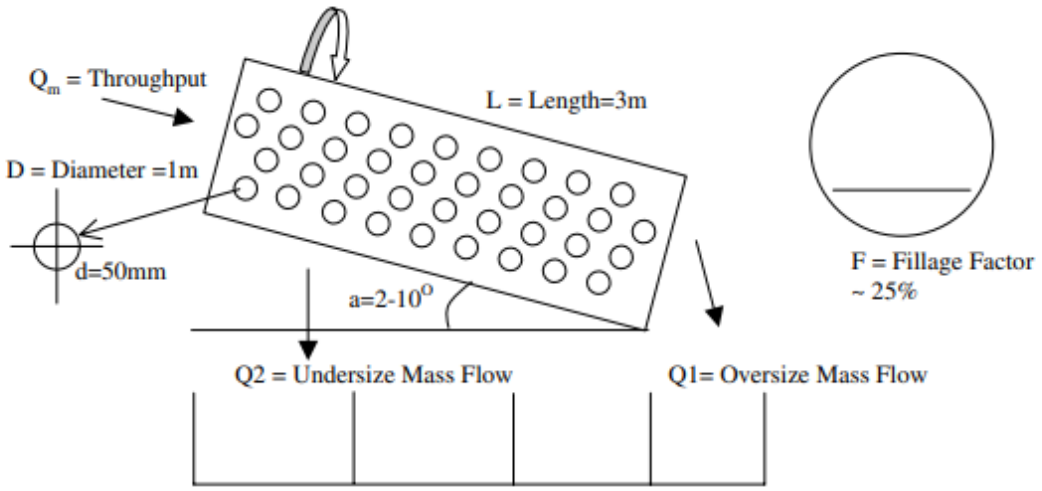


Ilustración 11: Esquema de un trómel

Fuente: (Lau et al., 2005)

Los investigadores (Rotich et al., 2015) encontraron que altos ángulos de inclinación de la criba con respecto a la horizontal aumentan la velocidad de deslizamiento de las partículas sobre ésta hacia las tolvas de descargue producto de la gravedad, pero reducen el área efectiva de tamizado lo que causa que la producción disminuya debido al desecho del producto sin tamizar. En un rango de inclinaciones entre 15 y 20° las partículas con tamaño promedio de 2 mm a 3 mm parecen separar bastante bien a la medida inferior, aunque no tan bien con partículas de menor tamaño en las mismas inclinaciones. En ángulos menores a 5 ° una cantidad significativa de partículas de 0,75 mm a 1 mm se separaron de la medida inferior, aunque con flujos muy pobres, mientras que la mayoría de las partículas más grandes parecían a estancarse en los orificios de la malla tamiz

4.2.1.1 Velocidad de rotación de la criba

La velocidad rotacional es función de la velocidad crítica a la cual los materiales quedan adheridos a las paredes del separador.

La velocidad óptima ocurre cuando los residuos tienen un movimiento tipo catarata, es decir, son parcialmente subidos por la pared del separador hasta cierta altura y caen. Idealmente la velocidad de rotación debe ser el 50% de la velocidad crítica para diseños que incluyen placas verticales en el interior y 80% para casos que no consideren estas placas. Algunas velocidades reportadas se encuentran entre 10 y 18 $\left(\frac{rev}{min}\right)$

El ángulo de inclinación entre la entrada y la salida del separador influye en el tiempo de residencia de los residuos. Los ángulos de inclinación reportados van de 2 a 5°. (Tchobanoglous, 1993)

Existen tres tipos de movimiento que puede generarse en el trómel para realizar la separación:

Caída o hundimiento: Esto ocurre cuando la velocidad de rotación del tambor es baja. Las partículas se elevan ligeramente de la parte inferior del tambor antes de caer hacia abajo en la superficie libre, como se muestra en la Ilustración N°12. Los gránulos de tamaño más pequeños que el filtro y que están cerca de la pared del cuerpo trómel son capaces de ser controlados, esto resulta en una eficiencia de cribado inferior. (Rodríguez García, 2016)

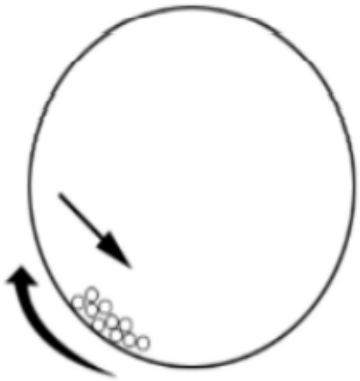


Ilustración 12:El hundimiento de movimiento en un tambor rotativo

Fuente. (Rodríguez García, 2016)

Catarata: A medida que aumenta la velocidad de rotación hay una caída de transiciones a efecto catarata, con un movimiento donde las partículas se separan en la parte superior del tambor giratorio, como se muestra en la Ilustración N°13Los gránulos más grandes se segregan cerca de la superficie interior, mientras que los gránulos más pequeños se quedan cerca de la superficie de la pantalla, lo que permite que pasen mayor cantidad de pequeños gránulos de filtro. Este movimiento genera un flujo turbulento de las partículas, lo que resulta en una mayor eficiencia de detección en comparación con la caída. (Rodríguez García, 2016)

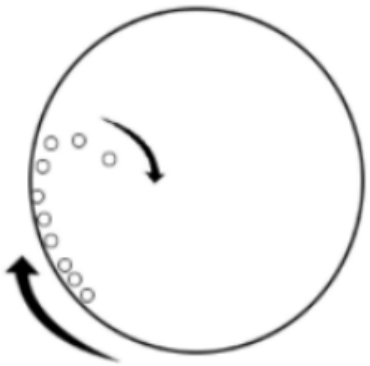


Ilustración 13: Efecto catarata movimiento en tambor rotativo

Fuente. (Rodríguez García, 2016)

Centrifugación: Como la velocidad de rotación se incrementa más, el movimiento efecto de catarata pasará a un movimiento de centrifugación que resultará en una eficiencia de cribado inferior. Esto es debido a que las partículas se fijan a la pared del tambor giratorio causado por las fuerzas centrífugas (Rodríguez García, 2016).

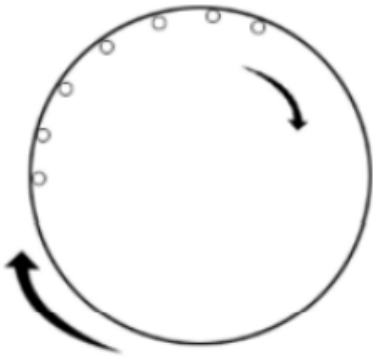


Ilustración 14: La centrifugación de movimiento en el tambor rotativo.

Fuente. (Rodríguez García, 2016)

Velocidad crítica: Al rotar la criba eleva su carga, existe una velocidad de rotación más allá de la cual un elemento de la carga tendrá la suficiente fuerza para adherirse a esta. Esta velocidad que debe alcanzar es la velocidad crítica (Nc) y depende del diámetro D de la criba. Para poder estimar esta velocidad es necesario realizar un balance de fuerzas del cual se obtiene la relación de velocidad de rotación crítica. La velocidad de rotación de la máquina está en función de la velocidad crítica, esta es la velocidad en la que los materiales se centrifugan o se adhieren a la superficie de cribado (Álvarez Velasco, 2013)

La velocidad crítica viene dada por la ecuación N°6:

$$\mathrm{Nc} = \frac{42{,}2\pi}{30\sqrt{D}} \qquad (6)$$

Donde:

Nc = velocidad crítica $\left(\frac{rad}{s}\right)$

D = Diámetro del trómel (m)

Velocidad óptima: La velocidad óptima se produce cuando los agregados se voltean con un movimiento de catarata, se produce parcialmente por la pared interior del tambor y después caen sobre sí mismo; En la Ilustración N°15 podemos encontrar la relación de

llenado versus el porcentaje de vueltas y se puede obtener la velocidad óptima para el trómel (Álvarez Velasco, 2013).

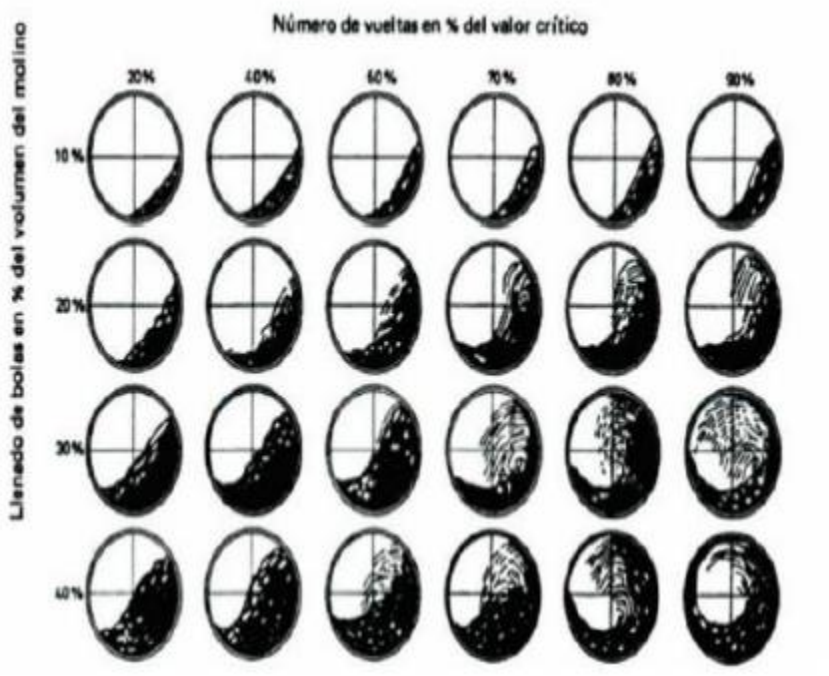


Ilustración 15:Movimiento del agregado dentro de la criba – trommel.

Fuente: (Álvarez Velasco, 2013).

Teniendo en cuenta el número de vueltas en porcentaje (%) del valor crítico X y la velocidad crítica se puede calcular la velocidad óptima mediante la ecuación N°7:

$$\mathrm{Nop} = \mathrm{XNc} = \frac{42{,}2\pi X}{30\sqrt{D}} \qquad (7)$$

Donde:

Nc: velocidad crítica $\left(\frac{rad}{s}\right)$

D: diámetro del trómel (m)

Nop: velocidad óptima $\left(\frac{rad}{s}\right)$

X: porcentaje (%) del valor crítico (adimensional).

4.2.1.2 Potencia necesaria para mover el equipo

Según Serway & Jewtt. jr, (2008) la potencia se define como el trabajo realizado por unidad de tiempo (J/s), donde el trabajo tiene unidades de Nm equivalente a 1 Joules. Se puede escribir el cálculo de la potencia mediante la ecuación N°8:

$$H = T\omega \tag{8}$$

Donde:

H: potencia en watts (W)

T: torque (Nm)

ω: velocidad angular $\left(\frac{rad}{s}\right)$

Para el cálculo de la potencia H se tuvo en cuenta dos factores, la potencia necesaria para mover el trómel y la potencia necesaria para mover el polen, de esta manera se calcula la potencia necesaria para mover el conjunto trómel y polen. Como se indica en la ecuación N°9:

$$H = H_a + H_t \tag{9}$$

Donde:

Ha: potencia para mover el polen (W)

Ht: potencia para mover el trómel (W)

Potencia necesaria para mover el polen ($\boldsymbol{Ha}$)

Esta potencia se calculó con base en la cantidad de polen que se adiciona al trómel cuando este se encuentra en movimiento, teniendo en cuenta la velocidad óptima Nop del trómel y el torque Ta. Se puede escribir el cálculo de la potencia como indica la ecuación N°10

$$H_a = T_a N_{op} \tag{10}$$

Donde:

Nop: velocidad óptima $\left(\frac{rad}{s}\right)$

Ta: torque (Nm)

El torque se determinó mediante un análisis estático usando la ecuación (11) teniendo en cuenta el peso del polen y el centroide de la fracción de polen:

$$T_a = w_a y \tag{11}$$

Donde:

wa: peso de el polen (N)

y: centro de masa con respecto al centro del trómel (m)

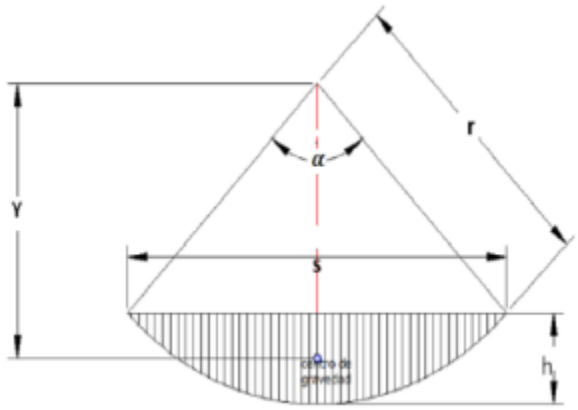


Ilustración 16: Área de relleno de polen dentro del trómel

Fuente. (GIECK, 2019)

Para el cálculo del peso del polen wa que se encuentra dentro del trómel cuando esta empieza a girar, se debe conocer el peso específico del polen y el volumen que se encuentra dentro de él. Mediante la ecuación N°12:

$$w_a = \gamma V = \rho g V \tag{12}$$

Donde:

V: volumen del polen. (m^3)

γ: peso específico. $\left(\frac{kN}{m^3}\right)$

El peso específico del Polen se encuentra en el anexo A1.

El volumen V del polen es calculado por el área generada por la porción de polen que cubre el trómel como se indica en la Ilustración N° 16, multiplicada por la longitud L del tamiz. usando la ecuación:

$$V = A * L \tag{13}$$

Las ecuaciones para el cálculo del centroide y del área se pueden hallar en los anexos A1 y A2, respectivamente.

Potencia necesaria para mover el trómel (Ht)

Esta potencia se calculó con base al momento torsor Tt generado por el peso de la estructura del equipo, con respecto al centro del harnero junto con la velocidad óptima de la máquina Nop. Como se indica la siguiente ecuación:

$$H_t = T_t N_{op} \tag{14}$$

Donde:

Nop: velocidad óptima $\left(\frac{rad}{s}\right)$

Tt: torque (Nm)

El torque Tt viene dado por un análisis dinámico teniendo en cuenta la masa del harnero, mt y la aceleración angular a del sistema que está dada en radianes por segundo al cuadrado rad/s 2 y el radio elevado al cuadrado del tamiz interno r, como indica la ecuación N°15:

$$\mathrm{T}_t = \alpha r^2 m_t \tag{15}$$

Estas ecuaciones se tomaron teniendo en cuenta la literatura (Serway & Jewtt. jr, 2008). La velocidad angular del sistema se obtiene mediante la velocidad óptima dividida por el tiempo top, este viene siendo el tiempo que tarda la máquina en alcanzar la velocidad óptima de operación y se determinó mediante ensayos hechos con la máquina.

Una vez efectuado los cálculos pertinentes para la potencia, validará si el motor utilizado es el óptimo.

4.2.1.3 Flujo másico de la máquina tamizadora y tiempo que tarda en pasar el polen por el trómel.

Flujo Másico:

$$\dot{m} = \frac{\rho K_v \sqrt{g} d^{\left(\frac{5}{2}\right)} tan\emptyset f}{11{,}36} = \frac{masa}{tiempo} \tag{16}$$

Donde

$\dot{m}$: Flujo Másico $\left(\frac{Kg}{s}\right)$

ρ: Densidad $\left(\frac{Kg}{m^3}\right)$

K_v: Factor de velocidad

g: Gravedad $\left(\frac{m}{s^2}\right)$

d : Diámetro de la criba interno (m)

$\emptyset$: Angulo de inclinación (°)

f : Factor de relleno

Tiempo que tarda en pasar el Polen por la criba

$$t = \sqrt{\frac{L\rho\pi r^2}{mg\dot{s}en\emptyset}} \qquad (17)$$

Donde

t: Tiempo (s)

L: Longitud de la criba (m)

r: Radio de la criba

4.2.1.4 Flujo de viento del equipo

El polen que ingresa al equipo es impulsado a través de la criba giratoria mediante una turbina de viento, por lo que se generan altas turbulencias y variaciones en la dirección del flujo.

Una de las principales problemáticas que se abordan en esta tesis, es la alta turbulencia y por ende remolinos de viento, los cuales producen que los residuos se devuelvan al inicio del proceso y caigan sobre el polen ya limpio, disminuyendo la eficiencia del equipo.

Se diseñará un cono de contracción para la turbina el cual dirigirá el flujo de aire y permitirá que se mezcle con el flujo de entrada de polen de manera homogénea. Además, se añadirá un ciclón como post procesamiento para eliminar de manera más eficiente los residuos más livianos.

Para determinar si las mejoras son viables y las óptimas, se utilizará el software COMSOL para realizar las simulaciones de flujo de aire, para ello se deben considerar los siguientes fenómenos que presenta el flujo de aire dentro del equipo.

Existen dos tipos de flujos permanentes en el caso de fluidos reales, que es necesario conocer y entender: flujo laminar y el flujo turbulento. Ambos flujos son gobernados por distintas leyes. Flujo laminar, es decir, el flujo ordenado que se observa, por ejemplo, en el flujo por

un tubo a velocidades lo suficientemente bajas de modo que partículas minúsculas inyectadas en el tubo se mueven siguiendo una 1ínea delgada. Esto contrasta de manera muy clara con el caótico "flujo turbulento" a velocidades suficientemente altas donde las partículas son arrojadas y dispersadas a lo largo de toda la sección transversal del tubo.

Fenómenos del viento que ocurren en el equipo

Flujo Laminar

Se llama flujo laminar o corriente laminar, al tipo de movimiento de un fluido cuando éste es perfectamente ordenado, suave, de manera que el fluido se mueve en láminas paralelas sin entremezclarse. Se dice que este flujo es aerodinámico, es decir, cada partícula de fluido sigue una trayectoria suave, llamada línea de corriente. (Marco Antonio Álvarez,2012)

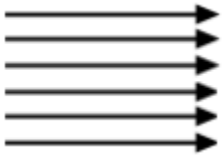


Ilustración 17: Representación de líneas de flujo laminar

La pérdida de energía es proporcional a la velocidad media. El perfil de velocidades tiene forma de una parábola, donde la velocidad máxima se encuentra en el eje del tubo y la velocidad es igual a cero en la pared del tubo.

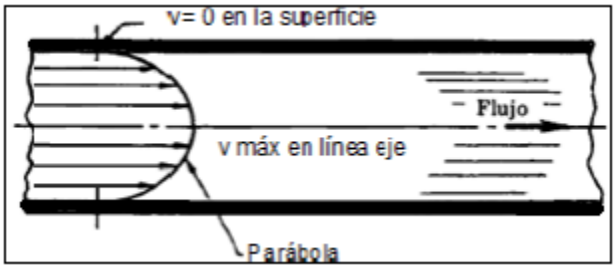


Ilustración 18: Distribución de velocidades de un fluido a través de una tubería

Fuente: (Marco Antonio Álvarez,2012)

Existe flujo laminar en fluidos con velocidades bajas o viscosidades altas, cuando se cumple que el número de Reynolds es inferior a 2300. Más allá de este número, será un flujo turbulento.

Flujo Turbulento

El flujo turbulento es más comúnmente desarrollado debido a que la naturaleza tiene tendencia hacia el desorden y esto en términos de flujos significa tendencia hacia la turbulencia. Este tipo de flujo se caracteriza por trayectorias circulares erráticas, semejantes a remolinos. El flujo turbulento ocurre cuando las velocidades de flujo son generalmente muy altas o en fluidos en los que las fuerzas viscosas son muy pequeñas. (Marco Antonio Álvarez,2012)

Ilustración 19:Representación de líneas de flujo turbulento

La turbulencia puede originarse por la presencia de paredes en contacto con el fluido o por la existencia de capas que se muevan a diferentes velocidades. Además, un flujo turbulento puede desarrollarse bien sea en un conducto liso o en conducto rugoso. Se define como flujo turbulento al fluido que presenta un número de Reynolds mayor a 4000.

Modelos de Turbulencia: En el caso de flujos turbulentos, ocurren oscilaciones en los campos de velocidad y presión, que dependen del tiempo, por lo que la resolución de la malla y el avance en el tiempo deben ser suficientemente finas para contemplar hasta los más pequeños remolinos que suceden en el flujo. Con forme aumenta el número de Reynolds, estas oscilaciones se vuelven tan pequeñas que resulta inviable, desde el punto de vista computacional actual, resolver las ecuaciones de Navier Stokes para cada elemento de la malla. La solución numérica con la aproximación de un mallado se traduce en un consumo computacional de recursos que excede lo manejable. Sin embargo, es posible obtener resultados para flujos simples a números de Reynolds moderados -con supercomputadores- lo que favorece la comprensión del fenómeno de turbulencia y ayuda a desarrollar mejores modelos. (Kuzmin, D., Mierka, O., & Turek, S, 2007)

a) *LES: Large-eddy simulation*: En el modelo LES se calculan de forma directa los movimientos de gran escala (grandes remolinos equivalente a large eddies en inglés) y los de pequeña escala son modelados y no resueltos directamente, lo que reduce el costo

computacional respecto a una DNS. Por pequeña escala se entiende la escala menor que la malla computacional, en inglés subgrid-scale SGS. El modelo LES fue propuesto en 1960 para simular flujos atmosféricos. Resulta sumamente adecuado para simular flujos turbulentos en régimen de transición. No obstante, por resolver de forma directa parte de las ecuaciones de Navier Stokes, el modelo LES resulta computacionalmente muy costoso para algunos problemas prácticos en ingeniería y se requiere una importante experiencia y conocimiento para emplear este modelo y obtener resultados adecuados. (Kuzmin, D., Mierka, O., & Turek, S, 2007).

b) DES: detached Eddy Simulation: Es un método en que se calculan de forma exacta los remolinos de gran escala y se modela con un promedio de Reynolds convencional los de pequeña escala, en la capa límite. En este caso, al comparar DES con LES, se debe indicar que en DES la pequeña escala es mucho mayor que la escala de la malla computacional SGS. (Kuzmin, D., Mierka, O., & Turek, S, 2007).

c) RANS: Reynolds Averaged Navier Stokes: El modelo RANS fue propuesto por Reynolds en 1895 y consiste en descomponer las variables de interés (velocidad, presión, etc.) en un valor medio y otro fluctuante. La aplicabilidad del promedio de Reynolds depende implícitamente de la estabilidad de los valores promedio. En esencia, el promedio de Reynolds es una brutal simplificación donde se pierde mucha información contenida originalmente en las ecuaciones de Navier Stokes. De este modo las ecuaciones originales de Navier Stokes se reformulan en función de las variables promedio y se obtiene un nuevo grupo de ecuaciones, precisamente las ecuaciones promediadas de Reynolds, que es similar al conjunto original, pero con una variable adicional, razón por la cual se requiere un modelo adicional que permita cerrar el modelo RANS. El modelo RANS es de menor complejidad que el modelo LES, o bien, es menos demandante computacionalmente, pues no resuelve de forma directa las ecuaciones originales de Navier Stokes. (Kuzmin, D., Mierka, O., & Turek, S, 2007).

Capa Límite

Cuando un fluido fluye sobre una superficie, debido a la fricción, la capa más cercana a la superficie se detiene completamente. Encima de esta capa se forman otras, cada una de las

cuales tiene menos fricción que la anterior y por tanto mayor velocidad. Así hasta que a partir de una capa concreta no hay fricción y las capas tienen la velocidad libre del fluido. Al conjunto de capas que van desde la que tiene velocidad cero (la más cercana al ala) hasta la que tiene velocidad libre, se le llama capa límite. A la distancia entre la primera y la última capa, es denominada como espesor de la capa límite. El espesor de la capa límite suele aumentar a medida que el fluido se mueve a lo largo de la superficie. La cantidad de este aumento depende de la viscosidad del flujo, la suavidad y rugosidad de la superficie, y la forma de esta. (Marco Antonio Álvarez,2012)

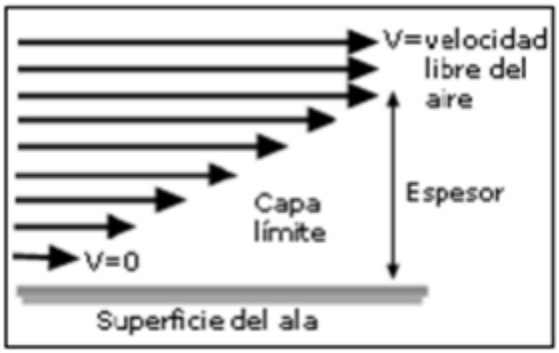


Ilustración 20: Capa límite. Perfil de velocidades

Fuente: (Marco Antonio Álvarez,2012)

A la capa límite cuyo flujo es laminar se le suele llamar capa límite laminar, que a veces se abrevia como capa laminar, mientras que, si el flujo es turbulento, la capa recibe el nombre de capa límite turbulenta, abreviada como capa turbulenta. Cuando la capa límite comienza a fluir por el borde de ataque del ala, lo hace en forma de capa laminar, pegada al ala y muy fina; pero a medida que fluye hacia el borde de salida, más o menos por el centro del ala, comienza a perder velocidad debido a la fricción y se va haciendo capa turbulenta, más separada y con más grosor. Mientras la capa es laminar, se mantiene pegada al ala y produce sustentación, pero al convertirse en turbulenta aumenta su separación del ala y no produce sustentación. El punto en el cual la capa laminar se va convirtiendo en turbulenta e incrementa su grosor se denomina “transición a turbulencia” o “transición de capa límite”.

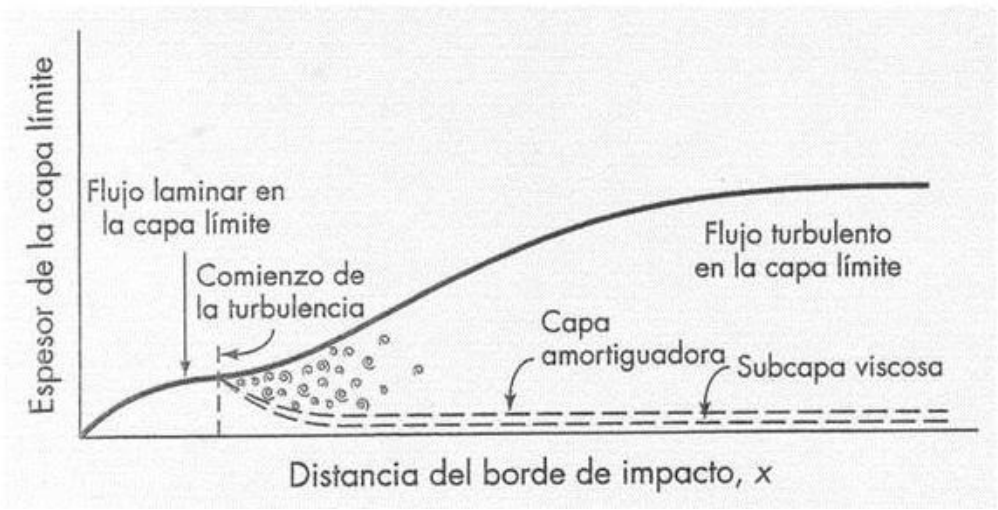


Ilustración 21: Desarrollo de la turbulencia en la capa límite

Fuente: (Marco Antonio Álvarez,2012)

Número De Reynolds

El número de Reynolds (Re) es un número adimensional utilizado en mecánica de fluidos, diseño de reactores y fenómenos de transporte para caracterizar el movimiento de un fluido. Este número recibe su nombre en honor de Osborne Reynodls (1842-1912), quien lo describió en 1883. El número de Reynolds relaciona la densidad, viscosidad, velocidad y dimensión típica de un flujo, en una expresión adimensional, que interviene en numerosos problemas de dinámica de fluidos. Dicho número o combinación adimensional aparece en muchos casos relacionado con el hecho de que el flujo pueda considerarse laminar (número de Reynolds pequeño, menor a 2300) o turbulento (número de Reynolds grande, mayor a 4000). Desde un punto de vista matemático, el número de Reynolds de un problema o situación concreta se define por medio de la siguiente fórmula (Marco Antonio Álvarez,2012):

$$Re = \frac{\rho D v_S}{\mu} \qquad (18)$$

Donde:

ρ: Densidad del fluido

v_S: Velocidad característica del fluido

D: Diámetro de la tubería a través del cual circula el fluido o longitud característica del fluido

μ: Viscosidad dinámica del fluido

Túnel de viento

Un túnel de viento o túnel aerodinámico es una herramienta experimental para estudiar los efectos del flujo de aire sobre objetos o cuerpos sólidos. Con él se simulan las condiciones experimentales por el objeto en la situación real. El túnel de viento es el sistema de simulación por excelencia, y aunque su funcionamiento es más complejo de lo que parece, se basa en conceptos bastante simples que se explican a continuación. En un túnel de viento, el objeto permanece estacionario mientras se fuerza el paso de aire o gas alrededor de él. El aire se sopla o aspira por medio de una turbina o ventilador a través de un conducto equipado con una ventana y otros aparatos en los que los modelos o formas geométricas se montan para el estudio. Después se utilizan varias técnicas para estudiar el flujo de aire real alrededor de la geometría y se comparan con los resultados teóricos, que también deben tener en cuenta el número de Reynolds y el número de Mach para su régimen de funcionamiento. En su topología más elemental, un túnel de viento es una instalación formada por un conducto tubular de sección arbitraria y regular, capaz de someter al modelo bajo ensayo a un flujo fluido con determinadas propiedades, con tal de caracterizar los fenómenos producidos durante su interacción. La experimentación en túneles de viento resulta a menudo el método más rápido, económico y preciso para la realización de estudios aerodinámicos; ofrecen capacidades de trabajo con modelos a escala en fases iniciales de desarrollo, representan enteramente la complejidad del comportamiento de un fluido real, y proporcionan grandes cantidades de información fiable que sirve de base para diferentes decisiones de diseño. (Luis Díaz Iriberri, 2005)

La topología concreta de un túnel de viento varía según la utilización determinada que se considere dar a la instalación. Sin embargo, la mayoría de ellos presentan cuatro componentes comunes, que constituyen los ejes de diseño de cualquier infraestructura de este tipo.

