



Propuesta de diseño de un sistema de filtración para polvos de madera

Heyder Felipe Sosa Múnera

Informe de práctica para optar al título de Ingeniero Mecánico

Asesor

Silvio Andrés Salazar Martínez, Magíster (MSc) en Ingeniería

Asesor externo de la empresa Ventilación y Control Ambiental

Jorge Mario Hernández Torreglosa, Especialista (Esp) en ventilación y aire acondicionado

Universidad de Antioquia

Facultad de Ingeniería

Ingeniería Mecánica

Medellín, Antioquia, Colombia

2022

Cita	Sosa Múnera [1]
Referencia	[1] H. F. Sosa Múnera, “Propuesta de diseño de un sistema de filtración para polvos de madera, 2022”, Trabajo de grado profesional, Ingeniería Mecánica, Universidad de Antioquia, Medellín, Antioquia, Colombia, 2022.
Estilo IEEE (2020)	



Centro de Documentación Ingeniería (CENDOI)

Repositorio Institucional: <http://bibliotecadigital.udea.edu.co>

Universidad de Antioquia - www.udea.edu.co

Rector: John Jairo Arboleda Céspedes.

Decano/Director: Jesús Francisco Vargas Bonilla.

Jefe departamento: Pedro León Simanca.

El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Antioquia ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por los derechos de autor y conexos.

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN	7
I. INTRODUCCIÓN	8
II. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	9
III. JUSTIFICACIÓN.....	10
IV. OBJETIVOS	11
V. MARCO TEÓRICO	12
Normativa técnica	12
Sistema de ventilación.....	12
Propiedades características de la biomasa en el transporte	14
Transporte neumático.....	14
Transporte por tornillo sinfín	15
Caracterización física de la biomasa	16
Ángulo de reposo	16
Relación de Hausner	17
VI. METODOLOGÍA	18
Primera etapa.....	18
Segunda etapa.....	18
Diseño del filtro de mangas	18
Variables del filtro de mangas.....	19
Tercera etapa	25
Diseño del tornillo transportador	25
Cuarta etapa.....	40
Selección de la válvula rotativa	40
VII. CONCLUSIONES	46

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. clasificación de fluidez [5]	16
Tabla 2. Cálculo del filtro de mangas	23
Tabla 3. Cálculo paramétrico de la válvula.....	42

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Ángulo de reposo [4]	16
Figura 2. Esquema de filtro de mangas [7]	19
Figura 3. Dimensionamiento general del filtro	24
Figura 4. Posición del filtro.....	25
Figura 5. Capacidad de llenado del tornillo [9].....	27
Figura 6. Factores para tornillos no convencionales [9]	29
Figura 7. Material para los cojinetes de suspensión [9]	30
Figura 8. Tabla de calibres para la hélice y el canal [9].....	31
Figura 9. Eficiencia por tipo de transmisión [9].....	32
Figura 10. Composición del bronce [10].....	33
Figura 11. Factor por tipo de rodamiento [9]	33
Figura 12. Factor por diámetro del tornillo [9]	34
Figura 13. Factor por tipo de hélice [9].....	34
Figura 14. Factor si existen paletas [9]	34
Figura 15. Factor F por potencia [9]	35
Figura 16. Propiedades de la tubería [9]	37
Figura 17. Resistencia del eje [9]	38
Figura 18. Selección motorreductor 54 RPM [11].....	39
Figura 19. Selección de chumacera.....	39
Figura 20. Esquema general del tornillo	40
Figura 21. Esquema representativo de válvula [7].....	41
Figura 22. Válvula parametrizada	43
Figura 23. Selección motorreductor 36 RPM [11].....	44
Figura 24. Selección de rodamientos	44
Figura 25. Esquema general de la válvula rotativa	45

RESUMEN

El presente informe de prácticas da a conocer la propuesta de diseño de un equipo de filtración para la retención de partículas de polvo de madera, en la cual, se contemplan los cálculos realizados para retención y captación de 2040 kg/h de material particulado que se produce a raíz del pulido de la madera. El objeto de este diseño es aprovechar la captación de polvo de madera para usarlo posteriormente como combustible, evitando además la deposición de material particulado a la atmósfera cumpliendo con la normativa colombiana que actualmente se encuentra vigente. Con esta propuesta de diseño se busca que la línea de polvos y acabados trabaje de forma permanente y no exista la necesidad de apagar el sistema de ventilación para extraer el polvo que se ha filtrado, obteniendo así, un ahorro en costos y tiempo ya que sólo se apagaría la línea en el caso de que haya una parada general para realizar mantenimiento en tiempos más extendidos.

Palabras clave — **Retención de partículas, filtro de magas, válvula rotativa, tornillo transportador, polvo de madera.**

I. INTRODUCCIÓN

VENTILACIÓN Y CONTROL AMBIENTAL S.A.S (VECAM) es una empresa dedicada a la consultoría, diagnóstico, diseño, fabricación y montaje de soluciones integrales de higiene ocupacional, con énfasis en control de ruido, ventilación general y exhaustiva, Iluminación, climatización, commissioning HVAC, auditorías energéticas y equipos para movimiento, climatización y limpieza de aire.

VECAM tiene amplia experiencia en el área de ventilación industrial, cuenta con un equipo de ingeniería que se encarga de desarrollar los proyectos para los diferentes clientes que buscan a la empresa para el desarrollo de sistemas de ventilación en sus instalaciones. El propósito de la ventilación es reducir la exposición de las personas a los contaminantes producidos en procesos industriales, incluyendo gases, vapores o polvos inflamables y/o explosivos. Consiste en la extracción constante de aire en un área específica, con el propósito reducir la concentración de los contaminantes en el área circundante a la fuente de emisión de contaminantes.

En gran parte de las industrias que transforman materia prima para procesarla en productos comerciales se producen residuos contaminantes, estos productos contaminantes que resultan de los procesos deben ser tratados para que no sean expulsados al ambiente o, peor aún, que causen afectaciones a los propios empleados de la compañía.

Los tipos de contaminantes que se pueden producir son gases, neblinas, polvos, virutas y demás, entonces, cada tipo de contaminante requiere de diferentes métodos para la captación y su posterior deposición. En este caso, se hace un análisis para el tratamiento de polvos de biomasa producto del corte y pulido de diferentes tipos de madera para la producción de aglomerados.

Los polvos de madera tienen la particularidad de tener bajas densidades, es decir, son considerados como material particulado, por este motivo, fluidizan fácilmente ante la acción de corrientes de aire, esto es malo, debido a que se producen nubes de polvos dentro de la compañía que afecta directamente a quienes allí laboran pudiendo causar afectaciones respiratorias, visuales, etc. Fuera de lo antes descrito, existe otro riesgo con los polvos de madera, gracias a que su composición lignocelulósica tiene gran porcentaje de elementos volátiles y ante la interacción con chispas, se puede generar explosión o incendios con polvos de biomasa como combustible.

II. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Actualmente en la compañía clienta que se dedica a producir aglomerados de madera, se encuentra instalado un sistema de retención de partículas con dos filtros de mangas, los cuales retienen material de madera en harina y lo almacena en el fondo del filtro. Para extraer el material retenido es necesario apagar el sistema de ventilación ya que se debe hacer la apertura de una compuerta en el filtro que está a nivel de piso. La forma de estos filtros es cilíndrica y no existe la posibilidad de instalar un sistema de extracción del material capturado para llevar a un sistema neumático que lo transporte hacia la caldera. Por tal motivo, existe la necesidad de complementar estos filtros por uno nuevo que tenga la función de atrapar la mayor cantidad de material particulado y almacenarlo en una tolva para su posterior extracción con un tornillo sinfín, válvula rotativa y sistema diverter como elementos que mitiguen la despresurización y desbalanceo de todo el sistema.

El sistema de filtración de mangas con tolva incluida en la cámara sucia del filtro debe ser capaz de retener y almacenar momentáneamente todo el polvo que viene de la línea de producción, y con la instalación de un tornillo sinfín en la descarga de la tolva en forma de cuña se asegura un elemento que obligue al material a ser llevado hacia la descarga, luego, se instala el elemento que es capaz de extraer material de la descarga del tornillo sin permitir que el filtro se despresurice y es la válvula rotativa, la cual, tiene la función de dosificar material de extracción sin permitir que ingrese aire ya que tiene unas cámaras que aíslan la presión interna del filtro que está presurizado negativamente con la presión atmosférica del exterior. Si no existiera la válvula rotativa, todo el aire del exterior ingresa al filtro y desbalancea todo el sistema ya que el aire de succión se tomaría por este punto y no por todo el sistema de captación que se ubica en las fuentes de emisión de polvos.

III. JUSTIFICACIÓN

La instalación de filtro de mangas con tolva tiene las siguientes ventajas:

- Se asegura la correcta retención del polvo de madera para su posterior uso como combustible.
- No es necesario de realizar parada en la planta del sistema de ventilación para extraer el polvo captado.
- La conexión directa a un sistema neumático que transporte el polvo a la caldera ayuda al no almacenamiento de material en sacos bigbag. Los sacos bigbag necesitan ser transportados en montacargas motorizados o manuales para llevarlos hacia la caldera o peor aún, almacenarlos en pilas y tener el riesgo de dispersión de polvos en el aire y producir quizás una explosión por polvos de biomasa.
- El filtro tiene láminas anti explosión, que consiste en una fina lámina metálica situada en la carcasa del filtro, este panel funciona como “fusible” y se rompe ante la sobrepresión originada en caso de explosión interna.

IV. OBJETIVOS

A. Objetivo general

Realizar el diseño de un equipo de filtración de limpieza de aire para una compañía de aglomerados.

B. Objetivos específicos

- Determinar el medio filtrante del filtro de mangas.
- Diseñar el equipo de limpieza de aire (filtro de mangas).
- Diseñar el sistema de cargue del transporte neumático-BIGBAG (tornillo sin fin-válvula rotativa).

V. MARCO TEÓRICO

Normativa técnica

La norma que actualmente está vigente en Colombia para el control de emisiones de fuentes fijas es la norma 909 de 2008 [1]. En esta se especifican los estándares de emisión admisibles de contaminantes para fuentes fijas y es el documento al cual se deben regir todas las compañías, contando a locales comerciales y demás. Esta norma tiene como objeto regular a todo establecimiento que pueda tener algún tipo de emisión de contaminantes a la atmósfera.

En el caso de una compañía que produce materiales aglomerados que fue fundada antes del 2008 aplican los criterios de control para emisiones de residuos de biomasa, en este se debe cumplir lo siguiente:

- Para una compañía fundada antes del 2008, que tenga una producción de contaminante (material particulado) mayor a 0.5 Kg/h, se debe tener un máximo de emisiones de material particulado (MP) de 150 mg/m^3 .
- En el caso que existan máquinas de combustión externas (calderas) se debe cumplir con el control de emisión admisibles establecidos en el artículo 7 de la resolución para combustibles sólidos y si el combustible es biomasa, se debe cumplir con el artículo 18.

