

PROYECTO DE MODIFICACIÓN DEL CIRCUITO DE
RECUPERACIÓN DE POLVOS EN ETAPA DE
DESPACHO DE UNA FÁBRICA DE CEMENTO



LILEN ALEJANDRA BRUNI

PROYECTO INTEGRADOR PROFESIONAL

Presentado a la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional del Comahue
como requisito para la obtención del grado de
INGENIERA MECÁNICA

Neuquén - Argentina

AÑO 2024

**PROYECTO DE MODIFICACIÓN DEL CIRCUITO DE
RECUPERACIÓN DE POLVOS EN ETAPA DE
DESPACHO DE UNA FÁBRICA DE CEMENTO**

LILEN ALEJANDRA BRUNI

Director: Ing. **MARIO TROFFÉ**

Presentado a la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional del Comahue
como requisito para la obtención del grado de
INGENIERA MECÁNICA

Neuquén - Argentina

AÑO 2024

**PROYECTO DE MODIFICACIÓN DEL CIRCUITO DE
RECUPERACIÓN DE POLVOS EN ETAPA DE
DESPACHO DE UNA FÁBRICA DE CEMENTO**

LILEN ALEJANDRA BRUNI

Aprobado en fecha X de XXXXX de 2024

Tribunal examinador:

- Ing. Rocío Garrido
- Ing. Néstor García
- Ing. Leandro Ramoska

AGRADECIMIENTOS

A mi familia, por el apoyo incondicional.

A Facu por el acompañamiento en esta última parte.

A Raúl y Marcelo por los recursos y charlas técnicas compartidas.

Al Ing. Mario Troffé por la confianza y el apoyo brindado a lo largo del trabajo.

A los docentes de la carrera de Ingeniería Mecánica de la Universidad Nacional del Comahue por brindar una educación de excelencia.

PROYECTO DE MODIFICACIÓN DEL CIRCUITO DE RECUPERACIÓN DE POLVOS EN ETAPA DE DESPACHO DE UNA FÁBRICA DE CEMENTO

Autor: LILEN ALEJANDRA BRUNI

Director: Ing. MARIO J. TROFFÉ

Resumen

Palabras clave: Industria cementera, optimización de procesos, filtro de mangas, pérdidas de carga.

La competitiva industria cementera del país requiere la optimización de sus procesos y sus equipos. Este trabajo propone una modificación al proceso de despacho que permite aumentar la producción de una fábrica de cemento. La metodología utilizada se basó en la recolección de información en campo, relevamiento de equipos y datos de la operación. Luego, se investigó sobre las tecnologías existentes para resolver el problema de la filtración de material particulado en una corriente de aire. Se realizó el cálculo de la pérdida de carga a través del sistema de filtración y finalmente se seleccionaron los equipos y componentes que dan solución a la situación planteada. Se diseñó un plan de mantenimiento acorde a los equipos involucrados y su contexto operativo. Finalmente, se concluyó en la viabilidad del proyecto. Mediante el análisis de tiempos y con datos de productividad de la Máquina Rotativa se pudo demostrar que el beneficio obtenido era el esperado: aumento en la producción a un costo razonable.

PROJECT FOR MODIFICATION OF THE DUST RECOVERY CIRCUIT IN THE DISPATCH STAGE OF A CEMENT FACTORY

Author: LILEN ALEJANDRA BRUNI

Advisor: Ing. MARIO J. TROFFÉ

Summary

Keywords: Cement industry, process optimization, bag house, pressure losses.

The competitive cement industry in the country requires the optimization of its processes and equipment. This work proposes a modification to the dispatch process that allows increasing the production of a cement factory. The methodology used was based on field data collection, equipment survey, and operation data. Then, existing technologies were investigated to solve the problem of particulate matter filtration in an air stream. The pressure loss calculation was performed through the filtration system, and finally, the equipment and components that solve the situation were selected. A maintenance plan was designed according to the involved equipment and its operational context. Finally, the project's feasibility was concluded. Through time analysis and productivity data from the Rotary Machine, it was demonstrated that the obtained benefit was as expected: increased production at a reasonable cost.

Índice

Índice de figuras	3
Índice de tablas	5
1. INTRODUCCIÓN	6
1.1. Reseña de la industria del cemento	6
1.2. Organización del trabajo	8
2. OBJETIVOS Y ALCANCE	9
2.1. Motivación del trabajo	9
2.2. Objetivos	9
2.2.1. Objetivo General	9
2.2.2. Objetivos específicos	9
2.3. Alcance	9
2.4. Aspectos generales y funcionamiento de la instalación	10
2.4.1. Descripción del funcionamiento de la instalación actual	10
2.4.2. Descripción de la situación problemática	16
2.4.3. Propuesta de modificación de la operatoria actual	17
3. MARCO TEÓRICO	19
3.1. Metodología proyectual	19
3.2. Conceptos de ventilación	20
3.2.1. Fundamento de diseño	21
3.3. Sistema de ventilación industrial	23
3.3.1. Método de diseño	25
3.4. Sistemas de captación	25
3.5. Sistema de conductos	28
3.5.1. Velocidad de transporte	28
3.5.2. Diámetro y velocidad real	28
3.5.3. Caída de presión en conductos	29
3.5.4. Caída de presión en accesorios	30
3.6. Dispositivos de limpieza	31
3.7. Filtro de mangas	32
3.7.1. Mecanismos de recolección de partículas	34
3.7.2. Tipos de telas y sus características	34
3.7.3. Método de limpieza	35
3.7.4. Relación gas-tela	37

3.8. Ventilador	39
4. CÁLCULOS Y CRITERIOS PARA SELECCIÓN DE EQUIPOS	41
4.1. Datos preliminares	41
4.2. Fuentes de emisión del sistema	43
4.2.1. Campana de captación	43
4.3. Pérdidas en accesorios y conductos	44
4.4. Dimensionamiento de calderería	47
4.5. Dimensionamiento del filtro de mangas	48
4.5.1. Velocidad del frente	48
4.5.2. Dimensionado de mangas	51
4.5.3. Cantidad de mangas	51
4.5.4. Caída de presión en el filtro	51
4.6. Ubicación del filtro de mangas	52
4.7. Selección del ventilador	54
4.7.1. Rendimiento del ventilador	58
5. PLAN DE MANTENIMIENTO	60
5.1. Componentes básicos del plan de mantenimiento	60
5.1.1. Tipo de mantenimiento	60
5.1.2. Estado de la instalación	62
5.1.3. Tipo de tarea	62
5.1.4. Frecuencia	63
5.2. Planes de mantenimiento por equipo	63
6. ANÁLISIS DE VIABILIDAD	70
7. CONCLUSIONES	74
8. ANEXO I	76
8.1. Datos de consulta	76
Referencias	82

Índice de figuras

1.	Proceso de fabricación del cemento. (Rueda 2020)	7
2.	Circuito completo - etapa despacho.	12
3.	Disposición actual de equipos críticos del circuito de despacho.	14
4.	Fluidor típico. (Filtex, 2023)	15
5.	Esquema de un elevador de cangilones típico. (Lochamp, 2024)	15
6.	Diagrama de flujo de las etapas del proyecto.	19
7.	Esquema de la instalación de un filtro de mangas con sus elementos típicos (Ziebtex, 2024).	33
8.	Mangas sometidas a sacudido mecánico (Billings and Wilder, 1970).	36
9.	Sección transversal de una cámara tipo Pulse Jet (Billings and Wilder, 1970).	38
10.	Relacion gas-tela (Unidades dadas en $[(\text{pie}^3/\text{min})/\text{pie}^2])$, (Mussatti, 2002).	39
11.	Relevamiento del circuito de despolvamiento por piso.	42
12.	Identificación de puntos de extracción.	43
13.	Forma de las campanas de captación.	45
14.	Trazado actual de cañerías.	46
15.	Secuencia de montaje de manga con fijación tipo <i>Snap Band</i> (VENTEC, 1999).	50
16.	Modelos de filtros de mangas.	52
17.	Ubicación del nuevo filtro de mangas.	53
18.	Zonas de operación de la serie EU-EUM-MPR (Euroventilatori, 2006).	55
19.	Ventilador serie EU (Euroventilatori, 2006).	56
20.	Tabla de características serie EU-EUM (Euroventilatori, 2006).	57
21.	Plan de mantenimiento del filtro de mangas y del ventilador.	61
22.	Tareas para el plan de mantenimiento del filtro de mangas.	64
23.	Tareas para el plan de mantenimiento del filtro de mangas (Continuación).	65
24.	Tareas para el plan de mantenimiento del filtro de mangas (Continuación).	66
25.	Tareas para el plan de mantenimiento del ventilador.	67
26.	Tareas para el plan de mantenimiento del ventilador (Continuación).	68
27.	Tareas para el plan de mantenimiento del ventilador (Continuación).	69
28.	Análisis de tiempos para obtener la disponibilidad de la Máquina Rotativa.	70
29.	Datos de disponibilidad y productividad de la Máquina Rotativa para los cálculos.	70
30.	Datos de costos variables.	71
31.	Estimación de los costos de mano de obra.	71
32.	Estimación de los costos del proyecto.	72
33.	Balance del proyecto.	73
34.	Pérdidas a la entrada de la campana y coeficiente de entrada (Londoño, 2021).	76

35. Pérdida de carga en conductos circulares rectilíneos en función del caudal y el diámetro (Escoda, 2002).	77
36. Factor de corrección para rugosidades vs. velocidad y diámetro de cañería (Londoño, 2021).	78
37. Coeficiente de pérdida por fricción para codo a 90° de sección circular (Londoño, 2021).	79
38. Coeficiente de pérdida por fricción para codos de sección circular (ACGIH, 1998).	79
39. Coeficiente de pérdida por fricción para unión de ramales (Londoño, 2021).	79
40. Caudal de aire a utilizar por equipo (Holcim, 2005).	80
41. Características para distintos tipos de telas (Tomadoni, 2022).	81

Índice de tablas

1.	Posibilidades de despacho y sus limitaciones actuales.	16
2.	Ventajas e inconvenientes de cada método de diseño para pérdidas de carga (ACGIH, 1998).	26
3.	Valores recomendados para la velocidad de captación (Londoño, 2021).	27
4.	Factores de dispersión (Londoño, 2021).	27
5.	Equipos y tamaño de partícula filtrada.	31
6.	Comparativa equipos de filtración	32
7.	Factor de aplicación para telas (Londoño, 2021.)	40
8.	Datos característicos del proceso.	41
9.	Detalle de operaciones.	44
10.	Datos para el diseño de las campanas de captación.	44
11.	Datos y pérdida de carga en accesorios.	45
12.	Datos de conducciones rectas.	47
13.	Pérdida de carga en tramos rectos.	47
14.	Espesores de chapa.	48
15.	Datos para dimensionar las campanas de captación.	48
16.	Datos para dimensionar los conductos.	49
17.	Interpolación lineal para n=2900 rpm.	56

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Reseña de la industria del cemento

La actividad ligada a la fabricación de cemento es tan antigua como la actividad industrial del hombre, data desde la Edad Antigua (9000 AC) teniendo su auge de desarrollo en la Edad Contemporánea (1900 DC). Se evidenciaba ya varios siglos A.C. el uso de distintos morteros y construcciones de hormigón perfeccionados de forma empírica a lo largo del tiempo hasta llegar a lo que se denomina Era de los Descubrimientos en el 1700, donde se formalizan las investigaciones y surgen las primeras patentes. A comienzos del 1800 se yergue la primera fábrica de cemento en Inglaterra, y en 1845 se lanza la producción en escala industrial por Isaac Johnson, logrando temperaturas suficientemente altas para lograr la clinkerización de la arcilla y la caliza, empleadas como materia prima. Luego de 1860 se introducen distintos métodos para evaluar la aptitud de los cementos fabricados. Se publica, además la primera norma británica BS 12 y la norteamericana ASTM C9. Ya en el 1900 aparecen las primeras bolsas de papel para cementos, surgen nuevas normas que sientan las bases para las normas actuales y se desarrollan nuevas tecnologías para los hornos. Auguste Perret realiza sus primeras estructuras de hormigón armado en París y se inaugura el Canal de Panamá (1914) como la primera mega estructura realizada en hormigón. En la Era Contemporánea, es decir desde 1940 hasta la actualidad, se introducen mejoras a los procesos de fabricación y se perfeccionan técnicas para ensayos químicos. En 1960 aparece el análisis químico por fluorescencia de Rayos-X (XFR). En 1980 surgen los separadores de alta eficiencia para la molienda de cemento y se desarrolla el proceso de precalcinación, contribuyendo esto a la reducción de los grandes consumos energéticos en el proceso de alta temperatura. En la primera década del 2000 se focaliza en el control de emisiones de la combustión multietapa y se popularizan los controles automáticos para hornos de cemento.