Esta sección es el componente más importante de un túnel de viento, siendo en este dónde se realiza el ensayo. En ella se instala el modelo bajo estudio, controlando que el flujo fluido presente unas características de turbulencia y velocidades idóneas para una correcta reproducción de la situación que se pretende simular. Sus parámetros de diseño se definen a partir de requisitos operativos, principalmente accesibilidad para la manipulación del modelo y los diferentes instrumentos de medida necesarios para el ensayo, así como la correcta caracterización del flujo para reproducir el entorno deseado. (Luis Díaz Iriberri, 2005).

Esta sección tiene por propósito dotar al flujo de los parámetros de calidad necesarios (dirección, turbulencia, perfil de velocidades, etc.) para una correcta realización del ensayo. Tal acondicionamiento se consigue haciendo circular el fluido a través de una serie de dispositivos que le confieren una turbulencia isótropa (la fluctuación media del corriente turbulento es igual en todas direcciones, incluso en escalas de longitud pequeñas) y eliminan los vórtices de mayor tamaño, dejando pasar únicamente aquellos de pequeña magnitud que se extinguirán rápidamente en secciones posteriores. Estos dispositivos son, principalmente:

- Panel de abejas: Elementos en forma de panel mallado cuya función es la de dotar al flujo de la dirección deseada. El fluido circula a través de los diferentes elementos de la malla adoptando una disposición de filamentos paralelos a su paso. Según, los valores de porosidad típicos de estos dispositivos son próximos a 0.8.

- Pantallas de turbulencia: Dispositivos encargados de uniformar el perfil de velocidades del fluido, a costa, de una considerable pérdida de presión. Para mejorar la eficiencia del acondicionamiento y corregir las deficiencias que presentan estos dispositivos, se disponen varios montajes.

La sección del cono de contracción se sitúa entre la zona de acondicionamiento y la cámara de ensayo. Su misión consiste en dotar al flujo, adecuadamente acondicionado, de la velocidad necesaria para realizar el ensayo. Tal aceleración es generada mediante una reducción gradual de su sección recta, produciendo así un incremento continuo y proporcional de la velocidad, reduciendo el grosor de la capa límite en cámara de ensayo y evitando la formación de vórtices. Se observa mediante la ecuación de Bernoulli para fluidos ideales, que el incremento de velocidad a la salida de esta sección va acompañado de una reducción de presión.

La etapa del difusor se sitúa a continuación de la sección de test, realizando la tarea opuesta que ejecuta el cono de contracción, disminuye la velocidad e incrementa la presión del flujo, mediante un aumento progresivo de su sección recta, posibilitando así el uso de propulsores menos potentes para mantener la velocidad del flujo. El cono de contracción y el difusor resultan secciones críticas de diseño de instalaciones de túnel de viento, debido a su misión de asegurar que el flujo posea unas características de velocidad óptimas en la cámara de ensayo (Luis Díaz Iriberri, 2005).

4.3 Software para la simulación del equipo

Para simular los fenómenos ocurridos en el equipo se utilizará el software COMSOL, con la finalidad de observar la turbulencia que se produce en su interior producto de la turbina que impulsa el flujo de alimentación de polen y permite separar las impurezas del polen limpio. Debido a esta turbulencia el flujo se devuelve al inicio del proceso disminuyendo la eficiencia del equipo, por lo que en la presente memoria se simulará el equipo actual con la problemática y posteriormente con las mejoras correspondientes.

4.3.1 Historia de la simulación computacional

La historia y la evolución de la simulación computacional han sido paralelas a la evolución de la informática. Sus orígenes los encontramos en la segunda guerra mundial cuando dos matemáticos, J. V Neumann y S. Ulam, tenían el reto de resolver un problema complejo relacionado con el comportamiento de los neutrones. Los experimentos basados en prueba y error eran muy costosos y el problema era demasiado complicado para abordarlo mediante técnicas analíticas. La aproximación que escogieron se basó en la utilización de números aleatorios y distribuciones de probabilidad, este método desarrollado fue llamado 'método de Montecarlo' por el paralelismo entre la generación de números aleatorios y el juego de la ruleta. Durante la guerra fría se intensificó el uso de la simulación para resolver problemas de interés militar; trayectorias y dinámicas de satélites artificiales, guiar mísiles, etc. Muchos de estos problemas exigen la resolución de sistemas de ecuaciones diferenciales no lineales. Para abordar estos problemas se utilizaron ordenadores analógicos que usaban elementos electrónicos para resolver las operaciones matemáticas: integración, suma, multiplicación, generación de funciones, etc. A partir de la década de los 60 empiezan a aparecer en el mercado programas de simulación de sistemas de acontecimientos discretos que poco a poco se empezaron a utilizar para resolver problemas de ámbito civil, los más destacables fueron el GPSS de IBM (General Purpose System Simulator) y el SIMSCRIPT. Los modelos de acontecimientos discretos son muy utilizados en la actualidad para estudiar problemas de fabricación de procesos, logística, transporte, comunicaciones y servicios; estos problemas se caracterizan por centrar su interés en los cambios que hay en el sistema como consecuencia de los acontecimientos y en su capacidad para modelar los aspectos aleatorios del sistema.

La revolución que se produjo en la informática a partir de los años 80 tuvo un impacto importante en la simulación computacional, haciendo que el uso de este se difundiera en prácticamente todos los ámbitos de la ciencia y la ingeniería. (Ricardo Montes, 2015)

4.3.2 Ventajas y desventajas de la simulación

Ventajas de la simulación

A pesar de las desventajas, la simulación por computador es una de las técnicas más comúnmente usadas por que ofrece las siguientes ventajas:

- La simulación le permite analizar grandes problemas complejos para los que no están disponibles resultados analíticos. De hecho, la mayoría de los problemas del mundo real encajan en esta categoría, por lo tanto, la simulación proporciona una alternativa práctica.
- La simulación proporciona un método más simple de solución cuando los procedimientos matemáticos son complejos y difíciles.
- La simulación proporciona un control total sobre el tiempo, debido a que un fenómeno se puede acelerar.
- No es necesario destruir el sistema si se desea investigar sus límites de resistencia.
- Si sólo es un sistema propuesto no es necesario construirlo físicamente.
- Auxilia el proceso de innovación ya que permite al experimentador observar e interactuar con el sistema.
- Generalmente es económico mejorar el sistema vía simulación que hacerlo en el sistema real.
- En algunos casos, la simulación es el único medio para lograr una solución.

Desventajas de la simulación

Las principales desventajas que conlleva la simulación por computador son las siguientes:

- Los resultados numéricos obtenidos se basan en el conjunto específico de números aleatorios, cuyos valores corresponden a sólo uno de los resultados posibles, por tanto, los

valores finales reportados en una simulación son sólo estimaciones de los valores reales que está buscando.

- Un buen modelo de simulación puede resultar bastante costoso; a menudo el proceso es largo y complicado para desarrollar un modelo.

- Cada modelo de simulación es único; las soluciones e inferencias no son usualmente transferibles a otros problemas.

- Los resultados de simulación son numéricos; por tanto, surge el peligro de atribuir a los números un grado mayor de validez y precisión.

- La construcción de un modelo no es fácil ni cualquiera puede llegar y hacerlo, requiere de una preparación especial.

- Los resultados de la simulación pueden ser difíciles de interpretar.

- Hacer el análisis y el modelo de simulación puede ser muy caro tanto en tiempo como en dinero.

4.3.3 COMSOL Multiphysics

COMSOL Multiphysics, antes conocido como FEMLAB, es un paquete de software de análisis y resolución por elementos finitos para varias aplicaciones físicas y de ingeniería, en especial fenómenos acoplados o multifísicos; también ofrece una buena interfaz a MATLAB, y sus toolboxes proporcionan una amplia variedad de posibilidades de programación, preprocesado y post procesado. Los paquetes de simulación del programa son multiplataformas (Windows, Mac, Linux, Unix), además de las interfaces de usuario convencionales basadas en física, COMSOL también permite modelar y solucionar sistemas acoplados de ecuaciones de derivadas parciales (EDP). COMSOL Multiphysics fue iniciado en 1986 por dos graduados del Instituto Real de Tecnología en Estocolmo Suecia, Svante Littmarck y Farhad Saeidi quienes lanzaron la primera versión del programa en 1998 y hoy en día son los presidentes de la compañía que produce y promueve el software, el cual en los años siguientes, los módulos de simulación del programa se fueron ampliando hasta obtener un conjunto de disciplinas de simulación para varias aplicaciones en el campo de la física y la ingeniería. (COMSOL Multiphysics, 2012)

4.3.3.1 Interfaces de modelado y simulación en COMSOL

El uso de COMSOL Multiphysics proporciona una cantidad significativa de funcionalidades en la modelación de fenómenos físicos, incluyendo la capacidad de multifísica. Mediante la adición de módulos específicos de aplicación, el poder del modelado se incrementa con el uso de herramientas específicas para el flujo de electricidad, mecánica, fluidos y aplicaciones químicas; COMSOL incluye un conjunto de interfaces físicas básicas para áreas de aplicación de la física común tales como el análisis estructural; flujo laminar; la acústica de presión; el transporte de especies diluidas; electrostática; corrientes eléctricas; transferencia de calor; y calentamiento Joule. Todas estas son versiones simplificadas de un conjunto seleccionado de interfaces físicas disponibles en los módulos. Para las soluciones matemáticas aplicada a simulaciones físicas, dónde la opción de las variables por defecto no está disponible, se incluye un conjunto de 13 interfaces para principios físicos fundamentales para la creación de una simulación mediante la definición de ecuaciones. Varios modelos de ecuaciones diferenciales parciales (PDE) hacen fácil el modelado de segundo orden para ecuaciones de sistemas lineales y no lineales, también al reunir varias ecuaciones se pueden modelar sistemas de ecuaciones de orden superior; estas herramientas basadas en ecuaciones pueden combinarse con la física preestablecida de COMSOL o cualquiera de los módulos adicionales, lo que permite un análisis totalmente acoplado y personalizado. (COMSOL Multiphysics, 2012)

Los modelos de turbulencia de COMSOL Para modelar el flujo turbulento, la versión 5.3a de COMSOL ofrece 8 modelos, cada uno de ellos es en realidad un modelo de cierre dentro del modelo tipo RANS, o bien, modelos para la viscosidad turbulenta. Según la documentación de COMSOL y la descripción que da el mismo programa en el momento de seleccionar la física, las generalidades de cada modelo son:

1. **Algebraic y Plus:** Es un modelo de viscosidad mejorada, basado en la distancia de pared (y+) local. Incluye también una ecuación para la distancia de pared. Se utiliza para simular flujos a alto número de Reynolds, es adecuado para flujo interno, como enfriamiento de aparatos electrónicos. Es un modelo económico computacionalmente y robusto, pero en general es menos preciso que los modelos de ecuación de transporte.

2. **L-VEL:** Las descripciones de COMSOL presentan la misma información que para el modelo Algebraic y Plus. No se considera necesario exponer aquí las diferencias pues no se trata una aplicación de alto Reynolds ni flujo interno. Vale decir que la L es de la distancia a la pared más cercana y VEL se refiere a la velocidad, una de sus variables principales es u+ en reemplazo de y + que se usa en el modelo Algebraic y Plus.

3. **k-ε:** Es el modelo de turbulencia más común y es usado con frecuencia en aplicaciones industriales por su robustez y por su bajo costo computacional [14]. A pesar de que no se desempeña bien en casos de fuertes gradientes de presión adversa. Consiste en resolver dos ecuaciones adicionales: para el transporte de energía cinética turbulenta k (que determina la energía en la turbulencia) y para la tasa de disipación de la energía cinética turbulenta ε (que determina la escala de la turbulencia). Esto le permite considerar efectos en la historia del flujo como convección y difusión de la energía turbulenta. Se usa para flujos a alto número de Reynolds, sea en régimen incompresible o compresible con Ma < 0.3. El flujo cerca de las paredes es modelado usando funciones de pared, por tanto, no es simulado. Puede ser aplicado en estudios estacionarios o dependientes del tiempo.

4. **Realizable k-ε**: Es similar al anterior, pero contempla mejoras para ciertos flujos, como chorros turbulentos.

5. **k-ω:** Es un modelo similar al k-ε, pero en este caso se resuelve para ω, la tasa específica de disipación de energía cinética. Es un modelo de alto número de Reynolds y se puede usar combinado con funciones de pared. De acuerdo con la documentación de COMSOL, es un modelo para flujos con alto número de Reynolds, pero también es conocido como un modelo de bajo número de Reynolds pues puede resolver todo el flujo hasta las paredes, sin usar funciones de pared. Este modelo es mas no-lineal y por tanto su convergencia es más desafiante que en el modelo k-ε. Además, es más sensible al valor inicial supuesto para la solución. Por tanto, es menos robusto. Usualmente da mejores resultados y es más adecuado que el k-ε en regiones con recirculación, cerca de paredes sólidas, para flujos internos, flujos con mucha curvatura, separación de flujo y chorros.

6. **SST:** Sus siglas del inglés Shear Stress Transpor, es un modelo que combina la robustez del k-ε con la exactitud del modelo k-ω, lo que lo hace aplicable a una amplia gama de flujos. Emplea k-ε en las zonas de corriente libre y k-ω en las regiones cercanas a las paredes, pero su formulación elimina algunas debilidades de estos dos modelos. De acuerdo con la documentación de COMSOL, es un modelo para flujos con alto número de Reynolds, pero también es conocido como un modelo de bajo número de Reynolds pues puede resolver todo el flujo hasta las paredes, sin usar funciones de pared. Sin embargo, el modelo depende de la distancia a la pared más cercana, por lo tanto, se incluye una ecuación para la distancia hacia la pared. La resolución de malla requerida es similar a la de los modelos k-ω y Low Re k-ε.

7. **Low Re k-ε:** Es un modelo similar al k-ε pero no requiere funciones de pared, resuelve todo el flujo. Lo que lo hace más preciso cerca de las paredes. Requiere una malla más densa en todo el dominio. Por ser un modelo de bajo número de Reynolds puede amortiguar los efectos de la turbulencia. Se recomienda usar primero el modelo k-ε para obtener una condición inicial adecuada para luego aplicar este modelo. Por sus características resulta adecuado para calcular fuerzas de sustentación y arrastre, además predice adecuadamente la separación y re-adhesión bastante bien en muchos casos. El modelo para la turbulencia se conoce como AKN (Abe-Kondoh-Nagano) y depende de la distancia a la pared más cercana, por lo tanto, se incluye una ecuación para la distancia hacia la pared.

8. **Spalart-Allmaras:** Es un modelo diseñado originalmente para aplicaciones aerodinámicas, como flujo alrededor de perfiles aerodinámicos. La experiencia muestra que no simula adecuadamente la separación de flujo, sin embargo, es estable y ofrece buena convergencia. Es un modelo de solo 1 ecuación. El modelo depende de la distancia a la pared más cercana, por lo tanto, se incluye una ecuación para la distancia hacia la pared. 9. V2-f: Es un modelo adecuado para describir la anisotropía de la intensidad de turbulencia en la capa límite, se recomienda para flujos cerrados sobre superficies curvas, por ejemplo, ciclones. Analizando las descripciones brindadas de manera general. Se concluye que son modelos de interés para el caso de estudio k-ε, k-ω, SST y Low Re k-ε. (COMSOL Multiphysics Manual, 2019)

4.3.3.2 Sistema de coordenadas

El usuario tiene la capacidad de definir cualquier número de sistemas locales de coordenadas, también hay atajos para sistemas de coordenadas comunes, tales como cilíndrica, esférica y un método para la creación automática de coordenadas para el sistema, lo cual hace que sea fácil de definir las propiedades del material anisotrópico que siguen formas geométricas curvas. (COMSOL Multiphysics Manual, 2019)

4.3.3.3 Acoplamientos del modelo

En COMSOL se puede trabajar simultáneamente en 3D, 2D, 1D y 0D, lo cual se conoce como acoplamientos del modelo y se puede usar para asignar cualquier cantidad a través de dimensiones espaciales. Por ejemplo, una solución 2D se puede asignar a una superficie 3D o extruirlo a lo largo de un volumen 3D, esta funcionalidad hace que sea fácil de configurar simulaciones Inter dimensionales. (COMSOL Multiphysics Manual, 2019)

4.3.3.4 Mallado y FEM

Se dispone de herramientas automáticas y semiautomáticas, incluyendo mallado tetraédrico libre y de barrido. El algoritmo por defecto es tetraédrico automático para la definición de la física en sólidos, y una combinación de mallado tetraédrico y capa límite para fluidos; también puede tomarse el control total de la secuencia de operaciones utilizadas para crear la malla mediante la definición de una secuencia. (COMSOL Multiphysics Manual, 2019)

4.3.3.5 Uso de métodos numéricos

COMSOL reúne y resuelve los modelos que utilizan la técnica de los métodos de análisis numérico. En los módulos adicionales se utilizan varios métodos diferentes como el de volumen finito, de los elementos de contorno y de rastreo de partículas, pero el énfasis de COMSOL Multiphysics está en el método de elementos finitos; hay disponibles muchos tipos de elementos finitos y los elementos totalmente acoplados son generados automáticamente por el software en el momento de la resolución, este método patentado es precisamente lo que permite combinaciones multifísicas ilimitadas, algo que es único en COMSOL. (COMSOL Multiphysics Manual, 2019)

4.3.3.6 Los modelos paramétricos y asociativos

COMSOL realiza secuencias para registrar todos los pasos que crean la geometría, la malla, los estudios y la configuración del solucionador, visualización y presentación de resultados; por tanto, se puede parametrizar fácilmente cualquier parte del modelo, cambiando simplemente un nodo en el árbol del modelo y ejecutando de nuevo las secuencias. (COMSOL Multiphysics Manual, 2019)

4.3.3.7 Variables, expresiones y tablas de consulta

El software viene con un intérprete integrado para expresiones matemáticas, estas expresiones pueden ser asignadas a variables para su uso posterior en las propiedades del material y las condiciones de frontera; esto significa que la mayoría de las veces no es necesario escribir códigos para adaptar el software a la necesidad de una expresión personalizada. Las variables de las coordenadas X, Y, Z se pueden utilizar para definir espacialmente cantidades, por ejemplo, cargas distribuidas; de manera similar, t minúscula está reservado para el tiempo y se puede utilizar en expresiones para dar forma a los pulsos variables en el tiempo para las simulaciones transitorias. (COMSOL Multiphysics Manual, 2019)

4.3.3.8 Exportación de resultados y generación de informes

Los resultados pueden ser exportados a archivos de texto en los formatos txt, dat y csv. Por medio de la herramienta LiveLink para Excel, los resultados se pueden exportar a formato Excel.xlsx; las imágenes pueden exportarse a varios formatos de imagen común, mientras que las animaciones se pueden exportar a “Animated GIF, Adobe Flash o AVI”. Los informes que resumen la totalidad del proyecto de simulación se pueden exportar a HTML (htm, html) o en formato Microsoft Word (Doc). Tres informes por defecto están disponibles: Breve, intermedio y completo; sin embargo, también se puede optar por crear informes personalizados a partir de las diferentes partes que conforman el árbol del modelo. (COMSOL Multiphysics Manual, 2019)

4.3.3.9 Resultados, visualización y postproceso

Las capacidades de visualización incluyen superficies, cortes, isosuperficies, planos de corte, flechas y graficas de líneas de corriente, así como muchos otros tipos de gráficos. Las visualizaciones no están limitadas a las cantidades incorporadas ya que pueden ampliarse con cantidades físicas compuestas, escribiendo expresiones matemáticas en las variables de campo desconocido; como resultado, puede visualizarse casi cualquier cantidad de interés relacionado con los resultados de simulación. (COMSOL Multiphysics Manual, 2019)

4.4 Software para diseño 3D y dibujos técnicos

En el mundo del diseño mecánico hay una amplia variedad de software para desarrollar un sinfín de proyectos, piezas mecánicas, diseños de estructuras, ya sea, en 2D, 3D y también analizar los esfuerzos (CAE). Entre los softwares más comunes que se encuentran en las empresas de diseño son: Autodesk AutoCAD, Inventor, Solid Works, Solid Edge, Tekla Structures, Algor Fempro, etc. Se ocupará los softwares autodesk autocad para el diseño en 2D y 3D.

4.4.1 Software para modelación 2D y 3D (Autodesk AutoCAD)

Es un programa de dibujo técnico desarrollado por Autodesk para el uso de ingenieros, técnicos y otros profesionales de carreras de diseño. Autocad es un programa, como su nombre lo dice, para diseñar, CAD que significa Computer Aid Design, en el que se puede realizar todo tipo de diseños técnicos, muy útil para ingenieros, arquitectos, etc., pudiendo crear diseños de todo tipo en 2d y 3d, planos, objetos, cortes de objetos, etc.; tiene muchos avances en cuanto a 3d y herramientas avanzadas, aprender totalmente autocad toma tiempo, ya que es una herramienta profesional muy potente. (Domingo Martin & Jorge Costafreda, 2017)

En noviembre de 1982, Autodesk lanzó la primera versión de AutoCAD, que proporciona una función de dibujo de línea simple, sin menú, los usuarios necesitan memorizar el comando, ejecutarlo en la operación DOS Sistema, el medio de software es un disquete de 360K. Debido a que se puede copiar libremente, pronto se hizo popular en el mundo del diseño.

La historia de AutoCAD es una larga sucesión de nuevas utilidades y características del programa. Esta es la historia de una serie de conjeturas acerca de causas y consecuencias de cada una de sus 17 ediciones. Si bien Auto CAD fue uno de los primeros, a mediados de la década del 80, muchas otras empresas también desarrollaron sus propios sistemas CAD. En general, las otras implementaron desde un principio el uso de todo tipo de trabas electrónicas y/o digitales a la reproducción, instalación y uso de sus sistemas. La evolución y desarrollo de las aplicaciones CAD han estado íntimamente relacionados con los avances del sector informático. Hay que destacar, el gran interés estratégico que desde el principio ha tenido el

CAD para las empresas, por el impacto enorme en la productividad. Las grandes empresas desde el principio han apostado por el CAD y ello supone importantes inversiones que lógicamente potencian y convierten el CAD en un producto estratégico con un gran mercado. (Domingo Martin & Jorge Costafreda, 2017)

Al igual que otros programas de Diseño Asistido por Ordenador (DAO), AutoCAD gestiona una base de datos de entidades geométricas (puntos, líneas, arcos, etc.) con la que se puede operar a través de una pantalla gráfica en la que se muestran éstas, el llamado editor de dibujo. La interacción del usuario se realiza a través de comandos, de edición o dibujo, desde la línea de órdenes, a la que el programa está fundamentalmente orientado. Las versiones modernas del programa permiten la introducción de éstas mediante una interfaz gráfica de usuario o en inglés GUI, que automatiza el proceso. (Oswaldo Aguilar, 2020)

Como todos los programas de DAO, procesa imágenes de tipo vectorial, aunque admite incorporar archivos de tipo fotográfico o mapa de bits, donde se dibujan figuras básicas o primitivas (líneas, arcos, rectángulos, textos, etc.), y mediante herramientas de edición se crean gráficos más complejos. El programa permite organizar los objetos por medio de capas o estratos, ordenando el dibujo en partes independientes con diferente color y grafismo. El dibujo de objetos seriados se gestiona mediante el uso de bloques, posibilitando la definición y modificación única de múltiples objetos repetidos. (Oswaldo Aguilar, 2020)

Parte del programa AutoCAD está orientado a la producción de planos, empleando para ello los recursos tradicionales de grafismo en el dibujo, como color, grosor de líneas y texturas tramadas. AutoCAD, a partir de la versión 11, utiliza el concepto de espacio modelo y espacio papel para separar las fases de diseño y dibujo en 2D y 3D, de las específicas para obtener planos trazados en papel a su correspondiente escala. La extensión del archivo de AutoCAD es .dwg, aunque permite exportar en otros formatos (el más conocido es el .dxf). Maneja también los formatos IGES y STEP para manejar compatibilidad con otros softwares de dibujo. (Oswaldo Aguilar, 2020)

El formato. .dxf permite compartir dibujos con otras plataformas de dibujo CAD, reservándose AutoCAD el formato.dwg para sí mismo. El formato .dxf puede editarse con un procesador de texto básico, por lo que se puede decir que es abierto. En cambio, el .dwg sólo podía ser editado con AutoCAD, si bien desde hace poco tiempo se ha liberado este

formato (DWG), con lo que muchos programas CAD distintos del AutoCAD lo incorporan, y permiten abrir y guardar en esta extensión, con lo cual lo del DXF ha quedado relegado a necesidades específicas. (Oswaldo Aguilar, 2020)

Es en la versión 11, donde aparece el concepto de modelado sólido a partir de operaciones de extrusión, revolución y las booleanas de unión, intersección y sustracción. Este módulo de sólidos se comercializó como un módulo anexo que debía de adquirirse aparte. Este módulo sólido se mantuvo hasta la versión 12, luego de la cual, AutoDesk, adquirió una licencia a la empresa Spatial, para su sistema de sólidos ACIS. (Oswaldo Aguilar, 2020).

El formato.dwg ha sufrido cambios al evolucionar en el tiempo, lo que impide que formatos más nuevos.dwg no puedan ser abiertos por versiones antiguas de AutoCAD u otros CADs que admitan ese formato. La última versión de AutoCAD hasta la fecha es el AutoCAD 2008, y tanto él como sus productos derivados (como Architectural DeskTop ADT o Mechanical DeskTop MDT) usan un nuevo formato no contemplado o trasladado al OpenDWG, que sólo puede usar el formato hasta la versión 2000.

Las aplicaciones del programa son múltiples, desde proyectos y presentaciones de ingeniería, hasta diseño de planos o maquetas de arquitectura. (Oswaldo Aguilar, 2020)

4.4.1.1 AutoCAD 3D

Antes de la existencia de los programas en 3D, el dibujo técnico era una actividad exclusivamente dominada por los instrumentos de dibujo ya que para lograr un buen resultado debíamos utilizar herramientas específicas como reglas, escuadras, compases, lápices, marcadores, etc. El proyecto arquitectónico o pieza mecánica se dibujaba en varias vistas (preferentemente en vista de planta, frente y lateral o perfil -izquierda o derecha-), y a veces se dibujaba una vista isométrica. Todo esto era una labor tediosa ya que primeramente se requería dibujar una vista y luego realizar proyecciones de líneas para las siguientes, y debido a esto los dibujos eran muy propensos a tener errores de medida, de dibujo y sobre todo, de escala. Otra desventaja de este procedimiento es que a menudo debemos corregir estos errores y/o borrar en el papel, lo que afecta a la larga la calidad del dibujo y del papel debido al desgaste. (Domingo Martin & Jorge Costafreda, 2017)

Incluso, si dibujamos en programas de dibujo 2D como AutoCAD, se debe realizar de una manera muy similar al dibujo técnico tradicional, pero con la ventaja que no cometemos errores de medida ni tenemos problemas con los trazos, además que podremos borrar cualquier línea que no necesitemos o también podremos reparar errores sin sacrificar "papel", ya que se trabaja en un espacio papel virtual e ilimitado.

La gran ventaja del modelado en 3D es que nos permite realizar el modelo en "tres dimensiones", o sea, tal como existe en la realidad y con todos los elementos y detalles necesarios. Ya no se deberá dibujar una vista frontal, superior o lateral, sino que simplemente dibujamos el modelo completo y para cambiarlo de vista sólo basta con girarlo a lo que necesitemos. De esto mismo se desprende lo siguiente:

a) El conjunto de todas las formas 2D que realizamos en el plano se llama dibujo. Al acto de crear este tipo de formas lo llamaremos dibujar.

b) El conjunto de todos los elementos o sólidos 3D que creamos en el espacio se llamará modelo. Al acto de crear este tipo de formas lo llamaremos modelar.

De todo lo anteriormente dicho podemos inferir que la esencia del modelado tridimensional es entender que la posición de un punto cualquiera en el plano cartesiano se determina por el valor de las 3 coordenadas cartesianas: X, Y Z. Cada eje representa a una dimensión del plano tridimensional donde el "largo" corresponderá a X, el "ancho" a Y el "alto" a Z.

Otra cosa importante en el dibujo 3D es entender lo siguiente:

1) Existe un punto de origen (0,0,0).

2) En 2D, el eje X se extiende de forma horizontal por la pantalla, su valor será positivo a la derecha del punto de origen y será negativo a la izquierda de este.

3) En 2D, el eje Y se extiende de forma vertical por la pantalla, su valor es positivo arriba del punto de origen y negativo debajo de este.