Fuera de lo antes mencionado, se debe hacer la correcta determinación del punto de descarga de las chimeneas, se debe hacer plataformas y aberturas para los puntos de muestreos que se requieren por norma para hacer la verificación y toma de muestras cuando la autoridad lo exija.

Sistema de ventilación

Los procesos que generan polvos de madera necesitan tener sistemas de extracción localizada para que dichos sistemas capturen los contaminantes y, no permitan que los contaminantes queden esparcidos en la atmósfera circundante. En la compañía de producción de aglomerados se tiene instalada toda una línea para la captación de polvos provenientes de cada una de las áreas en donde se ve involucrado el corte y pulido de la madera y sus derivados. Esta línea consiste en los siguientes elementos:

Campanas, venteos y cabinas: Estos elementos se sitúan en la fuente de contaminación de polvos, con el objetivo de succionar el aire circundante que contiene polvo y poder ingresarlo al sistema de ventilación que se encarga de extraer dichos materiales.

Ductos y accesorios: Los ductos y accesorios son aquellos sistemas que se instalan a través de la planta para comunicar por medio de ramales las diferentes áreas en los procesos de captación de los diferentes emisores de contaminantes con el propósito de llevarlos a un sistema de captación por filtración.

Ciclón: Es el primer elemento que se instala para retener partículas “pesadas”, estas partículas ingresan al ciclón de manera tangencial para tener un movimiento dentro del ciclón de manera de torbellino, esto es, con el objetivo de que la corriente de aire con contaminante de madera describa una trayectoria helicoidal y pierda energía para que las partículas más grandes desciendan hacia el fondo del ciclón y se queden allí retenidas. Luego, las partículas son extraídas del ciclón y, este es el primer método de captación para material de madera, luego, existe otro ducto de salida del ciclón para la salida de aire con partículas más finas polvo de madera que no son lo suficientemente pesadas para quedar retenidas en el ciclón. El ducto de salida se conecta con el siguiente elemento de retención de partículas más finas que a continuación se describe.

Filtro de mangas o talegas: Es un sistema presurizado que se encarga de retener las partículas más finas de polvo, a través de un medio de retención conocido como mangas. Los filtros de mangas funcionan de la siguiente manera: La corriente de aire contaminado ingresa al filtro y en este se encuentran dispuestos múltiples mangas, cuya cantidad depende de la razón de flujo que ingresa al filtro contra el material de fabricación de las mangas, conocida como relación aire-tela. La corriente de aire es forzada a pasar por las mangas en las cuales se quedan impregnadas las partículas más finas del aire contaminado. Luego de la retención de las partículas, el aire sale limpio hacia el ventilador del sistema de extracción y posteriormente hacia el ambiente por una chimenea de descarga.

Ventilador: El ventilador es el elemento que produce la energía necesaria para generar una corriente de succión que se ve reflejada en cada una de las campanas de succión y debe ser capaz de captar material en todas las líneas, luego, debe hacer pasar la corriente de aire por los dos elementos de retención de partículas (ciclón y filtro) y finalmente expulsar aire a la atmósfera con algunos polvos de madera. Si el sistema de ductos, campanas y filtros se calcula de manera

inadecuada, el ventilador, es incapaz de generar la suficiente energía para vencer las caídas de presión en el sistema y llegar a cada uno de los puntos de emisión del contaminante.

Propiedades características de la biomasa en el transporte

Es importante hacer la revisión de los sistemas o caracterizaciones experimentales que se han realizado para el transporte de biomasa, esto es, con el fin de tener conocimiento acerca del comportamiento del polvo de madera en el momento que sea transportado por tornillo sinfín y por transporte neumático. La biomasa tiene varios aspectos que son fundamentales para la fluidez en cualquier sistema de transporte, los cuales son, la humedad del material, tamaño de partícula, la forma geométrica que puede determinar las características de cohesión y fricción propia entre la interacción de partícula-partícula y partícula-pared del transportador. A continuación, se hace un breve recuento de la información recolectada por diferentes autores que estudian los efectos de fluidez de la biomasa.

Transporte neumático

El transporte neumático de polvos es utilizado con gran frecuencia en la industria, algunos ejemplos de materiales transportados es la harina, leche en polvo y sólidos a granel de bajas densidades. Se debe tener presente que el transporte de cualquier material a través de la neumática requiere de más gasto energético debido a que se necesitan altas velocidades y gran cantidad de aire con respecto al material a transportar. Para el caso de polvos de biomasa se denomina transporte de material en fase dispersa (fase diluida), debido a que el polvo entra en la línea neumática y queda en suspensión por el efecto del gas, en este caso se tiene buena fluidez en cuanto al transporte del material por toda la red neumática.

Para evitar el aglomeramiento entre partículas de biomasa que puede ocurrir dentro de una línea neumática, se hizo una propuesta por parte de [2] para un sistema de transporte neumático de doble contenedor, el cual, se almacenaba en el primer contenedor material de biomasa de tamaños entre 200-1200 μm para que ingresara gas perturbador al contenedor de tal forma que hacía dispersión de las partículas y evitaba la agregación entre partículas, luego, en el segundo contenedor pasa una corriente de gas de transporte para transportar el material que fue perturbado

con anterioridad en el primer recipiente. Con el análisis hecho por [2] se asegura la correcta dispersión de las partículas generando una presión expansiva para que exista buena fluidez de la biomasa ante la acción de un gas (aire) de transporte.

Transporte por tornillo sinfín

Son equipos que se utilizan con gran frecuencia en la industria para el transporte de una amplia variedad de materiales que ya se encuentran caracterizados, para el caso del transporte de biomasa es de igual importancia conocer las propiedades físicas del material, tamaño, forma de partículas y proporción de humedad. El transporte de biomasa por medio de tornillo sinfín puede ser complejo cuando el material no está lo suficientemente seco, debido a que ocurre un apelmazamiento entre las partículas de polvo la cual conlleva a tener baja fluidez y altos consumos de energía ya que se requiere de más torque para arrastrar el material apelmazado.

Cuando se instala un tornillo sinfín para la descarga en tolvas es de igual importancia tener en cuenta que la cantidad de humedad no sólo afecta la agregación (apelmazamiento) que puede haber en la interacción entre partícula-partícula-hélice y pared del canal, sino también, en el efecto que ocurre cuando el tornillo está rotando y no cae material en el canal del tornillo llamado efecto túnel, en el cual, la alta cohesión que tienen las partículas hace que se forme un túnel entre el material almacenado y el tornillo y no exista el arrastre de material para ser descargado de la tolva. En un estudio realizado por [3] en un tornillo sinfín utilizado inicialmente como transportador de aserrín hacia un gasificador, se tomaron varios materiales de biomasa como pellets de madera, aserrín, virutas de madera y combustible de cerdo para ser transportados en el equipo transportador. El tamaño de las partículas de biomasa oscilaba entre los 0.5-15 mm, siendo los pellets los que tenían mayor tamaño, en este caso, se analizó el efecto del nivel de carga que tiene la biomasa en una tolva hacia el tornillo que se encuentra en la base de la tolva, el objetivo del trabajo era variar el nivel de llenado en la tolva con los distintos materiales para analizar el efecto de la carga que ejerce el material hacia el tornillo. Los estudios arrojaron que la carga ejercida es proporcional al nivel de llenado de la tolva y que, si se varía la velocidad de rotación del tornillo a velocidades mayores a 40 RPM se tiene el fenómeno de túnel, ya que, en esos niveles de rotación no se alcanza a llenar las cavidades que se forman entre el canal y las hélices del tornillo, por tanto, no hay transporte de material y el tornillo rota en vacío sin carga alguna.

Caracterización física de la biomasa

Ángulo de reposo

Un criterio aplicable para la caracterización de la fluidez y fuerzas de cohesión es el cálculo experimental del ángulo de reposo, en este, lo que se busca es verter una fracción de masa por un embudo que se encuentra a una altura definida para que el material a caracterizar pase por este embudo y caiga a la base, formándose de esta manera una pila de material que tiene forma de cono invertido, el ángulo de reposo se mide en este cono invertido como el ángulo que hay entre la superficie horizontal y el lado de la pendiente del cono.



Figura 1. Ángulo de reposo [4]

El ángulo de reposo (AR) indica que, a mayores valores de ángulo, se tiene que la fluidez del material es mucho más baja debido a que es un material que tiene alta cohesión y que no se esparce fácilmente, sino por el contrario, tiende a formarse un cono de gran pendiente. En materiales que tienen alta fluidez el cono tiende a tener pendientes más bajas. El cálculo del ángulo de reposo se le denomina índices de Carr (IC) y el procedimiento para determinar la fluidez de algún material está estipulado en el estándar ASTM D6393-14.

Tabla 1. clasificación de fluidez [5]

AR	IH	IC	
25	1,11	10	Excelente
31	1,18	15	Bueno
36	1,25	20	Bastante Bueno
41	1,34	25	Aceptable
46	1,45	31	Mediocre
56	1,59	37	Muy Mediocre

Relación de Hausner

La razón de Hausner (IH) es un número que correlaciona la fluidez de material pulverizado, fue introducida por Hausner (1967) y su procedimiento se describe detalladamente en la norma ASTM D4164. La relación de Hausner no es una propiedad absoluta de los materiales, pero en gran medida es un indicador que se utiliza en la caracterización de muchos materiales, a medida que la relación de Hausner disminuye, el material tiene mayor fluidez (Tabla 1). Algunos autores han demostrado que la relación de Hausner no es aplicable para la caracterización de biomasa, como es el caso de [6], quienes encontraron que la relación de Hausner para la biomasa era menor que para el carbón bituminoso (Tabla 1), lo que a simple vista indicaba que la biomasa presentaba mayor fluidez que el carbón. Sin embargo, observaciones experimentales han demostrado lo contrario.

VI. METODOLOGÍA

Primera etapa

Determinar el flujo del sistema de extracción, para calcular la velocidad de ascenso en el filtro.

Inicialmente se debe contemplar el tipo de material que se piensa recolectar en el equipo de filtración de mangas, este dato es indispensable para tener la certeza que el medio de filtración que se va a diseñar es el correcto. La línea de producción que se piensa intervenir es la que produce polvo por lijado y fibras de recortes de madera, en esta se tiene un ángulo de reposo promedio de 40° , lo cual indica que es un material que tiende a tener baja fluidez y que las partículas se entrelazan o aglomeran fácilmente.

La cantidad de material que se piensa recolectar en el filtro de mangas es de 2040 kg/h y velocidad en el ducto de $24215 \text{ ft}^3/\text{min}$, datos proporcionados por la evaluación realizada en la línea de producción de polvo y virutas por Ventilación y Control Ambiental S.A.S, estos son los datos de partida para realizar un diseño el cuál cubra la necesidad que se tiene actualmente para retener y almacenar las partículas.