Hoy en día se usa el cemento Portland, el cual puede definirse como: “aglomerante hidráulico obtenido como producto en fábrica de cemento y que contiene el Clinker Portland como ingrediente necesario” según (Rueda 2020). Es un material inorgánico finamente dividido que, mezclado con agua, forma una masa pastosa que endurece en virtud de las reacciones de los procesos de hidratación y que, una vez endurecido conserva su resistencia y estabilidad, incluso debajo del agua (Rueda 2020).

El proceso comienza con la explotación de la cantera de caliza, seguidamente la roca sufre distintas trituraciones hasta lograr una granulometría de unos 20-25 mm de diámetro. Luego las materias primas seleccionadas se muelen en un molino para obtener la harina cruda. Este es el producto base que ingresa a los grandes hornos rotativos y que, luego de calcinado, se obtiene el clinker. El Clinker Portland, como se dijo, se obtiene por la calcinación hasta la fusión parcial (clinkerización) de mezclas íntimas (denominadas crudas) preparadas artificialmente y convenientemente dosificadas a partir de calizas y arcillas, con el agregado de otros materiales en menor proporción que no

aportan elementos extraños a la composición normal del cemento. Estas mezclas determinan las composiciones de los crudos deseados en cada caso.

En el esquema de la Figura 1 se pueden ver las etapas que transforman a los materiales.

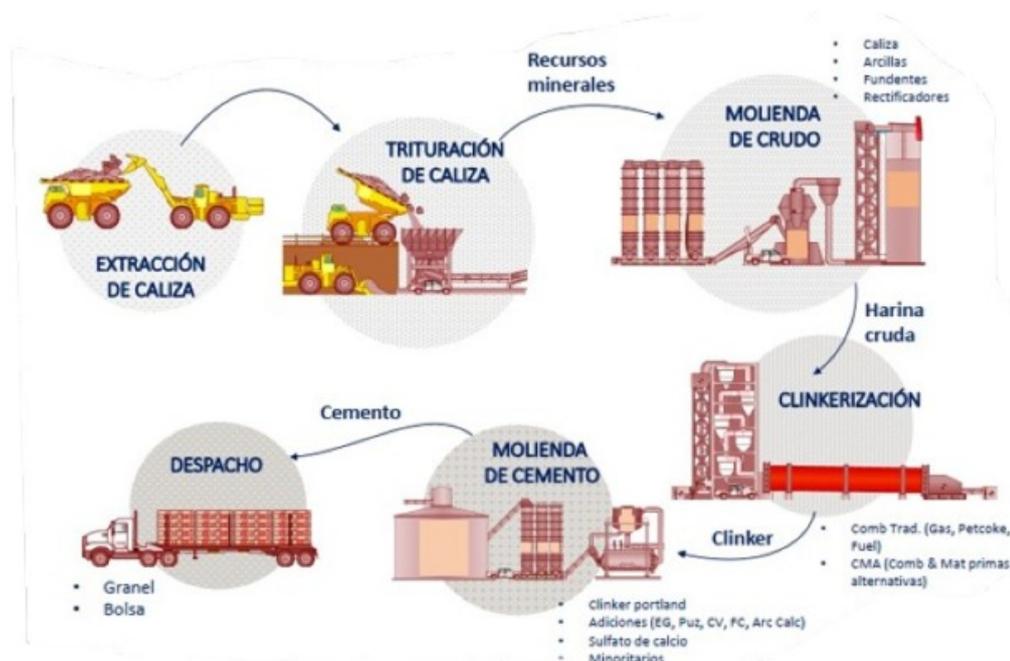


Figura 1: Proceso de fabricación del cemento. (Rueda 2020)

El proceso de fabricación del cemento se divide normalmente en dos etapas, a saber: Calcinación y Molienda. Someramente, cada etapa consiste en:

Etapa 1: Calcinación de una mezcla de carbonato de calcio (caliza) y uno o más materiales que contengan silicio, aluminio y hierro (usualmente arcillas, esquistos, hematita, arena u otros). Este tratamiento térmico consiste en el calentamiento de la harina cruda por encima de los 1200°C, sufre transformaciones que modifican su estructura y posterior enfriamiento del producto resultante.

Etapa 2: Molienda del producto resultante del proceso de calcinación, el clinker, con aproximadamente del 2% al 5% de yeso para producir el cemento.

Luego de la molienda ya se cuenta con el producto terminado. El cemento con sus especificaciones se deriva a almacenamiento o directamente a la etapa de despacho para ser enviado al cliente. Las formas convencionales de despacho son, a granel en camiones o vagones de tren, o en bolsas de 50 o 40 kilogramos dependiendo del producto.

La creciente población tanto a nivel mundial como local, exige un aumento en la producción y despacho de cementos para construcciones (edificios, rutas, represas, entre otros). Acompañando esa creciente demanda, se pretende en este trabajo desarrollar una modificación que permite optimizar el circuito productivo de una planta cementera de la República Argentina.

1.2. Organización del trabajo

A continuación, se muestra cómo se estructura el presente trabajo. Se describe el contenido de cada capítulo y cuál es el objetivo del mismo.

- Capítulo 1: Introducción, breve reseña de la historia del cemento.
- Capítulo 2: Definición de los objetivos y del alcance del trabajo. Descripción de aspectos generales de la instalación y delineamiento del problema que busca resolverse.
- Capítulo 3: Se describe el marco teórico que sustenta el trabajo. Consiste en búsqueda y recopilación bibliográfica respecto a sistemas de filtrado y selección de equipos asociados a la filtración de aire industrial.
- Capítulo 4: En este capítulo se plasman los cálculos realizados y criterios aplicados para la selección de los equipos que dan solución a la situación problemática planteada en el Capítulo 2.
- Capítulo 5: Aquí se describen los aspectos básicos que debe cubrir un plan de mantenimiento de acuerdo a las condiciones de operación de la planta de las características que se describen en este trabajo.
- Capítulo 6: Se realiza un análisis básico de la viabilidad del proyecto.
- Capítulo 7: Conclusiones y nivel de mejora respecto de la instalación original.

2. OBJETIVOS Y ALCANCE

2.1. Motivación del trabajo

Este trabajo surge como necesidad del aprovechamiento de la capacidad instalada de una fábrica de cemento. Esta necesidad se sustenta en una demanda insatisfecha del mercado. Se pretende un análisis crítico de la situación actual de la planta industrial para identificar oportunidades de mejora. Para lo cual, se estudia la planta industrial en condiciones de funcionamiento normal y a partir de allí se definen los parámetros que servirán como punto de partida para plantear las mejoras correspondientes. El objetivo es maximizar la producción de cemento liviano (CL) a expensas de que el beneficio obtenido justifique la inversión económica.

2.2. Objetivos

Para llevar a cabo este trabajo es que se plantean una serie de objetivos, generales y particulares, que se exponen a continuación.

2.2.1. Objetivo General

Realizar la ingeniería conceptual del proyecto de modificación y adecuación de la instalación industrial para aumentar la producción de forma eficiente y sin generar polución.

2.2.2. Objetivos específicos

- Recolección de datos prácticos.
- Recopilación bibliográfica sobre métodos de transporte de cemento y tratamiento del mismo.
- Definir aspectos técnicos de la modificación planteada; capacidad requerida y consideraciones de diseño.
- Selección de equipos.
- Análisis de viabilidad de la propuesta.
- Desarrollo de planes de mantenimiento preventivo.
- Informe final.

2.3. Alcance

A lo largo de este informe se describen las actividades que se han realizado con el fin de cumplimentar los objetivos propuestos. El alcance de dichas actividades es tal que permite realizar la selección del equipo de filtrado de aire y partículas y definir los parámetros mínimos de operación.

A continuación, se describe el alcance pretendido de las diferentes tareas necesarias para definir la ingeniería básica del sistema planteado:

- Relevamiento del circuito actual y descripción del funcionamiento del mismo.
- Definir las modificaciones necesarias para lograr la optimización propuesta del proceso, específicamente en la etapa de despacho.
- Se realizan los cálculos que permitirán seleccionar los equipos adecuados para tal fin.
- Se define el sistema de filtrado.
- Se definen condiciones de presión y caudal de material que debe circular por los conductos, esto deja delineado, para una etapa posterior, las especificaciones para la selección de componentes necesarios para la operación y control del proceso (por ejemplo, diferentes tipos de válvulas).
- Se realizan cálculos de aire requerido para transporte y limpieza.
- Se realizan cálculos de calderería.
- Se seleccionan motores eléctricos y ventiladores.
- Se definen planes de mantenimiento estándar y generales para los equipos seleccionados. Las frecuencias y recursos asignados a inspecciones y mantenimiento deberán ser ajustadas según el contexto operativo oportuno.
- Se realiza un análisis de tiempos y costos de producción con el objetivo de valorizar el proyecto y analizar su viabilidad, es decir, que la modificación tenga un costo razonable dentro de un período de tiempo aceptable.

2.4. Aspectos generales y funcionamiento de la instalación

Con el objetivo de identificar claramente los aspectos esenciales del proceso que se quiere optimizar, es que se procede a dar una descripción detallada de los elementos constituyentes y su interacción, para así poder, identificar los puntos limitantes o “cuellos de botella” que dan lugar a este proyecto.

2.4.1. Descripción del funcionamiento de la instalación actual

En este apartado se describen los elementos constituyentes de la instalación, en particular aquellos que son relevantes para este trabajo y la interacción entre los mismos.

Como punto de partida se tiene el *molino de cemento liviano*, el cual es un molino horizontal de bolas con una capacidad de producción de 30 toneladas/hora. La disponibilidad actual es de 160

horas/semana con lo que, con una relación de marcha del 100 % y en condiciones ideales, resultaría en una producción de 4800 toneladas/semana.

Las materias primas, luego de atravesar el camino tortuoso impuesto por el funcionamiento del molino, abandonan el mismo por el conducto de salida hacia un separador del tipo estático. Si el tamaño de partícula es adecuado sigue su camino hacia los silos de almacenamiento, caso contrario, retornan al molino. Los movimientos que realizan los productos en su proceso de transformación son provocados por una corriente de aire con la energía suficiente para transportar el volumen de material que se está procesando en cada momento. Este flujo de aire es generado por un gran ventilador del tipo radial.

La parte del proceso que hasta aquí se describe, en la actualidad se utiliza muy pocas horas a la semana, lo que se podría expresar con un factor de utilización del 10 % de acuerdo con la productividad del molino, con lo cual, el sistema se encuentra subutilizado. Esta disponibilidad para poder utilizar este equipo es la que se desea aprovechar.

Cabe aclarar que, en la planta industrial estudiada, además, se dispone de otro molino de similares características destinado a la producción de otros tipos de cementos y es la combinación de producción de estos productos la que determina las hora de marcha de cada molino. Este trabajo solo se enfoca en el aprovechamiento que se le podría dar al molino de cemento liviano.

A lo largo del trabajo se hará referencia a tres productos diferentes que, por comodidad y sin hacer referencia a marcas comerciales, se denominarán como Cemento Común (CC), Cemento Especial (CE) y Cemento Liviano (CL). Además, se dispone de dos líneas o circuitos por los cuales los productos circulan y se referirá a ellos como Línea 1 (L1) y Línea 2 (L2).

La etapa subsiguiente a la descrita en los párrafos anteriores es lo que se denomina *despacho*. En este punto los productos, listos para su comercialización, son almacenados en grandes silos.