4) En 2D, el eje Z se extiende de forma perpendicular a la pantalla y su valor será positivo al apuntar hacia fuera de la pantalla y será negativo al apuntar dentro de ella.

El dibujo 2D está estrechamente relacionado con el modelado tridimensional, pues en la mayor parte de los casos deberemos basarnos en los planos o vistas para generar los proyectos en tres dimensiones. El correcto entendimiento de la planimetría 2D (plantas, cortes, elevaciones, etc.) es fundamental para reproducir en el espacio toda la información dada por cada vista en particular (Domingo Martin & Jorge Costafreda, 2017).

4.4.1.2 Ventajas del software AutoCAD

La versatilidad del sistema lo ha convertido en un estándar general, sobre todo porque permite: Dibujar de una manera ágil, rápida y sencilla, con acabado perfecto y sin las desventajas que encontramos si se ha de hacer a mano. Permite intercambiar información no solo por papel, sino mediante archivos, y esto representa una mejora en rapidez y efectividad a la hora de interpretar diseños, sobre todo en el campo de las tres dimensiones. Con herramientas para gestión de proyectos podemos compartir información de manera eficaz e inmediata. Esto es muy útil en ensamblajes, contrastes de medidas, etc. Es importante en el acabado y la presentación de un proyecto o plano, ya que tiene herramientas para que el documento en papel sea perfecto, tanto en estética, como en información, que ha de ser muy clara. Para esto tenemos herramienta de acotación, planos en 2D a partir de 3D, cajetines, textos, colores, etc. Aparte de métodos de presentación foto realísticos. Un punto importante para AutoCAD es que se ha convertido en un estándar en el diseño por ordenador debido a que es muy versátil, pudiendo ampliar el programa base mediante programación (Autolisp, DCL, Visual Basic, etc.). (Domingo Martin & Jorge Costafreda, 2017).

4.5 Diseño del ciclón para el equipo semi – industrial

El equipo de recolección de polvo que se usa con mayor frecuencia es el ciclón. Los ciclones remueven el material particulado de la corriente gaseosa, basándose en el principio de impactación inercial, generado por la fuerza centrífuga.

El ciclón es esencialmente una cámara de sedimentación en que la aceleración gravitacional se sustituye con la aceleración centrifuga. Los ciclones constituyen uno de los medios menos costosos de recolección de polvo, tanto desde el punto de vista de operación como de la inversión. Estos son básicamente construcciones simples que no cuentan con partes móviles, lo cual facilita las operaciones de mantenimiento; pueden ser hechos de una amplia gama de materiales y pueden ser diseñados para altas temperaturas (que ascienden incluso a 1000 °C) y presiones de operación. Los ciclones son adecuados para separar partículas con diámetros mayores de 5 µm; aunque partículas muchos más pequeñas, en ciertos casos, pueden ser separadas. Los ciclones presentan eficiencias mayores que la cámara de sedimentación gravitacional, y eficiencias menores que los filtros de talegas, lavadores y precipitadores electrostáticos. La fuerza centrífuga generada por los giros del gas dentro del ciclón puede ser mucho mayor que la fuerza gravitacional, ya que la fuerza centrífuga varía en magnitud dependiendo de la velocidad de giro del gas y del radio de giro. Teóricamente el aumento de la velocidad de entrada al ciclón implicaría un aumento de la fuerza centrífuga y, por lo tanto, un aumento de la eficiencia; sin embargo, velocidades de entrada muy altas generan la re-suspensión de material particulado de las paredes internas del ciclón, lo cual disminuye la eficiencia del ciclón; adicionalmente, aumentar la velocidad de entrada implica mayor consumo de energía.

4.5.1 Principio de funcionamiento

En un ciclón, la trayectoria del gas comprende un doble vórtice, en donde el gas dibuja una espiral descendente en el lado externo, y ascendente, en el lado interno. Las Ilustraciones N° 22 y N°21 muestran dichos vórtices.

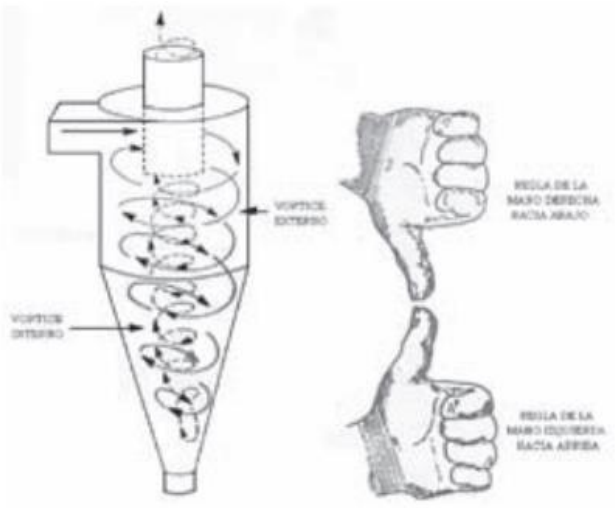


Ilustración 22: Vórtices en el ciclón

Fuente: (David Leith & Dilip Mehta, ,1973)

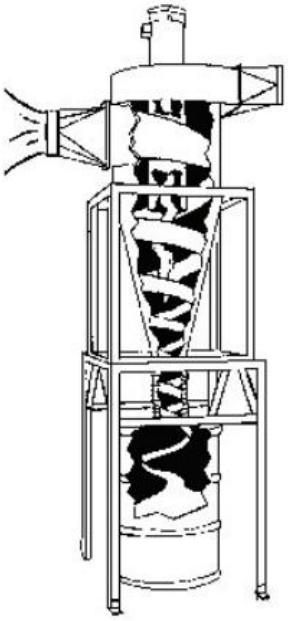


Ilustración 23: Vórtices en el ciclón

Fuente: (Echeverry Londoño & Alberto. C, 2006)

En un ciclón, el gas entra en la cámara superior tangencialmente y desciende en espirales hasta el ápice de la sección cónica; luego, asciende en un segundo espiral, con diámetro más pequeño, y sale por la parte superior a través de un ducto vertical centrado. Los sólidos se mueven radialmente hacia las paredes, se deslizan por las paredes, y son recogidos en la parte

inferior. El diseño apropiado de la sección cónica del ciclón obliga al cambio de dirección del vórtice descendente; el vórtice ascendente tiene un radio menor, lo que aumenta las velocidades tangenciales; en el cono se presenta la mayor colección de partículas, especialmente de las partículas pequeñas al reducirse el radio de giro. (Echeverry Londoño & Alberto. C, 2006).

Los ciclones utilizan la inercia para remover las partículas de la corriente del gas. Generado por una fuerza centrífuga a la corriente de gas, normalmente en una cámara de forma cónica. Los ciclones operan creando un vórtice doble dentro del cuerpo del mismo. El gas que entra es forzado a bajar por el cuerpo del ciclón con movimiento circular cerca de la superficie del tubo del ciclón. En el fondo del ciclón, la dirección del gas se invierte y sube en espirales por el centro del tubo saliendo por la parte superior (Echeverry Londoño & Alberto. C, 2006).

Las partículas en la corriente del gas son forzadas hacia la pared del ciclón por la fuerza centrífuga del gas en rotación, pero se les opone la fuerza de arrastre del gas que pasa por el ciclón hacia la salida. Con las partículas más grandes, la inercia vence a la fuerza de arrastre, haciendo que las partículas alcancen la pared del ciclón y sean colectadas. (Echeverry Londoño & Alberto. C, 2006).

Con las partículas más pequeñas, la fuerza de arrastre es mayor que la inercia, ocasionando que las partículas salgan del ciclón junto con el gas. La gravedad también hace que las partículas más grandes que llegan a la pared del ciclón bajen hacia la tolva. Aunque utilizan el mismo mecanismo de separación que los separadores por impulso, los ciclones son más efectivos porque tienen un patrón de flujo de gas más complejo. (Echeverry Londoño & Alberto. C, 2006).

Los ciclones constituyen uno de los medios menos costosos de recolección de polvo, tanto desde el punto de vista de operación como de la inversión. Estos son básicamente construcciones simples que no cuentan con partes móviles, lo cual facilita las operaciones de mantenimiento; pueden ser hechos de una amplia gama de materiales y pueden ser diseñados para altas temperaturas (que ascienden incluso a 1000 °C) y presiones de operación bastante altas. (Echeverry Londoño & Alberto. C, 2006).

Los ciclones son adecuados para separar partículas con diámetros mayores de 5 µm; aunque partículas muchos más pequeñas, en ciertos casos, pueden ser separadas.

Los ciclones presentan eficiencias mayores que la cámara de sedimentación gravitacional y eficiencias menores que los filtros de talegas, lavadores y precipitadores electrostáticos, claro que siendo estos mucho más caros que el ciclón. (Echeverry Londoño & Alberto. C, 2006).

La fuerza centrífuga generada por los giros del gas dentro del ciclón puede ser mucho mayor que la fuerza gravitacional, ya que la fuerza centrífuga varía en magnitud dependiendo de la velocidad de giro del gas y del radio de giro. Teóricamente el aumento de la velocidad de entrada al ciclón implicaría un aumento de la fuerza centrífuga y por lo tanto un aumento de la eficiencia, sin embargo, velocidades de entrada muy altas generan la resuspensión de material particulado de las paredes internas del ciclón, lo cual disminuye la eficiencia del ciclón; adicionalmente aumentar la velocidad de entrada implica mayor consumo de energía.

A continuación, se estudiará la velocidad de sedimentación de las partículas a través del aire mediante la Ley de Stokes, hay que consignar que estas ecuaciones, son la base para el diseño y teoría de funcionamiento de los ciclones. (Echeverry Londoño & Alberto. C, 2006).

4.5.2 Familias de ciclones

Los ciclones son un dispositivo de control de material particulado bastante estudiado, el diseño de un ciclón se basa normalmente en familias de ciclones que tienen proporciones definidas. Las principales familias de ciclones de entrada tangencial son: ciclones de alta eficiencia, ciclones convencionales y ciclones de alta capacidad. Los márgenes de la eficiencia de remoción para los ciclones están con frecuencia basados en las tres familias de ciclones, es decir, convencional, alta eficiencia y alta capacidad. La imagen 21 presenta el intervalo de eficiencia de remoción para las diferentes familias de ciclones

Tabla 6: Intervalo de eficiencia de remoción para tipos de ciclones

Familia de Ciclones	**Eficiencia de Remoción (%)**		
	PST	**PM10**	**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

Fuente: (Echeverry Londoño & Alberto. C, 2006)

Los ciclones de alta eficiencia están diseñados para alcanzar mayor remoción de las partículas pequeñas que los ciclones convencionales. Los ciclones de alta eficiencia pueden remover partículas de 5 µm con eficiencias hasta del 90%, pudiendo alcanzar mayores eficiencias con partículas más grandes.

Los ciclones de alta eficiencia tienen mayores caídas de presión, lo cual requiere de mayores costos de energía para mover el gas sucio a través del ciclón. Por lo general, el diseño del ciclón está determinado por una limitación especificada de caída de presión, en lugar de cumplir con alguna eficiencia de control especificada. Los ciclones de alta capacidad están garantizados solamente para remover partículas mayores de 20 µm, aunque en cierto grado ocurra la colección de partículas más pequeñas. Se ha reportado que los multiciclones han alcanzado eficiencias de recolección de 80 a 95 % para partículas de 5 µm.

El diámetro del ciclón identifica la dimensión básica de diseño, todas las demás dimensiones simplemente son una proporción del diámetro del ciclón.

Dimensión	**Nomenclatura**	**Tipo de ciclón**		
		Stairmand	**Swift**	**Echeverri**
Diámetro del ciclón	Dc/Dc	1.0	1.0	1.0
Altura de entrada	a/Dc	0.5	0.44	0.5
Ancho de entrada	b/Dc	0.2	0.21	0.2
Altura de salida	S/Dc	0.5	0.5	0.625
Diámetro de salida	Ds/Dc	0.5	0.4	0.5
Altura parte cilíndrica	h/Dc	1.5	1.4	1.5
Altura parte cónica	z/Dc	2.5	2.5	2.5
Altura total del ciclón	H/Dc	4.0	3.9	4.0
Diámetro salida de partículas	B/Dc	0.375	0.4	0.375
Factor de configuración	G	551.22	698.65	585.71
Número cabezas de velocidad	NH	6.4	9.24	6.4
Número de vórtices	N	5.5	6.0	5.5

Ilustración 24: Características de los ciclones de ala eficiencia

Fuente: (Echeverry Londoño & Alberto. C, 2006).

Tabla 7: Características de los ciclones convencionales

Dimensión	Nomenclatura	Tipo de ciclón			
		Lapple	**Swift**	**Peterson - whitby**	**Zenz**
Diámetro del ciclón	Dc/Dc	1.0	1.0	1.0	1.0
Altura de entrada	a/Dc	0.5	0.5	0.583	0.5
Ancho de entrada	b/Dc	0.25	0.25	0.208	0.25
Altura de salida	S/Dc	0.625	0.6	0.583	0.75
Diámetro de salida	Ds/Dc	0.5	0.5	0.5	0.5
Altura parte cilíndrica	h/Dc	2.0	1.75	1.333	2.0
Altura parte cónica	z/Dc	2.0	2.0	1.837	2.0
Altura total del ciclón	H/Dc	4.0	3.75	3.17	4.0
Diámetro salida de partículas	B/Dc	0.25	0.4	0.5	0.25
Factor de configuración	G	402.88	381.79	342.29	425.41
Número cabezas de velocidad	NH	8.0	8.0	7.76	8.0
Número de vórtices	N	6.0	5.5	3.9	6.0

Fuente: (Echeverry Londoño & Alberto. C, 2006).

Tabla 8: Características de los ciclones de alta capacidad.

Dimensión	Nomenclatura	Tipo de ciclón	
		Stairmand	**Swift**
Diámetro del ciclón	Dc/Dc	1.0	1.0
Altura de entrada	a/Dc	0.75	0.8
01Ancho de entrada	b/Dc	0.375	0.35
Altura de salida	S/Dc	0.875	0.85
Diámetro de salida	Ds/Dc	0.75	0.75
Altura parte cilíndrica	h/Dc	1.5	1.7
Altura parte cónica	z/Dc	2.5	2.0
Altura total del ciclón	H/Dc	4.0	3.9
Diámetro salida de partículas	B/Dc	0.375	0.4
Factor de configuración	G	29.79	30.48
Número cabezas de velocidad	NH	8.0	7.96
Número de vórtices	N	3.7	3.4

Fuente: (Echeverry Londoño & Alberto. C, 2006).

4.5.3 Mecánica del movimiento de las partículas

Para que una partícula se mueva a través de un fluido, se requiere la existencia de una diferencia de densidad entre la partícula y el fluido. Por otra parte, se necesita una fuerza externa que comunique a la partícula un movimiento relativo respecto del fluido.

La fuerza externa generalmente es la gravedad, pero cuando la gravedad no es lo suficientemente intensa, se emplea la fuerza centrífuga, que puede llegar a ser varias veces superior a la de gravedad. Si las densidades de la partícula y el fluido son iguales, la fuerza de flotación debida a la inmersión de la partícula en el fluido contrarrestará a cualquier fuerza externa por grande que sea, y la partícula no se podrá mover en el seno del fluido. Cuando mayor sea la diferencia de densidad, tanto más eficaz será el proceso. Sobre una partícula que se mueve a través de un fluido actúan tres fuerzas (Casal, J. & Martínez-Benet, J. 1989):

1. Una fuerza externa, de gravedad o centrífuga.

2. La fuerza de empuje, que actúa paralela a la fuerza externa, pero en dirección opuesta.

3. La fuerza de retardo, que aparece siempre que existe movimiento relativo entre la partícula y el fluido. La fuerza de retardo actúa oponiéndose al movimiento, paralela a la dirección de este, pero en dirección opuesta.

En un caso general, la dirección del movimiento de la partícula respecto del fluido puede no ser paralela a la dirección de las fuerzas externa y de empuje, formando entonces la fuerza de retardo un ángulo con las otras dos. En este caso, donde el movimiento es bidimensional, el retardo hay que expresarlo en función de sus componentes, lo cual complica el estudio de la mecánica de partículas. En este caso se estudiará el movimiento unidimensional, en el que todas las fuerzas que actúan sobre una partícula esférica son colineales (Casal, J. & Martínez-Benet, J. 1989).

4.5.4 Velocidad de sedimentación y fuerzas de retardo

La sedimentación gravitacional terminal para esferas con gravedad específica de 2. Se entiende como la velocidad con la cual una partícula se sedimenta a través de la atmósfera o a través del agua. (Taylor & Francis, 2007)

Para un grano de arena gruesa, con un diámetro de 1000µm en el aire la velocidad de sedimentación es de 6 m/s. Ésta es mucho mayor que las velocidades verticales comunes de la atmósfera, de modo que es raro que el viento sople esas partículas hacia arriba una vez que se encuentran en el aire.

La velocidad terminal de sedimentación de una partícula con un diámetro de 1µm es de 6 ×10-5 m/s. Los movimientos verticales del aire en el exterior normalmente son mayores que este valor, de modo que las partículas de este tamaño no sedimentan con rapidez en la atmósfera, como lo haría la arena gruesa, sino en lugar de ello se mueven con el gas y permanecen en suspensión durante largos períodos. (Taylor & Francis, 2007)

De este modo, se establece una distinción entre el polvo, que se asienta con rapidez en la atmósfera debido a su alta velocidad gravitacional de sedimentación, y las partículas suspendibles, que se sedimentan con tanta lentitud que puede considerarse que permanecen en la atmósfera hasta que son eliminados por precipitación. No existe una línea divisoria clara y simple entre las dos categorías, pero si se debe hacer una distinción arbitraria de ese tipo, se haría en alguna parte cerca de un diámetro de partícula de 10µm. Las partículas bastante pequeñas como para permanecer suspendidas en la atmósfera, o en otros gases, durante largos períodos se llaman aerosoles, lo que indican que se comportan como si estuvieran disueltas en el gas. (Taylor & Francis, 2007)

En virtud de que la estrategia básica de la mayor parte de los dispositivos colectores de partículas es llevar a cada una de ellas a que entren en contacto entre sí, de modo que puedan aglutinarse y aumentar su tamaño, debe contarse con cierto conocimiento de las fuerzas de retardo que el aire o gas que las rodea ejercen sobre esas partículas cuando se intenta moverlas, con el fin de evaluar esos dispositivos (Taylor & Francis, 2007).

- La partícula se mueve a una velocidad tangencial que es igual a la velocidad tangencial del gas en la posición radial “r”
- La dirección positiva es radialmente hacia fuera.

Balance de fuerzas:

Utilizando la segunda ley de Newton:

$$\sum F = m * a \tag{19}$$

$$F_C - F_D = m * a \tag{20}$$

F_C: Fuerza centrífuga sobre la partícula

F_D: Fricción

$$\frac{d^2r}{dt^2} + \frac{1}{\tau} * \frac{dr}{dt} + \left(\frac{v_r}{\tau} - \frac{{v^2}_{T,pared} * {r_{pared}}^{2*n}}{r^{2*n+1}}\right) = 0 \tag{21}$$

Donde los valores de Vr, r y Vt son tomados en la posición radial de velocidad tangencial máxima (Taylor & Francis, 2007).

4.5.5 Cálculo de la eficiencia del ciclón

El parámetro más importante para medir y diferenciar los ciclones se basa en la eficiencia, es por eso que se incluyen sus métodos de cálculo. No existe un método teórico sencillo que permita el cálculo de la eficiencia (definido como el porcentaje de la masa de partículas entrante que es separado en el ciclón) de forma exacta. Esto es en parte debido a que, en la práctica, partículas pequeñas que teóricamente deberían salir con el gas, debido a la aglomeración y al barrido, sumado, al choque con partículas mayores, serán colectadas; mientras, partículas grandes que deberían ser retenidas rebotarán contra las paredes o serán capturadas por turbulencias, escapándose del ciclón.

Existen numerosas teorías sobre el cálculo de la eficiencia teórica de los ciclones, las cuales relacionan la eficiencia de colección y el tamaño de las partículas. Diversos autores investigaron la duración teórica del movimiento de las partículas en el ciclón y estimaron un desempeño teórico del equipo. Varias expresiones teóricas y semi-empíricas han sido propuestas para prever la eficiencia de captación de un ciclón, pero existen otros métodos experimentales de mayor confianza.

Diámetro de la partícula que es re coleccionado con una eficiencia de 50%

d_{pc}: 50% del diámetro de corte

$$d_{pc} = \sqrt{\left(\frac{9\mu W}{\left(2\pi N_e V_i\left(\rho_{part} - \rho_{gas}\right)\right)}\right)} \quad (22)$$

La eficiencia del ciclón para partículas de cualquier tamaño puede ser determinada por (Iozia y Leith)

$$\eta_j = \frac{1}{\left(1 + \left(\frac{d_{pc}}{d_{pj}}\right)^{\beta}\right)} \quad (23)$$

$$ln\beta = 0{,}62 - 0{,}87 * lnd_c + 5{,}21 * \left(\frac{H * W}{D}\right) + 1{,}05 * \left[ln\left(\frac{H * W}{D^2}\right)\right]^2 \quad (24)$$

$$\beta \approx 2$$

Eficiencia global: $\eta = \sum n_j m_j$

η= Eficiencia total

ηj = Eficiencia fraccional

mj = Porcentaje másico, %.

Según su eficiencia los extractores ciclón entrada tangencial se clasifican en:

- Alta eficiencia (98 % - 99,5 %)
- Alta capacidad (70 % - 80 %)
- Convencionales (50 %)

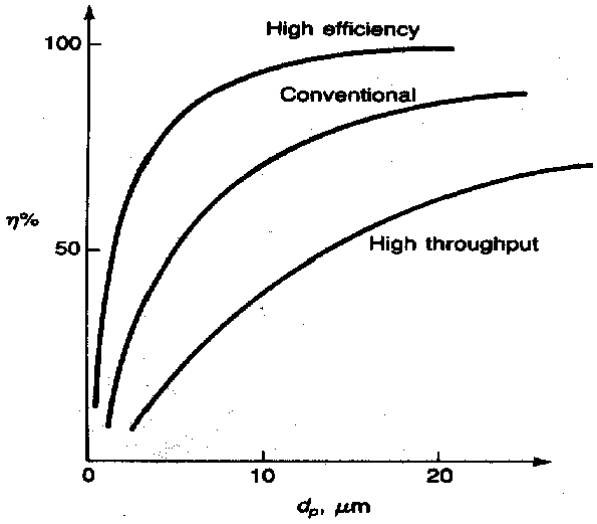


Ilustración 25: Relación general de la eficiencia de recolección frente al tamaño de las partículas

Fuente: (David Leith & Dilip Mehta, ,1973)

Se ha comprobado científicamente que el diámetro de salida del gas y altura del ciclón afectan directamente la eficiencia de este, una de las causas más comunes que afectan la eficiencia del ciclón es la fuga del gas hacia la salida de las partículas (David Leith & Dilip Mehta, ,1973).

Los ciclones de alta eficiencia tienen mayores caídas de presión, por lo tanto, requieren de mayor energía el mover el gas a través de ellos, lo cual hace que aumente su costo de operación, estos ciclones tienen más del 90 % de eficiencia en partículas mayores a las 5 micras. Los ciclones de alta capacidad solo se pueden utilizar si las partículas a remover son mayores a las 20 micras.

El cálculo del diámetro del ciclón requiere de estudio y fórmulas matemáticas para determinarlo, siendo el diámetro la dimensión principal de su diseño, las demás dimensiones son una proporción de este (Echeverry Londoño & Alberto. C, 2006).

Tabla 9: Intervalo de porcentaje de eficiencias de remoción de materia

Familia de ciclones	**Eficiencia de Remoción (%)**		
	PM > 10 µm	PM ≤ 10 µm	PM ≤ 2,5 µm
Convencionales	70 - 90	30 – 90	0 - 40
Alta Eficiencia	80 - 99	60 - 95	20 - 70
Alta Capacidad	80 - 99	10 - 40	0 - 10

Fuente: (Echeverry Londoño & Alberto. C, 2006)

4.5.6 Contaminantes aplicables

Los ciclones se usan para controlar material particulado, principalmente el material particulado de diámetro aerodinámico mayor de 10 micras (µm). Hay, sin embargo, ciclones de alta eficiencia, diseñados para ser efectivos con material particulado de diámetro aerodinámico menor o igual a 10 µm y menor o igual a 2.5 µm (MP10 y MP2.5). Aunque pueden usarse los ciclones para recolectar partículas mayores de 200 µm, las cámaras de asentamiento por gravedad o los simples separadores por impulso son normalmente satisfactorios y menos expuestos a la abrasión. (Casal, J. & Martínez-Benet, 1989)

4.5.7 Límites de emisión logrables/reducciones

La eficiencia de colección de los ciclones es el punto más importante con que se diseñan los ciclones para lograr sus fines, y varía en función del tamaño de la partícula y del diseño del ciclón (Vatavuk, 1990).

La eficiencia de los ciclones generalmente crece con el aumento de:

- El tamaño de partícula y/o la densidad.
- La velocidad en el conducto de entrada.
- La longitud del cuerpo del ciclón.

- El número de revoluciones del gas en el ciclón,
- La proporción del diámetro del cuerpo del ciclón al diámetro del conducto de salida del gas,
- La carga de polvo
- El pulimento de la superficie de la pared interior del ciclón.

La eficiencia de los ciclones disminuirá con el aumento de:

- La viscosidad del gas.
- El diámetro del cuerpo.
- El diámetro de la salida del gas.
- El área del conducto de entrada del gas
- La densidad del gas.

Un factor común que contribuye a la disminución de eficiencias de control en los ciclones es el escape de aire en el conducto de salida del polvo.

Los márgenes de la eficiencia de control para los ciclones individuales están con frecuencia basados en tres clasificaciones de ciclones, es decir, convencional, alta eficiencia y alta capacidad. El rango de eficiencia de control de los ciclones individuales convencionales se estima que es de 70 a 90% para MP; de 30 a 90% para MP10 y de 0 a 40% para MP2.5. (Vatavuk, 1990).

Los ciclones individuales de alta eficiencia están diseñados para alcanzar mayor control de las partículas pequeñas que los ciclones convencionales. De acuerdo con estudios, los ciclones individuales de alta eficiencia pueden remover partículas de 5 µm con eficiencias hasta del 90%, pudiendo alcanzar mayores eficiencias con partículas más grandes. Los rangos de eficiencia de control de los ciclones individuales de alta eficiencia son de 80 a 99% para MP; de 60 a 95% para MP10 y de 20 a 70% para MP2.5. Los ciclones de alta eficiencia tienen mayores caídas de presión, lo cual requiere de mayores costos de energía para mover el gas sucio a través del ciclón. Por lo general, el diseño del ciclón está determinado por una limitación especificada de caída de presión, en lugar de cumplir con alguna eficiencia de control especificada.

De acuerdo con Vatavuk (1990), los ciclones de alta capacidad están garantizados solamente para remover partículas mayores de 20 µm, aunque en cierto grado ocurra la colección de partículas más pequeñas. Los rangos de eficiencia de control de los ciclones de alta capacidad son de 80 a 99% para MP; de 10a 40% para MP10 y de 0 a 10% para MP2.5. Se ha reportado que los multi-ciclones han alcanzado eficiencias de recolección de 80 a 95% para partículas de 5 µm.