Segunda etapa

Diseño del filtro de mangas

Cuando se tiene un sistema de captación de contaminantes existe una corriente de gas que arrastra partículas de contaminante desde una fuente emisora hasta un sistema de tratamiento de aire (filtro), en el caso de la industria maderera son polvos que se originan por el desbaste, corte y pulido de los troncos. Es necesario realizar la captación de partículas para que no sean expulsadas hacia la atmósfera y causen afectaciones de contaminación por material particulado, para esto, se usan los filtros de mangas con el propósito de limpiar el aire que va a ser expulsado a la atmósfera, en el caso de los filtros de mangas se busca que el gas pase a través de tela y que en dicha tela queden las partículas retenidas.

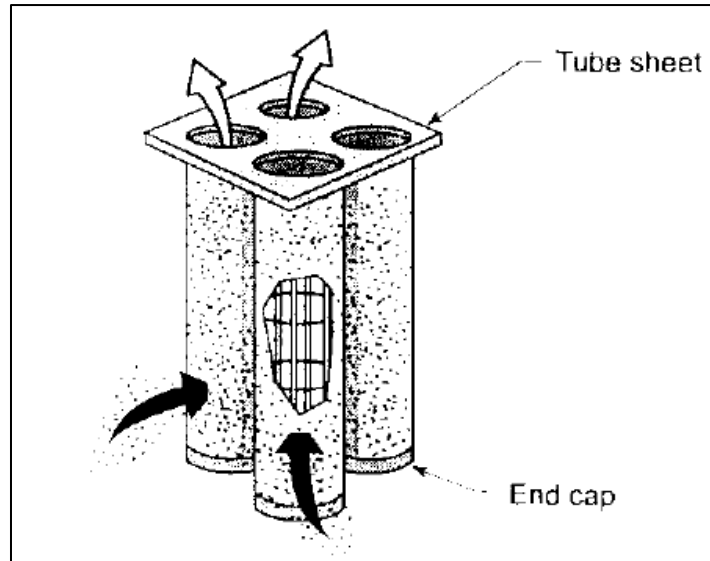


Figura 2. Esquema de filtro de mangas [7]

La Figura 2 muestra el ingreso de aire contaminado por las flechas negras y la salida de aire filtrado denotado por las flechas blancas a través de las mangas dispuestas en el filtro.

Se denomina filtro de mangas debido a la forma cilíndrica que tiene cada filtro, cada manga requiere que esté soportada internamente por una estructura metálica, llamada canastilla, estas son las que dan rigidez a las mangas para que no se deformen y tengan un refuerzo rígido y no permita que haya reducciones de área por encuellamiento [7].

Variables del filtro de mangas

Las cámaras de los filtros se diseñan a partir de las siguientes variables: caída de presión, arrastre del filtro, relación aire-tela y velocidad de ascenso.

Caída de presión:

La caída de presión (Δp), es una variable indispensable en el diseño de los filtros ya que es el valor que describe la resistencia que tiene el aire al tratar de pasar por el medio filtrante. Esta caída de presión se determina a partir de la medición antes y después del filtro, la caída total de presión en el filtro se relaciona directamente con el dimensionamiento del ventilador de succión,

esto, acompañado de la caída de presión total por los demás accesorios y componentes que conforman los sistemas de ventilación.

La ecuación más utilizada y simplificada para predecir la caída de presión a través de un filtro limpio se deriva de la ley de Darcy que rige el flujo a través de materiales porosos y se describe como:

$$\Delta p_f = k_1 * v_f \quad (1)$$

Donde:

$\Delta p_f =$ Caída de presión a través de la tela limpia, (inH₂O)

$k_1 =$ Resistencia de la tela, (inH₂O)

$v_f =$ Velocidad de filtración, $\left(\frac{ft}{min}\right)$

El término k_1 es la resistencia que tiene la tela con su porosidad y espesor en función de la viscosidad del gas que pasa por dicha tela cuando se encuentra limpia sin contaminantes.

Cuando se tiene el filtro con material impregnado que se ha filtrado con antelación, se dice que el filtro está apelmazado con polvo y en este caso la caída de presión se expresa usando la ecuación de (Billings y Wilder 1970). Esta fórmula es una derivación de la ley de Darcy ajustada para el caso en el que el filtro está saturado y denota como:

$$\Delta p_c = k_2 * c_i * v_f^2 * t \quad (2)$$

Donde:

$\Delta p_c =$ Caída de presión a través del material apelmazado, (inH₂O)

$c_i =$ Carga de concentración de polvo, $\left(\frac{lb}{ft}\right)$

$v_f =$ Velocidad de filtración, $\left(\frac{ft}{min}\right)$

$t =$ Tiempo de filtración, (min)

El término k_1 hace referencia a la resistencia que existe entre polvo-tela y se determina experimentalmente. En este caso el coeficiente depende de la viscosidad del gas, densidad y porosidad de las partículas de polvo.

La caída de presión total en el equipo de filtración es igual a la caída de presión del filtro limpio más la caída de presión a través de la capa de polvo apelmazada y se da como:

$$\Delta p_t = \Delta p_f + \Delta p_c \quad (3)$$

$$\Delta p_t = k_1 * v_f + k_2 * c_i * v_f^2 * t$$

La ecuación anterior es un estimado para la presión del filtro, normalmente, en los filtros de mangas existen interacciones más complicadas entre partículas y tejidos cuando se están desarrollando los ciclos de filtración, entonces, los factores de resistencia k pueden ser muy variables dependiendo de la cantidad de formación de material apelmazado en la tela de filtración y se debe tener en cuenta en el diseño del equipo de filtración que no supere las 6 inH₂O como regla general cuando esté saturado.

Arrastre del filtro:

El arrastre del filtro es la resistencia del filtro a través de la capa de polvo de tela, este arrastre es función de la cantidad de polvo acumulado en el tejido y se expresa como:

$$S = \frac{\Delta p}{v_f} \quad (4)$$

Donde:

$$S = \text{Arrastre del filtro, } \left(\frac{\text{inH}_2\text{O}}{\text{ft}/\text{min}} \right)$$

$\Delta p =$ Caída de presión a través de la tela y el polvo apelmazado, [inH₂O]

$$v_f = \text{Velocidad de filtración, } \left(\frac{\text{ft}}{\text{min}} \right)$$

Velocidad de filtración: relación aire-tela

La velocidad de filtración se expresa como:

$$v_f = \frac{q}{A_c} \quad (5)$$

Donde:

$$v_f = \text{Velocidad de filtración, } \left(\frac{\text{ft}}{\text{min}} \right)$$

$$q = \text{Flujo de aire volumétrico, } \left(\frac{\text{ft}^3}{\text{min}} \right)$$

$$A_c = \text{Área de la tela del filtro, } (\text{ft}^2)$$

La relación aire-tela se refiere a la velocidad de paso del aire a través de la tela de la manga o la relación entre la corriente de gas con material particulado con el área total de filtración. A medida que la relación aire-tela aumenta, indica que el filtro se va a saturar más rápido, por lo que se debe considerar valores que estén rondando a 6 para que no existan problemas de saturaciones rápidas. La influencia de valores menores a 6 afectan en el dimensionamiento del filtro ya que aumenta su tamaño, aunque, puede ser más efectivo en cuanto a la reducción en los ciclos de limpieza que requiere el filtro [8].

Cálculo de variables para el diseño del filtro de mangas:

Para el cálculo del filtro de mangas o talegas, se fijan los siguientes datos:

- Tipo de material particulado: Aserrín (madera)
- Caudal de aire: $24215 \text{ ft}^3/\text{min}$
- Relación aire-tela (de diseño): 6
- Velocidad de ascenso: $150 \text{ ft}/\text{min}$
- Diámetro de la manga: 6.25 in (Diámetro comercial)
- Longitud de la manga: 10 in

$$\frac{\text{Área filtrante}}{\text{talega}} = \frac{\pi 6.25}{12} * 10 = 16.36 \text{ ft}^2$$

$$\text{Área filtrante requerida} = \frac{24215}{6} = 4035.8 \text{ ft}^2$$

$$\text{Número de talegas requerida} = \frac{4035.8}{16.36} \approx 247 \text{ unidades}$$

Luego, se seleccionan 240 unidades de mangas para conformar un arreglo de $12 \text{ unidades} \times 20 \text{ unidades}$ y se realizan las siguientes corroboraciones:

$$\text{Área filtrante seleccionada} = \frac{\text{Número de talegas seleccionadas}}{\frac{\text{Área filtrante}}{\text{talega}}} = \frac{240}{16.36} = 3927 \text{ ft}^2$$

$$\text{Relación}_{\text{real}} \text{ aire} - \text{tela} = \frac{\text{Área filtrante seleccionada}}{\text{caudal de aire}} = 6.17$$

Con las anteriores variables calculadas, se hace la verificación y dimensionamiento de la distribución de todas las talegas en el filtro. Este se realiza con la ayuda de un programa que tiene la empresa Ventilación y Control Ambiental para el cálculo de filtros de talegas, el cual, se muestra brevemente en la Tabla 2:

Tabla 2. Cálculo del filtro de mangas

PARÁMETROS DE DISEÑO	Tipo de Material Particulado	Aserrín (Madera)	
	Caudal de aire [cfm]	24215	
	Relación Aire - Tela de diseño [ft]	6	
	Velocidad de ascenso [fpm]	150	
MEDIO FILTRANTE	Diámetro de talega [in]	6,25	
	Longitud de talega [ft]	10	
	Área filtrante / talega [ft ²]	16,36	
FILTRACIÓN REQUERIDA	Área filtrante requerida [ft ²]	4035,833333	
	Número de talegas requeridas [un]	247	
CANTIDAD DE ELEMENTOS FILTRANTE	12	20	
	Número de talegas seleccionado [un]	240	
	Área filtrante seleccionada [ft ²]	3926,99	
	Relación Aire - Tela Real	6,17	
CÁLCULO DE TAMAÑO DE FILTRO	Área transversal de cada talega [ft ²]	0,21	
	Área transversal ocupado por las talegas [ft ²]	51,13	
	Área libre para paso de aire [ft ²]	161,43	
	Área total de la sección	212,57	
	Área correspondiente / talega [ft ²]	0,89	
	Sección transversal por talega [in]	11,29	
DIMENSIÓN TRANSVERSAL	SECCIÓN DE FILTRO		
	in	135,52	225,87
	mm	3442	5737
TOLVA	Número de Tolvas	1	
	Ángulo de tolva [°]	75	
	Sección inferior de tolva [mm]	365	700
	Altura de tolva [mm]	5742	
ALTURA FILTRO	Altura camara limpia [mm]	1500	
	Altura camara sucia [mm]	3148	
	Altura válvula rotativa [mm]	300	
	Altura libre de descarga [mm]	2000	
	Altura total de filtro	12690	
VER ESQUEMA			
SELECCIÓN DE MATERIAL FILTRANTE	Proceso		
	Despolvamiento en bandas transportadoras después de molinos de crudo		
	Material filtrante recomendado		
Poliéster, Acrílico			