En la Figura 2 se muestra un esquema completo del circuito de despacho. Se aprecian los puntos de conflicto identificados como zonas. La primera de estas zonas representa la existencia de dos líneas principales de circulación y tres productos a ser conducidos. La segunda zona posee un filtro de proceso dedicado al despolvamiento de todos los equipos involucrados en el circuito de L2 y de la Máquina Rotativa. Se esquematiza allí también, la necesidad de instalar un nuevo filtro para independizar los circuitos indicados.

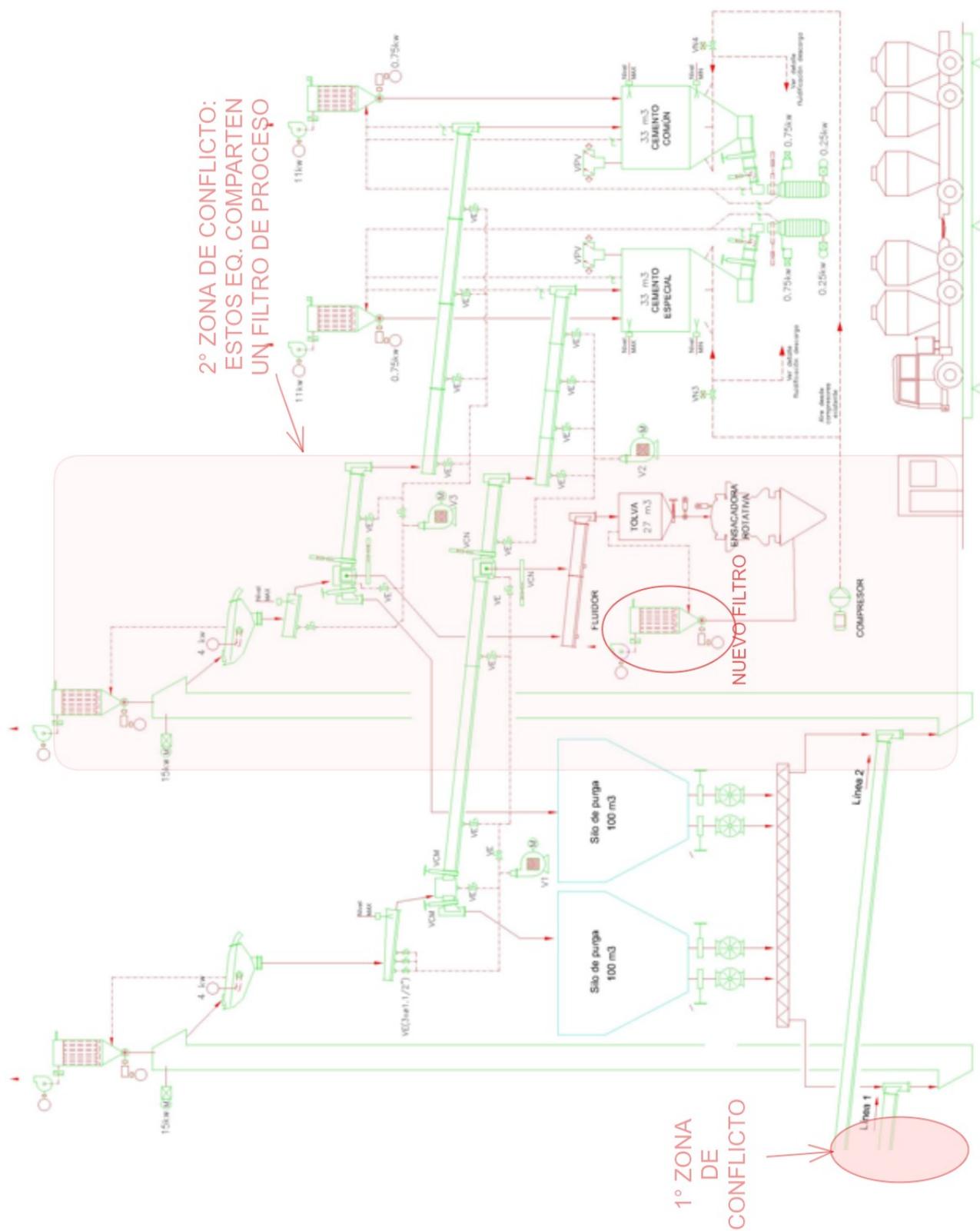


Figura 2: Circuito completo - etapa despacho.

En la Figura 3 se observa un esquema del circuito de despacho que incluye los elementos más representativos del sistema incluyendo los silos de almacenamiento. Es importante identificarlos claramente ya que luego se requerirá conocerlos para tenerlos en cuenta en los cálculos de capacidad del sistema en conjunto. En esta figura se utilizan tres colores diferentes para representar las zonas de pasaje de los distintos productos analizados. A saber: rojo, CE; verde, CC y azul, CL. Este último se superpone en todo el recorrido con el circuito verde (CC) excepto en la vía de despacho a granel ya que el CL se despacha exclusivamente en bolsas.

Como se mencionó anteriormente, se disponen de tres silos de 10 toneladas cada uno para almacenar CL, un silo de 40 toneladas para CE que corresponde a la L1 y un silo de 40 toneladas para CC que corresponde a L2. Las líneas, L1 y L2, hacen referencia a los “camino” que recorre el material hasta ser despachado. A continuación de los silos se encuentran los *fluidores* principales. Como se muestra en la Figura 4, estos consisten en una cámara limpia (sección inferior) y la cámara de transporte (sección superior). Desde la sección inferior se inyecta aire a presión. El efecto de esta presión se transmite a través de una tela permeable que separa dicho recinto de la cámara de transporte. Estos equipos permiten la extracción de material de los silos por medio de la acción de la gravedad asistida neumáticamente.

Luego, el material asciende a niveles superiores por medio de un *elevador de cangilones*. Seguidamente, es transferido a la *zaranda* donde se retienen impurezas como ser, lajas de cemento y partículas de tamaño inadecuado. En la Figura 5 se observa un elevador de cangilones con sus componentes principales: cabezal superior, cabezal inferior o pie, ambas piernas y resbaladeras de carga y descarga.

A continuación de la zaranda el material tiene dos opciones, o seguir hacia el despacho a granel o sufrir una transformación más, dirigiéndose a la Máquina Rotativa (MR) que es la encargada de disponer el material en bolsas de 40 o 50 kilogramos según cual sea el producto que se esté procesando.

El circuito de despacho a granel no merece más atención que lo ya dicho, ya que no constituye una limitante como si lo es el circuito que involucra a la MR.

Siguiendo el circuito de la Figura 3, se observa que se dispone de un tornillo sin fin que cierra el circuito de regreso a los elevadores de cangilones, asegurando el reproceso del material recuperado durante la operación de despacho. El material se recupera del proceso de distintos modos: el más importante, es debido al circuito de aspiración que es el que realiza el **despolvamiento** de los equipos y del circuito en general. Como se muestra en el esquema de la Figura 3 se disponen de dos importantes filtros que prestan función a ambos circuitos. Los Filtros 1 y 2 (F1 y F2, respectivamente) son ambos filtros de mangas pero con distintas tecnologías, a saber: de aire reverso (F1) y tipo “Pulse Jet” (F2). Lo que respecta a las tecnologías filtrantes se describirá en el capítulo siguiente.

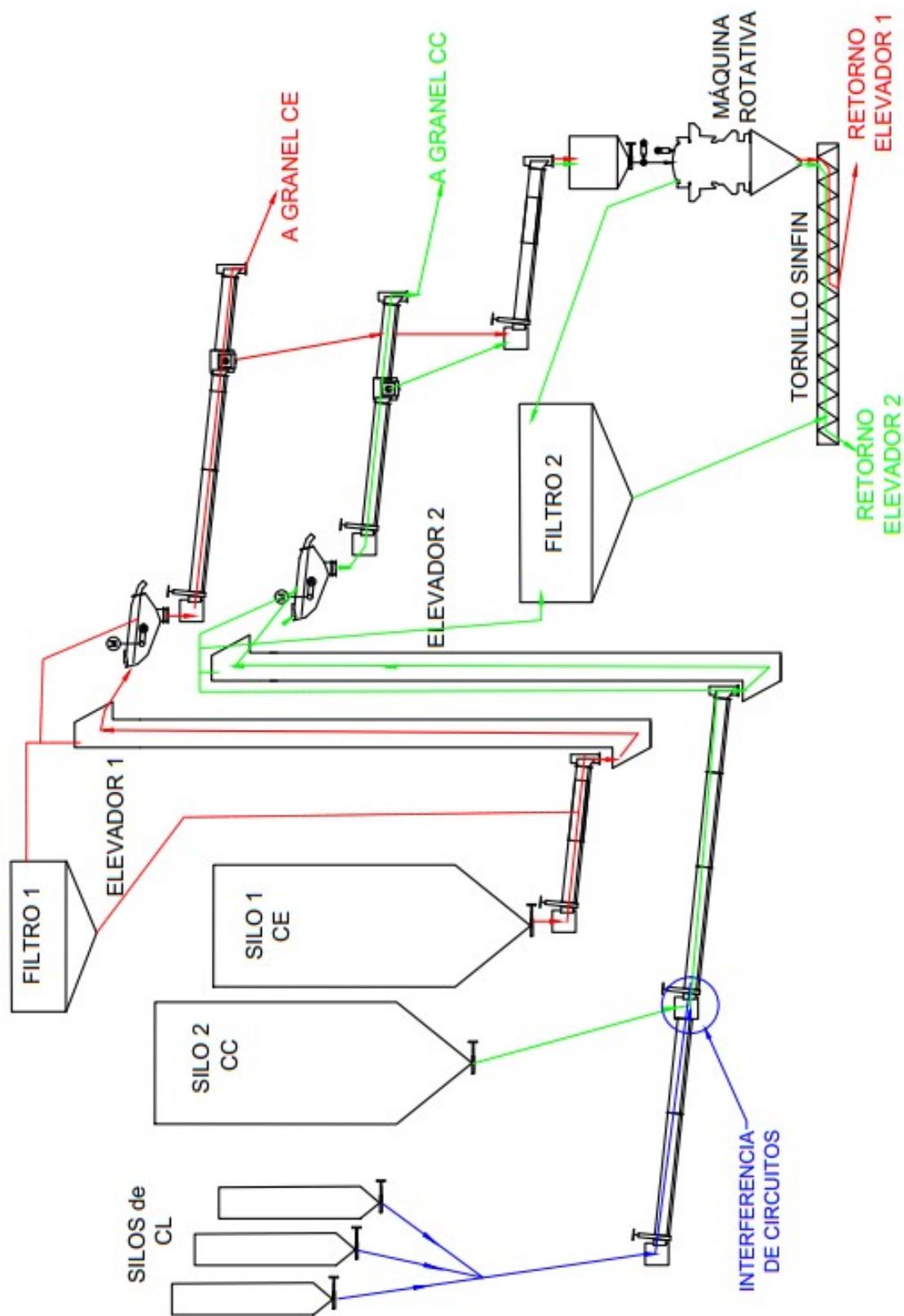


Figura 3: Disposición actual de equipos críticos del circuito de despacho.



Figura 4: Fluidor típico. (Filtex, 2023)

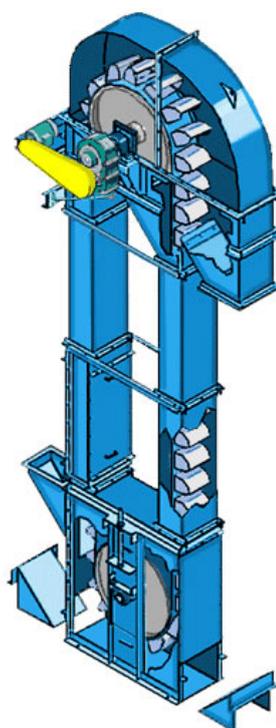


Figura 5: Esquema de un elevador de cangilones típico. (Lochamp, 2024)

2.4.2. Descripción de la situación problemática

Se parte de la necesidad de aumentar la producción del producto llamado CL para lo cual se realiza un análisis de la operatoria actual y se distinguen las dificultades existentes.