4.5.8 Diseño de los ciclones

Los ciclones se diseñan habitualmente de tal modo que se satisfagan ciertas limitaciones bien definidas de caída de presión. Para instalaciones ordinarias que operan más o menos a la presión atmosférica, las limitaciones del ventilador dictaminan, casi siempre, una caída de presión máxima permisible correspondiente a una velocidad de entrada al ciclón dentro del intervalo de 15.2 a 27.4 m/s. Por consiguiente, los ciclones se suelen diseñar para una velocidad de entrada de 22 m/s, aunque no es necesario apegarse estrictamente a este valor. En la separación de partículas, la eficiencia de recolección puede cambiar sólo en una cantidad relativamente pequeña mediante una variación en las condiciones operacionales. El factor de diseño primario que se utiliza para controlar la eficiencia de recolección es el diámetro del ciclón. Un ciclón de diámetro más pequeño que funciona a una caída de presión fija alcanza la eficiencia más alta. Sin embargo, los ciclones de diámetro pequeño requieren varias unidades en paralelo para lograr una capacidad especificada. En tales casos, los ciclones individuales descargan el polvo en una tolva receptora común. El diseño final implica llegar a un término medio entre la eficiencia de recolección y la complejidad del equipo. Se acostumbra a diseñar un solo ciclón para una capacidad particular, recurriendo a varias unidades en paralelo sólo cuando la eficiencia de recolección prevista es inadecuada para una sola unidad. (Echeverry Londoño & Alberto. C, 2006)

A continuación, se detalla la nomenclatura necesaria para el diseño del equipo:

Tabla 10: Nomenclatura diseño ciclón

Nomenclatura	**Dimensión**
Dc	Diámetro del ciclón
a	Altura de entrada
b	Ancho de entrada
S	Altura de salida
Ds	Diámetro de salida
h	Altura parte cilíndrica
z	Altura parte cónica
H	Altura parte total del ciclón
B	Diámetro salida de partículas
G	Factor de configuración
NH	Número cabezas de velocidad
N	Número de vórtices

Fuente: Fuente: (Echeverry Londoño & Alberto. C, 2006)

Supuestos:

- $H < S$
- $W < (D-D_e)/2$
- $H > 3D$
- Cone angle = $7^o \sim 8^o$
- $D_e/D = 0.4 \sim 0.5$, $H/D_e = 8$, $S/D_e = 1$

Tabla 11: Relación de las dimensiones de los ciclones

	Tipo de Ciclón					
	Alta Eficiencia		**Convencional**		**Alta Capacidad**	
D/D	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
H/D	0,5	0,44	0,5	0,5	0,75	0,8
W/D	0,2	0,21	0,25	0,25	0,375	0,35
D_e/D	0,5	0,4	0,5	0,5	0,75	0,75
S/D	0,5	0,5	0,625	0,6	0,875	0,85
L_b/D	1,5	1,4	2,0	1,75	1,5	1,7
L_c/D	2,5	2,5	2,0	2,0	2,5	2,0
D_d/D	0,375	0,4	0,25	0,4	0,375	0,4

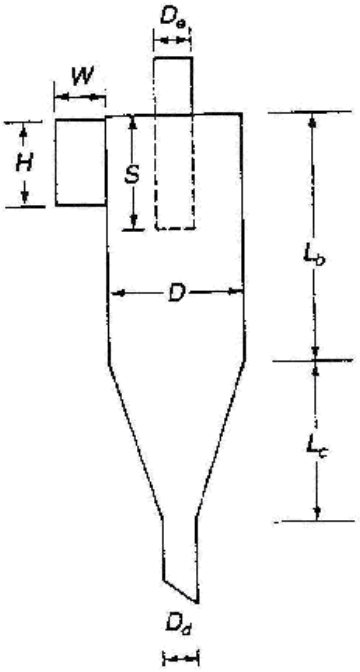
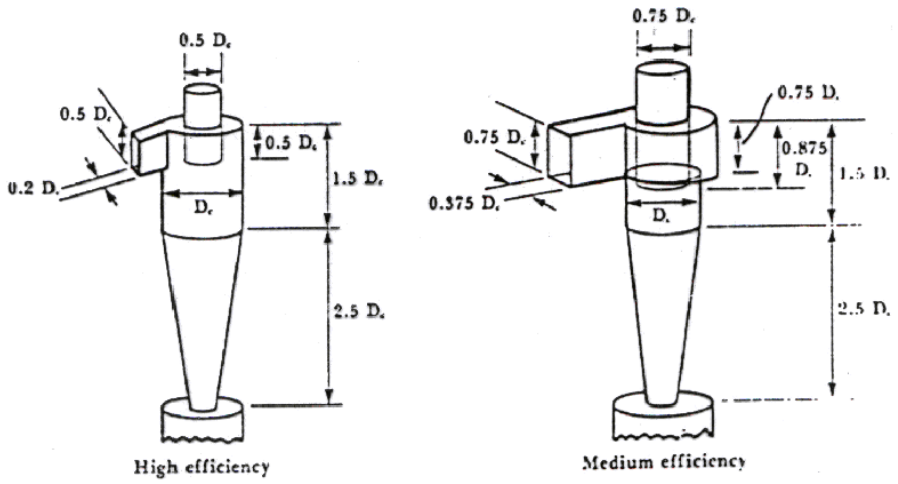


Ilustración 26: Ciclón con sus parámetros de diseño

Fuente: : (David Leith & Dilip Mehta, ,1973)



Standard cyclone designs. (Adapted from Strauss, W., *International Series in Chemical Engineering*, Vol. 8, Pergamon Press, Elmsford, NY, 1975.)

Ilustración 27: Diseño ciclón alta y media eficiencia

4.5.9 Criterios de mantenimiento y detección de fallas

El mayor problema que sufren estos sistemas de transporte de material particulado consiste en el desgaste, de sus partes componentes ocasionados, porque el material particulado se desplaza a gran velocidad, produciendo con esto un desgaste de gran magnitud, por tanto, se recomienda:

- Medición de espesores de pared de ciclón en periodos no muy extensos, según características de planchaje usado.
- Chequeo del ventilador neumático (rodamientos, alineación, planchaje).
- Limpieza de material acumulado. La detección "in situ", de un mal funcionamiento del separador ciclónico, se verá si ocurriese lo siguiente:
- Por exceso de salida de material por la chimenea, o humo excesivo (en el caso de secado).
- Igualando la cantidad de masa que se desea separar, con la masa de material que llega a su destino final. En algunos ciclones existen sensores que ayudan a detectar un mal funcionamiento, estos son:

- Sensores de chispa.
- Sensores vibratorios del ventilador.
- Sensores de Temperatura de rodamientos

4.5.10 Ventajas y desventajas de los ciclones

Las ventajas de los ciclones incluyen las siguientes:

a) Bajos costos de capital.

b) b) Falta de partes móviles, por lo tanto, pocos requerimientos de mantenimiento y bajos costos de operación.

c) Caída de presión relativamente baja, comparada con la cantidad de partículas removidas

d) Las limitaciones de temperatura y presión. dependen únicamente de los materiales de construcción.

e) Colección y disposición en seco

f) Requisitos espaciales relativamente pequeños

Las desventajas de los ciclones incluyen las siguientes:

a) Eficiencias de recolección de partículas sus pérdidas totales relativamente bajas, particularmente para partículas menores de 10 µm.

b) No pueden manejar materiales pegajosos o aglomerantes.

c) Las unidades de alta eficiencia pueden tener altas caídas de presión.

4.5.11 Eficiencia de los ciclones:

Existen muchos factores que afectan la eficacia de recolección de los ciclones.Se ha demostrado que la eficiencia del ciclón por lo general aumenta con los siguientes parámetros: el tamaño y/o densidad, la velocidad en el conducto de entrada,la longitud del cuerpo del ciclón, el número de revoluciones del gas en el ciclón, la relación del diámetro del cuerpo

del ciclón al diámetro de la salida del gas, lacarga de polvo, y la uniformidad de la pared interior del ciclón. (Casal, J. & Martínez-Benet, J, 1989)

La eficiencia del ciclón disminuye con aumentos en los siguientes parámetros:

la viscosidad del gas, el diámetro del cuerpo del ciclón, el diámetro de la salida del gas, la superficie del conducto de entrada del gas, y la densidad del gas.

Otra causa común de la falta de efectividad de un ciclón es la fuga de aire hacia la salida del polvo. En específico, esto disminuirá la eficiencia para las partículas finas.

Se han desarrollado varios métodos para estimar la eficiencia de un ciclón. La mayoría de las teorías ciclónicas utilizan un término para el tamaño de las partículas, llamado el "tamaño de corte de las partículas", que define el tamaño de las partículas para una eficiencia de recolección específica. Las partículas mayores que el tamaño de corte serán recolectadas con una eficiencia mayor que la especificada, y las partículas más pequeñas serán recolectadas con menor eficiencia. El tamaño de corte de las partículas generalmente corresponde al 50% de la eficiencia de recolección y se denomina "d_{50}." Otro parámetro ciclónico importante para designar el tamaño es el "tamaño crítico de las partículas". Las partículas de este tamaño y mayores son capturadas con el 100 % de eficiencia. (Casal, J. & Martínez-Benet, J, 1989).

Lapple desarrolló un modelo relativamente sencillo para predecir la eficiencia deun ciclón que fue derivado de la teoría del movimiento de las partículas y requiere una suposición sobre el número de revoluciones que el gas efectúa dentro del ciclón.

$$\eta = 1 - exp\left(\frac{\pi N \rho_p {D_p}^2 V_i}{9\mu b}\right) \qquad (25)$$

η_i:	eficiencia fraccional por intervalos de tamaño
ρ_p:	densidad de la partícula (kg/m^3)
D_p:	diámetro de la partícula (m)
V_i:	velocidad de entrada al ciclón (m/s)
μ:	viscosidad del gas (Pa.s)

5. METODOLOGÍA

5.1 Visitas a planta Polen de Monte

5.1.1 Primera visita

El día 28 de enero se realizó la primera visita a la Planta Polen de Monte ubicada en Quilpué en la Región de Valparaíso, con la finalidad de conocer el proceso de limpieza y envasado del polen. La limpieza del polen es llevada a cabo por el equipo de limpieza semi – industrial elaborado por el dueño e ingeniero agrónomo Leonardo Badani. A continuación, se muestra el equipo de limpieza.

Ilustración 28: Equipo limpiador de polen semi industrial

El proceso inicia con una pre limpieza del polen a través de harneros de 3 y 4mm el cual es realizado por el operador con la finalidad de eliminar residuos de mayor tamaño que puedan interferir en la limpieza realizada en el equipo, posteriormente se ingresa el polen por la parte superior del equipo donde comienza a caer de manera constante, gracias a una turbina en el interior este flujo de polen es impulsado por el flujo de aire al interior de dos cribas giratorias que están ubicadas continuamente con un tamiz de 3 mm y 4mm respectivamente. Estas

cribas permiten que los granos de polen caigan a la tolva a través del mallado y la rotación, mientras que los residuos como polvo y restos de abejas continúan con el flujo de aire y salen por la parte final del equipo.

Ilustración 29: Tolva con polen limpio

Finalmente, el polen limpio es recolectado de las tolvas que se encuentran debajo de las cribas y es envasado en los distintos formatos que ofrece la empresa. A continuación, se observa el operador pesando el polen para su envasado.

Ilustración 30: Envasado del Polen

5.1.2 Segunda visita

La segunda Visita a la planta se llevó a cabo el 1 de junio del 2021, con la finalidad de conversar con el dueño, Leonardo Badani. Mencionaba que antes de construir el equipo de limpieza semi industrial de polen utilizaba harneros vibratorios similares al de la siguiente imagen:

Ilustración 31: Ejemplo de harnero vibratorio

Estos harneros se utilizan en casi todos los procesos de limpieza de polen en el mundo. Posteriormente, con la finalidad de mejorar la eficiencia del proceso construyo un prototipo del equipo semi industrial el cual se basaba en dos harneros concéntricos con distintos metrajes a los cuales ingresaba el polen y este era tamizado. Pero al ser concéntricos el tiempo en que se encontraba el polen dentro era muy bajo por lo que la eficiencia de separación no era la óptima.

Ilustración 32: Primer diseño del equipo con cribas concéntricas

Finalmente, llegó al equipo semi industrial actual que consta de dos cribas consecutivas con distinto metraje. De este modelo se construyeron dos equipos, con la única diferencia que el segundo es unos centímetros más cortos, con la finalidad de ser mejorado y utilizado para limpiar polen para consumo humano en un futuro. A diferencia del modelo mejorado de este proyecto que es para consumo animal.

Ilustración 33: Vista lateral del equipo de limpieza

También, se tomaron las medidas del equipo para poder llevar a cabo los planos del equipo y dibujos 3D para las simulaciones.

5.1.3 Tercera visita

La tercera visita realizada el 10 de septiembre, se llevó a cabo la toma de datos para el cálculo del flujo másico y la eficiencia del equipo. Este experimento consistió en limpiar tres tipos de polen con diferentes características: Limpio, normal y sucio.

Cada tanda de polen que se ingresa al equipo pesa entre 5 y 10 kg, ya que es vertida constantemente por el operador. El polen ingresa al equipo y es limpiado gracias al tamizado de la criba rotatoria y al flujo de aire que se inyecta. El equipo demora entre 2 a 4 minutos en limpiar cada tanda, dependiendo del caudal másico de entrada. A partir de estos datos se determinarán las eficiencias, tiempo de operación y flujo másico de entrada para cada tipo de polen.

Tabla 12: Ejemplo de la tabla que se debe desarrollar con los datos tomados

Ensayo	Peso Polen (kg)	Tiempo de Tamizado (s)	Flujo Másico de Polen (t/h)
1,2,3…n	-	-	-
Flujo Másico Promedio			-

También se registró mediante un anemómetro la velocidad del flujo del viento inyectado en el equipo, el cual oscila entre 6 y 8 m/s en la entrada del proceso.

6. DESARROLLO

En la siguiente sección se determinarán los parámetros del equipo actual y del equipo con las mejoras necesarias. Además, se observarán sus respectivos dibujos técnicos desarrollados en AutoCAD y sus simulaciones de los fenómenos ocurridos en COMSOL.

6.1 Partes del Equipo Actual

Actualmente, en Badani y Guevara Ltda se está utilizando un innovador limpiador de polen semi – industrial diseñado por el dueño de la empresa. Este es utilizado para limpiar polen a granel y comercializarlo principalmente para consumo animal. Este equipo tiene como parte principal una criba giratoria la cual tiene 2 tipos de mallados consecutivos (3 y 4 mm), con la finalidad de que el polen más grande caiga por un orificio y el más pequeño por el mallado siguiente. Además, la corriente de entrada de polen es impulsada por una corriente de viento producida por una turbina al comienzo del equipo, permitiendo que las impurezas finas como polvo o partes de abeja entren en suspensión hasta llegar a la corriente de salida del proceso.

Ilustración 34: Equipo de Limpieza de Polen

A continuación, En las ilustraciones N°35, N°36 y N°37 se muestra un esquema general del diseño de la máquina en las cuales se encuentran enumerados algunos componentes.

La máquina tamizadora de polen está compuesta por una estructura de soporte (1), una criba (2), dos ejes (3), un motor eléctrico (4), dos chumaceras (5), un sistema de transmisión de potencia por bandas y poleas (6), rodachines de apoyo para la criba que ayudan con el movimiento giratorio (7), tolvas de descargue (8), tolva de carga (9), turbina de viento (10), frecuencímetro para el giro de la criba (11), bateas (12), cubierta del equipo (13) y manga de descarte (14).

Ilustración 35: Estructura de soporte del equipo (1), criba (2), chumaceras (5) y rodachines (7)

Ilustración 36: Dos ejes (3), dos chumaceras (5), sistema de transmisión de potencia por bandas y poleas (6), rodachines (7,) tolvas de descargue (8), turbina de viento (10)

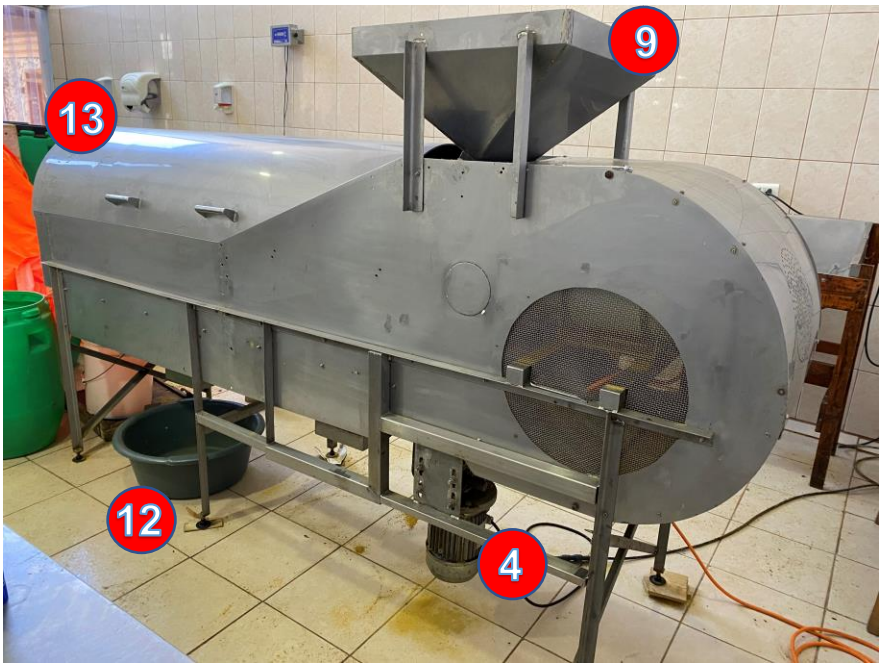


Ilustración 37: Tolva de carga (9), cubierta del equipo (13), motor (4) y bateas (12)

Ilustración 38: Manga de descarte e impurezas (14)

Ilustración 39: Frecuencímetro (10)

La máquina fue construida en acero inoxidable en forma de perfiles angulares y láminas junto con barras circulares de acero. La criba está compuesta por dos tamices y está sobre 2 ejes que poseen ruedas en sus extremos que se apoyan en la estructura soporte. Los parámetros y componentes que se definieron para construir la máquina fueron seleccionados a partir del criterio de los diseñadores, sugerencias en la literatura, conversaciones o sugerencias de expertos.

6.2 Diseño de dibujos técnicos en AutoCAD

El diseño conceptual se llevó a cabo utilizando el software AutoCAD, para el cual se utilizaron como base las dimensiones generales del equipo que se tomaron en terreno durante la segunda visita a la planta Polen de Monte. Las dimensiones se encuentran en centímetros. Los planos conceptuales de las diferentes partes que conformarán el equipo se muestran en la sección de resultados. Para desarrollar los dibujos técnicos se siguieron los siguientes pasos:

a) Ingresar al software AutoCAD y abrir una hoja nueva.

b) Seleccionar la herramienta Drafting y Annotation donde se entregarán las herramientas de dibujo (curvas, líneas, circunferencias, etc.) para realizar el diseño.

c) Dibujar las vistas del equipo (isométrica, frontal, lateral y superior).

d) Posteriormente a realizar el diseño se colocan las medidas en centímetros con la herramienta Dimensión.

e) Finalmente se guarda el documento en formato .dwg.

6.3 Cálculo de los parámetros de operación del equipo

6.3.1 Cálculo de los parámetros del equipo actual

La capacidad de la máquina, la velocidad de alimentación, el tamaño de la criba, las características operativas, el ángulo de inclinación, la velocidad de rotación, etc. son algunos de los parámetros importantes de la máquina que influirían en los requisitos de diseño de un limpiador. Un material debe extenderse uniformemente por todo el ancho de la superficie de la pantalla. El tamaño de la superficie de la pantalla lo dicta el requisito de capacidad de la máquina. La forma de la abertura depende de la forma del grano de polen a manipular.

La naturaleza del movimiento del grano sobre la superficie del tamiz cilíndrico depende del coeficiente de fricción en la superficie, las condiciones de funcionamiento cinemáticas del tamiz y la condición crítica. La condición cinemática está gobernada por la aceleración centrípeta.

6.3.1.1 Cálculo velocidad de rotación de la criba

A continuación, se realizará el cálculo de la velocidad óptima para el giro de la criba.

a) **Velocidad Crítica**: A partir de la ecuación N°1 para calcular la velocidad critica se tiene

$$n_c = \frac{42{,}2\pi}{30\sqrt{0{,}5}} = 6{,}25\ (rad/s)$$

D: 0,5 (m) (medida actual)

b) **Velocidad óptima**: Ya teniendo el valor de la velocidad crítica se procede a calcular la velocidad óptima de la criba:

A partir de la Ilustración N°12 mencionada anteriormente que corresponde al movimiento del agregado dentro de la criba se seleccionará el porcentaje del valor crítico. El llenado de polen en la criba según el volumen visual es de un 10% por lo que se selecciona esta fila, luego se determina que en un 90% se produce el efecto catarata con un volumen de llenado de un 10%, por lo que X será 0,9 adimensional.

$$n_{op} = X * n_c = 6{,}25\ \left(\frac{rad}{s}\right) * 0{,}9 = 5{,}62\ (rad/s)$$

6.3.1.2 Cálculo de la potencia necesaria para mover el equipo

a) Potencia necesaria para mover el polen (Ha):

Según la ecuación N°11 para el cálculo de la potencia necesaria, ya se tendría la velocidad óptima del ítem anterior, sólo faltaría el cálculo del torque.

Como en el proceso de limpieza se agregan 10 kg por pasada se considerará este peso en la criba, ya que es el máximo que suele tener habitualmente.

$$\mathrm{T}_a = 10\ (kg) * 9{,}8\ \left(\frac{m}{s}\right) * \mathrm{y}$$

Para el cálculo del centro de masa se usó la ecuación planteada en el anexo A1 la cual relaciona la distancia S con el área A (anexo A2).

$$y = \frac{S^3}{12A} \qquad (26)$$

Supuesto: α = 45° y h = 0,1(m)

Distancia:

$$S = 2rsen\frac{\alpha}{2} = 0{,}19(m)$$

Área:

$$A = \frac{h}{6S}(3h^2 + 4S^2) = 0{,}015\ (m2)$$

Centro:

$$y = \frac{0{,}19^3}{12 * 0{,}015} = 0{,}038$$

Torque:

$$\mathrm{T}_a = 10\ (kg) * 9{,}8\ \left(\frac{m}{s^2}\right) * 0{,}038\ (\mathrm{m}) = 3{,}724\ Nm$$

Finalmente, la potencia necesaria para mover el polen:

$$H_a = 5{,}24\ \left(\frac{rad}{s}\right) * 3{,}724\ (Nm) = 19{,}5\ W$$

b) Potencia necesaria para mover la criba (Ht):

Para el cálculo del torque se necesitó de la ecuación N°15 la cual relaciona el peso de la estructura, la aceleración angular y el radio de la criba. Donde la aceleración angular está dada por la siguiente ecuación, teniendo en cuenta que el tiempo en alcanzar la velocidad óptima es de 2 segundos.

$$\alpha = \frac{N_{op}}{t_{op}} = \frac{5{,}24\ (\frac{rad}{s})}{2\ s} = 2{,}62(\frac{rad}{s^2})$$

El peso de la criba tomado en terreno fue de 25 (kg)

$$T_t = 2{,}62\left(\frac{rad}{s^2}\right) * 0{,}25(m)^2 * 25(Kg) = 16{,}375\ Nm$$

Usando la ecuación N°14 se calculó la potencia necesaria para mover la estructura.

$$H_t = 5{,}24\ \left(\frac{rad}{s}\right) * 16{,}375\ (Nm) = 85{,}81\ W$$

c) Potencia total necesaria:

Una vez obtenida la potencia para mover el polen y la estructura, se calcula la potencia para mover el sistema mediante la ecuación N°9:

$$H = H_a + H_t = 19{,}5\ (W) + 85{,}81\ (W) = 105{,}3\ (W) = 0{,}105\ (kW)$$

6.3.1.3 Cálculo del flujo másico, tiempo de operación y eficiencia.

Para determinar el flujo másico y tiempo de operación se realizaron tres experimentos, los cuales consistieron en limpiar 3 tipos de polen según su nivel de suciedad clasificados por el ingeniero que diseñó el equipo.

Los pasos del experimento son los siguiente:

a) La empresa entrego tres tandas de polen, las cuales estaban clasificadas en polen limpio (pre tamizado), normal (proveniente de la colmena) y sucio (descarte del proceso).

b) Se ingresa cada tanda al equipo y se registra el flujo de entrada al proceso, el tiempo de residencia dentro del equipo, el flujo de salida de polen limpios en las bateas y flujo de polen en la salida como residuo.

c) A partir de estos datos y la ecuación N°16 se calculará el flujo másico de cada experimento.

d) Finalmente se calculará la eficiencia de cada experimento a través de la siguiente fórmula:

$$Eficiencia = \frac{Flujo\ de\ salida}{Flujo\ de\ entrada} * 100 \qquad (27)$$

Tabla 13: Datos obtenidos de los experimentos de limpieza de polen

N	Entrada (kg)	Tiempo (S)	Salida (kg)	Residuos (kg)	Características
1	7.4	182	6.27	1.13	Normal
2	7	163	6.29	0.71	Limpio
3	9.86	247	5.91	3.95	Sucio

6.3.2 Cálculos asociados a las mejoras

6.3.2.1 Cálculos asociados al diseño del ciclón

Los ciclones son probablemente los dispositivos de recolección de polvo industriales más utilizados. Este método de diseño proporciona un medio para calcular las dimensiones de un ciclón teóricamente óptimo para cualquier conjunto de criterios de diseño. Un ciclón diseñado por este procedimiento se compara con un ciclón estándar de alta eficiencia y, teóricamente, se encuentra que tiene una mejor eficiencia en condiciones operativas idénticas.

Considerando un diámetro de 25 cm y que se requiere un ciclón de alta eficiencia debido al tamaño de las partículas (PM mayor a 10 µm) se tienen las siguientes dimensiones:

Tabla 14: Relación de las dimensiones de los ciclones

	Tipo de Ciclón					
	Alta Eficiencia		**Convencional**		**Alta Capacidad**	
D/D	**1,0**	**1,0**	1,0	1,0	1,0	1,0
H/D	**0,5**	**0,44**	0,5	0,5	0,75	0,8
W/D	**0,2**	**0,21**	0,25	0,25	0,375	0,35
D_e/D	**0,5**	**0,4**	0,5	0,5	0,75	0,75
S/D	**0,5**	**0,5**	0,625	0,6	0,875	0,85
L_b/D	**1,5**	**1,4**	2,0	1,75	1,5	1,7
L_c/D	**2,5**	**2,5**	2,0	2,0	2,5	2,0
D_d/D	**0,375**	**0,4**	0,25	0,4	0,375	0,4

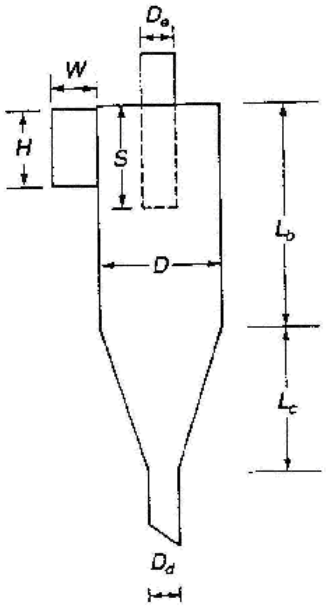


Ilustración 40: Ciclón con sus parámetros de diseño

Tabla 15: Cálculo de los parámetros de diseño del ciclón

Parámetro	Ecuación	Valor
Diámetro	D	25 cm
Altura	Lb = D * 1,5	37,5 cm
Cono	Lc = D * 2,5	62,5cm
Salida inferior	Dd = D * 0,375	9,375cm
Entrada	HXW=D * 0,5 x D * 0,2	12,5 cm x 5cm
Salida de aire	De=D * 0,5	12,5 cm
Altura salida de aire	S=D * 0,5	12,5 cm

6.3.2.2 Cálculos para obtener la eficiencia del ciclón

La eficiencia se define a partir del diámetro de corte que equivale a aquel diámetro para el que la curva de eficiencia tiene un valor de 50%. Este valor constituye una medida del tamaño de las partículas capturadas.

Donde:

Wi: Es una dimensión que representa el ancho de entrada al ciclón y es función del diámetro del ciclón.

N: Número de vueltas que el gas realiza alrededor del ciclón, normalmente se considera n=5

Vi: Velocidad del gas en la entrada del ciclón

A partir de la ecuación N°25 se puede determinar la eficiencia del ciclón

Tabla 16: Datos para el cálculo de la eficiencia del ciclón

Parámetro	Valor
b	5 cm
N	5
Vi	20 m/s
Viscosidad del aire (20°c)	1,009 x10-3 (Ns/m2)
D	0,25 m
Dp	0,04 mm = 4 e-5 m

Experimento para determinar la densidad del polen

Para calcular la eficiencia del ciclón es necesario determinar la densidad del polen que ingresa al equipo.

Para determinar la densidad es necesario tener los datos de la masa y volumen del polen, por lo que se realizó el siguiente experimento:

1) Se tomó una muestra de polen fresco y se machacó con la finalidad de poder medir efectivamente su volumen, ya que al colocar los granos enteros en la probeta había muchos espacios vacíos.
2) La muestra es pesada en una balanza para conocer la masa del polen.
3) El polen en polvo se ingresa a una probeta para medir los milímetros de volumen que utiliza.
4) Finalmente se calcula el valor de la densidad con la siguiente formula:

$$\text{Densidad} = \frac{masa}{volumen} \tag{28}$$

Tabla 17: Datos para el cálculo de la eficiencia del ciclón

Polen	2,92 $[g]$
Volumen	3,5 $[ml]$
Densidad	0,834 $\left[\frac{g}{ml}\right]$ = 834 $\left[\frac{kg}{m3}\right]$

A partir de la ecuación N°25 se reemplazan los datos para obtener una eficiencia estimada del ciclón:

$$\eta = 1 - exp\left(\frac{\pi * 5 * 834\left[\frac{kg}{m3}\right] * (0{,}04\, x10^{-3}m)^2 * 20\left[\frac{m}{s}\right]}{9 * 1{,}009x10^{-3}(Pa\ s) * 5}\right) = 0{,}98$$

6.4 Simulaciones fenomenológicas en COMSOL

6.4.1 Cálculos necesarios para las simulaciones

Para realizar las simulaciones se requerirá tener un rango de velocidades del viento en el que opera el equipo, ya que no está determinado que la velocidad actual sea la óptima. A partir de este rango de velocidades se obtendrán su número de Reynolds y así decidir los modelos a utilizar para realizar las simulaciones. Se utilizará la ecuación N°18.

Datos:

Diámetro del equipo: 500 mm

Temperatura ambiente: 20°C

Viscosidad Cinemática (aire): 1,51 x $10^{-5}(m^2/s)$

Tabla 18: Cálculo del número de Reynolds del equipo para cada velocidad del viento

Velocidad (m/s)	Número de Reynolds
0,1	3.311
1	33.112
2	66.225
4	*132.450*
6	*198.675*
7	*231.788*
8	*264.900*

- El flujo laminar: Re < 2300
- El flujo turbulento: Re > 4000

A partir de los números de Reynolds obtenidos se determina que el mejor modelo a utilizar es el modelo k-ω para flujo turbulento, ya que en el rango de velocidad de viento en que opera el equipo (6 (m/s) a 8 (m/s)) se obtienen números mayor a 4000.