El programa mostrado anteriormente, arroja el dimensionamiento tentativo que tiene el filtro de manera esquemática, las dimensiones reales se precisan cuando se defina la forma de fabricación (como perfiles estructurales y láminas para conformar el cuerpo del filtro); pero, el

dimensionamiento se debe conservar muy aproximado a lo que arroja el programa en Excel. A continuación, se muestra el esquemático del filtro:

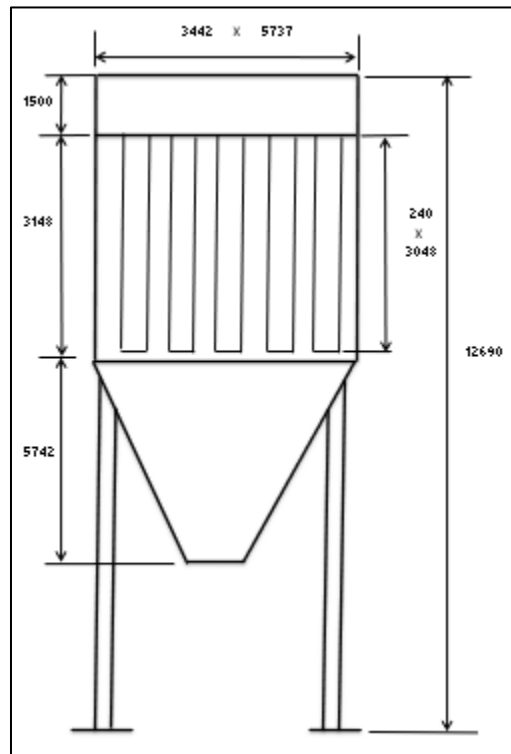


Figura 3. Dimensionamiento general del filtro

Finalmente, se muestra un esquema general (Figura 4) sobre la ubicación de la propuesta para instalar el filtro de mangas en la compañía cliente, con lo cual, luego de aprobado la propuesta se realizará el cálculo en detalle de todas las componentes que conforman el filtro de mangas.

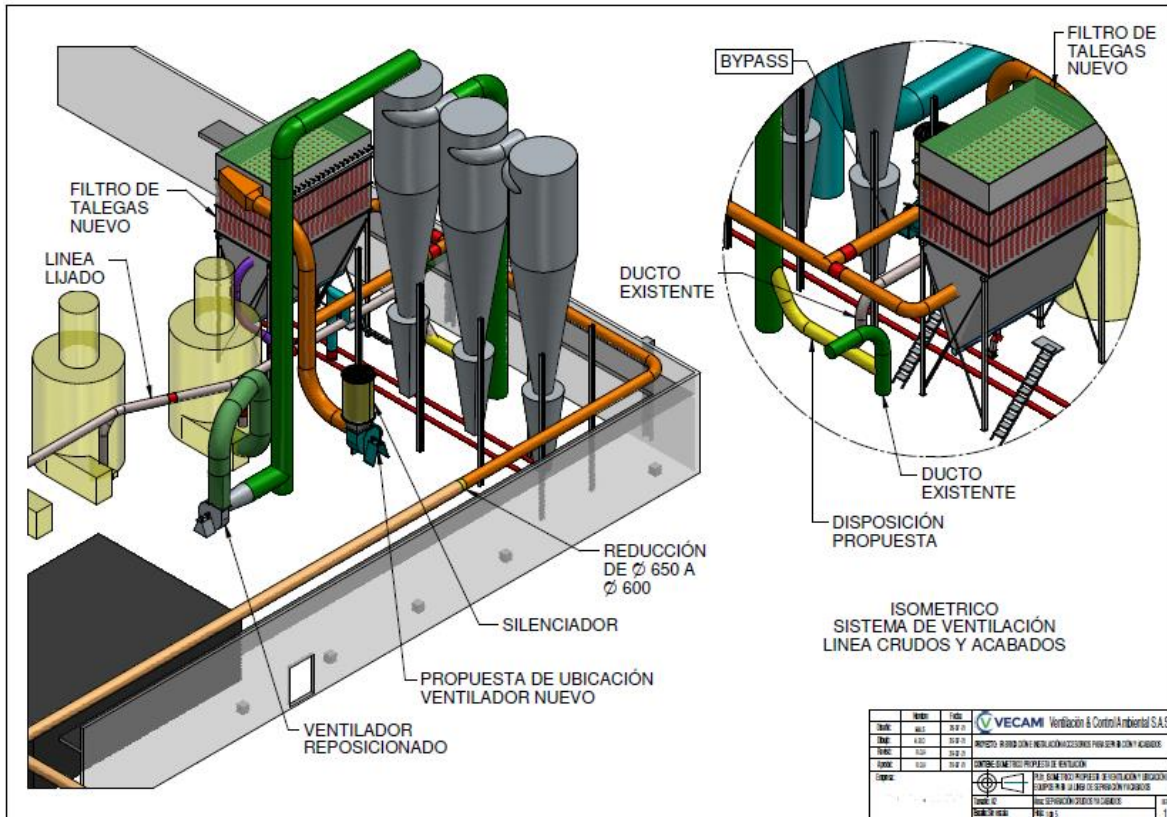


Figura 4. Posición del filtro

Tercera etapa

Diseño del tornillo transportador

Para el diseño del tornillo transportador se toma como referencia harina de madera (Wood Flour), con una densidad aparente suelta aproximada de $100 \frac{Kg}{m^3}$.

Para determinar el tamaño y la velocidad de un transportador de tornillo sinfín, primero es necesario establecer el número de código del material. Se verá a partir de lo que sigue que este número de código controla la sección transversal carga que se debe utilizar.

Para el caso de las virutas de madera, el código según la ANSI/CEMA 350 es de $26B_635N$ e indica lo siguiente:

B_6 : Tamaño de partículas de tamiz n°6 (0.132”) y menos.

3: La fluidez es promedio (función de flujo >2 pero <4).

6: Moderadamente abrasivo.

N: Polvos inflamables o incluso explosivos.

El diseño del tornillo sinfín se rige bajo el estándar ANSI/CEMA 350, el cual estandariza todo el procedimiento de cálculos y consideraciones a tomar para realizar el diseño de tornillos transportadores a escala industrial. El estándar ANSI/CEMA 350 es el referente debido a que gran parte de los catálogos comerciales de tornillos sinfín se rigen bajo este estándar y es la fuente madre para tener un buen diseño de tornillo transportador. El estándar es un documento muy completo en el cual se estipulan las consideraciones que se deben tener en el diseño de tornillos; es decir, no sólo hay cálculo, sino que se hacen recomendaciones que han surgido a través de la amplia experiencia que se tiene con sus diferentes versiones.

Selección de un tornillo transportador, dimensiones y velocidad:

Un tornillo transportador que se ubica en posición horizontal tiene una única región la cual es útil para transportar cierto material, esta región es del punto medio del tornillo hacia abajo, ya que el efecto de la gravedad y la rotación del tornillo hace que las partículas se asienten en el fondo del canal. Lo anterior acompañado de las características físicas del material, hacen que la región útil de transporte se vea reducida, entonces, las características propias de cada material se pueden consultar en la tabla 2.2 de estándar ANSY/CEMA 350, en el cual se indica la fluidez y abrasividad que puede llegar a tener dicho material, luego, en la tabla 2.3 se verifica el porcentaje de llenado como sigue a continuación [9].



Material Class Code	Degree of Trough Loading	Screw Dia. (in)	Maximum RPM*	Capacity, ft ³ /hr	
				At Max. RPM	At One RPM
A-15	 45%	6	165	368	2.23
A-25		9	155	1,270	8.2
B-15		12	145	2,820	19.4
B-25		14	140	4,370	31.2
C-15		16	130	6,060	46.7
C-25		18	120	8,120	67.6
		20	110	10,300	93.7
		24	100	16,400	164.0
		30	90	28,795	320.0
			36	75	41,490
A-35	E-15	6	120	180	1.49
A-45	E-25	9	100	545	5.45
B-35	E-35	12	90	1,160	12.9
B-45	E-45	14	85	1,770	20.8
C-35	 30% A	16	80	2,500	31.2
C-45		18	75	3,380	45.0
D-15		20	70	4,370	62.5
D-25		24	65	7,100	109.0
D-35		30	60	12,800	213.3
D-45		36	50	18,440	368.8

Figura 5. Capacidad de llenado del tornillo [9]

Con lo anterior, se tiene que la harina de madera tiene un porcentaje de llenado en el tornillo aproximado de un 30% de carga, este valor es útil ya que el porcentaje de carga determina cuanta es la cantidad de material que se transporta por cada vuelta de giro del tornillo.

Capacidad del tornillo por una RPM:

Ahora, se calcula la capacidad del tornillo en pies cúbicos por hora sobre RPM.

$$\frac{C}{RPM} = \frac{0.784(D_s^2 - D_p^2)PK60}{1728} \quad (6)$$

Donde:

$$C = \text{Capacidad, } \left(\frac{ft^3}{h} \right)$$

RPM = Revoluciones del tornillo por minuto

D_s = Diametro del tornillo (in)

D_p = Diametro del tubo, (in)

P = Paso del tornillo, (in)

K = Porcentaje de carga de llenado

La tabla 2.3 muestra que para la clasificación B35 se tiene un porcentaje de llenado del 30%, también, en nuestro tornillo se usará una dimensión de diámetro externo de 12", paso de 12" y diámetro exterior de tubo de 2 7/8".

Remplazando se tiene:

$$\frac{C}{RPM} = \frac{0.784 * (12^2 - 2.875^2) * 12 * 0.3 * 60}{1728}$$

$$\frac{C}{RPM} = 13.3 \left(\frac{ft^3/h}{RPM} \right)$$

Velocidad del tornillo:

En tornillos en los que se tiene diámetro exterior constante y paso regular, se utiliza la siguiente ecuación.

$$N = \frac{Capacidad\ requerida, (ft^3/h)}{C} \quad (7)$$

Para el cálculo de velocidades de transportador donde se utilizan tipos especiales de tornillos, como tornillos de paso corto, se debe utilizar una capacidad requerida equivalente, según los factores de la Tabla 2-4.

$$Capacidad\ equivalente = Capacidad\ requerida * CF_1 * CF_2 * CF_3 \quad (8)$$

El factor CF1 se relaciona con el paso del tornillo, el factor CF2 se relaciona con la forma de la hélice y con modificaciones, el factor CF3 se refiere al uso de paletas mezcladoras dentro de los campos de vuelo.