Como se aprecia en el esquema de la Figura 3, la interferencia más evidente ocurre sobre el circuito de L2, entre CL y CC, lo que implica la **imposibilidad de producción en simultáneo** de estos productos. Continuando el recorrido, se observa que se dispone de una única MR, con lo cual se puede operar la misma de a un producto por vez.

Para contemplar todos los escenarios posibles se plantea un análisis sistemático de las posibles situaciones que podrían ocurrir con la disposición de circuitos actual. Lo que se busca con este análisis es identificar los puntos de conflicto y tiempos ociosos de la MR, para eventualmente destinarlos al procesamiento de CL. Esto se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1: Posibilidades de despacho y sus limitaciones actuales.

Combinación	Despachando		Limitación actual
	A granel	En bolsas	
1	CC(L2)	CE (L1)	- Superposición en F2 (MR y L2 dependen de F2) -El rechazo de la Zaranda 2 (CC) cae en el sin fin de recupero junto con el rechazo de MR (CE) y retorna al elevador de la L2.
2	CC(L2)	CL (L2)	-Superposición de productos en la L2 (ambos usan la misma línea íntegramente)
3	CC(L2)- CE(L1)	-	-Ninguna limitación. Se despacha a demanda por cada línea según sea necesario.
4	CE (L1)	CC (L2)	-Ninguna limitación. Se despacha a demanda por cada línea según sea necesario.
5	CE (L1)	CL (L2)	-Ninguna limitación. Se despacha a demanda por cada línea según sea necesario.
6	CC(L2)	CC (L2)	- Caudal de material insuficiente para satisfacer al circuito a granel y a la MR simultáneamente. El cuello de botella está en la derivación luego de la zaranda 2 y se tiene una dirección preferencial hacia el granel. Se puede embolsar cuando se ha producido el llenado de la tolva que abastece al granel.
7	CE (L1)	CE (L1)	- Idem combinación 6 pero sobre línea 1.

En la primera columna de la Tabla 1 se numeran las posibles combinaciones de producción que se pueden obtener. En la segunda columna se indica en qué condición se espera obtener un determinado producto, ya sea a granel (cargado a camiones tolvas) o en bolsas (para luego ser palletizado). En esta columna se aclara qué tipo de producto se está procesando y a través de qué circuito lo hace. La última columna describe las interacciones que ocurren entre los circuitos y, en caso de existir, las limitaciones que tendrían.

Del análisis de la Tabla 1 se extraen las siguientes conclusiones:

- La combinación 1 es posible que suceda, su ocurrencia depende del cronograma de producción preestablecido, es decir, es una decisión puramente operativa. No representa un conflicto que en el sin fin de recupero exista superposición de materiales, siempre y cuando no se afecte la calidad del producto.
- La combinación 2 no es posible que suceda ya que ambos productos deben utilizar la misma línea. Esta combinación es de interés ya que, realizando modificaciones al circuito, tiene potencial para producir CL.
- Las combinaciones 3 y 4 son ambas posibles y representan la operación típica, la opción 3 más habitual que la opción 4. Esta condición de marcha representa una gran oportunidad de mejora orientado al objetivo del presente trabajo, ya que la MR dispone de tiempo ocioso durante esta operación.
- La combinación 5 representa el 100 % de la producción actual de CL.
- En cuanto a las combinaciones 6 y 7 su ocurrencia es una decisión operativa.

A partir de estas conclusiones se plantean una serie de propuestas de modificaciones que permitan aumentar la disponibilidad de la MR, con el objetivo de producir más CL. El análisis pormenorizado de cada alternativa no se muestra en este trabajo ya que no es el objetivo del mismo. De lo que sí se trata es sobre la alternativa que permite optimizar la producción, es decir, la opción que redundaría en mayores volúmenes de producto terminado disponibles para el cliente y que no produzca inconvenientes operativos.

2.4.3. Propuesta de modificación de la operatoria actual

La industria cementera del país y del mundo trabaja bajo estrictos estándares de calidad, tanto de calidad de producto como lo que respecta a emisiones en el entorno fabril y al medio ambiente, es por esto que sus procesos y sus equipos deben ajustarse a esta necesidad. Adecuarse a los requisitos de calidad, en una industria tan competitiva, implica optimizar los recursos disponibles sin que esto conlleve riesgos asociados que empañen el trabajo cotidiano. Con esto en mente y con la necesidad creciente de materiales de construcción es que se propone diseñar una modificación al sistema de transporte de producto terminado en la etapa de Despacho, la última etapa del proceso

de fabricación de la planta cementera bajo análisis.

La propuesta consiste en: nuevo filtro de proceso para la Línea 2. Las hipótesis sobre las que se trabajará serán:

- Independizar circuito de L2 con un nuevo filtro de proceso.
- La Línea 2 pasa a ser para suministro exclusivo de CC.
- El suministro de CL será por Línea 1.

Para poner en perspectiva las modificaciones propuestas a continuación, se describe cómo esto impactaría en la nueva operación.

Nueva operación:

- La operación de la MR es controlada por el F2. Esta operación sigue siendo la misma, la diferencia está en que el F2 será ahora, exclusivo para la MR y no se compartirá su uso con la marcha de la L2. La MR sigue descargando al sin fin de recuperero.
- Con la combinación CC granel (por L2) y embolsado de CL (por L1 hacia la MR), el sin fin de recuperero descarga al Elevador 1 (esta es una condición que debe cumplirse para no afectar la calidad del producto).
- Requiere cambio de producto en la L1 según sea la demanda de CL o CE. Esto implica que ante la necesidad de producir alguno de estos dos productos debe realizarse una purga del sistema antes de entrar en régimen. Esto antes ocurría sobre L2.

Para poder llevar a cabo la propuesta de modificación se deben realizar una serie de tareas. Básicamente se las puede resumir en:

Tareas a realizar:

- Elección de tecnología filtrante
- Definir ubicación de filtro nuevo.
- Despolvamientos: estimación del trazado de los nuevos ductos de despolvamiento y cálculos de pérdidas de carga.
- Definir requerimientos para equipos eléctricos.

El avance de las tareas a realizar está condicionado por pautas operativas, disponibilidad de espacio, oferta local de equipos y cuestiones económicas.

3. MARCO TEÓRICO

3.1. Metodología proyectual

Este trabajo se organizará en etapas o fases de un proyecto de ingeniería. A continuación, se describen estas fases. En la Figura 6 se muestra la información en forma de diagrama de flujo, indicando, para cada fase, sus entradas y su salidas.

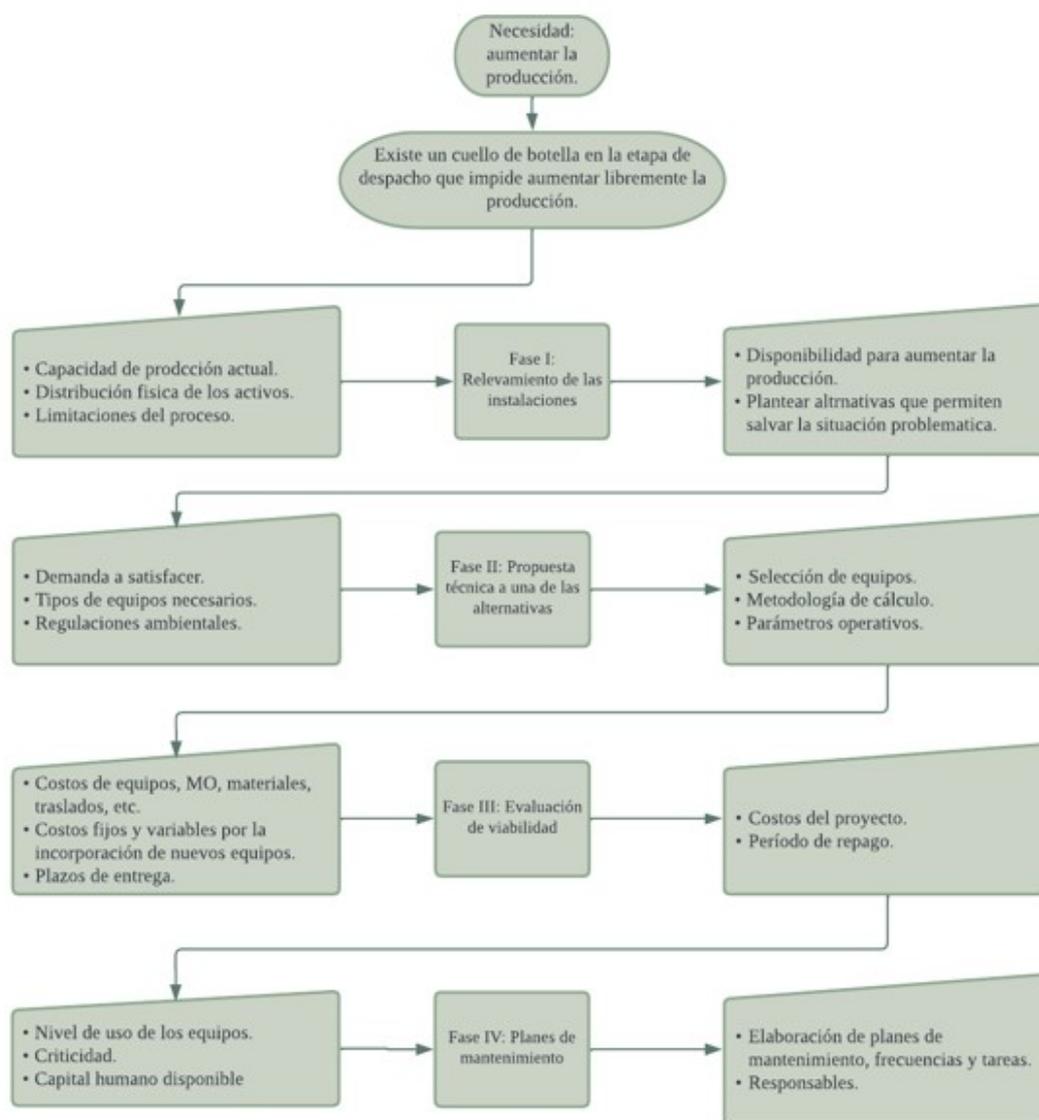


Figura 6: Diagrama de flujo de las etapas del proyecto.

En la fase I, se realizará la Ingeniería Conceptual donde se analizará el circuito de fabricación sobre el cual se intervendrá, realizándose un relevamiento de las instalaciones, capacidad de producción actual e identificando sus limitaciones. Las conclusiones de esta fase estarán asociadas a:

selección de una alternativa al circuito actual que ofrezca la posibilidad de producir más cemento compatibilizando con la operación actual.

En la fase II se desarrollará la propuesta técnica que permitirá lograr los objetivos planteados en la fase anterior. Consistirá en realizar la Ingeniería Básica del proyecto de modificación o adecuación de la instalación industrial para lograr salvar el cuello de botella que sufre el proceso y así poder aumentar la producción de forma eficiente y sin generar contaminación. Se investigará sobre las normas que regulan lo que respecta a emisiones de partículas al ambiente y a las cuales el proceso debe ajustarse para así seleccionar los equipos adecuados a la operación. El objetivo de esta fase se cumple al conocer los nuevos parámetros operativos para seleccionar el tipo y tamaño de equipos de filtración, motores eléctricos, ventiladores, entre otros.

La fase III, será la evaluación de viabilidad de la propuesta técnica, para esto se realizará un análisis de costo-beneficio del proyecto. Se contemplarán los costos de la modificación y los costos fijos y variables del proceso.

Como último paso, la fase IV, se complementará el proyecto con el enfoque de la mantenibilidad, considerando las tareas de intervención a los equipos con el objetivo de realizar inspecciones y/o mantenimientos.

3.2. Conceptos de ventilación

En este apartado se abordarán los conceptos de ventilación tomando como referencia los capítulos 1 y 2 de *Ventilación Industrial* (Londoño, 2021).

Hay dos tipos principales de ventilación: la ventilación general y la ventilación exhaustiva local. La ventilación general busca la renovación y control del aire en la totalidad de un ambiente, mientras que la ventilación localizada trata de crear condiciones particulares en sectores delimitados.