6.4.2 Simulación fenomenológica en COMSOL del equipo actual

Para resolver la actual problemática, primero se analizará el equipo con su funcionamiento actual para así identificar los puntos clave a mejorar. Se utilizará el software COMSOL MULTIPHYSICS el cual permite analizar la fenomenología que ocurre dentro de un determinado sistema.

Pasos y datos necesarios para realizar la simulación:

1. Iniciar el software, seleccionar tipo de sistema estacionario y cargar el modelo 3D en formato IGES que se diseñó anteriormente en AutoCAD en la sección Geometría.
2. Añadir el fluido (material) con el que se trabajará, en este caso aire.
3. Agregar la física que se necesitará (flujo laminar, turbulento k-ω, etc.) para la simulación. Se utilizará flujo turbulento modelo k-ω para tener una visión base del fenómeno.
4. Se agregan los parámetros necesarios para la simulación. El flujo de entrada se coloca al inicio del cono con una velocidad de 6 m/s. El flujo de salida se colocará al final del cilindro.
5. Como malla se seleccionó una de tamaño grueso para facilitar el tiempo de cálculo de la simulación.
6. En la sección estudio se da inicio al cálculo de la simulación.

A continuación, se detallarán los resultados obtenidos de la simulación. Cabe mencionar que sólo se consideró el cono que va unido a la turbina y un cilindro como reemplazo de la criba, ya que el software sólo permite simular sistemas cerrados (sin orificios) y principalmente nos interesa analizar porque se están devolviendo las impurezas al inicio del proceso.

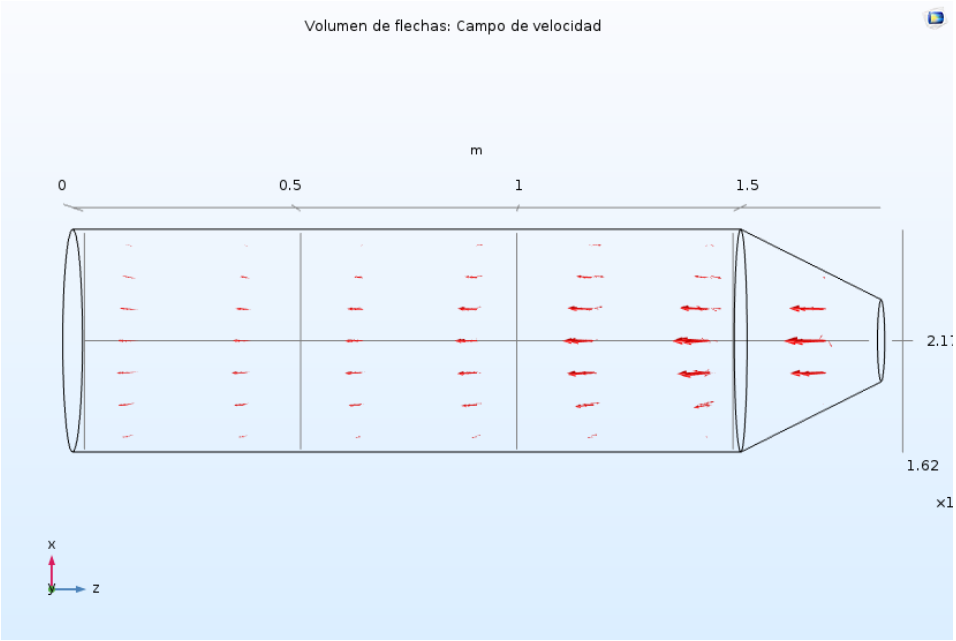


Ilustración 41: Flujo de aire en el equipo actual

En la ilustración 41, se observa el sistema completo con flechas que simulan el flujo de viento. El flujo inicia al comienzo del cono donde estaría ubicada la turbina de viento, este pasa a través del cono y se va expandiendo a través del cilindro que correspondería a la criba. Además, se observan flechas de mayor tamaño que corresponden a flujo de viento con mayor magnitud de velocidad y van disminuyendo de tamaño a medida que disminuye su velocidad.

Para analizar más a fondo el fenómeno se realizará un acercamiento al sistema:

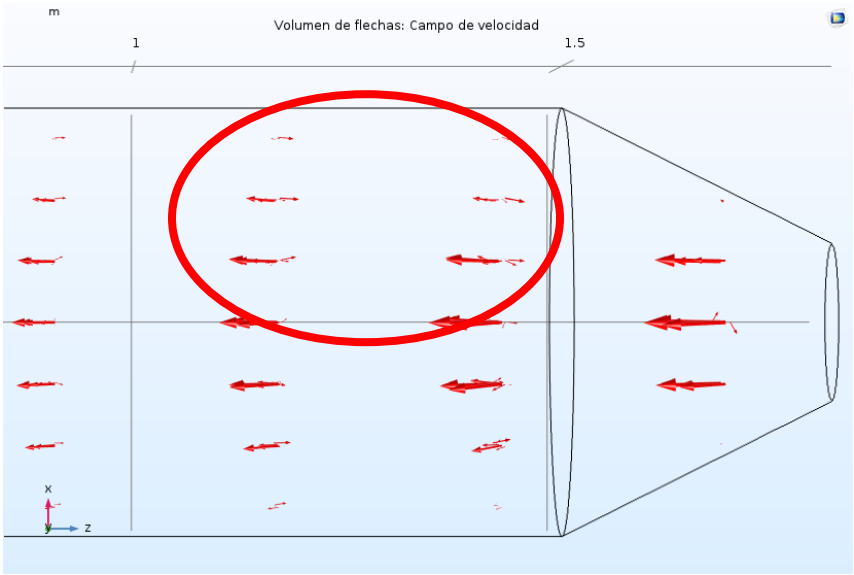


Ilustración 42: Parte inicial con mayor velocidad del viento en el equipo actual

Se tiene la vista lateral del sistema, donde se observan pequeñas flechas que van en contra del flujo principal de aire, estas se producen debido a la expansión del aire por la forma cónica de la entrada y hacen que las impurezas retornen al inicio del flujo de aire disminuyendo la eficiencia del equipo.

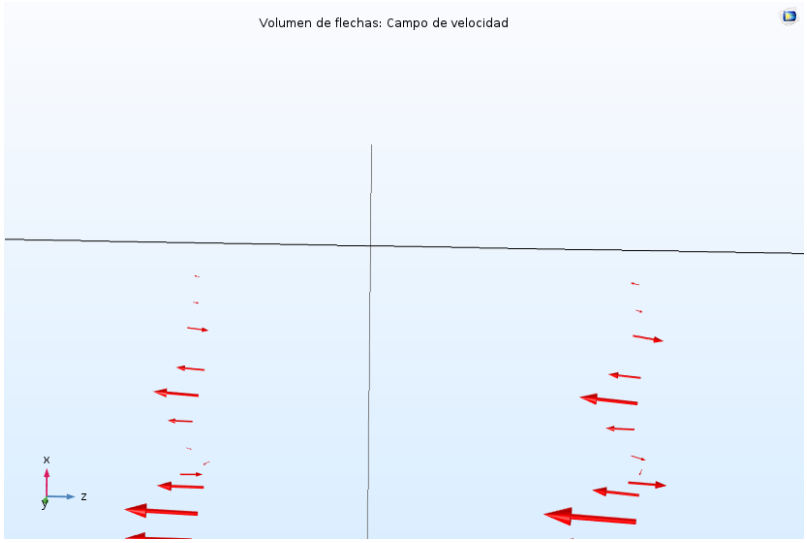


Ilustración 43: Vista lateral del flujo de viento del equipo actual

En la ilustración 44, se observa la vista superior donde también se encuentran las pequeñas flechas en contra del flujo.

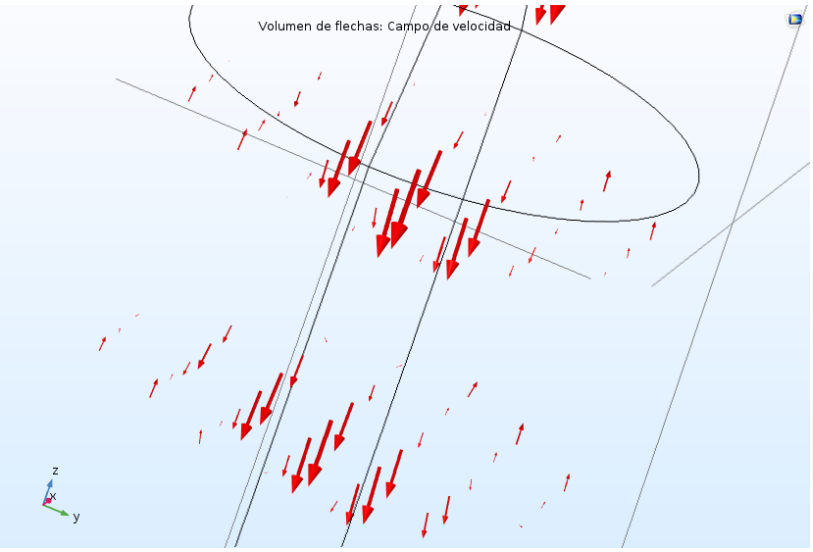


Ilustración 44: Vista superior del flujo de viento del equipo actual

A partir de la misma simulación, se seleccionó la opción para eliminar la magnitud de las flechas permitiendo que todas se vean del mismo tamaño independiente de su velocidad (normalización de las flechas). En la ilustración 45 se observa con mayor claridad como se produce el cambio de dirección del flujo hasta llegar al inicio del proceso.

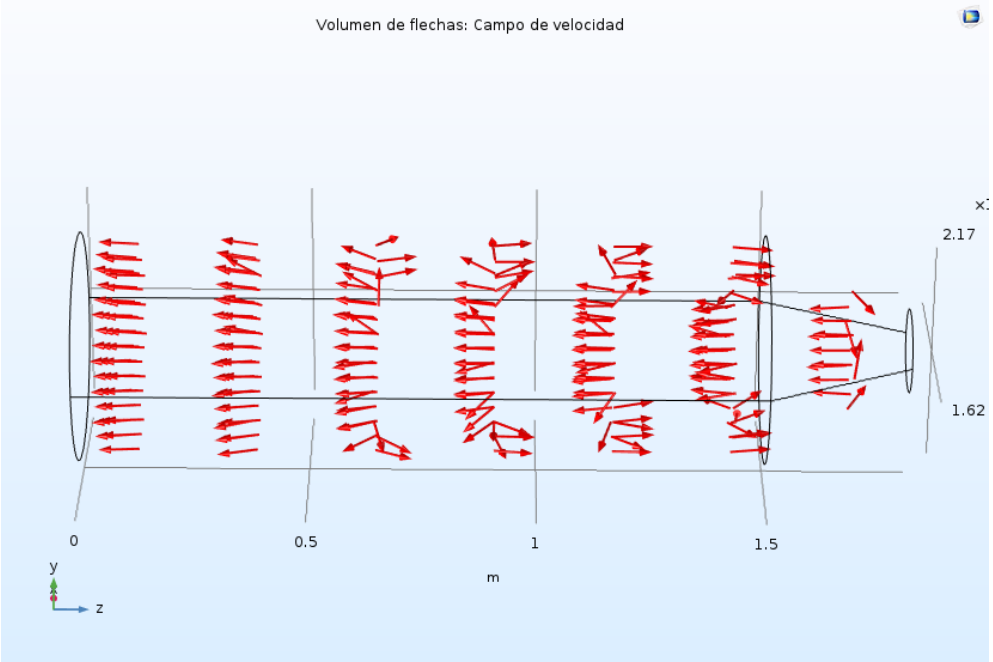


Ilustración 45: Representación del movimiento del flujo de aire a través del equipo actual

Finalmente en la ilustración 46 se tiene el perfil de velocidad del viento con corte en el plano XY donde se observa como el flujo se expande hacia las paredes a medida que avanza por el cilindro, producto a que el cono le da esa dirección. Como mejora se optará por cambiar el cono por un acople con una salida mas pequeña y recta, permitiendo que el flujo salga de manera mas pareja y no se expanda a las paredes.

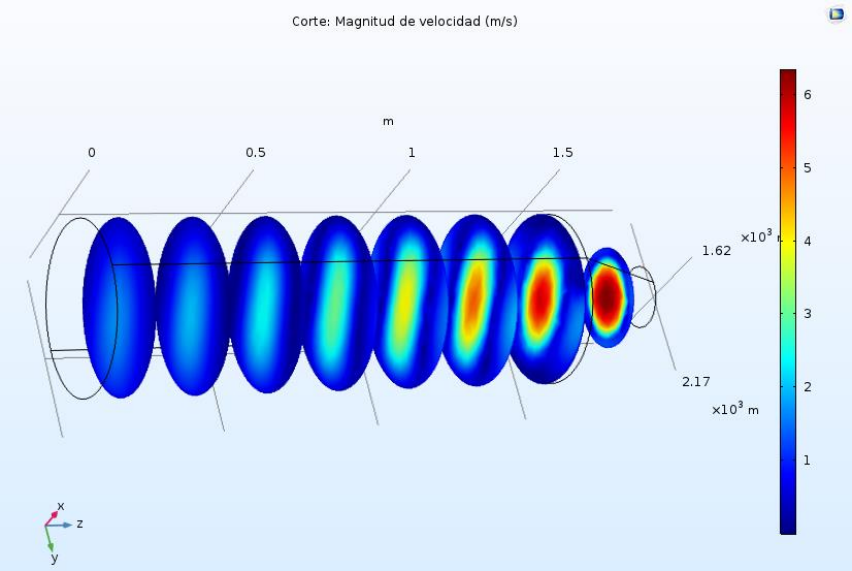


Ilustración 46: Perfil de velocidad del viento plano XY del equipo actual

6.4.3 Solución a la alta turbulencia en el flujo de aire de entrada

Para encontrar una mejora a la alta turbulencia y expansión del aire que se genera debido al uso de un cono como acople en la turbina, se decidió simular un túnel de viento en COMSOL. Para ello se diseñará y simulará un cono de contracción que se sitúa a la salida de la turbina de viento y al inicio del cilindro (criba). Su misión consiste en dotar al flujo, adecuadamente acondicionado, de la velocidad necesaria. Tal aceleración es generada mediante una reducción gradual de su sección recta, produciendo así un incremento continuo y proporcional de la velocidad, reduciendo el grosor de la capa límite y evitando la formación de vórtices. Mediante la ecuación de Bernoulli para fluidos ideales, que el incremento de velocidad a la salida de esta sección va acompañado de una reducción de presión de esta.

6.4.3.1 Simulación fenomenológica en COMSOL del cono de contracción.

Para llevar a cabo la simulación de COMSOL se considerarán los siguientes supuestos:

- Se utilizará el modelo para flujo turbulento k-ω, ya que los Reynolds obtenidos para este sistema son altos en un rango de 2-6 (m/s).
- Se considerará un cilindro cerrado unido al acople diseñado como la estructura a estudiar. No se le agregaran los agujeros a la criba ni se considerará la distancia que hay entre el cono al cilindro, debido a que COMSOL sólo trabaja con sistemas cerrados para disminuir los grados de libertad y simplificar los cálculos.
- Se considerará flujo estacionario para simplificar los cálculos.
- Sólo se trabajará con aire como el material, ya que al tener turbulencias altas y ser un modelo complejo para resolver no se le pueden agregar más materiales al sistema (como por ejemplo polen).
- Se utilizará un mallado grueso para simplificar los cálculos.
- Se considera que la entrada de aire esta al inicio del cono y la salida estará al final del cilindro.

Simulación Flujo Turbulento K-ω

a) Velocidad 2 (m/s):

A continuación, se muestran las imágenes resultantes de la simulación en COMSOL del equipo con el nuevo cono de contracción a una velocidad de 2(m/s) utilizando el modelo para flujo turbulento k-ω. En la Ilustración 47 se detalla el perfil de velocidad en vista de corte transversal en la cual se observa que la velocidad aumenta en la salida del cono como debería ser un cono de contracción (color rojo intenso).

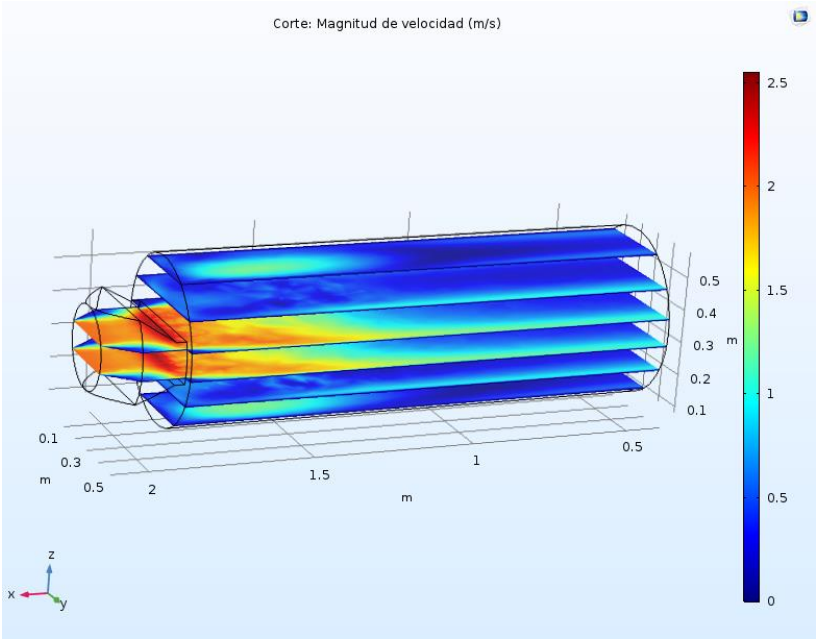


Ilustración 47: Perfil de velocidad flujo turbulento velocidad 2 m/s

En la siguiente Ilustración N°48 se encuentra el perfil de velocidad visto desde flechas que varían de tamaño según su magnitud de velocidad, es decir, mayor tamaño mayor velocidad donde se observa un flujo más constante gracias al nuevo cono de contracción. Además, tiene menos flechas en contra del sentido del flujo y menos turbulencia que en el equipo sin las mejoras.

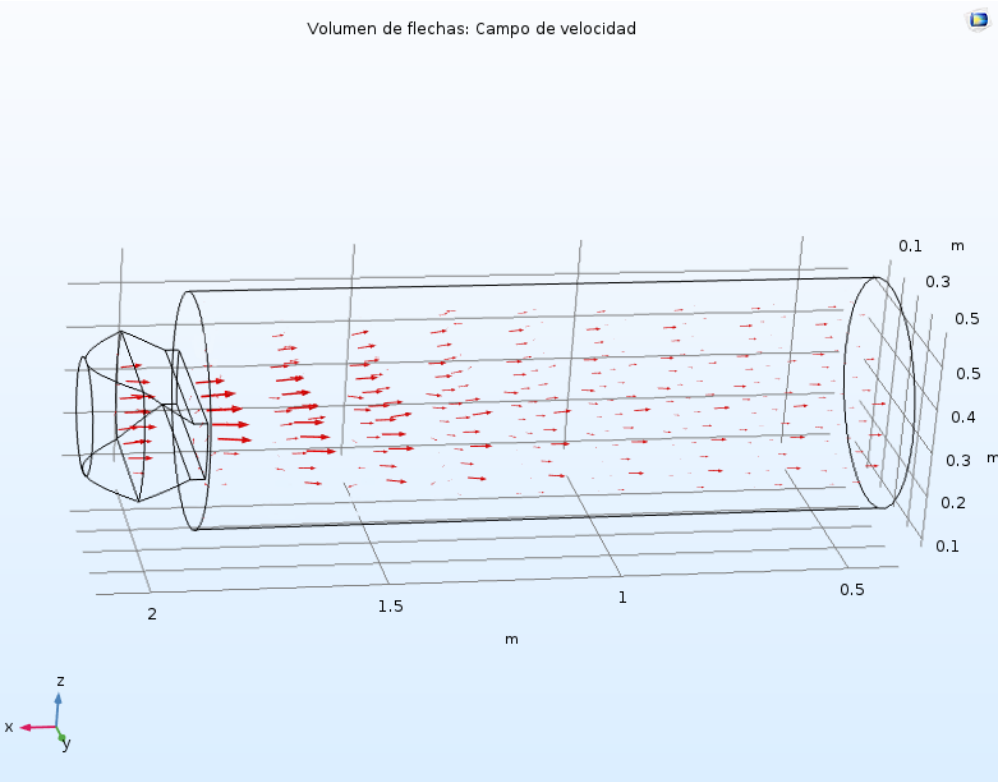


Ilustración 48: Perfil de velocidad por flechas flujo turbulento velocidad 2 m/s

En la Ilustración N°49 también se observa el perfil de velocidad mediante flechas, pero estas se encuentran normalizadas, es decir, todas poseen igual tamaño y sólo muestran las direcciones en que podría ir el flujo. Se puede observar que el flujo no se devuelve al comienzo del proceso como en el equipo sin mejoras. Al ser una velocidad de 2 (m/s) tiene un número de Reynolds menor que 6 – 8 (m/s) que es el rango de operación actual y por lo tanto las turbulencias son más bajas.

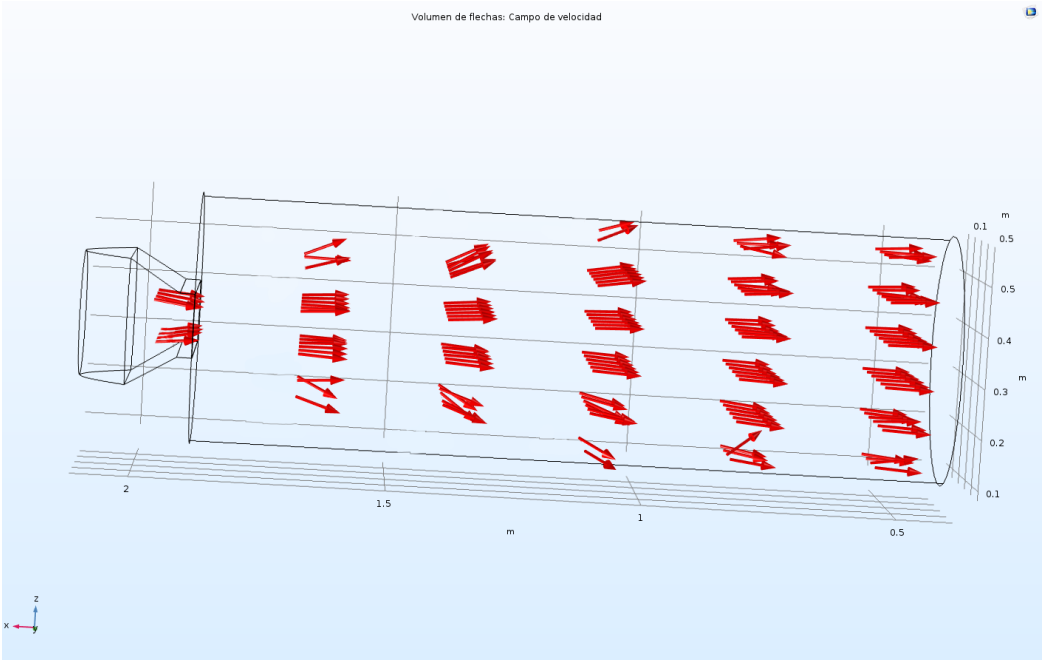


Ilustración 49:Perfil de Velocidad por flechas normalizadas flujo turbulento velocidad 2 m/s

b) Velocidad 4 (m/s)

A continuación, se muestran las imágenes resultantes de la simulación en COMSOL del equipo con el nuevo cono de contracción a una velocidad de 4(m/s) utilizando el modelo para flujo turbulento k-ω. En la Ilustración N°48 se observa en perfil de velocidad en vista de corte en la cual se observa que la velocidad aumenta en la salida del cono de contracción. A una velocidad de 4 (m/s) ya se presenta un aumento en su número de Reynolds en comparación al caso anterior, por lo que se espera un aumento en la turbulencia.

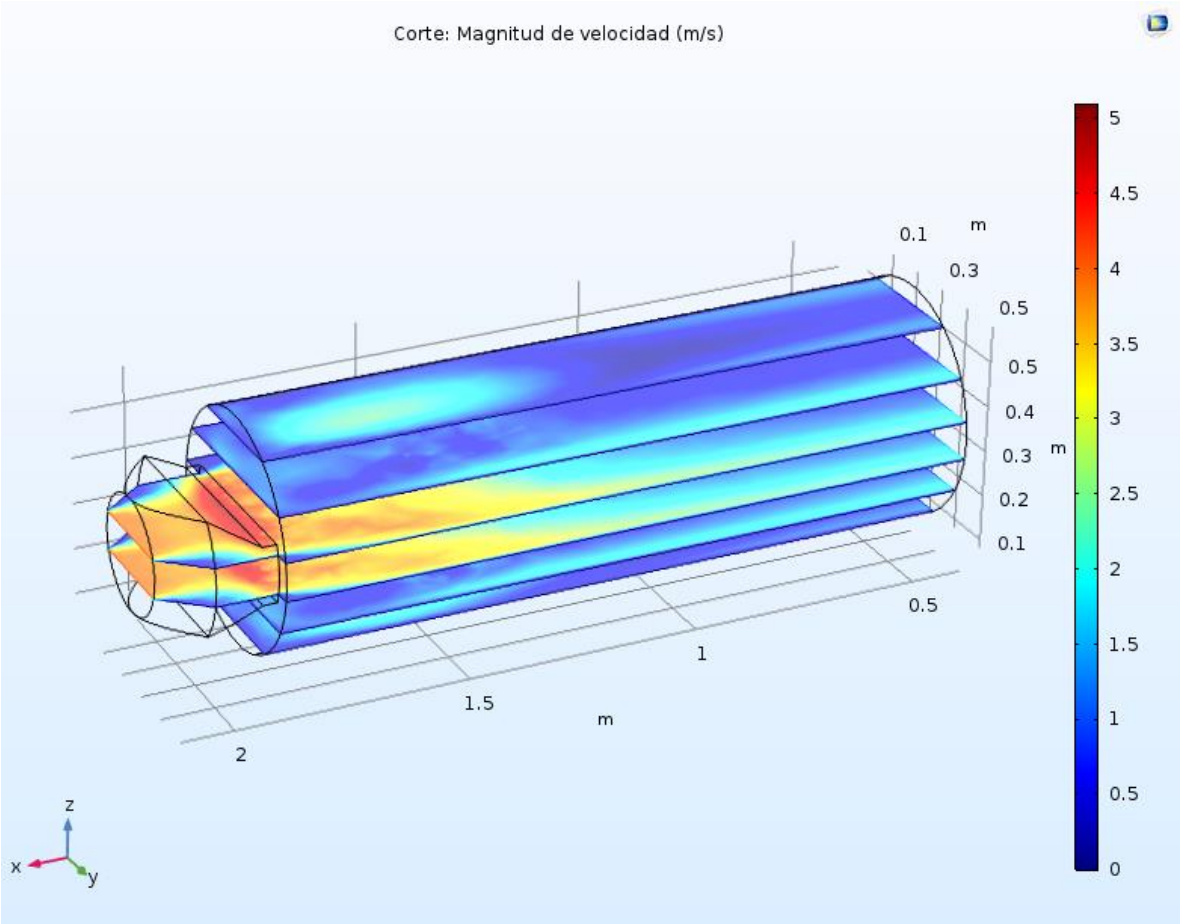


Ilustración 50: Perfil de velocidad flujo turbulento velocidad 4 m/s

En la Ilustración N°53 se muestra el perfil de velocidad a partir de flechas en donde flechas más grandes corresponden a altas velocidades y viceversa. En comparación al caso anterior se observan pequeñas flechas al final del cilindro que van en contra del flujo, esto producto del aumento de la velocidad y por ende de la turbulencia dentro del equipo.