Table 2-4 Screw Conveyor Capacities

Special Conveyor Pitch Capacity Factor CF_1					
Pitch	Description	CF_1			
Standard	Pitch = Diameter of screw	1.00			
Short	Pitch = 2/3 Diameter of screw	1.50			
Half	Pitch = 1/2 Diameter of screw	2.00			
Long	Pitch = 1-1/2 Diameter of screw	0.67			
Special Conveyor Flight Capacity Factor CF_2					
Type of Flight	Conveyor Loading				
	15%	30%	45%		
Cut Flight	1.95	1.57	1.43		
Cut & Folded Flight	N. R.*	3.75	2.54		
Ribbon Flight	1.04	1.37	1.62		
Special Conveyor Mixing Paddle Capacity Factor CF_3					
Factor CF_3	Standard Paddles Per Pitch Set at 45°				
	Reverse Pitch				
	None	1	2	3	4
	1	1.08	1.16	1.24	1.32

* Not Recommended

Figura 6. Factores para tornillos no convencionales [9]

Como se observa en la figura 2, para el caso del factor CF_2 se asume que es 1 ya que el tornillo que se está diseñando no sufre alteraciones en la envolvente helicoidal, este factor aplica para cuando existen cortes y dobleces en dicha envolvente.

La capacidad requerida para evacuar polvo que se recolecta en el filtro de mangas es informada del cliente con un valor de $2040 \frac{Kg}{h}$, con este dato de capacidad requerida y la densidad aparente se puede calcular el flujo volumétrico de la siguiente manera.

$$\text{Flujo volumétrico} = \frac{2040}{100} * 35,3147$$

$$\text{Flujo volumétrico} = 720.4 \frac{ft^3}{h}$$

Ahora, se puede remplazar los datos para hallar las RPM:

$$N = \frac{720.4 * 1 * 1 * 1}{13.3}$$

$$N = 54 \text{ RPM}$$

Clasificación del material para la selección del cojinete de suspensión:

La longitud total del tornillo que se va a diseñar es de 6700 mm, por esto, es necesario realizar el diseño del tornillo en dos secciones que se unen en la mitad con un eje macizo, dicho eje se soporta por medio de un colgante (elemento de suspensión) para evitar la excesiva deflexión de todo el tornillo; es por esto, que es necesario definir el cojinete de dicho elemento de suspensión, de acuerdo con la clasificación del material que se tomó de la tabla 2.2 del ANSI/CEMA, se puede verificar ahora que tipo de material es viable para utilizar en los cojinetes de suspensión que sostienen al tornillo.

Material Classification Code				Component Group Designation				
Material Size Classification	Abrasive Number	Corrosiveness Letter	Group Number Designation	Type of Intermediate Hanger Bearing + (See Table 2-10)				
				Babbited or Bronzed	Self Lubricating	Ball Bearing Δ	Hard Iron	Plastic Nylon PTFE
A ₂₀₀	B6	Non-Corrosive	1	B	B	A	-	C
A ₁₀₀	5	T	2	B	B	-	-	C
A ₄₀	C _{1/2}	S	3	B	B	-	-	C

Figura 7. Material para los cojinetes de suspensión [9]

Lo mostrado en la figura 3 indica que es recomendado usar cojinetes preferiblemente de bronce o autolubricados. Los cojinetes en rodamiento de bolas no son recomendados ya que el material a transportar es muy fino, puede ingresar en el rodamiento y causar un estancamiento de los balines, lo cual hace que la balinera quede pegada y por la acción constante del motorreductor puede causar un desgaste en el eje.

El cojinete que se seleccionó es el cojinete Babbited o Bronce, los cojinetes lubricados babbited se utilizan con mucha frecuencia, pero tienen una temperatura máxima de funcionamiento de 130 °F; Los cojinetes de bronce lubricados se pueden operar a temperaturas de hasta 225 ° F.

Calibre de la hélice y el canal:

En esta sección se toma la clasificación del material para extraer de la tabla 2.7 los calibres necesarios para la fabricación del canal como se muestra a continuación.

Normal Service

Table 2-7 Component Groups 1A, 1B and 1C. Regular Flights and Regular Trough

Screw Dia. (in)	Coupling Dia. (in)	Screw Number *		Thickness, U.S. Standard (ga. or in)	
		Helicoid Flights	Sectional Flights	Trough	Cover
6	1-1/2	6H304	6S307	16 ga.	16 ga.
9	1-1/2	9H306	9S307	14 ga.	14 ga.
9	2	9H406	9S409	14 ga.	14 ga.
12	2	12H408	12S409	12 ga.	14 ga.
12	2-7/16	12H508	12S509	12 ga.	14 ga.
14	2-7/16	14H508	14S509	12 ga.	14 ga.

Figura 8. Tabla de calibres para la hélice y el canal [9]

El calibre del canal recomendado es de 12 para un canal sin elementos conectados en la descarga, pero, en el caso del tornillo que va llevar el filtro de mangas tiene conectada a su descarga una válvula rotativa, la cual ejerce una carga adicional al canal del tornillo; por lo tanto, se seleccionó un calibre para el canal de 1/8" con el objetivo de tener un canal rígido que garantice la estabilidad de la descarga.

Potencia del tornillo horizontal:

Para el cálculo de potencia del tornillo es necesario realizar ciertas consideraciones para tener un total aproximado sobre la potencia real necesaria para el funcionamiento:

Calcular la potencia del tornillo horizontal con la ayuda de la siguiente fórmula.

$$hp_{horizontal} = \frac{(hp_f + hp_m) F_o}{e} \quad (9)$$

El requerimiento de caballos de fuerza es el total de caballos de fuerza para superar la fricción del transportador (hpf), es decir, la potencia requerida para mover todo el sistema móvil que compone el tornillo y, finalmente, la potencia para transportar el material a la velocidad especificada (hpm) multiplicada por el factor de sobrecarga Fo y dividido por la eficiencia total del variador e.

$$hp_f = \frac{L N F_d F_b}{1,000,000} \quad (10)$$

$$hp_m = \frac{C L W F_f F_m F_p}{1,000,000} \quad (11)$$

Donde.

$C = \text{Capacidad, (ft}^3/\text{h)}$

$e = \text{Eficiencia, tabla 8.1}$

$F_b = \text{Factor por tipo de cojinete}$

$F_d = \text{Factor por diámetro del tornillo}$

$F_f = \text{Factor por tipo de hélice}$

$F_m = \text{Factor por tipo de material, tabla 2.2}$

$F_o = \text{Factor de sobre carga}$

$F_p = \text{Factor de paleta}$

$L = \text{Longitud total del transportador, (ft)}$

$N = \text{Velocidad de operación, (RPM)}$

$W = \text{Densidad aparente, (lbs/ft}^3\text{)}$

Inicialmente en el cálculo de potencia, se hace la revisión y selección de todos los factores que en el estándar se especifican. Se debe tener en cuenta la eficiencia que representa el tipo de transmisión mecánica que se va a instalar en el tornillo, en este caso, se va a utilizar un motorreductor de acople directo al eje del tornillo como se muestra a continuación:

Table 8-1 Mechanical Efficiencies of Speed Reduction Mechanisms

Type of Speed Reduction Mechanism	Approximate Efficiencies
V-Belts and Sheaves	0.94
Precision Roller Chain on Cut Tooth Sprockets, Open Guard	0.93
Precision Roller Chain on Cut Tooth Sprockets, Oil Tight Casing	0.94
Single Reduction Helical or Herringbone Enclosed Gear Reducer or Gearmotor	0.95
Double Reduction Helical or Herringbone Enclosed Gear Reducer or Gearmotor	0.94

Figura 9. Eficiencia por tipo de transmisión [9]

Luego, se debe tener en cuenta el factor por tipo de rodamiento que lleva el sistema, con esto se hace referencia al elemento de rotación que lleva la unión de las dos secciones de tornillo, siendo un buje de bronce fosforado SAE 63 (aleación de cobre, zinc, estaño y plomo) como la mejor opción para antidesgaste en la junta. A continuación, se muestran las propiedades del bronce a utilizar y la selección del factor por tipo de rodamiento para el cálculo de la potencia.

<p>SAE 63 Bronce al Estaño Plomo (Blanco)</p> <hr/> <p>ASTM B 505, UNS C 92700</p> <p>COMPOSICIÓN QUÍMICA: Cu: 88 Sn: 10 Pb: 2</p> <p>APLICACIONES: Bujes de alta exigencia para resistencia al desgaste, empleados en condiciones severas de trabajo. Ejes con terminales roscadas, tuercas, coronas, piñones de engranar con acero endurecido; válvulas juntas de expansión, pistones de bombas, bujes para elevadores de botellas, molinos, trituradoras, empacadoras, accesorios para tubería de vapor de agua.</p> <p>PROPIEDADES MECÁNICAS: • Resistencia a la tracción: 41.870 PSI • Resistencia a la cedencia: 21.000 PSI • Elongación: 20% en 2" • Dureza: 77 HB • Densidad: 8.80 g/cc a 20°C • Índice de maquinabilidad: 35/100 • Temperatura de alivio de tensiones: 260°C una hora por pulgada de espesor</p>
--

Figura 10. Composición del bronce [10]

Component Group	Bearing Type	F_b
Group A	Ball	1.0
Group B	Babbit Bronze Graphite bronze * Canvas base phenolic * Oil impregnated bronze * Oil impregnated wood *	1.7
Group C	Plastic * Nylon * PTFE*	2.0
Group D	Chilled hard iron * Hardened alloy sleeve *	4.4

* Non-lubricated bearings or bearing not additionally lubricated

Figura 11. Factor por tipo de rodamiento [9]

Se hace la selección del factor por el diámetro del tornillo que se encuentra tabulada:

Table 3-2 Screw Diameter Factor, F_d

Screw Diameter (in)	F_d	Screw Diameter (in)	F_d
6	18	18	135
9	31	20	165
10	37	24	235
12	55	30	365
14	78	36	540
16	106		

Figura 12. Factor por diámetro del tornillo [9]

A continuación, se hace la selección del factor por el tipo de función que debe ejercer el tornillo respecto al porcentaje de carga de dicho tornillo, en este caso, el tornillo a utilizar no debe cortar el material a transportar ni tampoco tiene la hélice plegada, por lo tanto, se selecciona el factor de 1.

Table 3-3 Flight Factor, F_f

Type of Flight	Conveyor Loading			
	15%	30%	45%	95%
Standard	1.00	1.00	1.00	1.00
Cut Flight	1.10	1.15	1.20	1.30
Cut & Folded Flight	N.R. *	1.50	1.70	2.30
Ribbon Flight	1.00	1.14	1.20	-

* Not Recommended

Figura 13. Factor por tipo de hélice [9]

Finalmente, se tiene el factor por paletas, las cuales pueden se pueden instalar entre las secciones intermedias del paso de tornillo para cumplir la función de mezclado del material a transportar, en este caso, solo se usa el tornillo con fines de transporte por lo que el factor a seleccionar es 1.