La ventilación general consiste en el ingreso al recinto de un caudal de aire limpio proveniente del exterior, que ha sido calculado para diluir los contaminantes y reducir sus concentraciones a valores por debajo de los límites permisibles. Este tipo de ventilación tiene el inconveniente de que, de existir una fuente de contaminación concreta, el aire esparce el contaminante por todo el local antes de ser captado hacia la salida. Su aplicación está limitada por la toxicidad y por la cantidad de contaminantes generados que, cuando la concentración supera ciertos valores, determinan la necesidad de caudales de aire que no son técnica o económicamente factibles.

Por su parte, la ventilación exhaustiva local es usada para disminuir o prevenir la exposición a los contaminantes. En este tipo de ventilación, el aire contaminado es captado en el mismo lugar o confinado en un espacio delimitado y luego captado, para evitar su difusión por todo el recinto. La ventaja de este método es que remueve los contaminantes en vez de diluirlos. Otra ventaja es que requiere menos cantidad de aire que la ventilación general.

Los sistemas de extracción localizada son los apropiados para la aplicación de este trabajo. De forma general están compuestos por una serie de elementos básicos, a saber:

- Campanas o sistemas de captación, es el dispositivo a través del cual se captura el aire con los contaminantes.
- Sistemas de conductos con sus accesorios (codos, entradas, etc.) para realizar la conducción del fluido hacia los dispositivos de control.
- Equipos de control de flujo.
- Ventilador con su motor y su sistema de transmisión de potencia, para proporcionar la energía necesaria para transportar la corriente de aire y producir el arrastre de partículas.

Existen tres tipos de sistemas de captación: encerramientos (pueden ser de dos tipos, completamente cerrados al exterior o con aberturas de entrada y salida de material), cabinas (el área de la abertura es muy pequeña frente al tamaño del recinto a ventilar), y campanas (las cuales se localizan a cierta distancia y en una determinada posición relativa de la fuente de contaminantes generando una corriente de aire hacia ellas).

El sistema de ductos debe transportar al aire contaminado hacia el dispositivo de limpieza, luego al ventilador y desde allí a la chimenea, por lo tanto, el ventilador debe absorber todas las pérdidas debido a la fricción, a las entradas y demás accesorios del sistema para obtener el caudal de aire necesario.

Los principios de la mecánica de los fluidos tales como la conservación de la masa y la energía gobiernan el flujo de aire en un sistema de ventilación industrial, sin embargo, es importante declarar las simplificaciones con las que se realizan los cálculos:

1. Se desprecia la transferencia de calor debido a que no existe un gran gradiente térmico entre los equipos y los alrededores.
2. Se desprecian los efectos de compresibilidad del aire con partículas. Esto se puede asumir ya que la temperatura y la presión no varían significativamente. En los sistemas de ventilación localizada rara vez se superan los 500 *mm.c.a.* y la temperatura en el orden de los 15-45°C, no afectan de manera significativa la densidad del aire y puede asumirse el fluido como aire puro e incompresible.
3. El aire se asume seco. El ambiente posee muy bajos niveles de humedad y el material es sometido a proceso de secado con lo cual no agrega humedad al sistema.

3.2.1. Fundamento de diseño

Partiendo de la expresión de Bernoulli entre dos puntos, 1 y 2, de un tramo de cañería, sin pérdidas y considerando fluido incompresible, es decir, las densidades del fluido en ambos puntos

son iguales, se cumple:

$$P_1 + \frac{1}{2} \cdot \rho_g \cdot V_{t1}^2 + \rho_g \cdot g \cdot Z_1 = P_2 + \frac{1}{2} \cdot \rho_g \cdot V_{t2}^2 + \rho_g \cdot g \cdot Z_2 \quad (1)$$

Donde:

P_i = Presión estática del fluido en el punto “i” de interés.

ρ_g = Densidad del fluido

V_{ti} = Velocidad de transporte del fluido en el punto “i” de interés.

Z_i = Altitud del sistema en los puntos “i” considerados.

g = Aceleración de la gravedad.

Para cálculos de ventilación exhaustiva local se prefiere el uso del *mm.c.a.* como unidad de medida de energía. En cuanto al término de energía potencial, que es la energía por unidad de volumen que hay que entregarle a la corriente de aire para elevarla una altura z , es compensada con la disminución de la presión atmosférica que se produce al ascender la corriente esa misma altura con lo cual se hace practicamente nulo este término. Como es sabido de la experiencia, el teorema ideal de Bernoulli no se cumple rigurosamente debido a que en los fluidos reales existen pérdidas de energía debido a la fricción, con lo cual, la ecuación de conservación de masa y energía puede expresarse como:

$$P_1 + \frac{1}{2} \cdot \rho_g \cdot V_{t1}^2 = P_2 + \frac{1}{2} \cdot \rho_g \cdot V_{t2}^2 + h_f \quad (2)$$

Donde:

h_f = pérdidas de energía por fricción.

Del teorema de Bernoulli se desprende que la presión total es la suma algebraica de la presión estática y la presión debido a la velocidad o presión dinámica:

$$P_T = P_e + P_d \quad (3)$$

Donde, P_e , presión estática, es la presión que tiende a comprimir o expandir el fluido y la P_d , presión dinámica es la presión que se requiere para acelerar el fluido desde el reposo hasta una determinada velocidad.

La presión total puede ser positiva o negativa con respecto de la presión atmosférica ya que es una medida del contenido energético de la corriente de aire y siempre disminuye a medida que el aire se mueve a través del conducto, solo aumenta cuando pasa a través de un ventilador.

En cuanto a la presión dinámica, se mide con un tubo Pitot y permite calcular la velocidad de transporte de una corriente de aire en un conducto. De la bibliografía consultada, (Londoño,

2021), la velocidad promedio de transporte de la corriente se relaciona con la presión dinámica a través de la ecuación de Bernoulli según:

$$V_t = K_p \cdot C_p \cdot \sqrt{\frac{P_d \cdot T}{P_T \cdot M}} \quad (4)$$

Donde:

V_t = Velocidad de transporte en el conducto [m/s]

K_p = Constante del tubo de Pitot

C_p = Coeficiente del tubo de Pitot

P_d = Presión dinámica promedio de la corriente [mm.c.a.]

T = Temperatura promedio de la corriente [K]

P_T = Presión total de la corriente [mmHg]

M = Masa molar del aire en base húmeda [g/mol]

P_d se obtiene realizando “ n ” mediciones con un tubo Pitot dentro del conducto de ventilación en distintos puntos del diámetro y promediando las mediciones, esto resulta:

$$P_d = \left(\frac{\sum \sqrt{P_{vi}}}{n} \right)^2 \quad (5)$$

Luego, reemplazando la Ecuación 5 en la Ecuación 4 y simplificando, la expresión de la V_t para el aire, se reduce a:

$$V_t = 4,428 \cdot \sqrt{\frac{P_d}{\rho_g}} \quad (6)$$

Por lo general se trabaja en condiciones estándar de temperatura y presión (20° C y 101325 Pa) con lo que, la expresión 6 se reduce a:

$$V_t = 4,034 \sqrt{P_d} \quad (7)$$

Por lo general, V_t es dato del problema y P_d es la incógnita.

3.3. Sistema de ventilación industrial

Para el diseño de un sistema de ventilación industrial se seguirán los lineamientos de Londoño (2021), quien divide el proceso en tres partes:

1. Identificar las fuentes de contaminación.
2. Seleccionar sistema de captación.
3. Establecer una energía de succión capaz de capturar y transportar el aire contaminado.

Para seguir esta metodología conviene disponer de un plano de las instalaciones y diagramas de flujo del proceso. De esta forma se pueden identificar las fuentes de generación de contaminantes, o puntos de generación de polución y realizar la captación en el lugar de origen.

Se debe tener en cuenta si el contaminante a extraer es tóxico o inflamable, en ese caso se debe tratar cada fuente por separado. De tratarse de aire contaminado con partículas (no tóxicas) es conveniente adoptar un sistema de ramales múltiples de alta velocidad. Se les denomina de esta manera pues se requiere de una velocidad de transporte en los conductos de al menos 18 m/s para asegurar el transporte neumático de las partículas y evitar la sedimentación.

Estos sistemas funcionan con cierto nivel de presión negativa debido a la succión generada por el sistema de extracción, que es el encargado de movilizar el caudal de aire requerido para la operación. Debido a esto, se prioriza trabajar con campanas, ductos y demás componentes lo más estancos posible, para no agregar pérdidas de energías que deban ser compensadas en el ventilador. Además, esto tiene una doble función, evitar la dispersión indeseada de partículas y la pérdida de energía requerida para el transporte.

En cuanto al sistema de captación se debe definir previamente la ubicación y las dimensiones de ventiladores y dispositivos de limpieza, como así también la ubicación de los puntos de extracción donde irán las campanas. Se deben definir además, los caudales y velocidades mínimas requeridas y detalles de operación que puedan influir en la elección de los elementos del sistema, como ser abrasividad o toxicidad del material transportado.

Para realizar el desarrollo de esta metodología se sigue el procedimiento de diseño de sistemas de extracción planteado en *Industrial ventilation: a manual of recommended practice* (ACGIH, 1998). Consta de ocho instancias:

1. Seleccionar o diseñar cada campana en función de las características del fluido y determinar el caudal de diseño, la velocidad mínima del fluido dentro del ducto y pérdidas por entradas.
2. Calcular la sección transversal tentativa de los ductos desde el punto más alejado del ventilador.
3. Definir la longitud de cada tramo de cañería y la cantidad y tipos de accesorios, con el objetivo de considerar sus efectos de pérdida de carga.
4. Calcular las caídas de presión de estos subsistemas.
5. Verificar que la presión estática calculada sea un único valor e independiente del camino elegido para llegar a un punto en común de dos subsistemas distintos.
6. Seleccionar el sistema de limpieza y ventilador en función del cálculo de caudal, temperatura de servicio, humedad, tipo de partículas y caída de presión del sistema.
7. Controlar el tamaño de los ductos contra espacio disponible y las posibles interferencias.

8. Elegir el espesor de pared de los ductos de acuerdo a las características de la corriente de aire.

3.3.1. Método de diseño

Para calcular las pérdidas de carga del sistema de extracción localizada, es decir las pérdidas debido a rozamiento en conductos y accesorios, tradicionalmente se tienen dos métodos: el de la “presión dinámica”, y el de la “longitud equivalente”. Se prefiere el método de la presión dinámica ya que trata a todos los tipos de pérdida de manera similar lo que simplifica el procedimiento de cálculo. Este método se basa en que todas las pérdidas de carga, por rozamiento en conductos y por resistencia de forma en los accesorios, son función de la presión dinámica y se calculan multiplicando a dicha presión por un factor que caracteriza el accesorio en consideración.

En un sistema múltiple se considera la contribución de cada sistema más pequeño, debido a esto, también debe preverse un método que permita la repartición correcta del caudal entre los conductos secundarios. En la práctica ocurre un equilibrio de los caudales en las uniones de forma natural, es decir, el caudal se reparte entre los diferentes conductos de acuerdo a la pérdida de carga de cada uno de ellos. Para conseguir que la distribución de aire en cada campana sea la requerida, se debe lograr que la presión estática de cada ramal que confluye en un punto sea la misma. Para lograr este objetivo se dispone de dos métodos: “Equilibrado por diseño” o “Equilibrado por compuertas”. En la Tabla 2 se presentan las ventajas e inconvenientes de cada método.

En este caso, el diseño de los ductos se realiza por el “Método equilibrado por compuertas”. Consiste en la instalación de una compuerta de regulación en cada ramal, que puede ser regulada una vez que el sistema esté en funcionamiento y así conseguir el caudal deseado en cada campana de aspiración. Se selecciona este método ya que permite una mayor flexibilidad en la operación y un mayor control en caso de así requerirlo. Se diseñan todos los ductos del sistema con la misma velocidad mínima de transporte. Una vez dimensionado el sistema, se calculan todas las pérdidas de presión de trazado de cada ramal y se selecciona el ventilador con el recorrido que ofrece mayor resistencia.