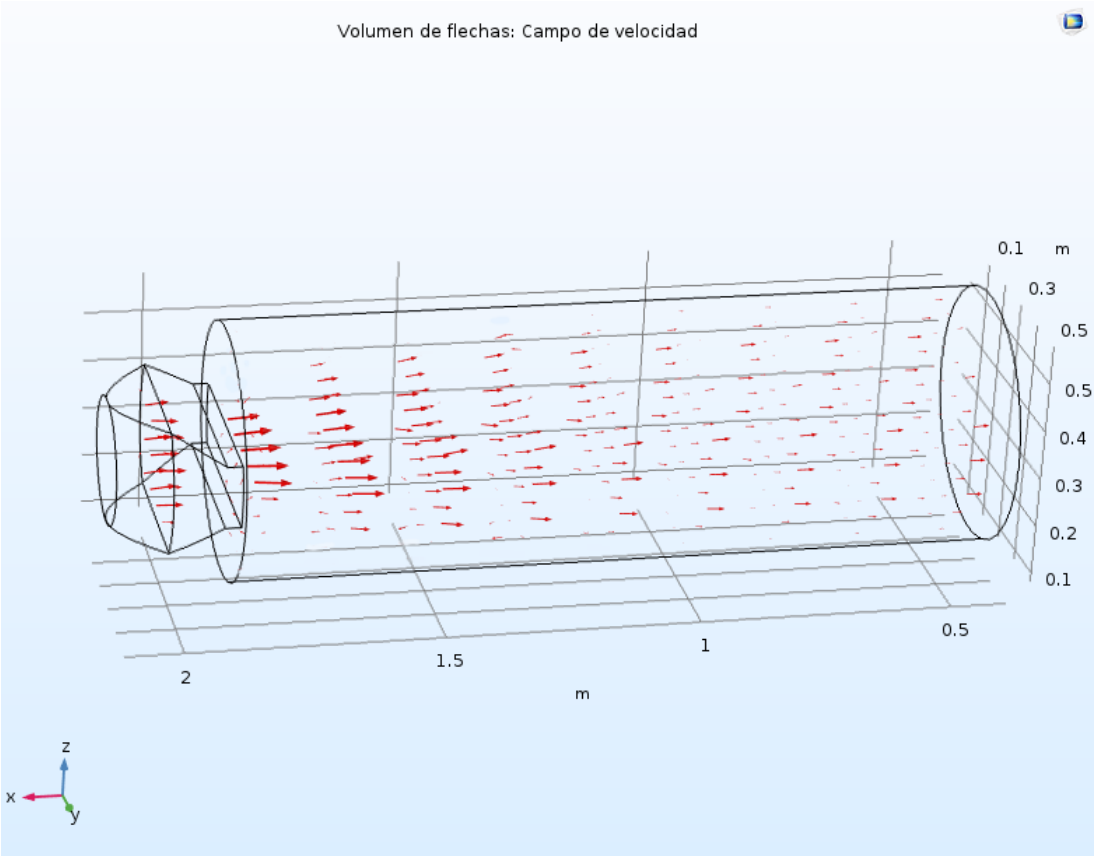


Ilustración 51: Perfil de velocidad por flechas flujo turbulento velocidad 4 m/s

En la Ilustración N°48 también se observa el perfil de velocidad mediante flechas normalizadas. En esta figura se observa aún mejor que debido al aumento en la velocidad del viento aumenta la turbulencia del viento y se produce una desviación del flujo recto del aire.

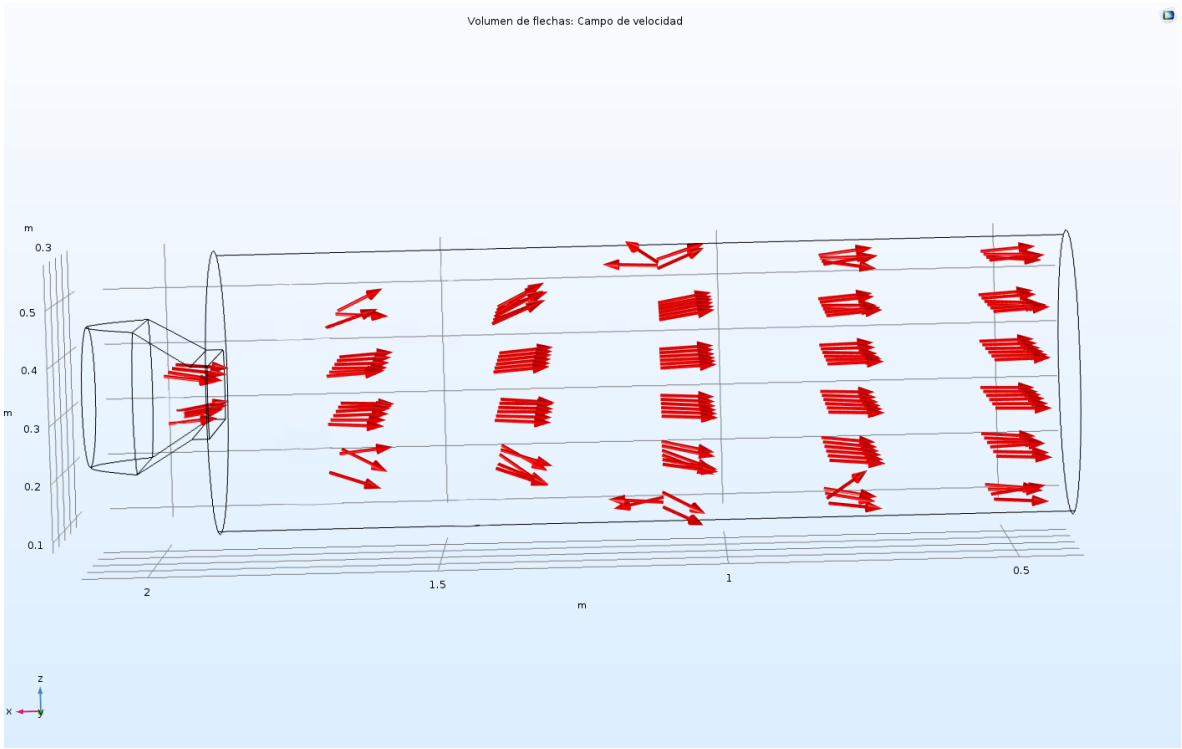


Ilustración 52: Perfil de velocidad por flechas normalizadas flujo turbulento velocidad 4 m/s

c) Velocidad 6 (m/s)

Finalmente, a una velocidad de 6 (m/s) que corresponde a la velocidad utilizada actualmente en el equipo, al igual que en los casos anteriores en la Ilustración N°48 se observa el perfil de velocidad mediante corte y la velocidad del viento aumenta en la salida del cono direccionado el flujo del aire.

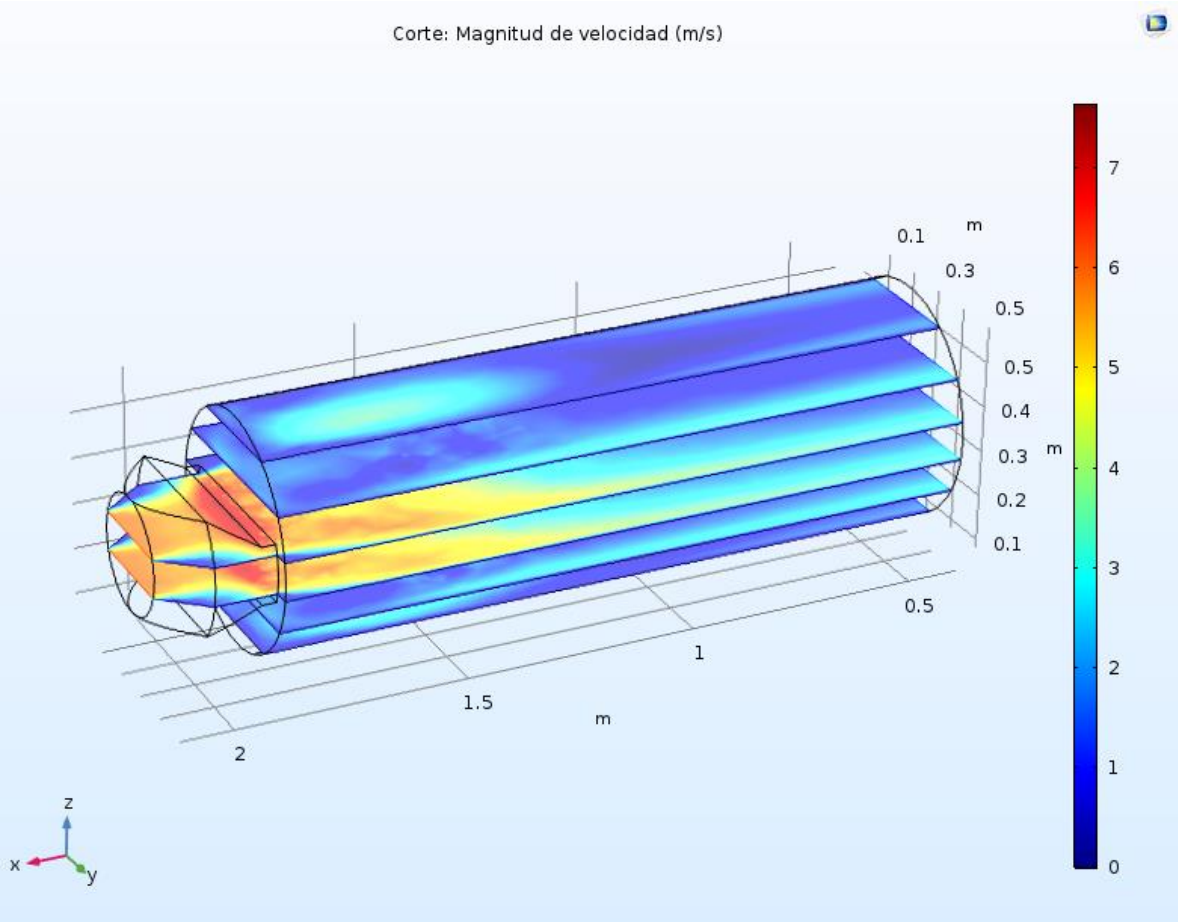


Ilustración 53: Perfil de velocidad flujo turbulento velocidad 6 m/s

En la Ilustración N°48 se encuentra el perfil de velocidad visto desde flechas que varían de tamaño según su magnitud de velocidad. En este caso ya se observan pequeñas flechas que cambian de dirección más cerca de la entrada, a pesar de que son despreciables en comparación al flujo principal puede significar una disminución en la eficiencia del equipo.

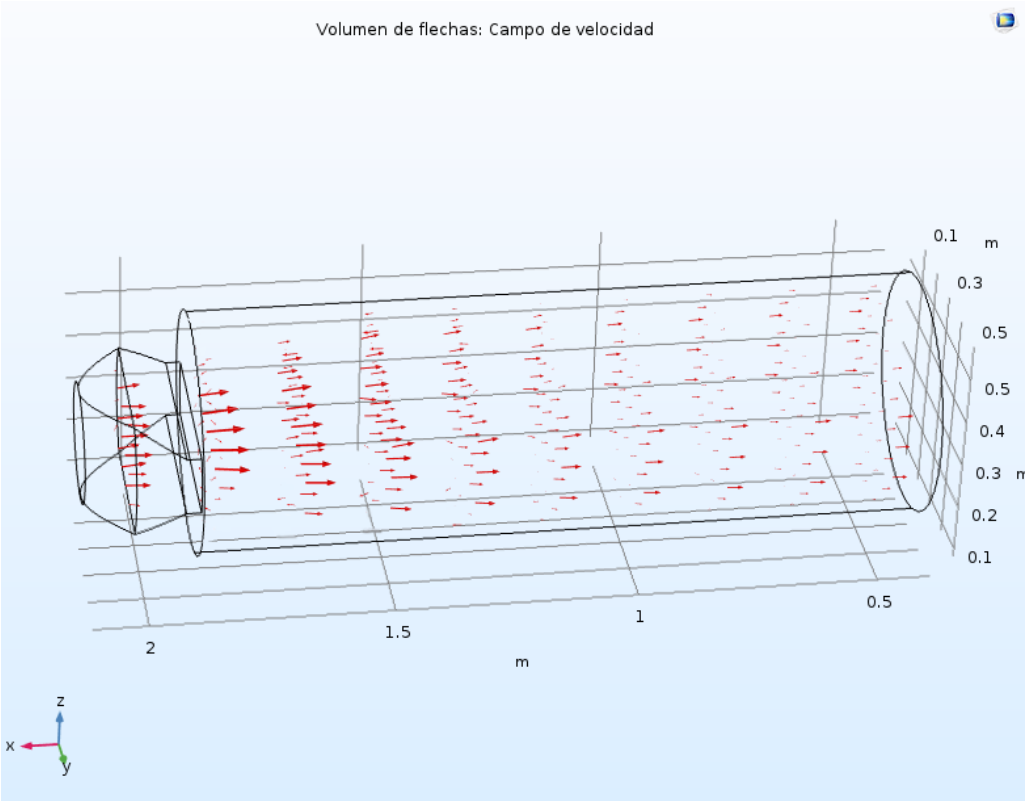


Ilustración 54: Perfil de velocidad por flechas flujo turbulento velocidad 6 m/s

En la Ilustración N°48 con las flechas normalizadas se observa el fenómeno mencionado anteriormente, donde se ve un aumento en el cambio de dirección del flujo de aire. Por lo que se deduce que a medida que va aumentando el flujo de velocidad hay mayor turbulencia y disminuye la eficiencia del equipo, ya que pueden devolverse residuos al inicio del proceso.

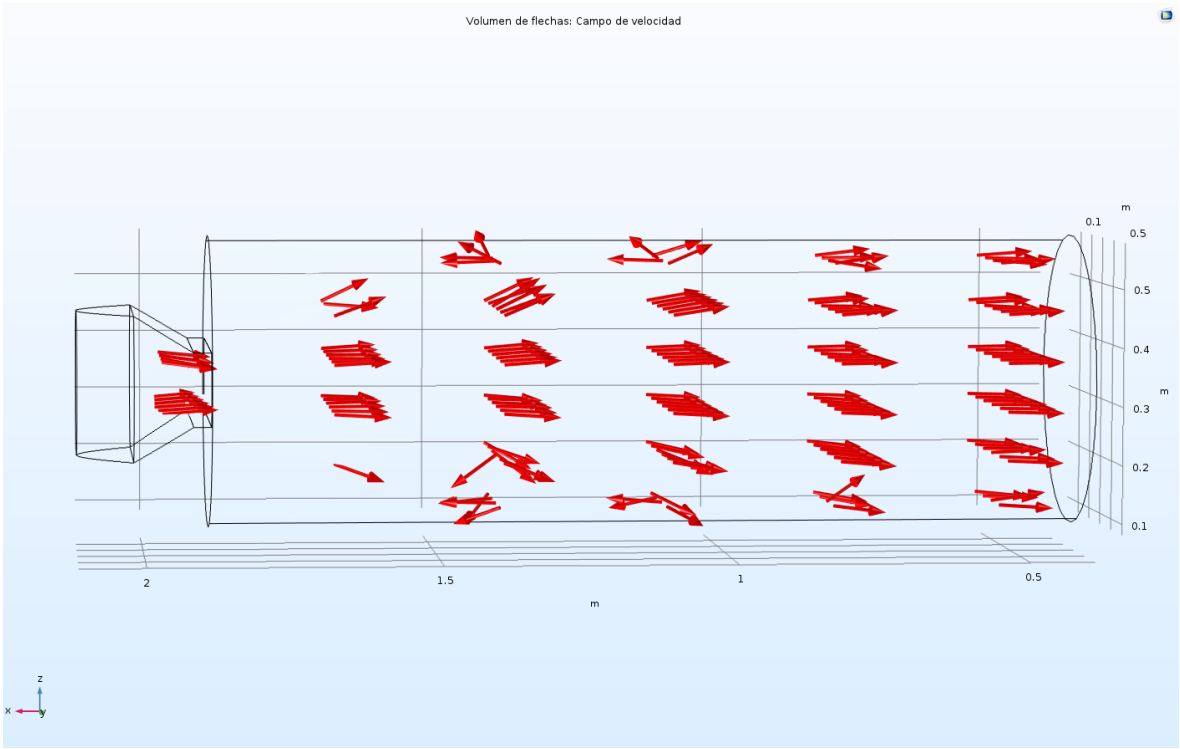


Ilustración 55: Perfil de velocidad por flechas normalizadas flujo turbulento velocidad 6 m/s

6.4.3.2 Simulación del ciclón en COMSOL

- Se utilizará el modelo para flujo turbulento k-ω, ya que los Reynolds obtenidos para este sistema son altos en un rango de 2-6 (m/s).
- Se considerará sólo el ciclón en la geometría para observar cómo se comportaría el flujo de aire y si el ciclón funciona como corresponde.
- Se considerará flujo estacionario para simplificar los cálculos.
- Sólo se trabajará con aire como el material, ya que al tener turbulencias altas y ser un modelo complejo que resolver no se le pueden agregar más materiales al sistema (como por ejemplo polen).
- Se utilizará un mallado grueso para simplificar los cálculos.
- Se considera que la entrada de aire esta al inicio del ciclón y tendrá la salida superior e inferior como especifica su diseño.

6.4.3.3 Simulación ciclón flujo turbulento K-ω

A continuación, se muestran las simulaciones del ciclón en las tres velocidades estudiadas con la finalidad de observar si el ciclón cumple la función de separar los flujos en cada caso.

a) Velocidad 2 (m/s)

A partir de las Ilustraciones N°56 y N°57 se puede observar que a una velocidad de 2 (m/s) el ciclón separa bien los flujos, por lo que cumpliría bien su función de eliminar el polvo y material liviano restante.

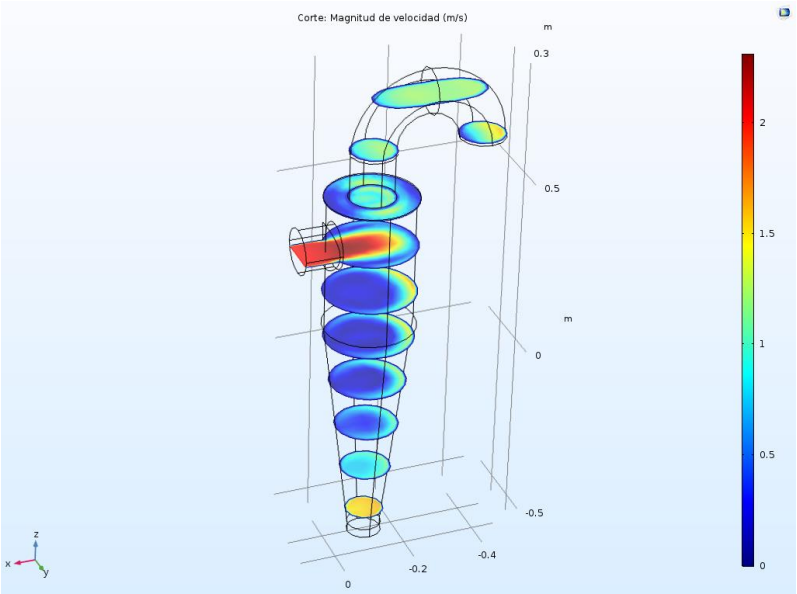


Ilustración 56: Perfil de velocidad del ciclón flujo turbulento velocidad 2 m/s

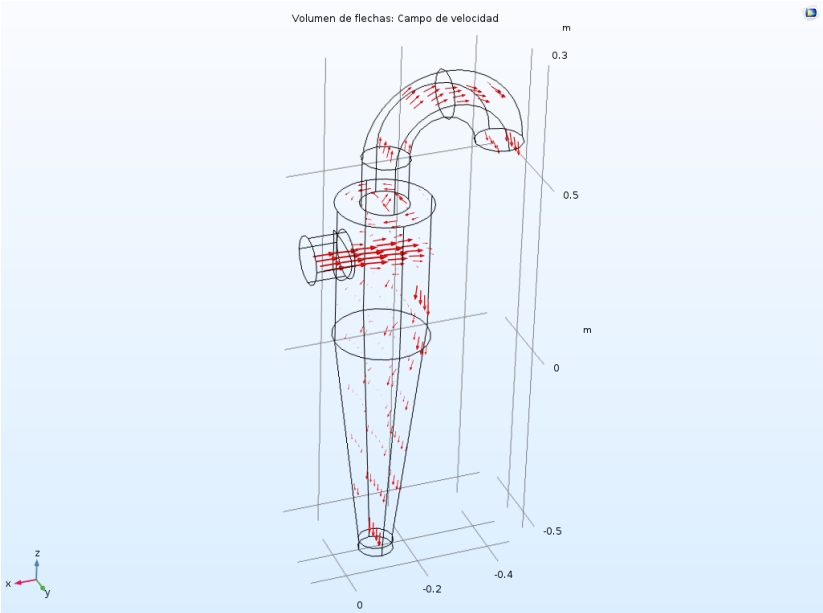


Ilustración 57: Perfil de velocidad por flechas del ciclón flujo turbulento velocidad 2 m/s

b) Velocidad 4 (m/s)

Igual que en el caso anterior a una velocidad de 4 (m/s) el ciclón cumple su función principal de separar el flujo de aire para eliminar el material liviano.

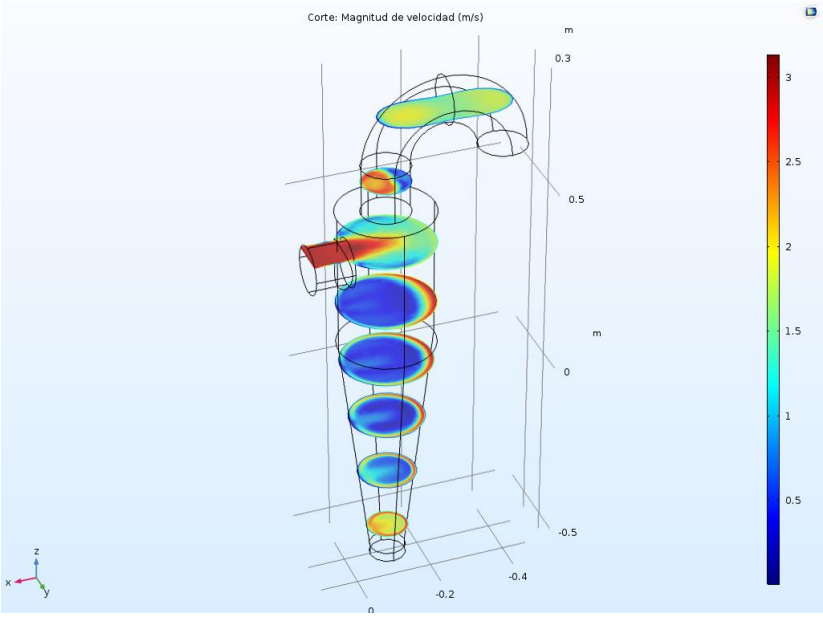


Ilustración 58: Perfil de velocidad del ciclón flujo turbulento velocidad 4 (m/s)

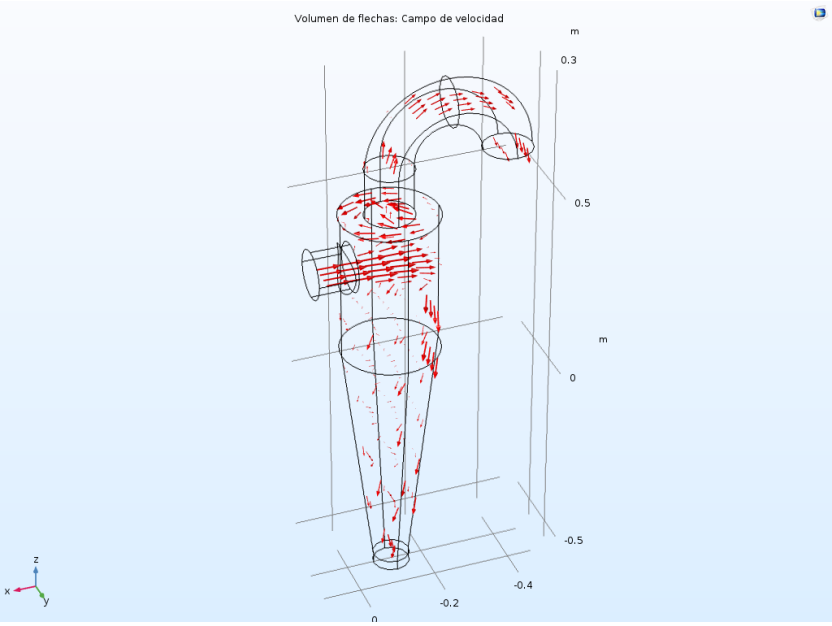


Ilustración 59: Perfil de velocidad por flechas del ciclón flujo turbulento velocidad 4 (m/s)

c) Velocidad 6 (m/s)

Como en los otros dos casos, a una velocidad de 6 (m/s) funciona perfectamente, por lo que es indiferente a la turbulencia que se genera dentro de la criba. Funcionará en cualquiera de los tres casos.

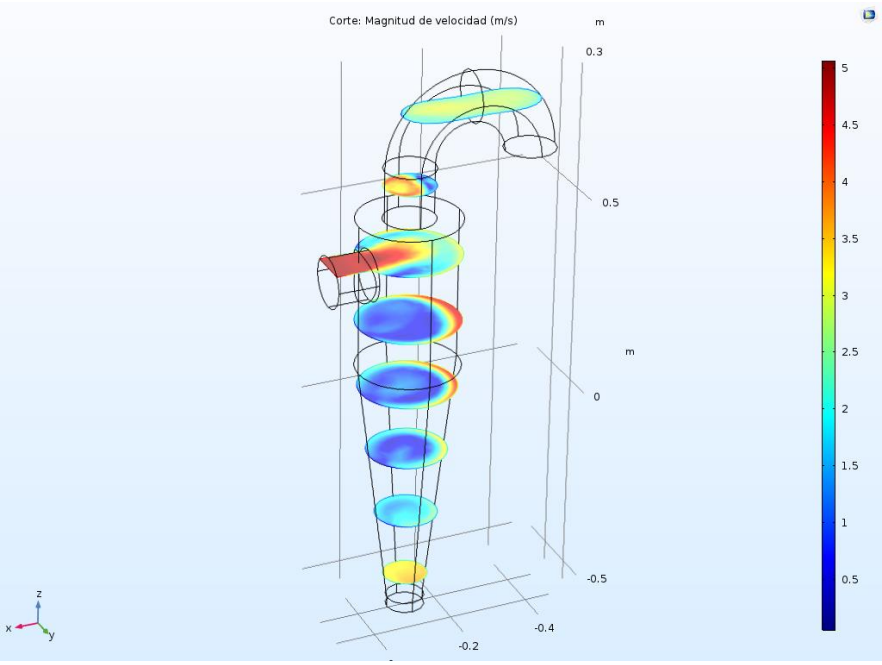


Ilustración 60: Perfil de velocidad del ciclón flujo turbulento velocidad 6 (m/s)

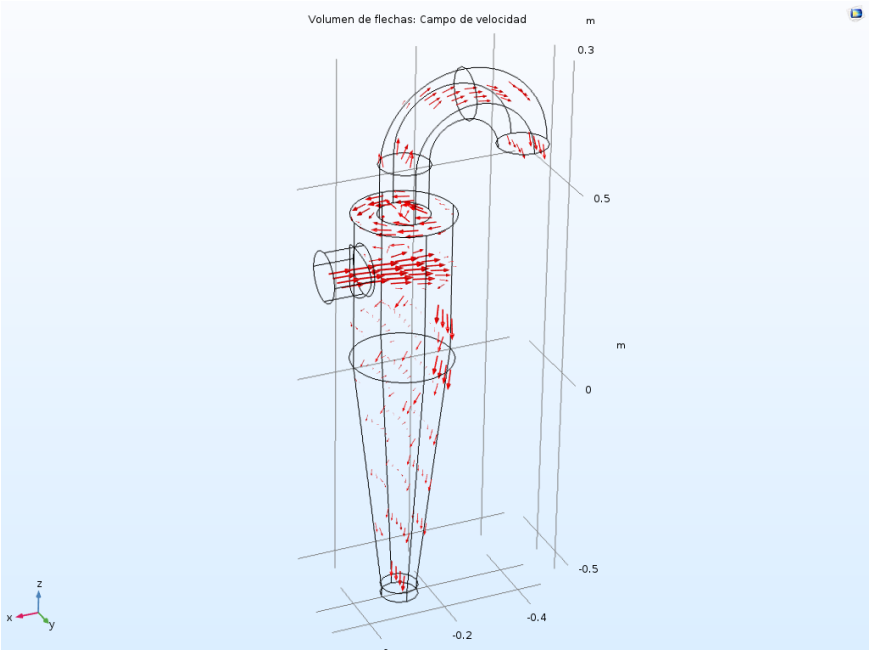


Ilustración 61: Perfil de velocidad por flechas del ciclón flujo turbulento velocidad 6 (m/s)

6.4.4 Simulación fenomenológica en COMSOL del equipo mejorado

- Se utilizará el modelo para flujo turbulento k-ω, ya que los Reynolds obtenidos para este sistema son altos en un rango de 2-6 (m/s)
- Se considerará un cilindro cerrado unido al acople diseñado como la estructura a estudiar. No se le agregaran los agujeros a la criba ni se considerará la distancia que hay entre el cono al cilindro, debido a que COMSOL sólo trabaja con sistemas cerrados para disminuir los grados de libertad y simplificar los cálculos. Se añadirá en ciclón como postratamiento del equipo.
- Se considerará flujo estacionario para simplificar los cálculos.
- Sólo se trabajará con aire como el material, ya que al tener turbulencias altas y ser un modelo complejo que resolver no se le pueden agregar más materiales al sistema (como por ejemplo polen)
- Se utilizará un mallado grueso para simplificar los cálculos.

- Se considera que la entrada de aire esta al inicio del cono y la salida estará en la parte superior e inferior del ciclón.

6.4.4.1 Simulación del equipo con mejoras flujo turbulento k-ω

A continuación, se muestran los resultados de las simulaciones del flujo de aire considerando el equipo con las mejoras, para cada velocidad del viento.

e) Velocidad 2 (m/s)

A partir de la Ilustración N°62 se observa que la velocidad de entrada al equipo es bastante menor en comparación a la velocidad que se obtiene al ingresar al ciclón debido a la reducción del área transversal (un radio menor en la tubería), por lo que se considerarían estas como las nuevas velocidades de entrada al ciclón.