Table 3-4 Paddle Factor, F_p

Factor F_p	Standard paddles per pitch set at 45° reverse pitch				
	None	1	2	3	4
	1.00	1.29	1.58	1.87	2.16

Figura 14. Factor si existen paletas [9]

Ahora, reemplazando todos los factores y las variables en las ecuaciones (10) y (11) se tiene:

$$hp_f = \frac{22 \text{ ft} * 54 \text{ RPM} * 55 * 1.7}{1,000,000} = 0.11 \text{ hp}$$

$$hp_m = \frac{720.4 \frac{\text{ft}^3}{\text{h}} * 22 \text{ ft} * 6.24 \frac{\text{lb}}{\text{ft}^3} * 1 * 1 * 0.4}{1,000,000} = 0.04 \text{ hp}$$

Luego, se debe hallar el factor F_o , que se halla de la siguiente figura.

$$hp_m + hp_f = 0.15 \text{ hp}$$

Ingresando al gráfico se tiene:

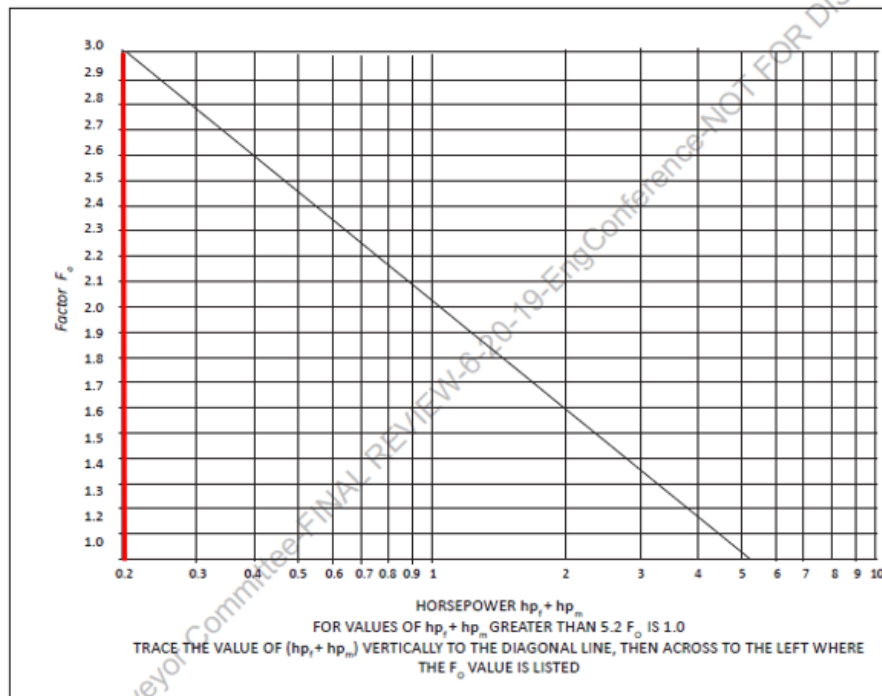


Figura 15. Factor F por potencia [9]

Como la suma de la potencia hp_m y hp_f es menor a 0.2, se asume que el valor para F_o es de 3. Con esto ya se puede calcular la potencia para un tornillo en posición horizontal.

$$hp_{horizontal} = \frac{(0.11 \text{ hp} + 0.04 \text{ hp}) * 3}{0.95}$$

$$hp_{horizontal} = 0.47 \text{ hp}$$

También, se debe estimar la potencia requerida para superar la disminución en la eficiencia debido a la agitación adicional y volteo del material. Obviamente, este factor variará con cada

solicitud. Como el material a transportar es harina de madera el cual tiene baja densidad y su tamaño de partículas no representan problemas para la rotación y el frenado en las hélices del tornillo, se realiza el siguiente ajuste en el cálculo de potencia.

$$hp_{Total} = 1.6 * 0.47 hp$$

$$hp_{Total} = \frac{3}{4} hp$$

Deflexión del tornillo:

Es necesario conocer la deflexión que puede llegar a tener el tornillo transportador, de esta forma conocer la luz que queda entre la hélice del tornillo y el canal en U para que no existan rozamiento tornillo - carcasa. Para esto, se calcula la deflexión de cada tramo de tornillo (3350 mm) y se hace de tal forma que la deflexión calculada sea sólo en el punto medio del tornillo, ya que en este punto es el máximo de deformación que puede llegar a tener el tornillo.

$$\Delta y = \frac{5WL^3}{384 EI} \quad (12)$$

$\Delta y =$ Deflexión a la mitad del tramo, (in)

$W =$ Peso total del tornillo, (lb)

$L =$ Longitud del tornillo entre rodamientos, (in)

$E =$ Módulo de elasticidad para el acero

$I =$ Momento de inercia de eje hueco o macizo

De la tabla 3.6 del ANSI/CEMA 350 se puede extraer datos de las propiedades para tubería cédula 40, para este diseño se piensa utilizar un diámetro de tubo cédula 40 de 2.5".

Table 3-6 Schedule 40 Pipe (Only)

Pipe Size (in)	Diameter (in)		Weight Per Foot Pounds	Moment of Inertia I
	External	Internal		
1-1/4	1.660	1.380	2.272	0.79
2	2.375	2.067	2.652	0.67
2-1/2	2.875	2.469	5.793	1.53
3	3.500	3.068	7.575	3.02
3-1/2	4.000	3.548	9.109	4.79
4	4.500	4.026	10.790	7.23
5	5.563	5.047	14.617	15.16
6	6.625	6.065	18.974	28.14
8	8.625	7.981	28.554	72.49
10	10.750	10.020	40.483	160.73
12	12.750	12.000	49.562	279.34

Figura 16. Propiedades de la tubería [9]

El peso de cada tramo de tornillo evaluado en el programa SOLID EDGE ST10 es de $W = 104 \text{ lbm}$

$$\Delta y = \frac{5 * 104 \text{ lbm} * 132^3 \text{ in}^3}{384 * 29 * 10^6 * 1.53}$$

$$\Delta y = 0.07 \text{ in}$$

Resistencia de los ejes:

El estándar considera el tipo de material que se va a utilizar en el diseño del tornillo con el fin de mostrar la potencia máxima a la cual puede ser sometido el eje, en este caso se va a utilizar un eje de acople de 2" fabricado en un acero AISI-SAE 1045 y una velocidad de giro de 54 RPM. Con los anteriores datos de los ejes se puede verificar en la figura 3.3 la potencia máxima a la cuál resiste el eje.

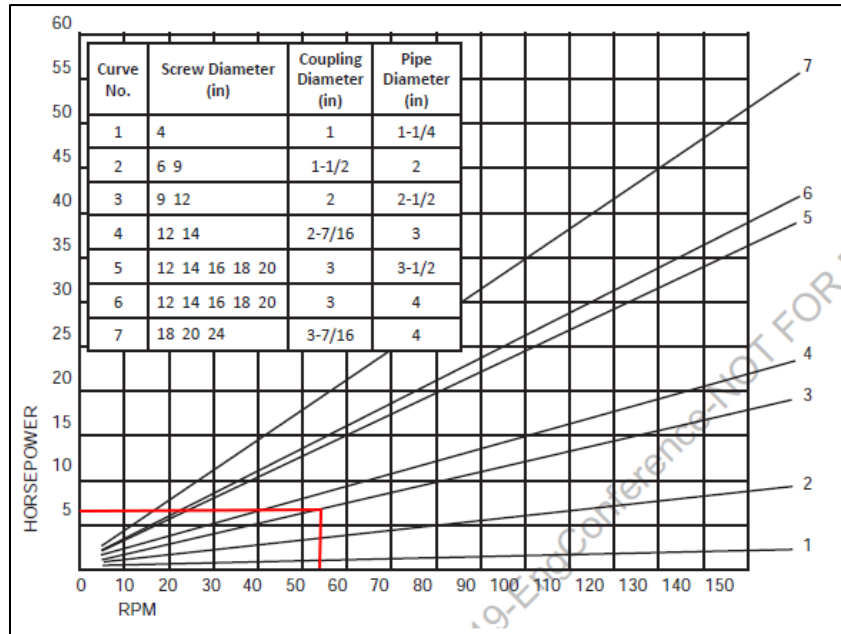


Figura 17. Resistencia del eje [9]

En la anterior figura se observa que la potencia máxima que puede resistir el eje es de 6 hp aproximadamente.

Selección de accesorios:

Para el tornillo se realizó la selección del motorreductor de la marca SEW, de referencia R37DRN80MK4, el cuál va a ir instalado en el extremo más cercano a la descarga del tornillo, esto es, por recomendación en el estándar ANSI/CEMA 350.

Características	Valor	Unidad			
Velocidad nominal del motor	1745	1/min	Factor de duración	S1-100%	
Velocidad de salida	54	1/min	Clase eficiente	IE3	
Índice de reducción total	32,40		Eficiencia (50/75/100% Pn)	78,07 / 80,98 / 81,5	%
Par de salida	98	Nm	Marcado CE	SI	
Factor de servicio SEW-FB	2,10		Tensión del motor	230/460	V
Posición de montaje	M1		Esquema de conexionado	R76	
Pintura imprimación/CapaFinal	7031 Gris azulado (51370310)		Frecuencia	60	Hz
Posición de conexión/caja de bombas	0	*	Corriente nominal	2,3 / 1,16	A
Entrada de cable/ Posición del conector	X		Cos Phi	0,71	
Eje de salida	25x50	mm	Clase de aislamiento	155(F)	
Salida de carga radial permitida a n=1750	4540	N	Tipo protección del motor	IP55	
Cantidad de lubricante 1er reductor	0,3	Litro	Requisito del diseño	IEC60034 (sin CE)	
Potencia del motor	0,55	kW	Momentos de inercia de masa (en referencia al lado de entrada)	17,00	10 ⁴ kgm ²
			Peso neto	20	Kg

Figura 18. Selección motorreductor 54 RPM [11]

En los extremos se van a instalar dos chumaceras de la marca SKF, las cuales, están fabricadas en forma de rotula para compensar cualquier desalineamiento que pueda tener el tornillo luego de fabricado.



DATOS DEL CÁLCULO

Capacidad de carga dinámica básica	C	43.6 kN
Capacidad de carga estática básica	C ₀	29 kN
Carga límite de fatiga	P _u	1.25 kN
Velocidad límite		3 600 r/min
con tolerancia de eje h6		

SKF F4B 200-FM

Figura 19. Selección de chumacera

Finalmente, se muestra el esquema general del tornillo sinfín, el cual, tiene una descarga descentrada en un extremo para facilitar el descargue del material en una línea neumática que pasa debajo del filtro y transporta material hacia una caldera para el aprovechamiento del polvo como

combustible. El tornillo se piensa fabricar con canales partidos para facilitar el montaje y desmonte ante posteriores rutinas de mantenimiento.