3.4. Sistemas de captación

El sistema de captación es el encargado de que el aire con partículas ingrese al sistema de conductos y, de forma genérica se lo denomina “campana”. Lo que se busca con estos dispositivos es lograr un caudal de aire lo más uniforme posible y que sea capaz de capturar las partículas o contaminantes, es decir, que se generen las velocidades de captación necesarias.

Una vez definida la ubicación de la campana respecto al proceso y la forma y tamaño de la misma, se debe definir la velocidad de captura, el caudal de succión y las pérdidas por fricción. Siendo la velocidad de captura V_c el primer parámetro a definir: es la velocidad mínima de aire inducida

Tabla 2: Ventajas e inconvenientes de cada método de diseño para pérdidas de carga (ACGIH, 1998).

Equilibrado por diseño	Equilibrado por compuerta
Los caudales no pueden ser modificados fácilmente por los operadores.	Los caudales pueden ser modificados fácilmente. Estos cambios son necesarios cuando el proceso puede verse afectado si se varía la cantidad de producto captado.
Poca flexibilidad para adaptar futuros cambios o ampliaciones.	En función del ventilador y motor seleccionado existe una mayor flexibilidad para modificaciones.
La selección del caudal para una operación no conocida puede ser incorrecta. En este caso se requeriría una revisión de los conductos.	La corrección de caudales mal estimados es relativamente fácil dentro de ciertos márgenes.
No se presenta problema de abrasión inusuales o acumulación de polvo.	En las compuertas parcialmente cerradas se puede producir abrasión y en consecuencia modificarse la pérdida de carga o bien generarse acumulación de polvo.
Los conductos no se obstruyen si se eligen las velocidades adecuadas.	Los conductos pueden obstruirse si la compuerta está muy cerrada.
La implantación del sistema debe ser conocida en detalle, con medidas exactas de todas las longitudes de los tramos y de los pasos por obstáculos.	Son posibles pequeñas variaciones sobre el esquema inicial de implantación.

en la entrada de la campana que debe existir para capturar y transportar el contaminante hacia el conducto de ventilación. Existen valores recomendados de velocidad de captación de acuerdo al tipo de proceso industrial y por cómo se dispersa el contaminante. En la Tabla 3 se describen condiciones de dispersión del contaminante y se da un rango de valores de V_c . Para seleccionar un valor único de velocidad se debe analizar en conjunto con la Tabla 4, la cual muestra un listado de factores que afectan a la dispersión del contaminante.

El caudal de aire a succionar Q es una función de la distancia x entre la fuente de emisión y la campana, del área de la abertura, A , y en general de la velocidad de captura, V_c . Para valores de $x < 1,5D$ siendo “D” el diámetro de la abertura, es válida la fórmula de Dalla-Valle (Londoño, 2021):

$$Q = V_c \cdot (10x^2 + A) \quad (8)$$

Cuando el punto de captación está muy próximo al punto de generación de la polución, la distancia “x” a la campana se desprecia. Para casos en que los equipos a ventilar se encuentren instalados, es decir, se requiera adaptar un sistema de ventilación a un proceso determinado, lo más habitual es contar con datos empíricos de caudales necesarios y así determinar el área transversal de la campana.

Tabla 3: Valores recomendados para la velocidad de captación (Londoño, 2021).

Condiciones de dispersión del contaminante	Ejemplos	Velocidad de captación [m/s]
Liberado casi sin velocidad en aire tranquilo.	Evaporación en tanques, desengrase	0,3 - 0,5
Liberado a baja velocidad en aire moderadamente tranquilo.	Cabinas de pinturas, llenado intermitente de tanques, soldadura, baños electrolíticos, decapado.	0,5 - 1,0
Generación activa en una zona de rápido movimiento del aire.	Aplicación de pintura con pistola, llenado de recipientes, trituración.	1,0 - 2,5
Liberado con alta velocidad inicial en una zona de movimiento muy rápido del aire.	Pulido, operaciones de abrasión en general, esmerilado, desmolde en fundiciones.	2,5 - 10

Tabla 4: Factores de dispersión (Londoño, 2021).

Límite inferior	Límite superior
1. Corrientes de aire en el local mínimas o favorables a la captura del contaminante.	1. Corrientes de aire que dificultan la captura del contaminante (turbulencias).
2. Contaminantes de baja toxicidad o molestos.	2. Contaminantes de alta toxicidad.
3. Producción de contaminantes baja o intermitente.	3. Gran producción u operaciones continuas.
4. Campanas de gran tamaño o con caudales elevados.	4. Campanas pequeñas.

En este punto también debe considerarse el coeficiente de pérdidas en la campana F . Conociendo este parámetro junto con la presión debido a la velocidad en el conducto, se pueden determinar las pérdidas por fricción según:

$$H_e = F.P_d \quad (9)$$

Donde H_e son las pérdidas a la entrada de la campana. Estas pérdidas representan la energía necesaria para que el flujo ingrese al conducto y están dadas en *mm.c.a.* Los valores de F , adimensionales, pueden obtenerse de la tabla de la Figura 34, referenciada en el Anexo del Capítulo 8.

Habiendo definido las pérdidas a la entrada se puede definir la presión estática a la entrada de la campana como la suma de las pérdidas a la entrada más la presión dinámica en el conducto:

$$P_e = H_e + P_d \quad (10)$$

3.5. Sistema de conductos

Una vez capturado el aire con partículas debe ser conducido hacia el equipo de filtración a través de un sistema de conductos. El sistema de conductos se extiende desde las campanas hasta la chimenea e incluye: tramos rectos y todo tipo de accesorios, (como ser: codos, entradas y dispositivos de control).

Los conductos como sistema deben cumplir la función de llevar el aire contaminado desde las campanas hasta el filtro y luego a la chimenea. Deben realizar las conducciones con la mínima pérdida de energía por fricción y asegurar una velocidad de transporte adecuada para que no haya sedimentación de partículas. Además, debe mantener equilibrado el sistema en todo momento y así asegurar que cada campana capture el caudal de aire requerido.

Típicamente, el ventilador se ubica después del equipo de control, en este caso es luego del filtro, por lo tanto la mayor parte del sistema estará sometido a una presión estática negativa de hasta unos 500 *mm.c.a.* Según datos de la práctica (Escoda, 2002) se considera que, para sistemas de ventilación, se tiene una alta presión por encima de los 300 *mm.c.a.* Estas condiciones de presión definen el tipo de cañería a utilizar y su espesor de pared. Los conductos circulares son los más utilizados ya que resisten el colapso, presentan mejores condiciones de transporte y menor perímetro para áreas equivalentes a una sección cuadrada. El material típico es el tubo de chapa rolada y soldada de acero galvanizado o acero al carbono.

3.5.1. Velocidad de transporte

V_t es la velocidad mínima para que las partículas no sedimenten dentro del conducto y produzcan bloqueos de la corriente. Por lo tanto, V_t depende de las características de los contaminantes que deben ser captados por el sistema. De la bibliografía se selecciona el valor empírico de $V_t = 18 \text{ m/s}$ que corresponde a la velocidad mínima necesaria para el transporte de partículas de caliza, recordando que más del 90% de la composición del cemento es piedra caliza molida.

3.5.2. Diámetro y velocidad real

Una vez identificados todos los puntos de captura se definen los diámetros de los conductos. La sección del conducto se desprende de la Ecuación 11, es decir, de dividir el **caudal de diseño** hallado según el método de la sección anterior por la **velocidad de transporte**. De no existir comercialmente el diámetro calculado se debe elegir el tamaño inmediatamente inferior para asegurar la velocidad de captación mínima requerida. El diámetro calculado se despeja de la Ecuación 12.

$$A_d = \frac{Q_d}{V_t} \quad (11)$$

$$\frac{\pi * D^2}{4} = \frac{Q_d}{V_t} \quad (12)$$

Al seleccionar diámetros de cañerías comercialmente disponibles se debe recalcularse la velocidad real dividiendo el caudal real por el área de la cañería seleccionada.

3.5.3. Caída de presión en conductos

Las pérdidas de energía en sistemas de ventilación debido a la fricción son calculadas como fracción de la presión dinámica y depende del diámetro y la longitud del conducto, del material del mismo, de la velocidad de transporte, de la viscosidad y densidad de la corriente de aire. La fricción del aire representa una pérdida de presión que debe ser compensada en el ventilador. Comúnmente se le llama pérdida de carga, ya que determina el gasto en el ventilador y se calcula con la fórmula de Darcy-Weisbach. Esta expresión teórica-práctica involucra la longitud de la conducción, el diámetro hidráulico, la velocidad, la densidad del aire, el coeficiente de rozamiento, que a su vez depende del número de Reynolds, de la rugosidad y dimensiones del conducto. Calcular la pérdida de carga con estas fórmulas resulta engorroso y los resultados son aproximados ya que la viscosidad, densidad y rugosidad pueden variar entre márgenes muy amplios. La forma práctica y técnicamente válida es utilizar nomogramas y fórmulas confeccionadas a base del bagaje técnico de la mecánica de los fluidos. Son válidos para conducciones con la rugosidad de los materiales habitualmente utilizados para sistemas de ventilación como, el acero.

Una forma típica para calcular las pérdidas de carga en conductos de sección circular y rectos es con la Ecuación 13, la cual es válida para conducciones de acero galvanizado donde la corriente de aire fluye a temperatura y presión estándar (20°C y 101325 Pa) (Ver Figura 35 del Capítulo 8).

$$h_{f100} = 518,72 * \frac{V_t^{1,8}}{D^{1,18}} \quad (13)$$

Donde:

h_{f100} = Pérdida de carga en la cañería [*mm.c.a.*].

V_t = Velocidad de transporte [*m/s*].

D = Diámetro de la cañería [*mm*].

Cuando la corriente de aire fluye en condiciones distintas a las estándar se debe corregir la velocidad de transporte ajustando el caudal por presión y temperatura según la Ecuación 14. Con este dato de caudal corregido, es decir, llevado a condiciones estándar, se recalcula la velocidad y luego, con la Ecuación 15, se obtienen las pérdidas de carga referidas cada 100 m de conducto de acero galvanizado (aquí la presión P en [Pa], la temperatura T en [K], V_t en [*m/s*] y D en [*mm*]).

$$Q_{std} = Q_d * \frac{P_d}{P_{std}} * \frac{T_{std}}{T_d} \quad (14)$$

Dónde:

Q_{std} = Caudal corregido por presión y temperatura.

Q_d = Caudal de diseño.

P_{std} = Presión atmosférica en condiciones estándar [Pa].

P_d = Presión de diseño [Pa].

T_{std} = Temperatura ambiente en condiciones estándar [K].

T_d = Temperatura de diseño [K].

$$h_{f100} = 518,72 * \frac{V_t^{1,8}}{D^{1,18}} * \frac{P}{101325} * \frac{273,15}{T} \quad (15)$$

Para estimar pérdidas por fricción para conductos de otros materiales se debe corregir la Ecuación 15 por un factor de rugosidad, el cual es función de la velocidad de transporte, rugosidad del material utilizado y diámetro del conducto. Este factor se obtiene del nomograma referenciado en la Figura 36 del anexo del Capítulo 8.

Las Ecuaciones 13, 14 y 15 se pueden usar en secciones donde el diámetro es constante, como tramos rectos y accesorios simples, ya que se asume que la velocidad y, por lo tanto, la presión dinámica es constante.

3.5.4. Caída de presión en accesorios

También se utilizan bases de datos experimentales para este tipo de pérdidas que se deben a las turbulencias por cambios en la dirección o velocidades del fluido. Una forma de tener en cuenta todos los accesorios es el **Método del coeficiente “n”**. Considera las pérdidas de carga como función de P_d del aire y de un coeficiente “n” de proporcionalidad que surge de la experiencia y se expresa como:

$$h_f = n * P_d \quad (16)$$

Donde h_f está en *mm.c.a.* Los valores de los coeficientes de pérdidas por fricción para cada accesorio varían de acuerdo al diámetro, con el radio de curvatura, ángulo de inclinación, etc. y están tabulados en la bibliografía. En el Anexo del Capítulo 8 se encuentran las figuras de referencia.