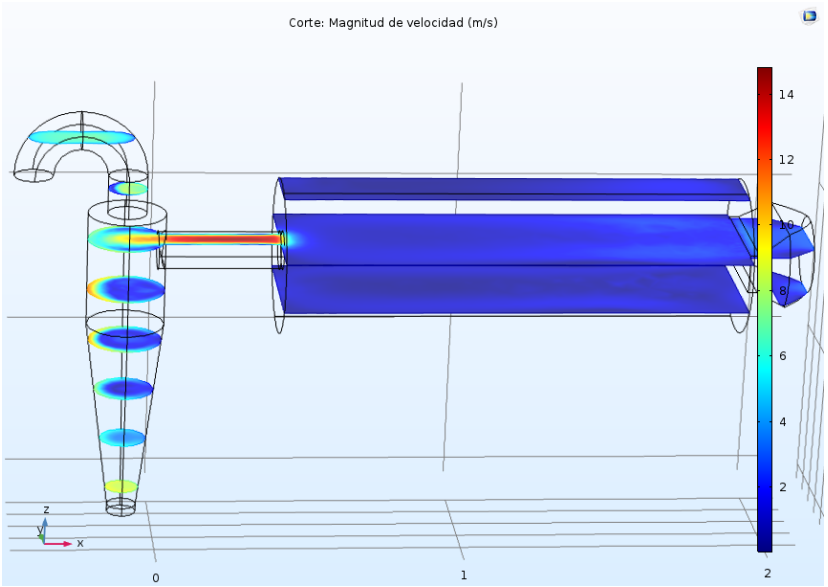


Ilustración 62: Perfil de velocidad del equipo con mejoras flujo turbulento velocidad (2 m/s)

En la Ilustración N°63 se detalla el flujo del aire mediante flechas en donde el tamaño depende de su magnitud. Las flechas de entrada al sistema son mucho más pequeñas que las del ciclón y se determina un flujo constante similar a un flujo laminar, ya que posee pocas desviaciones en el flujo.

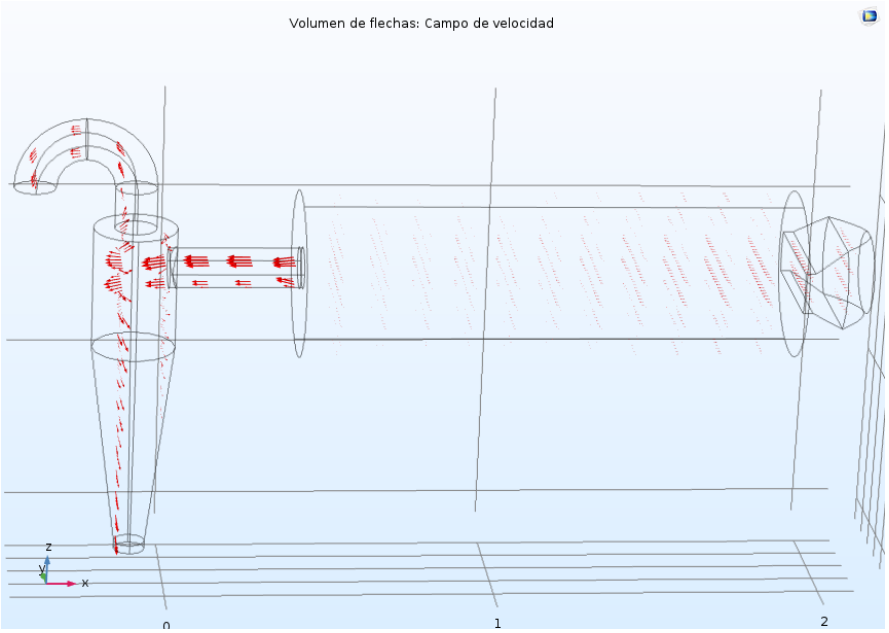


Ilustración 63: Perfil de velocidad por flechas del equipo con mejoras flujo turbulento velocidad 2(m/s)

A partir de la Ilustración N°64 donde se tienen las mismas flechas que representan el flujo de aire, pero esta vez normalizadas, se aprecian las bajas desviaciones de dirección del flujo de aire.

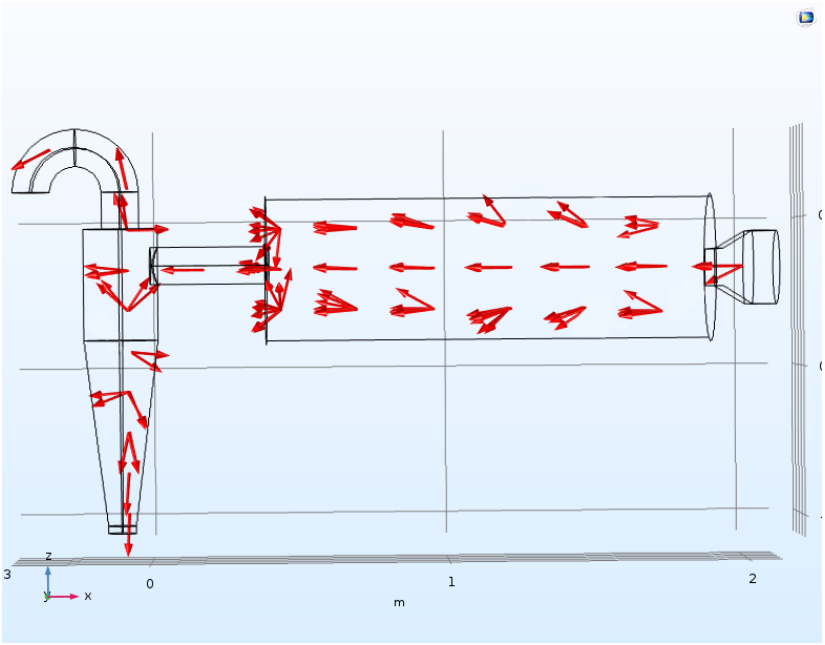


Ilustración 64: Perfil de velocidad por flechas normalizadas del equipo con mejoras flujo turbulento velocidad 2(m/s)

f) Velocidad 4 (m/s)

Al igual que en el caso anterior la velocidad de entrada es bastante menor que la velocidad de entrada al ciclón y presenta bajas turbulencias dentro de la criba como se observa en las Ilustraciones N°65 y N°66.

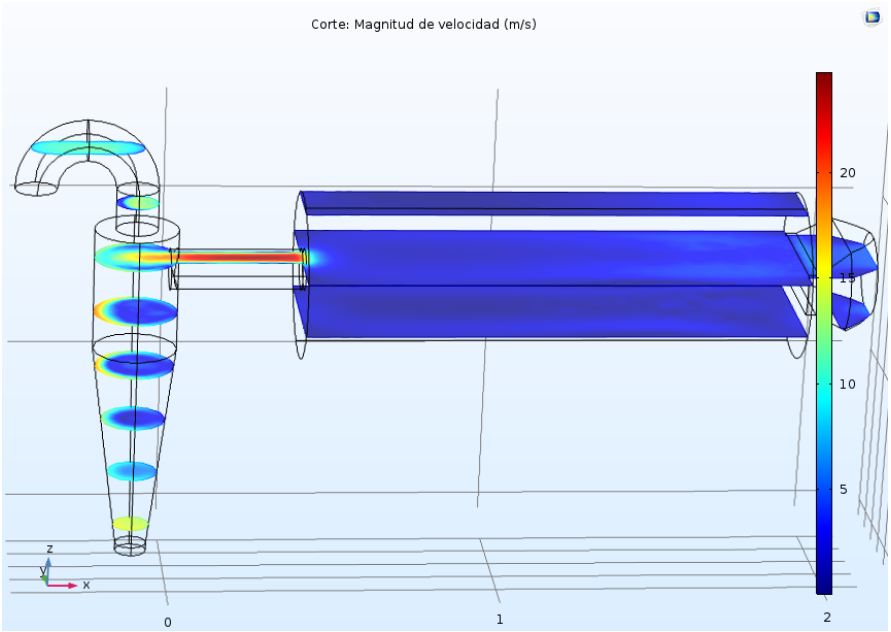


Ilustración 65: Perfil de velocidad del equipo con mejoras flujo turbulento velocidad 4(m/s)

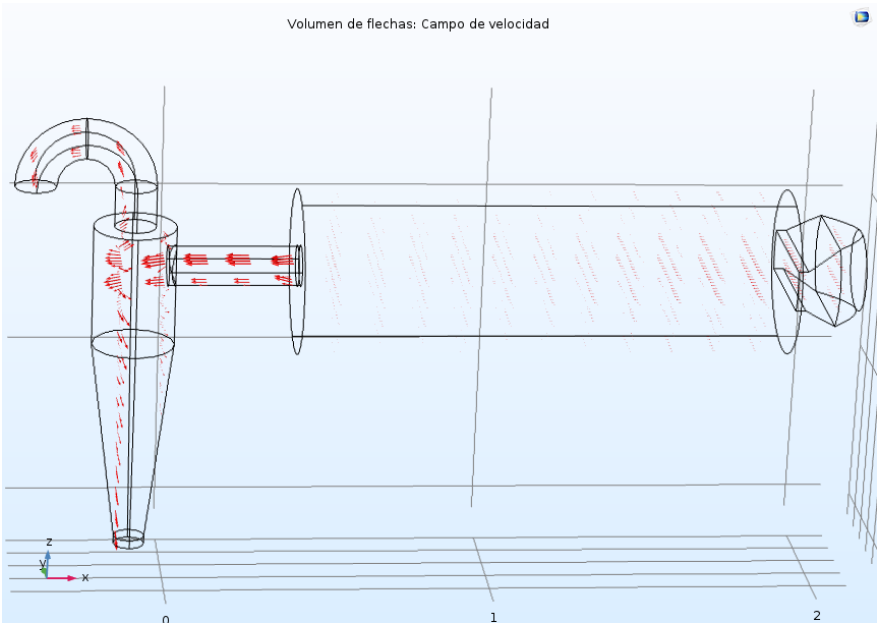


Ilustración 66: Perfil de velocidad por flechas del equipo con mejoras flujo turbulento 4(m/s)

A partir de la Ilustración N°67con las flechas normalizadas se observa una variación al caso anterior donde hay más desviaciones en la dirección de las flechas, lo cual es congruente debido a que aumenta la velocidad y por ende un numero de Reynolds más alto. Aun así, estas leves desviaciones no afectarían mayormente la eficiencia del equipo.

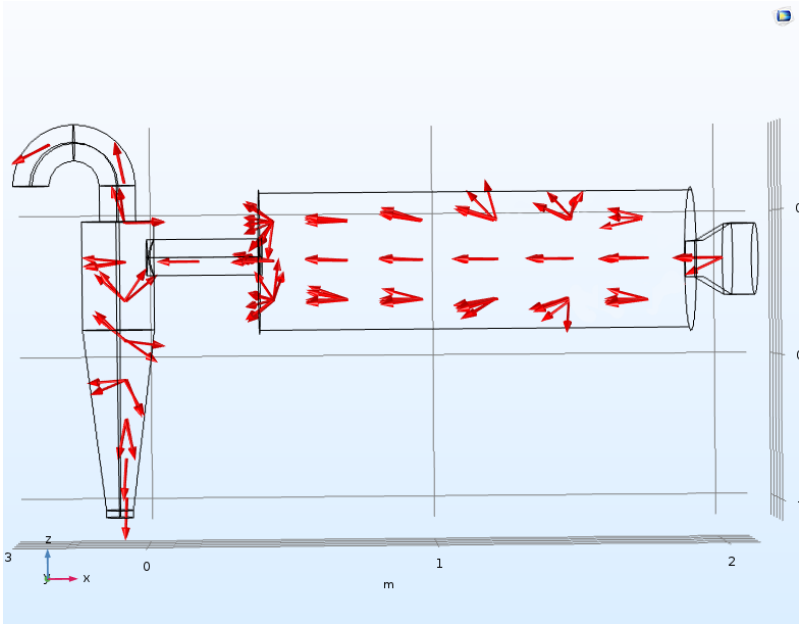


Ilustración 67: Perfil de velocidad por flechas normalizadas del equipo con mejoras flujo turbulento velocidad 4(m/s)

g) Velocidad 6 (m/s)

Al igual que los casos anteriores la velocidad de entrada al equipo es mucho menor a la que ingresa al ciclón. En el diagrama de flechas normalizadas (Ilustración N°70) se observa que las desviaciones del flujo aumentaron considerablemente en comparación a los otros dos casos, hay algunas flechas en sentido contrario al flujo lo que podría generar disminuciones en la eficiencia del equipo, por lo que se recomienda operar el equipo a velocidades cercanas a los 6 (m/s), ya que aumenta mucho el número de Reynolds y por ende la turbulencia del flujo.

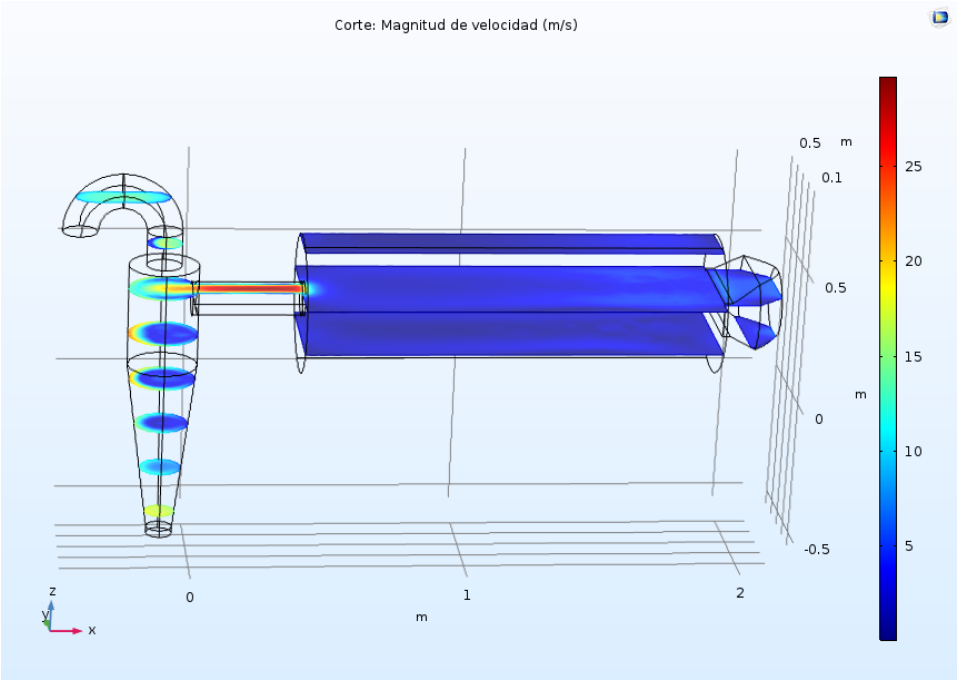


Ilustración 68: Perfil de velocidad del equipo con mejoras flujo turbulento velocidad 6 (m/s)

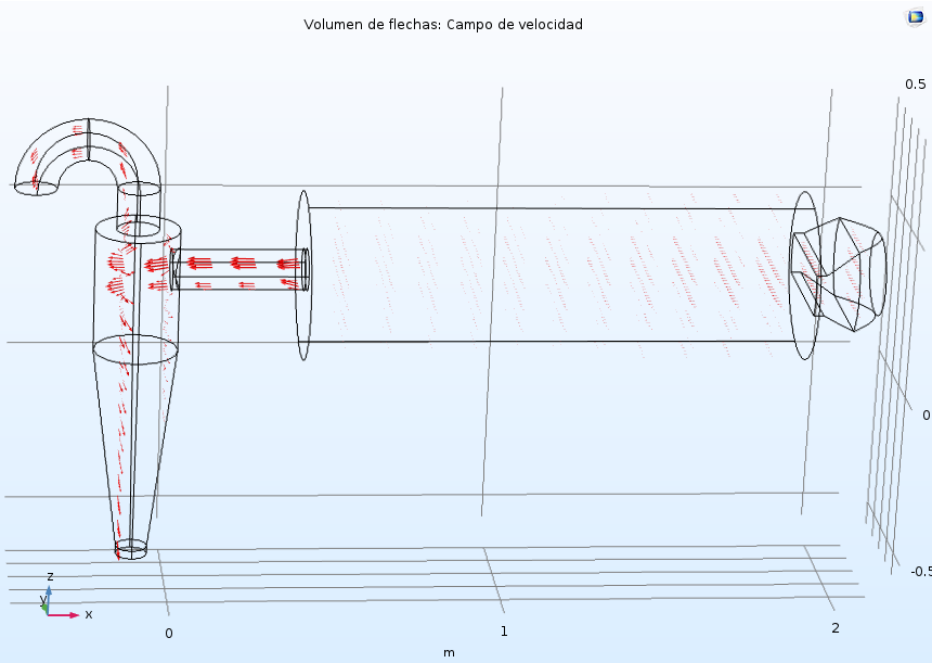


Ilustración 69: Perfil de Velocidad por Flechas del Equipo con Mejoras Flujo Turbulento Velocidad 6(m/s)

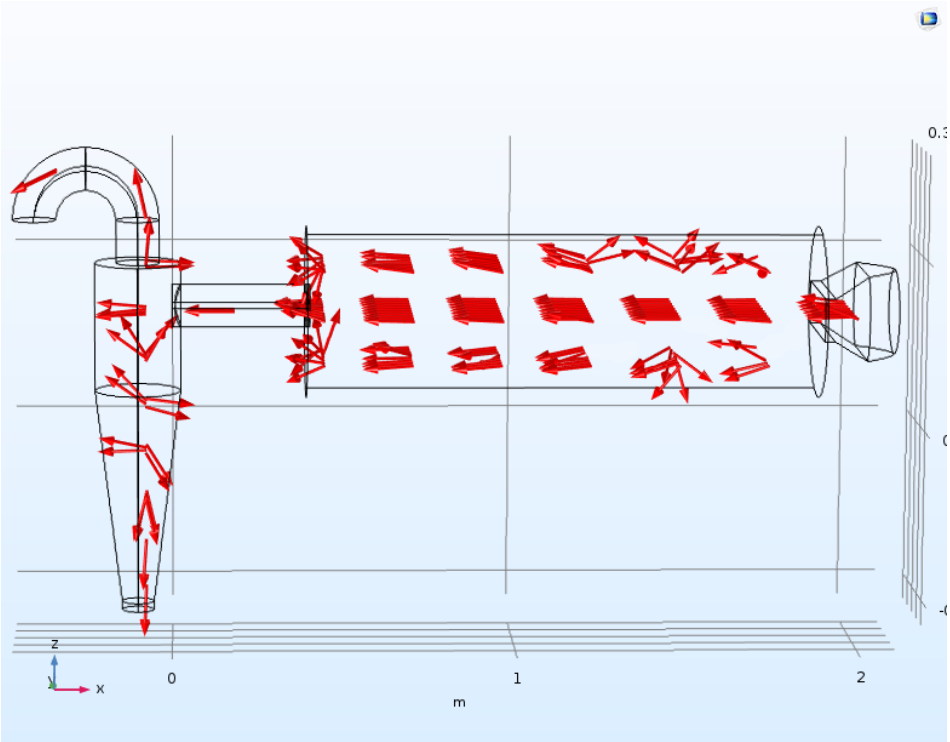


Ilustración 70: Perfil de velocidad por flechas normalizadas del equipo con mejoras flujo turbulento velocidad 6 (m/s)

7. RESULTADOS OBTENIDOS

7.1 Dibujos técnicos en AutoCAD

En el siguiente apartado se adjuntarán los dibujos técnicos para el equipo actual, de las mejoras y del equipo con las mejoras.

Estos dibujos se desarrollaron a partir de los pasos detallados en el ítem 6.2.

7.1.1 Equipo actual

A continuación, se muestran los dibujos técnicos para el equipo actual:

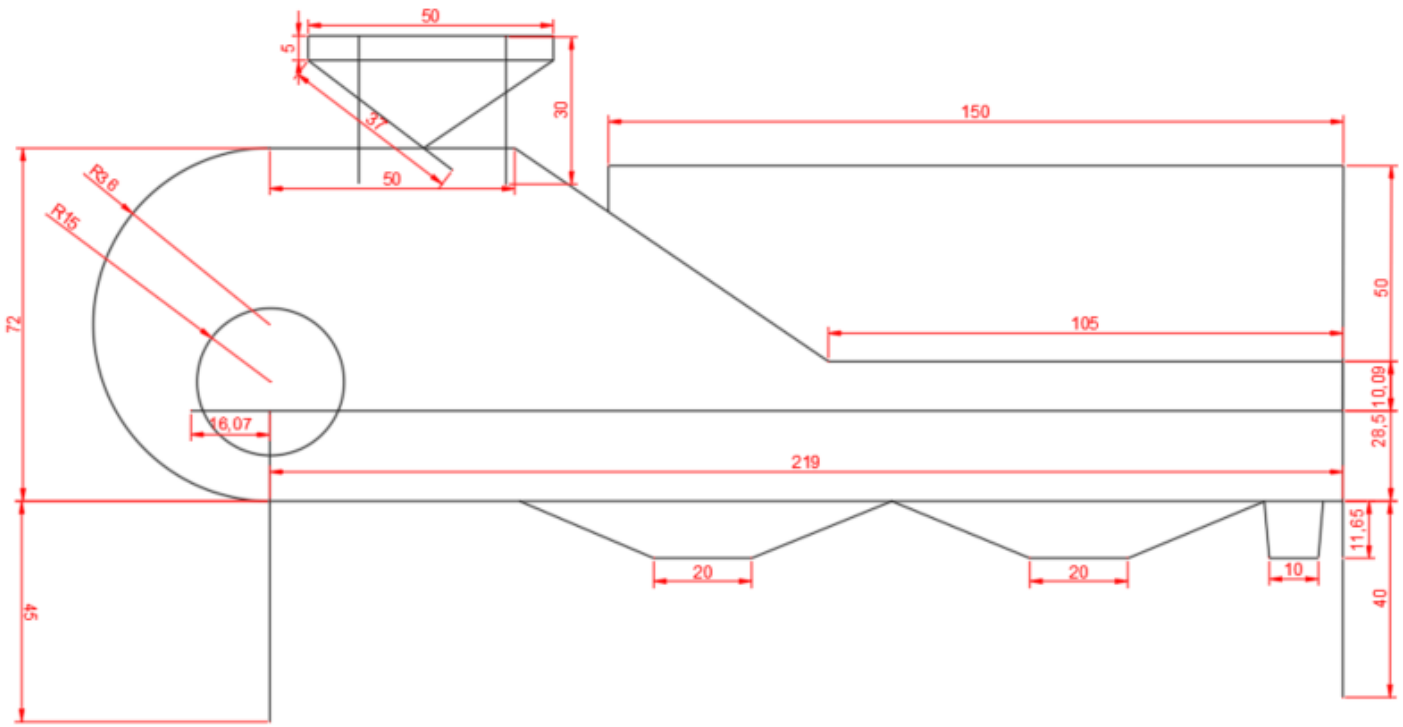


Ilustración 71: Vista lateral equipo de limpieza de polen en centímetros

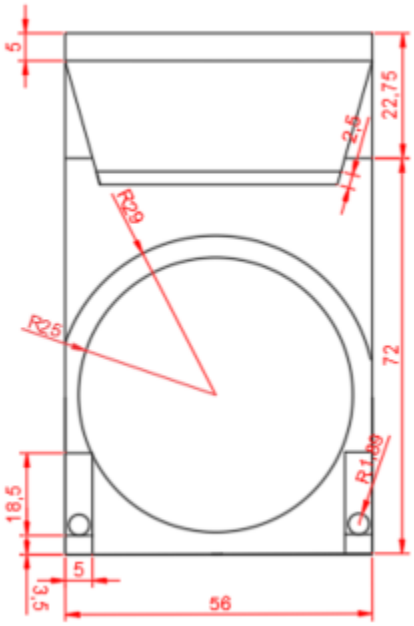


Ilustración 72: Vista frontal del equipo de limpieza de polen en centímetros

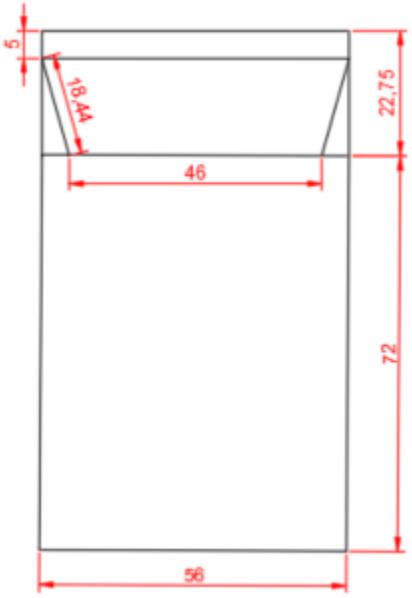


Ilustración 73: Vista Trasera del equipo de limpieza de polen en centímetros

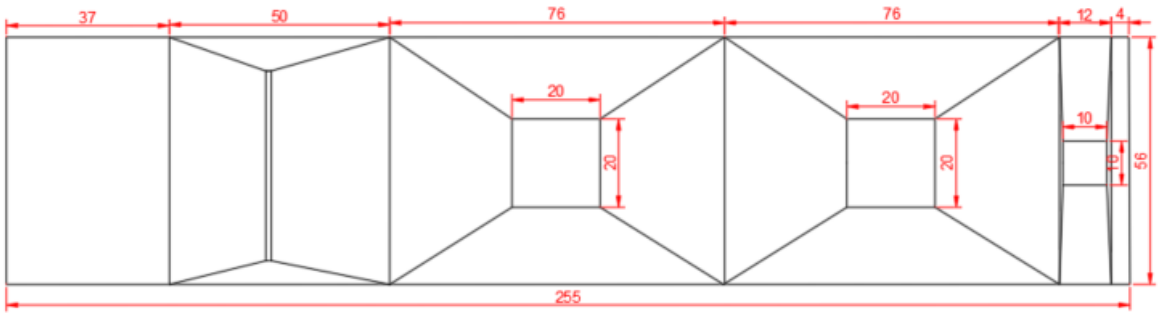


Ilustración 74: Vista superior del equipo de limpieza de polen en centímetros

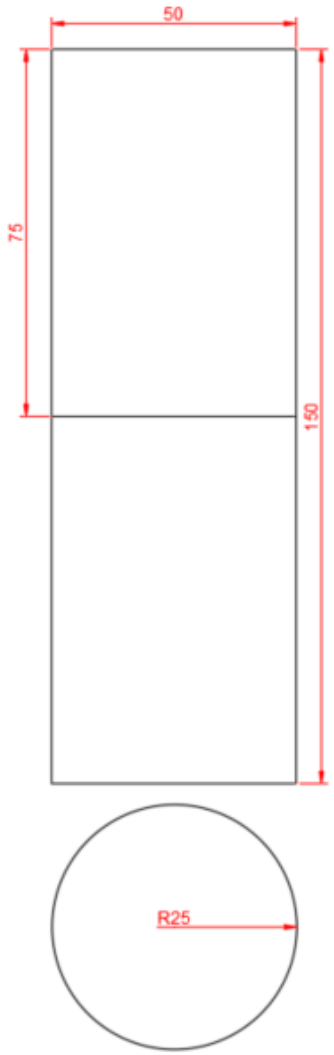


Ilustración 75: Cribas de 3 y 4 mm de mallado en centímetros

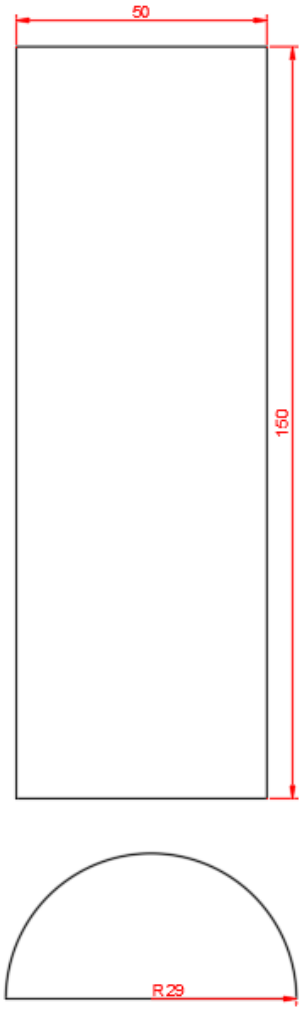


Ilustración 76: Tapa superior del equipo de limpieza de polen en centímetros

7.1.2 Dibujos técnicos de las mejoras

7.1.2.1 Dibujo técnico del cono de contracción

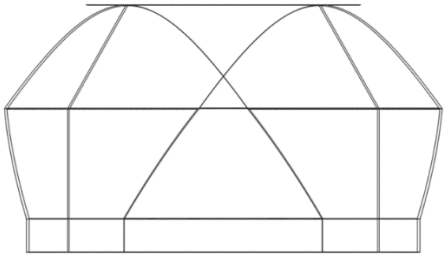


Ilustración 77: Vista isométrica del cono

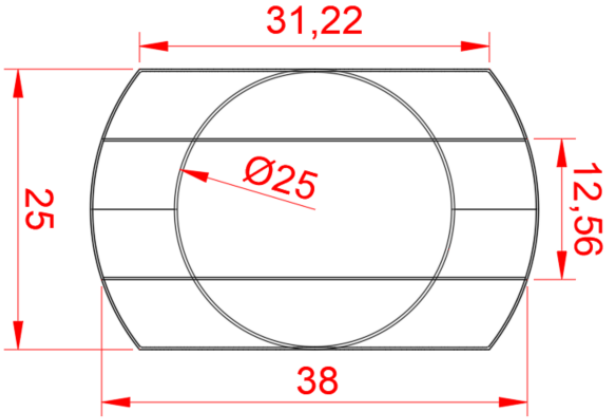


Ilustración 78: Vista superior cono

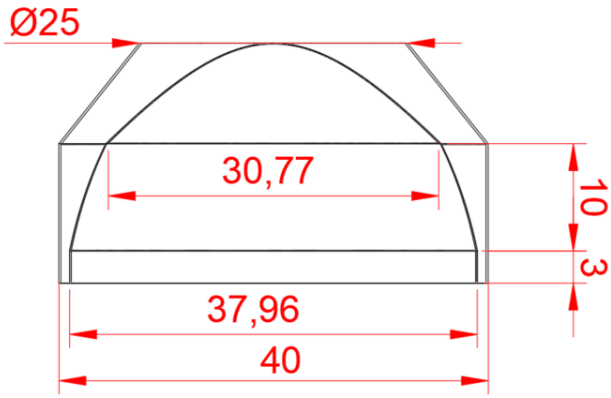


Ilustración 79: Vista frontal cono

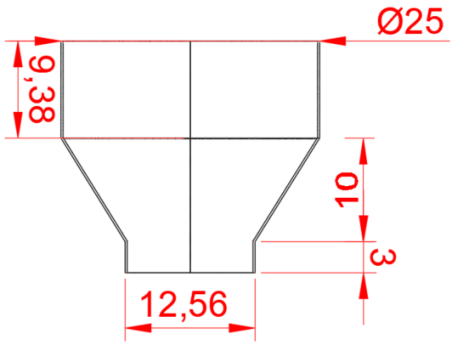


Ilustración 80: Vista lateral cono

7.1.2.2 Dibujo técnico del ciclón

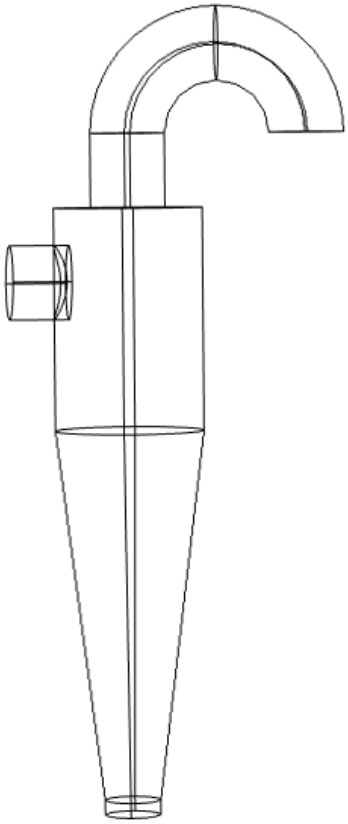


Ilustración 81: Vista isométrica ciclón

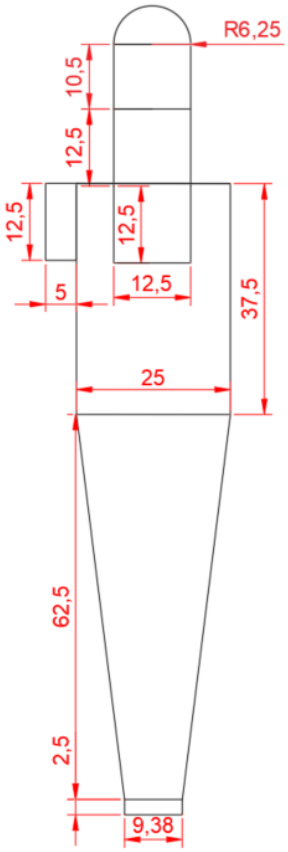


Ilustración 82: vista frontal ciclón

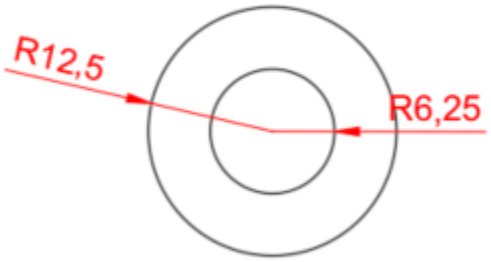


Ilustración 83: vista superior ciclón

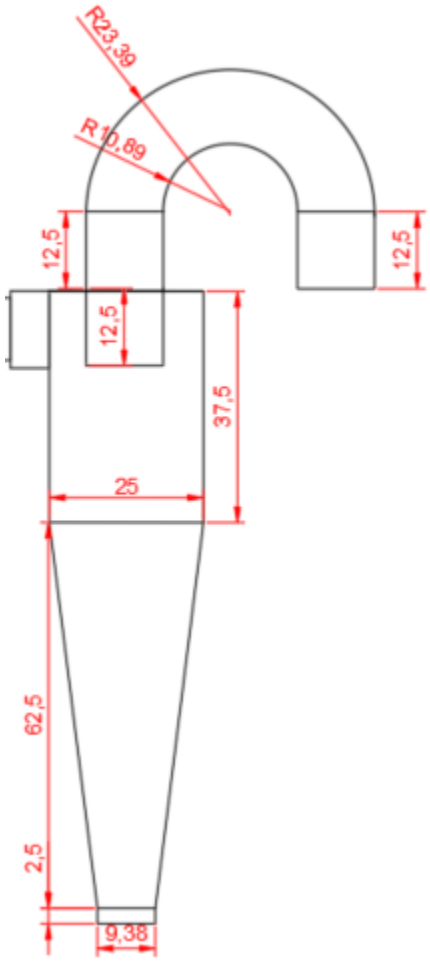


Ilustración 84: vista lateral ciclón

7.1.3 Dibujo técnico del equipo con las mejoras

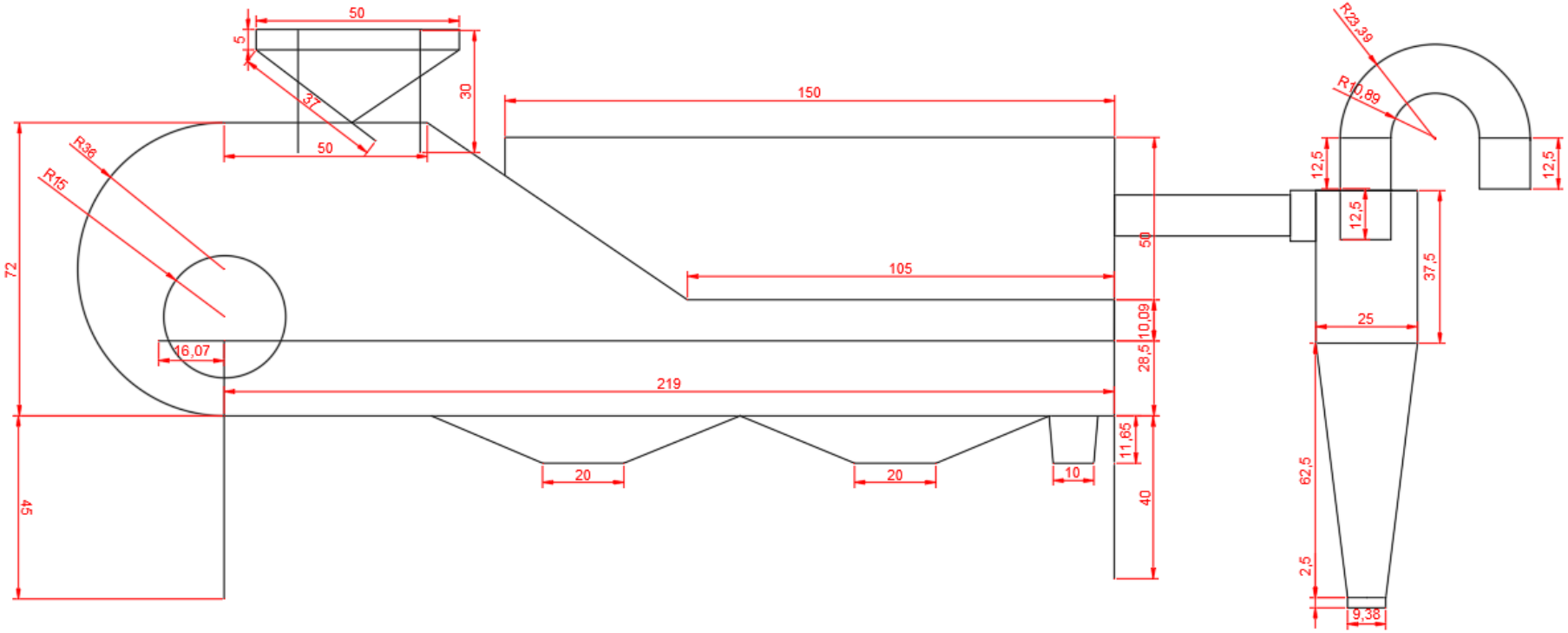


Ilustración 85: Vista lateral equipo de limpieza de polen con mejoras en centímetros

7.2 Parámetros de operación recomendados

7.2.1 Equipo actual

7.2.1.1 Velocidad de giro de la criba

Actualmente el dueño del equipo utiliza una velocidad de 50 RPM que al transformarlo a radianes por segundo corresponden a 5,24 (rad/s) lo que se encuentra bastante cercano a lo calculado mediante las fórmulas que corresponden a 5,62(rad/s) (cálculos en el apartado 6.3.1). Se recomienda mantener la misma velocidad de trabajo.

7.2.1.2 Velocidad del flujo de viento

La velocidad del viento utilizada actualmente oscila entre los 8 y 6 (m/s) obtenida a través de mediciones experimentales con un anemómetro. Estas velocidades permiten que el polen sea impulsado correctamente a través del proceso, se recomienda utilizar velocidades más cercanas a los 6 (m/s) para evitar altas turbulencias según lo obtenido de las simulaciones (simulaciones en el apartado 6.4).

7.2.1.3 Potencia necesaria para el giro de la criba

La potencia necesaria calculada es de 0,105 (kW) (cálculos en el apartado 6.3.1) y es menor a la entregada por el motor utilizado que tiene una potencia nominal de 0,55 (kW), por lo que es óptimo para el equipo o se puede cambiar por un motor menos potente para abaratar costos.

7.2.1.4 Angulo de inclinación

Según la literatura, se recomiendan ángulos menores a 5 ° para partículas con diámetro entre los 0,75 mm a 1 mm y el polen tiene un diámetro promedio de 0,04 mm, por lo que se recomienda no utilizar inclinación o una muy leve, ya que el flujo de viento impulsa las partículas y estas no necesitan caer por gravedad. (Rotich et al. 2015).

7.2.1.5 Eficiencia y Flujo másico

A partir de los experimentos realizados durante la tercera visita, se determinó que el equipo actual tiene una eficiencia de limpieza de un 85% en circunstancias normales. El flujo másico promedio independiente de su nivel de suciedad es de aproximadamente 140-150 (kg/h).

Tabla 19: Resultado de los cálculos de flujo másico y eficiencia del equipo actual

N	Entrada (kg)	Tiempo (S)	Salida (kg)	Residuos (kg)	Flujo (kg/h)	Eficiencia	Características
1	7.4	182	6.27	1.13	146.37	84.73%	Normal
2	7	163	6.29	0.71	154.60	89.86%	Limpio
3	9.86	247	5.91	3.95	143,71	59.94%	Muy sucio

7.2.2 Equipo con mejoras

7.2.2.1 Velocidad de giro de la criba

Según los cálculos realizados para el equipo actual se determinó que las 50 RPM a la que se encuentra operando corresponden a 5,24 (rad/s) lo que correspondería al movimiento cascada deseado. Las mejoras incorporadas no influyen en el giro de la criba por lo que se debe seguir operando a 50 RPM.

7.2.2.2 Velocidad del flujo de viento

A partir de las simulaciones realizadas se determinó que la velocidad óptima para que opere el equipo debería ser cercana a 6 (m/s), ya que a medida que aumenta la velocidad también aumenta la turbulencia dentro del equipo y por ende disminuye la eficiencia, ya que no se remueven de forma óptima los residuos.

Comparando las imágenes obtenidas en cada caso se observa cómo después de los 6 (m/s) comienzan a aparecer desviaciones en el flujo del aire.

7.2.2.3 Potencia necesaria para el giro de la criba

Considerando que en el equipo con mejoras se seguirán limpiando tandas de polen de menos de 10 (kg) la potencia para girar la criba y el polen sería la misma que la del equipo actual. La potencia necesaria para realizar el proceso es de 0,105 (kW) y la potencia nominal que entrega el motor del equipo es de 0,55 (kW) por lo que puede realizar bien el proceso y hasta aguantar más carga en caso de ser necesario.

7.2.2.4 Ángulo de inclinación

El material que ingresa al equipo sigue siendo polen, por lo que las recomendaciones son las mismas que para el equipo actual, mantener la inclinación en 0° o probar ángulos de inclinación menores a 5°.

7.2.2.5 Eficiencia del ciclón

Según los cálculos realizados para una velocidad de entrada del viento de 6 (m/s) al equipo y una velocidad de 20 (m/s) de entrada al ciclón debido a la reducción del área de la tubería que entra al ciclón se obtendría una eficiencia aproximada de un 98%, lo cual es congruente ya que su diseño se basó en un ciclón de alta eficiencia debido al tamaño de las partículas que se considerarían como grandes. (cálculos en el apartado 6.3.2)

7.2.2.6 Eficiencia final del equipo

Considerando que el equipo en condiciones de operación normales tiene un 85% de eficiencia, la cual aumentará solucionando la problemática de la turbulencia del viento con el cono de contracción y al colocar un post tratamiento como lo es el ciclón con un 98% de eficiencia para eliminar los pequeños residuos y recuperar el polen más liviano de manera más eficiente.

7.3 Protocolo de operación

7.3.1 Condiciones de Operación

1) Preprocesamiento:

   Como preprocesamiento se utilizarán harneros manuales que serán empleados por los operadores para eliminar los residuos más grandes que podrían venir en el polen (basura, bichos, partes de abejas, etc.). Para ello será necesario identificar visualmente el nivel de suciedad con el que viene el polen.

2) Procesamiento:

   - Encender el frecuencímetro del motor del equipo en 50 RPM (velocidad óptima del giro de la criba).
   - Encender la turbina de viento en el nivel de 6 (m/s)
   - Ingresar el polen harneado en tandas iguales o menores a 10 kg al equipo limpiador.

3) Post procesamiento:

   Al salir el polen de la criba ingresará al ciclón como post procesamiento, para eliminar los residuos más liviano (polvo, cría, patas o alas de abeja) y recuperar el polen más liviano que podría haber salido como descarte.

4) Envasado:

   Finalmente, el polen limpio será envasado al vacío y se mantendrá en el congelador para mantenerlo fresco y evitar algún tipo de contaminación.

7.3.2 Condiciones de Mantenimiento

Con el fin de garantizar el mejor funcionamiento de la máquina y obtener una vida prolongada, se deberá tener las siguientes precauciones en el uso del equipo y a su vez realizar el mantenimiento adecuado, que en este caso se debe realizar cada vez que se opere el equipo, el cual consiste en

7.3.2.1 Limpieza de la criba

La criba rotatoria es un elemento desmontable dentro del equipo de limpieza, por lo que es recomendable limpiarla diariamente para evitar que los agujeros se tapen de polen o para evitar algún tipo de contaminación.

7.3.2.2 Limpieza manga conductora de impurezas

Se utilizará una manga conductora entre el equipo de limpieza y el ciclón, la cual deberá limpiarse diariamente para evitar acumulación de residuos en ella.

7.3.2.3 Equipo de limpieza de polen

En general el mantenimiento a realizar sería para el motor y la turbina, las cuales sólo necesitarían mantenimiento al presentar algún tipo de falla, las cuales deberían ser las mínimas si se opera según las condiciones de operación.

7.3.2.4 Ciclón

Al ser un equipo de limpieza sin partes móviles tienen muy poco mantenimiento, ya que su funcionamiento radica en la física y no va conectado a la corriente eléctrica, sólo deberá mantenerse su limpieza.

7.3.2.5 Conexión eléctrica

Revisar la conexión eléctrica, los cables deben estar limpios, libres de polvo, sin cables expuestos que puedan causar corto circuito

7.3.2.6 Consecuencias de su uso

Comprobar el ajuste de las tuercas, pernos ya que pueden llegar a aflojarse debido a las vibraciones, de ser necesario realizar un apriete. Lubricar usando grasa las guías de las ruedas que permiten el desplazamiento de la criba.

8. CONCLUSIONES

A partir del estudio realizado en la presente tesis se determina que el equipo limpiador de polen semi industrial construido por Badani y Guevara Ltda realiza actualmente su función con una eficiencia estimada de un 85%, la cual es suficiente, ya que el polen exportado cumpliría con lo requerido por la normativa de exportación y para consumo animal.

A partir de los dibujos técnicos realizados en AutoCAD y las simulaciones obtenidas en COMSOL del equipo con las mejoras se determina que se soluciona la problemática de las altas turbulencias con el nuevo cono de contracción, ya que se observa en las imágenes una disminución en el flujo de viento que se devuelve debido a la turbulencia. Además, se lograría aumentar la eficiencia total del proceso, ya que además se agregaría un post tratamiento a través del separador de partículas ciclónico que constaría de un 98% de eficiencia, permitiendo eliminar los residuos más pequeños y recuperando el polen más liviano, sin la necesidad de reingresarlo nuevamente al proceso.

En el caso del equipo actual o con mejoras, se recomienda operar bajo los parámetros óptimos obtenidos a partir de la literatura estudiada. Estos parámetros serían: velocidad óptima de rotación de la criba es de 5,62 (rad/s), una potencia necesaria para que opere el equipo de 0,105 (kW), un flujo de aire con una velocidad igual o menor a 6 (m/s) y cargas de polen con un flujo másico de 140-150 (kg/h). Además, se recomienda seguir las condiciones de mantenimiento planteadas para garantizar el mejor funcionamiento de la máquina y obtener una vida prolongada.

Cabe añadir, que un 5,8% de los apicultores en Chile se dedican a la obtención de polen, del cual un 30% se comercializa en el país y un 70% es exportado al mundo, reflejando que existe un creciente mercado para este producto, concluyendo que existe mercado en el que se podría comercializar el equipo.

Finalmente, se recomienda seguir con el estudio de las mejoras y realizar los experimentos correspondientes para poder determinar la eficiencia de todo el proceso y determinar si el polen adquiere una limpieza lo suficientemente alta para llegar a ser de consumo humano.

9. REFERENCIAS

[1] Álvarez Velasco, L. Diseño Conceptual de un Cilindro Cribador Para. (Tesis). Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Buenavista, Saltillo, 2013.

[2] Arslan, Saral. Cyclone Separators. Estambul, Turquía, 2017. 22 p.

[3] Barbosa-Cánovas, G. V., Ortega-Rivas, E., Juliano, P., Yan, H., Food Powders. Physical Properties, Processing, and Functionality, Kluwer Academic/Plenum Publishers, New York, 2005.

[4] Casal, J. & Martínez-Benet, J. Cálculo y diseño de ciclones. En: Ingeniería Química. Madrid, 1989.

[5] COMSOL, Inc. Introduction to COMSOL Multiphysics. Estados Unidos, 2012.

[6] Corbitt, R. Standars handbook of environmental engineering. Mc Graw-Hill. New York, 1990.

[7] COTECNO. cotecno.cl. Obtenido de https://www.cotecno.cl/que-es-untamizador-por-que-usar-uno/

[8] De la Cuadra Sergio, Rodríguez Pamela. Manual de Polinización de Cultivos Agrícolas, Chile, 2019.

[9] ESSS, «dinámica de fluidos computacional: ¿qué es?,» Kessler, M. https://www.esss.co/blog/es/dinamica-de-fluidos-computacional-que-es/

[10] Facultad de Ciencias Agronómicas Universidad de Chile, Informe Final Estudio Estratégico de la Cadena Apícola de Chile. Santiago de Chile, 2015

[11] Fida, Inca. Manual de buenas prácticas para la apicultura, Santiago de Chile, 2002.

[12] Henderson, S.M. and Perry, R.L. Agricultural Process Engineering. AVI Publishing Co. West Port Connecticut. 1976.

[13] J. Pérez Porto y A. Gardey, «Definiciones.de,» 2. ttps://definicion.de/tamizado/

[14] Ladner, T.J. Archer, R.R. Mecánica de Sólidos, Mc Graw Hill, México, 1996

[15] Linnett.B, Seed Cleaning and Processing. Australia, 1999.

[16] Mamta Thakur∗, Vikas Nanda, Composition and functionality of bee pollen: A review, 2020.

[17] Marín, A. León, A. Curso Básico de Dibujo con AutoCAD, Barcelona España, 2017.

[18] Marks, Manual del Ingeniero Mecánico, Mc Graw Hill, Colombia, 9ª edición, 1995

[19] Menegozzo, L., Dal Monte, A., Benini, E., & Benato, A. Small wind turbines: A numerical study for aerodynamic performance assessment under gust conditions. 2018.

[20] Montenegro Gloria. Manual Apícola, Documento entregado a INDAP, Chile 2016.

[21] Muniategui Soledad, Sancho Mª Teresa, [et al.] Composición del polen apícola. revista de apicultura. 1993.

[22] N. rotich, R. t.-k.Estudio empírico sobre los efectos de la inclinación de la pantalla y la carga de alimentación en la clasificación del tamaño de los sólidos por gravedad. (Vol. Volumen 70). Lappeenranta, Finlandia,2015.

[22] Perry, R. & Chilton, C. Manual del Ingeniero Químico. vol. 5, McGraw-Hill. México, D. F. 1986.

[23] Pryor, Roger W. Multiphysics Modeling Using COMSOL, A First Principles Approach. JONES AND BARTLETT PUBLISHERS, Massachusetts, 2011

[24] Quintero Arteaga, L. D., & Ricardo Geney, A. F. Diseño Y Construcción De Una Máquina Tamizadora De Arenas Con Tamices Intercambiables(proyecto de pregrado). Universidad De Córdoba, monteria, 2016.

[25] Rocha, P. A. C., Rocha, H. H. B., Carneiro, F. O. M., da Silva, M. E. V., & de Andrade, C. F. A case study on the calibration of the k-ω SST (shear stress transport) turbulence model for small scale wind turbines designed with cambered and symmetrical airfoils,2016.

[26] Rocha, P. A. C., Rocha, H. H. B., Carneiro, F. O. M., Vieira da Silva, M. E., & Bueno, A. V. K-ω SST (shear stress transport) turbulence model calibration: A case study on a small scale horizontal axis wind turbine,2014.

[27] Roberto Martínez. Construcción y caracterización de túnel de viento a bajas velocidades. Departamento Física, Universidad Nacional de Colombia. 2011

[28] Shigley, Joseph Edward; Mischke, Charles R. Elementos de maquinaria: Mecanismos, Vol. 1. Mcgraw-Hill, S.A. México, 1995.

[29] Singh, R. K., Ahmed, M. R., Zullah, M. A., & Lee, Y.-H. Design of a low Reynolds number airfoil for small horizontal axis wind turbines,2012.

[30] Taylor & Francis, Effect of Cyclone Dimensions on Gas Flow Pattern and Collection Efficiency, 2007.

[31] Tona. Diseño Asistido por Computadora. Autodesk Inventor, 2009.

[32] Torres, Ricardo; Grau, Joan. Introducción a la mecánica de fluidos y transferencia de calor con COMSOL Multiphysics. Sofware científico, 2007.

[33] Velsilind, A. Rimer, A. Unit operations in resource recovery engineering. Prentice-Hall, EUA, 1981

[34] W.H. Cheung. S.T. Lau. Removal of batteries from solid waste using trommel separation. Estados Unidos, 2005.

[35] W. Frei, «Which Turbulence Model Should I Choose for My CFD Application?,» COMSOL Multiphysics, https://www.COMSOL.com/blogs/whichturbulence-model-should-choose-cfd-application/.

10. ANEXOS

A1. ÁREAS Y DIMENSIONES DE ALGUNAS FIGURAS.

Superficies — B 3

Círculo

b 30 $A = \frac{\pi}{4} d^2 = \pi r^2$

b 31 $\cong 0.785\, d^2$

b 32 $P = 2\pi r = \pi d$

Corona circular

b 33 $A = \frac{\pi}{4}(D^2 - d^2)$

b 34 $= \pi (d + b)\, b$

b 35 $b = \frac{D - d}{2}$

Sector circular

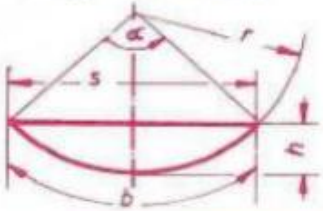
b 36 $A = \frac{\pi}{360} r^2 \alpha = \frac{\hat{\alpha}}{2} r^2$

b 37 $= \frac{br}{2}$

b 38 $b = \frac{\pi}{180} r \alpha$

b 39 $\hat{\alpha} = \frac{\pi}{180} \alpha$ ($\hat{\alpha} = \alpha$ en radianes)

Segmento circular



b 40 $s = 2r \operatorname{sen} \frac{\alpha}{2}$

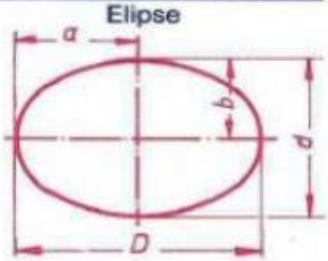
b 41 $A = \frac{h}{6s}(3h^2 + 4s^2) = \frac{r^2}{2}(\hat{\alpha} - \operatorname{sen} \alpha)$

b 42 $r = \frac{h}{2} + \frac{s^2}{8h}$

b 43 $h = r(1 - \cos \frac{\alpha}{2}) = \frac{s}{2} \tan \frac{\alpha}{4}$

b 44 $\hat{\alpha}$: Ver fórmula b 39.

Elipse



b 45 $A = \frac{\pi}{4} D\, d = \pi a b$

b 46 $P \cong \pi \frac{D + d}{2}$

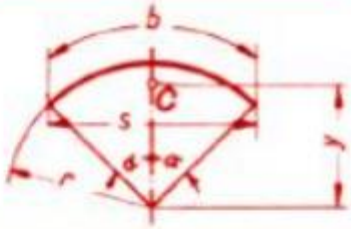
b 47 $= \pi (a + b) [1 + \frac{1}{4}\lambda^2 + \frac{1}{64}\lambda^4 + \frac{1}{256}\lambda^6 + \frac{25}{16\,384}\lambda^8 + \ldots]$, donde $\lambda = \frac{a - b}{a + b}$

A2. CENTROIDES DE ALGUNAS FIGURAS

Arco de circunferencia

$$y = \frac{r\,(\operatorname{sen}\alpha)\,(180^\circ)}{\pi\,(\alpha^\circ)} = \frac{r\,s}{b}$$

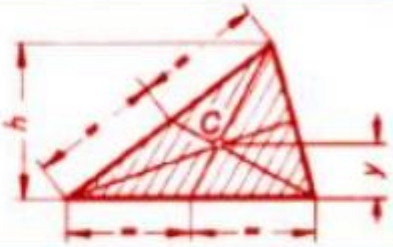
$y = 0.6366\,r$ si $2\alpha = 180^\circ$
$y = 0.9003\,r$ si $2\alpha = 90^\circ$
$y = 0.9549\,r$ si $2\alpha = 60^\circ$



Triángulo

$$y = \frac{1}{3}\,h$$

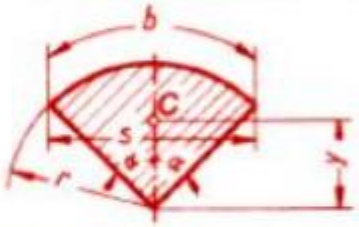
C está en el punto de intersección de las medianas.



Sector de círculo

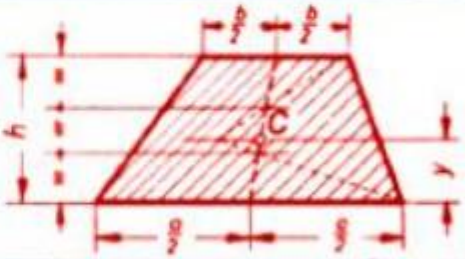
$$y = \frac{2r\,(\operatorname{sen}\alpha)\,(180^\circ)}{3\,\pi\,(\alpha^\circ)} = \frac{2r\,s}{3b}$$

$y = 0.4244\,r$ si $2\alpha = 180^\circ$
$y = 0.6002\,r$ si $2\alpha = 90^\circ$
$y = 0.6366\,r$ si $2\alpha = 60^\circ$



Trapecio

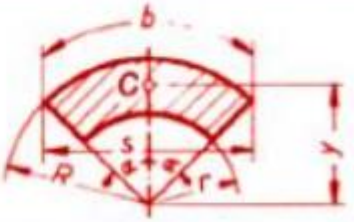
$$y = \frac{h}{3}\cdot\frac{a+2b}{a+b}$$



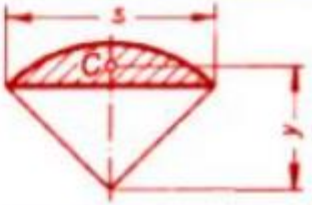
Segmento de corona circular

$$y = \frac{2}{3}\cdot\frac{R^3 - r^3}{R^2 - r^2}\cdot\frac{\operatorname{sen}\alpha}{\alpha}$$

$$y = \frac{2}{3}\cdot\frac{R^3 - r^3}{R^2 - r^2}\cdot\frac{s}{b}$$



Segmento de círculo

$$y = \frac{s^3}{12\,A}$$

Para el área A véase B 3.