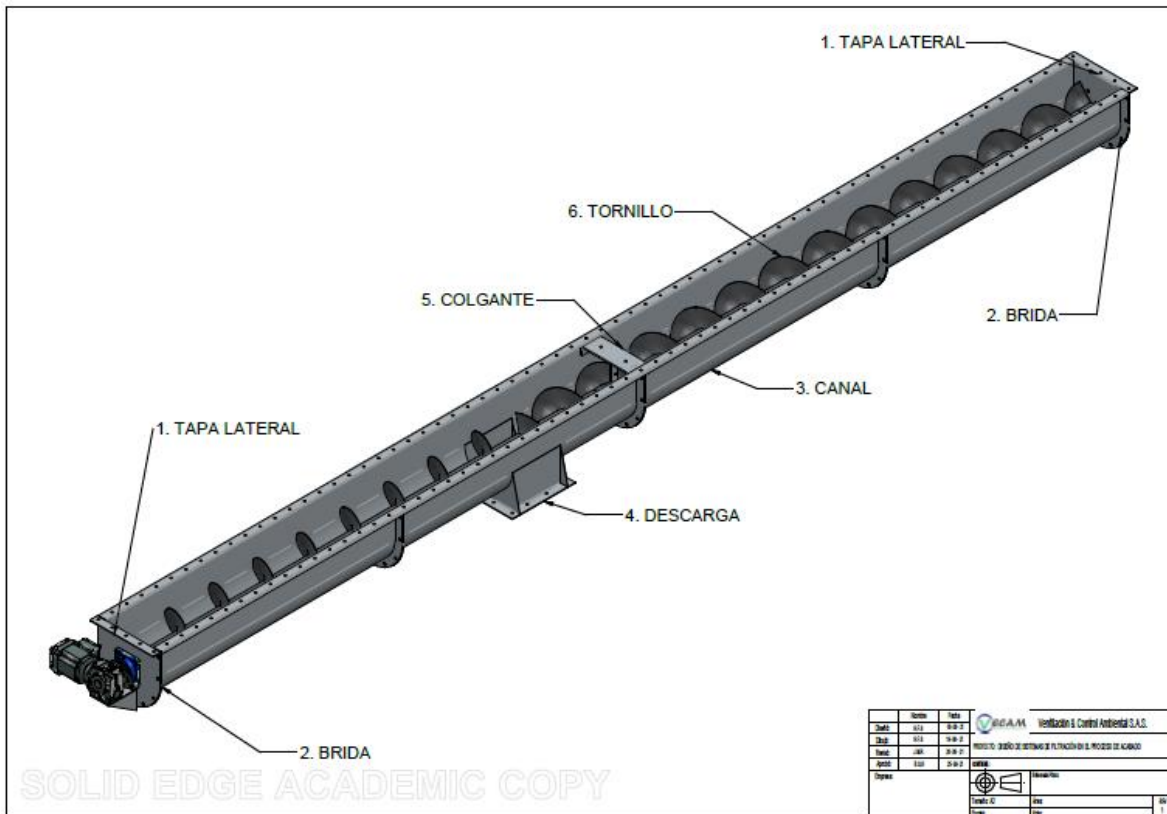


Figura 20. Esquema general del tornillo

Cuarta etapa

Selección de la válvula rotativa

Se realiza la selección de una válvula rotativa que sea capaz de extraer el material particulado entregado por el tornillo sinfín. Esta válvula se sitúa en la boca de descarga del tornillo sinfín, en el diseño se debe considerar la cantidad de material que entrega el tornillo y el tamaño de las partículas para determinar el tamaño de la válvula. A continuación, se muestran los cálculos para determinar el tamaño de la válvula y la capacidad a la cual va a extraer material:

$$\frac{\text{flujo deseado} \left[\frac{\text{lbs}}{\text{hr}} \right]}{\text{densidad del material} \left[\frac{\text{lbs}}{\text{ft}^3} \right]} * 0.024 = \text{Tamaño válvula (CFR)} * \text{RPM rotor} \quad (13)$$

Donde:

0.024 = Representa una constante de un factor de llenado del 70%

Tamaño válvula (CFR) = capacidad por revolución, $\left(\frac{ft^3}{Rev}\right)$

RPM rotor = Velocidad del rotor, $\left(\frac{Rev}{min}\right)$

Nota:

- Es importante tener en cuenta que el factor 0.024 tiene el factor de conversión implícito para la dimensión de tiempo, por lo que se deben conservar las unidades de todos los datos anteriores sin necesidad de realizar factores de conversión posteriores.
- En general, es recomendable que la velocidad de rotación de la válvula rotativa se encuentre entre 35- 40 RPM, esto es, con el fin de que haya tiempo suficiente para que caiga material en la válvula rotativa y pueda ser evacuado de manera correcta.

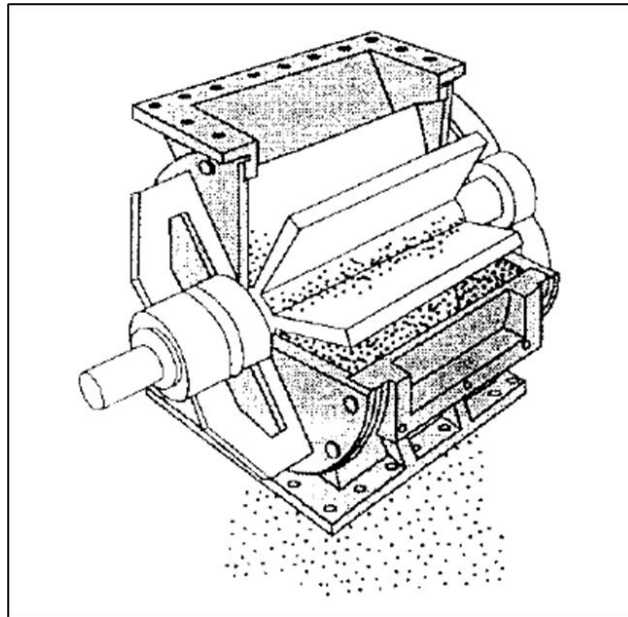


Figura 21. Esquema representativo de válvula [7]

Para el diseño de la válvula rotativa se considera lo siguiente:

- Densidad del material: $6.24 \frac{lbs}{ft^3} \left(100 \frac{kg}{m^3}\right)$
- Revoluciones: 36 RPM
- Diámetro interno de la válvula: 12 in

Con los datos que se muestran, se hizo en el programa Excel una hoja parametrizada enlazada con el programa de dibujo SOLID EDGE ST10 para tener diferentes dimensiones de

válvulas rotativas programadas, las cuales ya se encuentran despiezadas con los respectivos planos de fabricación. Sólo es necesario de ingresar parámetros como los anteriores y, con esto, se tiene inmediatamente todo el cálculo respectivo a la válvula rotativa que se desee.

La válvula rotativa diseñada en SOLID EDGE ST10 está constituida de tal forma que se pueda fabricar con tubería comercial de Schedule 40 o 80 y con platinas comerciales, este es un buen programa debido a que no se requiere de la realización de diseños desde cero, sino, que ya se tiene el modelo y sólo es enviar los planos para que en la planta de producción de Ventilación y Control Ambiental sea fabricado. El cálculo paramétrico realizado en la hoja de Excel se muestra a continuación:

Tabla 3. Cálculo paramétrico de la válvula

Tipo de tubería (Cédula)	80	CFR [FT^3/REV]	0,59
Diámetro Válvula	12		
Longitud interna	326	Flujo deseado [kg/h]	2514
Aleta		Disco lateral	
Ancho	300,6	Diámetro exterior	300,4125
Alto	109,0875	Diámetro interior	47,625
Espesor	12,7	Espesor Disco	12,7
Número de agujeros	8		
Diámetro de agujeros	11,1125		
Brida		Tapa de brida	
Diámetro exterior brida	370	Diámetro exterior tapa	370
Diámetro interior brida	323,8	Diámetro interior tapa	44
Espesor de la brida	21	Espesor de la tapa	21
Número de agujeros brida	6		
Diámetro de agujeros brida	11,1125		

Densidad del material [lb/ft3]	6,24	100 kg/m3		
revoluciones	36			
Eje			Ancho de abertura	150
Longitud de rodete	326		Longitud tubo	338
Diámetro central	47,625		Diámetro exterior tubo	323,8
Diámetro chumacera	30		Diámetro interior tubo	302
			Radio interior del tubo	151
			Longitud abertura	280
Entrada-descarga			Aleta de bronce	
Dimensión interna	280		Ancho	300,6
Dimensión externa	430		Alto	38,1
Diámetro de agujeros	14,2875		Espesor	9,525
Espesor de platina	15,875		Número de agujeros	8
Agujeros por costado	3		Diámetro de agujeros	11,1125

Lo mostrado en la parametrización de la hoja de Excel anterior se refleja inmediatamente en el ensamble principal de la válvula rotativa como se puede observar en la siguiente figura:

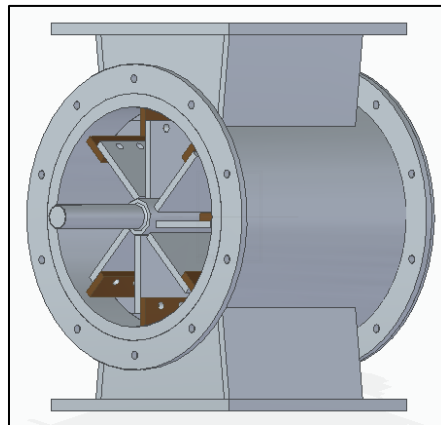


Figura 22. Válvula parametrizada

Selección de accesorios:

Para la válvula rotativa se realizó la selección del motorreductor de la marca SEW, de referencia R37DRN71MK4 y se especificó al vendedor la velocidad de rotación de 36 RPM para que se cumpla con la capacidad por hora.

Características	Valor	Unidad	Factor de duración	S1-100%	
Velocidad nominal del motor	1730	1/min	Clase eficiente	IE3	
Velocidad de salida	36	1/min	Eficiencia (50/75/100% Pn)	74,28 / 77,71 / 78,5	%
Índice de reducción total	48,08		Mercado CE	Si	
Par de salida	98	Nm	Tensión del motor	230/460	V
Factor de servicio SEW-FB	2,00		Esquema de conexionado	R76	
Posición de montaje	M1		Frecuencia	60	Hz
Pintura imprimación/CapaFinal	7031 Gris azulado (51370310)		Corriente nominal	1,84 / 0,92	A
Posición de conexión/caja de bornas	270	*	Cos Phi	0,62	
Entrada de cable/ Posición del conector	X		Clase de aislamiento	155(F)	
Eje de salida	25x50	mm	Tipo protección del motor	IP55	
Salida de carga radial permitida a n=1750	5250	N	Requisito del diseño	IEC60034 (sin CE)	
Cantidad de lubricante 1er reductor	0,3	Litro	Momentos de inercia de masa (en referencia al lado de entrada)	7,00	10 ⁻⁴ kgm ²
Potencia del motor	0,37	kW	Peso neto	18	Kg

Figura 23. Selección motorreductor 36 RPM [11]

En los extremos de la válvula rotativa se van a instalar rodamientos SKF 6006-2RS1 con protector para polvo.