Una vez calculadas una a una las pérdidas de cada accesorio, se realiza la sumatoria de todos los tipos de conducciones: secciones rectas, accesorios y entradas para obtener la caída total de presión del sistema. La caída de presión a través del sistema de control también debe ser tomada en cuenta

en esta sumatoria y por lo general representan una de las pérdidas de carga más importantes del sistema.

3.6. Dispositivos de limpieza

Interesa saber de qué tipo son los contaminantes que se deben filtrar y cuáles son sus características. Esto por un lado permitirá seleccionar el correcto sistema de filtrado y por otro, marcará los cuidados que se deben tener en su operación. El material particulado (MP) se presenta en dos grandes categorías, sedimentables (partículas mayores a 100 μm) y en suspensión (partículas menores a 100 μm). Dentro del MP en suspensión se tiene la fracción inhalables, denominada PM10, (partículas menores a 10 μm), y la fracción respirable, PM2,5 (partículas menores a 2,5 μm). Las partículas con menos de 10 y 2,5 micrómetros de diámetro son conocidas como contaminantes ya que por ser tan pequeñas tienen, en caso de ser inhalada, un efecto más nocivo sobre la salud humana que las partículas más grandes.

Las técnicas de control para partículas se centran en capturar las partículas emitidas por una fuente contaminante. Los dispositivos de control más usados para controlar la emisión de partículas son: precipitadores electrostáticos (PES), lavadores Venturi, cámaras de sedimentación, ciclones, filtros de papel y filtros de tela.

En la Tabla 5 se indica el rango de tamaños de partícula que pueden ser atrapadas en función de la tecnología de retención adoptada.

Tabla 5: Equipos y tamaño de partícula filtrada.

EQUIPO	TAMAÑO DE PARTICULAS [μm]
Precipitadores electrostáticos	0,01 a 90
Torres empacadas	0,01 a 100
Filtros de papel	0,005 a 8
Filtros de tela	0,05 a 90
Lavadores de gases	0,05 a 100
Separadores centrífugos	5 a 1000
Cámaras de sedimentación	10 a 10000

Para comenzar a delinear el criterio de selección del equipo de filtrado se debe tener en cuenta que los tamaños de las partículas que conforman los cementos Portland típicos van desde 0.5 hasta los 10 μm . Por otro lado, cualquier tipo de proceso que incorpore humedad al sistema es indeseable. Debido a estos requisitos es que se prescinde de las cámaras de sedimentación o separadores centrífugos (apropiados para tamaño de partícula mayor) y de los lavadores de gases (utilizan agua para captar partículas en suspensión).

De acuerdo a lo descrito por Woodard (1998) se realiza una comparación entre los otros cuatro tipos de equipos. En la Tabla 6 se sintetiza el análisis en función de los parámetros evaluados para cada equipo: su eficiencia, aplicabilidad y costos en relación a las otras tecnologías.

Tabla 6: Comparativa equipos de filtración

EQUIPO	EFICIENCIA	APLICABILIDAD	COSTO
Precipitadores electrostáticos	Alta	Requiere gran espacio de instalación y que la operación sea continua y estable.	Alta inversión inicial y bajo costo de mantenimiento.
Torres empacadas	Muy alta	Bajos caudales de aire y bajas velocidades, y temperatura moderadas a bajas.	Alto costo de inversión inicial y de mantenimiento.
Filtros de papel	Muy alta	Bajos caudales de aire y bajas velocidades y temperatura más bajas.	Alto costo de inversión inicial y muy alto costo de mantenimiento .
Filtros de tela	Alta	Muy versátiles - no recomendado para residuos de hidrocarburos.	Alto costo de inversión inicial y bajo costo de mantenimiento (inferior a los PES).

Por lo general, los sistemas de filtración en plantas industriales del tipo de la estudiada requiere manejar grandes volúmenes de aire. Los filtros de papel o torres empacadas (o también llamados filtros compactos) no serían apropiados desde el punto de vista del requisito de caudal de aire a vehicular, ya que se requerirían un gran número de unidades de filtración.

Una característica de la etapa del proceso estudiado es su variabilidad, el funcionamiento a demanda y la cantidad de material requerido en cada momento hacen que un sistema tal como un Precipitador Electrostático no sea el más apropiado ya que se vería reducida considerablemente su vida útil, además, se dispone de espacios reducidos para implantar el equipo de filtrado.

3.7. Filtro de mangas

Un filtro de mangas consiste en uno o más compartimientos aislados conteniendo hileras de bolsas de tela, en forma de tubos redondos. El aire sucio ingresa al recinto o al interior de las mangas, según sea el método de filtrado, las partículas son retenidas en una de las caras de las bolsas corriente arriba. Con el paso del tiempo se forma la “plasta” o “torta filtrante”, que debe ser limpiada a intervalos regulares y así obtener doble efecto, por un lado se recupera el polvo colectado que cae en una tolva inferior para luego retornarlo al sistema y, por otro lado, se libera la superficie filtrante para continuar con el ciclo. El gas limpio es ventilado hacia la atmósfera. El filtro es operado cíclicamente, alternando entre períodos de filtrado relativamente largos y períodos cortos de limpieza.

Durante la filtración por tela, el gas con polvo en suspensión es aspirado a través de la tela por ventiladores de corriente forzada. La tela es responsable de parte de la filtración, pero actúa especialmente como soporte de la capa de polvo que se acumula. Dicha capa de polvo conforma la

plasta, es un filtro altamente eficiente, aún para partículas submicrónicas. En la Figura 7 se muestra una instalación típica de un filtro de mangas. Se aprecian sus componentes fundamentales: tuberías de entrada de aire sucio en la parte inferior del filtro, y la tubería de salida de aire limpio por la parte superior, que se conecta al ventilador y conduce el flujo de aire hacia la chimenea. En cuanto al filtro de mangas se ve el recinto principal que aloja la placa espejo. La placa espejo es una pieza de acero con perforaciones que permite básicamente, colgar las mangas. La parte inferior del recinto es una tolva que permite recolectar el material filtrado y conducirlo nuevamente hacia alguna parte del circuito. El acceso al filtro se realiza por la parte superior del mismo, a través de tapas rebatibles que dan acceso a la cámara limpia. También se dispone de puertas de inspección sobre la tolva inferior.

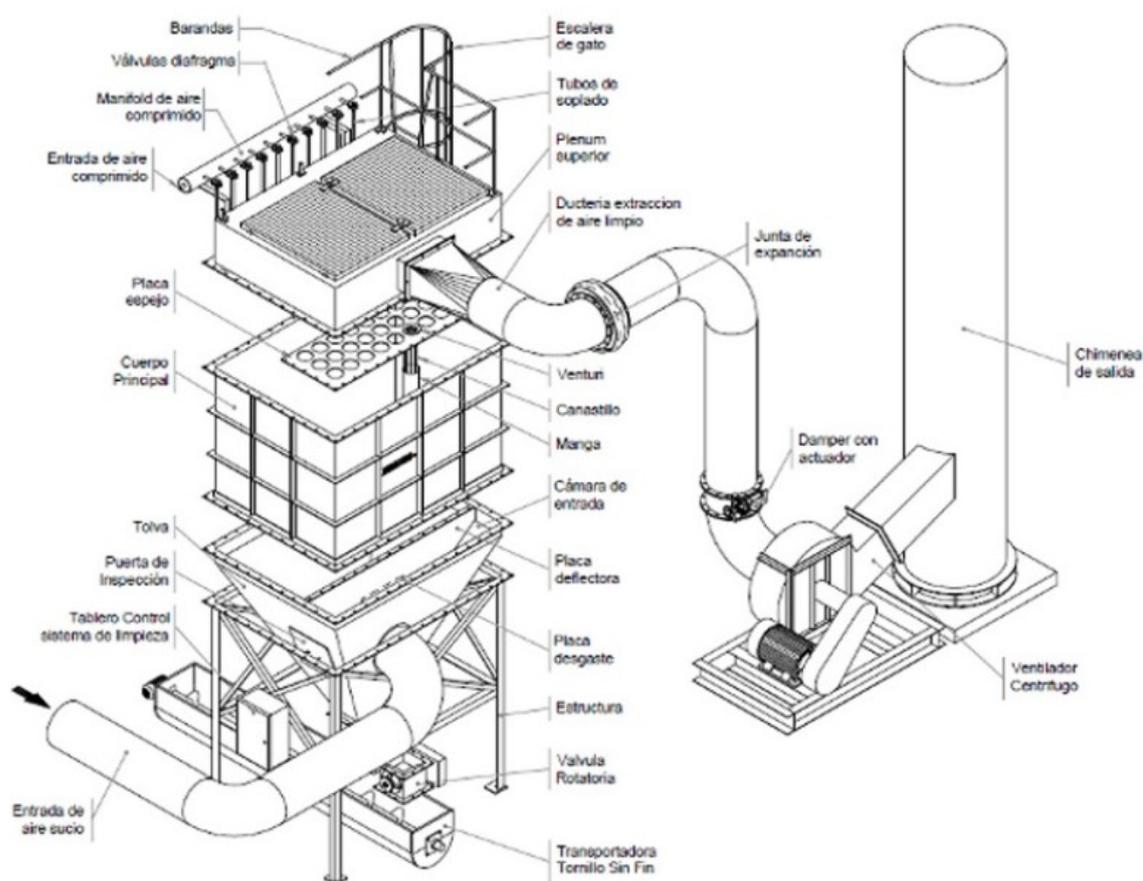


Figura 7: Esquema de la instalación de un filtro de mangas con sus elementos típicos (Ziebtec, 2024).

Los filtros de tela poseen algunas ventajas claves sobre otros tipos de dispositivos para la recolección de partículas, a saber: altísimas eficiencias de recolección, flexibilidad para tratar muchos tipos de polvos y un amplio rango de flujos volumétricos de gas, y pueden ser operados con caídas de presión bajas. También tienen algunas desventajas potenciales, en general, están limitados a filtrar corrientes secas. Además, las temperaturas altas y ciertas sustancias químicas pueden dañar ciertas telas. Los filtros de tela también tienen el potencial de incendio o explosión, y pueden

requerir una gran superficie para su instalación. El diseño apropiado puede minimizar o eliminar estas desventajas.

3.7.1. Mecanismos de recolección de partículas

Los mecanismos principales para la recolección de partículas de los filtros de tela son la impactación inercial, la difusión por movimientos aleatorios y la interceptación. La impactación inercial se produce cuando el aire que fluye a través del filtro experimenta cambios de dirección cada vez que debe rodear una fibra. Las partículas de mayor tamaño, debido a su inercia, no pueden realizar cambios tan bruscos, como resultado las partículas no siguen la corriente de aire y se proyectan sobre las fibras. La interceptación es un caso particular del impacto que se presenta cuando la partícula es suficientemente pequeña para seguir el movimiento del aire, pero entra en contacto con alguna fibra al seguir el camino tortuoso del aire a través del filtro, el contacto no depende de la inercia sino que queda adherida debido a las fuerzas inherentes entre la fibra y la partícula. La recolección por difusión tiene importancia cuando las partículas son tan pequeñas que su movimiento es influenciado por los choques moleculares, en este caso el comportamiento de las partículas es más parecido a una molécula de gas que al de una partícula sólida, se mueve de forma aleatoria.

3.7.2. Tipos de telas y sus características

La selección de la tela es un aspecto muy importante de la operación del filtro de mangas. Existen muchas fibras que pueden ser usadas, con propiedades diversas que determinan sus ámbitos de aplicación. En general, las fibras pueden ser convertidas en telas tejidas o afelpadas. El método de limpieza afecta la selección de las fibras, ya que algunas fibras se desgastan rápidamente y pierden su efectividad como resultado de la flexión o la agitación frecuentes. El tipo de tela también debe adecuarse al método de limpieza, y a las características de la corriente y de las partículas.

Las telas tejidas son preferidas para los filtros de tela con agitador y de aire reverso. Las telas afelpadas son recomendadas para los filtros de tela Pulse Jet y aquellos métodos que utilicen aire por pulsos.