DATOS DEL CÁLCULO		
Capacidad de carga dinámica básica	C	13.8 kN
Capacidad de carga estática básica	C ₀	8.3 kN
Carga límite de fatiga	P _u	0.355 kN
Velocidad límite		8 000 r/min
Factor de carga mínima	k _r	0.025
Factor de cálculo	f ₀	15

SKF 6006-2RS1

Figura 24. Selección de rodamientos

La válvula rotativa se diseña de tal forma que tenga paletas de bronce para que hagan buen sello con la carcasa de dicha válvula, ya que, en la válvula rotativa se debe garantizar el sello para

que no existan despresurizaciones en el filtro y a su vez, la válvula pueda rotar para extraer al exterior el material entregado por el tornillo sinfín.

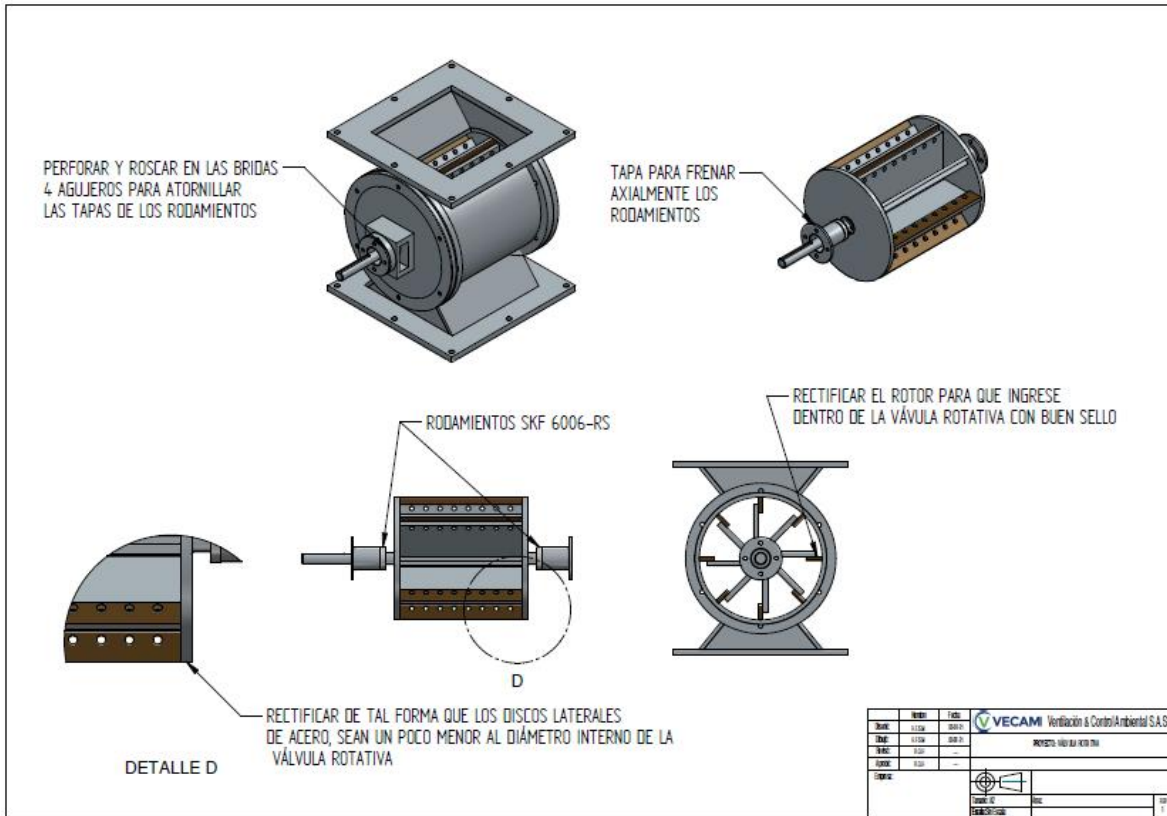


Figura 25. Esquema general de la válvula rotativa

VII. CONCLUSIONES

Con los cálculos realizados para el diseño de un sistema de captación de polvos se asegura lo siguiente:

- Tener un sistema de filtración, el cual, pueda instalarse a la línea de ventilación existente con el objetivo de retener partículas finas de polvo que no sean emitidas al ambiente, cumpliendo así con las normativas vigentes de emisión de contaminante. Además, con el dimensionamiento realizado del filtro de mangas, se espera garantizar la filtración de 2040 kg/h de polvo y virutas generadas por la línea de lijado y corte, con el objetivo de captar el material y darle un aprovechamiento como combustible para producción de vapor utilizado en diferentes procesos que tiene la compañía de aglomerados.
- El diseño del tornillo sinfín para la descarga de material filtrado, se realizó de tal forma que sea capaz de mover la cantidad de material que se requiere captar por hora, teniendo en cuenta factores como el porcentaje de carga del tornillo considerando los diversos factores que pueden tener influencia en la reducción de la capacidad calculada del tornillo, con esto, se asegura un diseño ajustado a lo que realmente se maneja en la producción de polvo.
- Se le dio a conocer a los demás ingenieros de la empresa los estándares ANSI/CEMA que rigen el diseño de tornillos sinfín para el cálculo y dimensionamiento siguiendo medidas estandarizadas, esto ayuda mucho, debido a que en la búsqueda de información se consiguen catálogos de diseño de fabricantes que siguen también el estándar ANSI/CEMA 350 y ANSI/CEMA 300, por lo que, es mejor tener los documentos del ANSI/CEMA ya que en estos se abarcan gran cantidad de casos para el diseño de tornillos transportadores con múltiples configuraciones.
- En el diseño de la válvula rotativa se realizó un programa paramétrico en EXCEL para tener diferentes tamaños y capacidades, dependiendo de lo requerido, con tan sólo hacer una breve selección se tiene una actualización completa del diseño en

SOLID EDGE ST10 para la impresión de los planos de fabricación. Esto facilita y estandariza la producción de válvulas rotativas cuando se requieran, lo que es una gran herramienta que va a quedar para su uso y va a reducir los tiempos de producción para la realización de los proyectos que requieran filtración.

VIII. REFERENCIAS

- [1] V. y D. T. El Ministerio de Ambiente, “Resolucion 909,” *D. Of. No. 47.051*, pp. 1–36, 2008.
- [2] P. Li, N. Wang, H. Si, and J. Chang, “Feeding characteristics of a novel double-bin pneumatic feeder of biomass particles,” *Powder Technol.*, vol. 363, pp. 735–744, 2020, doi: 10.1016/j.powtec.2020.01.030.
- [3] J. Dai and J. R. Grace, “Biomass granular screw feeding: An experimental investigation,” *Biomass and Bioenergy*, vol. 35, no. 2, pp. 942–955, 2011, doi: 10.1016/j.biombioe.2010.11.026.
- [4] “Ángulo de reposo de los materiales.,” 2021, [Online]. Available: <https://www.cuevadelcivil.com/2017/05/angulo-de-reposo-de-los-materiales.html>.
- [5] “Estudio de las propiedades de flujo de sólidos pulverulentos y granulados empleados en la elaboración de formas farmacéuticas sólidas de administración oral,” 2021. [https://riull.ull.es/xmlui/bitstream/handle/915/19338/Estudio de las propiedades de flujo de solidos pulverulentos y granulados empleados en la elaboracion de formas farmaceuticas solidas de administracion oral..pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://riull.ull.es/xmlui/bitstream/handle/915/19338/Estudio%20de%20las%20propiedades%20de%20flujo%20de%20solidos%20pulverulentos%20y%20granulados%20empleados%20en%20la%20elaboracion%20de%20formas%20farmaceuticas%20solidas%20de%20administracion%20oral..pdf?sequence=1&isAllowed=y).
- [6] Z. Miao, T. E. Grift, A. C. Hansen, and K. C. Ting, “Flow performance of ground biomass in a commercial auger,” *Powder Technol.*, vol. 267, pp. 354–361, Nov. 2014, doi: 10.1016/J.POWTEC.2014.07.038.
- [7] P. M. S. David, J. Jerry, “Fabric Filter Operation Review.” p. 33.
- [8] P. M. S. David, J. Jerry, “Fabric Filter Design Variables Lesson 3,” pp. 1–14.
- [9] Conveyor Equipment Manufacturers Association. Screw Conveyor Engineering Committee, Conveyor Equipment Manufacturers Association, and American National Standards Institute., *Screw conveyors for bulk materials*. .
- [10] C. de bronces y Metales, “Bronces fosforados,” [Online]. Available: [http://www.centralbroncesymetales.com/Bronces fosforados.html](http://www.centralbroncesymetales.com/Bronces%20fosforados.html).
- [11] S. Eurodrive, “Reductores SEW EURODRIVE,” 2022, [Online]. Available: https://www.tecnicaindustriale.es/seweurodrive/?gclid=CjwKCAjwrqqSBhBbEiwAlQeqGjTV-CxDWb-Nxu6sZXtDw0I7WjEZ1EDdKYEhaijpt3zb5jPVv7lFEhoCVxkQAvD_BwE.
- [12] P. M. S. David, J. Jerry, “Bag Cleaning Lesson 2,” pp. 1–18.

- [13] Molinder, R., & Wiinikka, H. (2015). Feeding small biomass particles at low rates. *Powder Technology*, 269, 240-246.
- [14] Falk, J., Berry, R. J., Broström, M., & Larsson, S. H. (2015). Mass flow and variability in screw feeding of biomass powders—Relations to particle and bulk properties. *Powder Technology*, 276, 80-88.
- [15] Chuayboon, S., Abanades, S., & Rodat, S. (2019). Insights into the influence of biomass feedstock type, particle size and feeding rate on thermochemical performances of a continuous solar gasification reactor. *Renewable Energy*, 130, 360-370.
- [16] Fernandez, J. W., Cleary, P. W., & McBride, W. (2011). Effect of screw design on hopper drawdown of spherical particles in a horizontal screw feeder. *Chemical engineering science*, 66(22), 5585-5601.
- [17] Xu, G., Li, M., & Lu, P. (2020). Experimental investigation on flow properties of biomass and pulverized coal binary powder mixtures. *Chemical Engineering Communications*, 1-13.