Las características principales de la corriente de gas a considerar cuando se seleccionan las telas son: la temperatura y la composición química. La mayoría de las telas son degradadas por las temperaturas altas. Algunas telas también son fácilmente degradadas por ácidos, mientras que otras son altamente resistentes a estos. Los alcalíes, oxidantes y solventes son otros tipos de sustancias químicas que pueden dañar a los materiales para filtro. Las fibras nuevas, tales como el Ryton®[®], el Gore-Tex®[®] y el Chem-Pro®[®], están continuamente en desarrollo para aplicaciones de alta temperatura y otras aplicaciones exigentes (Woodard, 1998).

Las características importantes de las partículas a considerar en la selección de la tela son:

el tamaño, el potencial de abrasión y el potencial de liberación. Los tamaños promedio de las partículas pueden ser un factor en la selección del tipo de tejido o felpa que se seleccione para una aplicación particular. Con polvos muy abrasivos, se debe tomar la precaución de asegurarse que la tela no se desgastará demasiado rápido. Los polvos húmedos o pegajosos requieren una tela que liberará la plasta de polvo con facilidad, o que esté recubierta con algún tipo de capa lubricante. Se han desarrollado varios acabados y texturas diferentes para las telas de fibra de vidrio para aumentar su uso en la filtración. También existen muchos recubrimientos y tratamientos químicos disponibles para proporcionar lubricación y otras propiedades a las fibras, y de este modo mejorar su rendimiento.

Típicamente los proveedores de mangas de tela para filtros proporcionan tablas que cruzan el tipo de material utilizado para la fabricación de las mangas con la aptitud en servicio de estas. Es decir, dan una idea del comportamiento físico-químico ante los agentes a filtrar.

3.7.3. Método de limpieza

Los filtros de mangas pueden ser clasificados según varios criterios como ser: el método de limpieza, la dirección del flujo de gas (desde el interior de la bolsa hacia el exterior o a la inversa), la localización del ventilador del sistema (de succión o de presión), o el tamaño (bajo, mediano o alto caudal de gas).

De estos cuatro enfoques, el método de limpieza es probablemente el criterio de selección más frecuente e importante. El principio de funcionamiento de este tipo de filtros está dado por la presencia de la plasta de polvo que aumenta la eficiencia de recolección a medida que ésta se engrosa, pero también restringe el flujo del gas. Este efecto aumenta la caída de presión y los requisitos de energía. Para operar el filtro de tela continuamente, el polvo debe ser removido de la tela periódicamente. Es por esto que los filtros de telas se clasifican con frecuencia según su método de limpieza.

A continuación, se describen los filtros de mangas haciendo foco en el tipo de limpieza que utilizan.

Sacudido mecánico: Es un método que ha sido usado ampliamente debido a su simplicidad así como a su efectividad. Debe impartirse a la tela la energía suficiente para superar las fuerzas de adhesión que sostienen el polvo a la bolsa. En este método, y considerando que el caudal de gas circula desde el interior de la manga hacia el exterior de la misma, se le imprime energía a través de un gancho o una estructura llamada percha que sostiene a la manga por la parte superior y que oscila como se esquematiza en la Figura 8. El movimiento es accionado por un mecanismo de golpes a intervalos regulares que se traducen en el sacudido característico del método. El movimiento impartido puede ser de varias formas, oscilaciones verticales, horizontales o una combinación de ambas, pero el efecto general es de crear una onda sinusoidal a lo largo de la tela. A medida que

la tela se mueve hacia afuera de la línea central de la bolsa durante la acción de la onda, el polvo acumulado sobre la superficie se mueve con la tela. Cuando la tela alcanza el límite de su extensión, la plasta de polvo posee la inercia suficiente para desprenderse de la tela y descender hacia la tolva inferior.

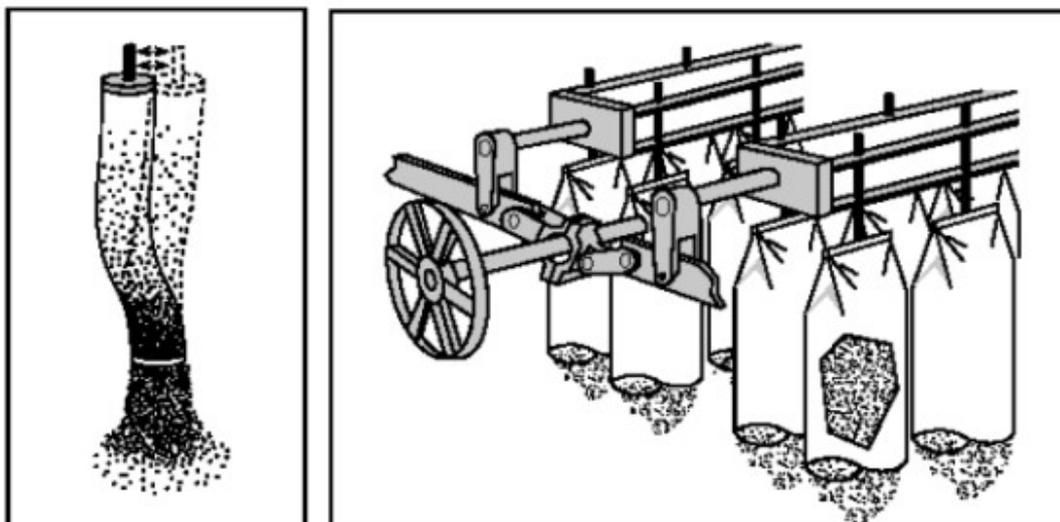


Figura 8: Mangas sometidas a sacudido mecánico (Billings and Wilder, 1970).

Este sistema puede adaptarse a tamaños pequeños ($< 14 \text{ m}^3/\text{min}$) que consiste de un solo compartimiento, generalmente operado de manera intermitente y el mecanismo de sacudida es accionado manualmente, la frecuencia es muy baja, por ejemplo, una vez por turno de trabajo.

Mayores caudales de gas requieren filtros con compartimientos múltiples, operados continuamente mediante un motor acoplado a un sistema de engranajes y yunques golpeadores que accionan el sistema de sacudido. Los compartimientos realizan la secuencia de limpieza de a uno por vez. El flujo de gas del compartimiento es interrumpido, permitiendo así el asentamiento del polvo, y el mecanismo de sacudido es encendido por un determinado tiempo (en promedio 30 segundos). Los períodos de asentamiento y sacudido pueden ser repetidos, y a continuación, el compartimiento es restablecido en línea para continuar con la filtración. Como resultado de la ausencia de flujo a través del compartimiento, la superficie colectora del filtro debe ser incrementada para compensar la porción que se encuentre fuera de servicio para su limpieza.

Lo descrito en el párrafo anterior es válido para todos los métodos de limpieza sea cual fuere la tecnología adoptada.

La limpieza por sacudido mecánico ha quedado obsoleta debido a que ha sido reemplazada por la limpieza con chorro a pulso. Los equipos aún existentes continúan en servicio aunque requieren de un mayor mantenimiento.

Aire reverso: Cuando las bolsas de fibra de vidrio fueron introducidas, se necesitó un medio más

suave para limpiar las grandes bolsas (de tres metros de largo contra las antecesoras de apenas un metro de longitud) para prevenir el deterioro prematuro. Se desarrolló la limpieza por aire reverso como una manera menos intensa de impartir energía a las bolsas. Como se dijo anteriormente el principio de funcionamiento es similar, salvo que al momento de cesar el flujo de aire cargado de partículas, un flujo inverso (de afuera hacia adentro) de aire limpio es dirigido a través de las bolsas. Por efecto de esta corriente las bolsas se pliegan suavemente hacia sus ejes centrales, lo que causa que la plasta se desprenda de la tela. Las características distintivas del tipo de mangas utilizadas en este sistemas son las tapas metálicas en la parte superior de las bolsas y los anillos cosidos que rodean las mangas para prevenir su colapso durante la limpieza. Sin estos últimos, el polvo que cae y se acumula tiende a obstruir la bolsa a medida que la tela se pliega sobre sí misma.

Tal como con los filtros con sacudido mecánico, se debe añadir una capacidad adicional de filtración a los filtros con aire reverso para compensar la porción que se encuentre fuera de servicio en cualquier ciclo de limpieza.

Pulse Jet: en este tipo de colector las mangas son limpiadas por medio de un chorro de aire comprimido. Este tipo de sistema, llamado Pulse Jet (representando en la Figura 9), se compone de un solo compartimiento alimentado por una serie de boquillas dotadas de un tubo Venturi. Con el objetivo de aumentar la capacidad es que se acomodan varios compartimientos que trabajan en conjunto. Se utiliza una válvula solenoide localizada encima de cada compartimiento, la función de ésta es bloquear o habilitar el flujo de aire sucio hacia cada cámara. Durante el ciclo de limpieza, la válvula solenoide se cierra, impidiendo el ingreso del flujo de gas y la válvula del pulso de aire comprimido abre durante 0.1 segundo aproximadamente permitiendo la limpieza de las mangas de dicha cámara. El compartimiento permanece fuera de línea entre 30 y 120 segundos, finalmente la válvula solenoide automáticamente vuelve a abrirse restableciendo el flujo.

Los filtros de pulsos de aire comprimido se han vuelto populares porque ocupan menos espacio que los filtros con sacudido mecánico y a lo largo de su vida útil resultan más económicos.

3.7.4. Relación gas-tela

La relación gas a tela (G/T) es una consideración de diseño importante que influye en los mecanismos de recolección de partículas. Es la relación de la velocidad de flujo volumétrico del gas por unidad de superficie filtrante, y generalmente se expresa en unidades de metros cúbicos por minuto de gas por metro cuadrado de tela $[(m^3/min)/m^2]$. Es común reducir estas unidades a metro por minuto (m/min), con lo cual a la relación G/T también se le refiere como la “velocidad del frente”.

Las velocidades de frente más altas permiten el uso de filtros de tela más pequeños (ya que aumenta su eficiencia), siempre que todo lo demás permanezca constante. Sin embargo, a medida que la velocidad del frente aumenta, hay un aumento de la caída de presión, un aumento de la

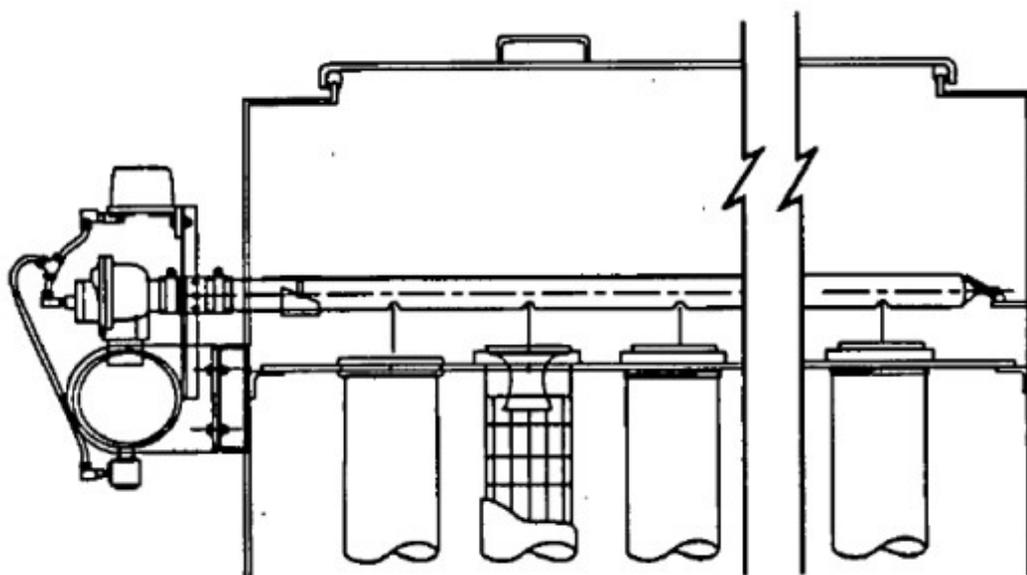


Figura 9: Sección transversal de una cámara tipo Pulse Jet (Billings and Wilder, 1970).

penetración de las partículas (la recolección por difusión disminuye), una mayor cobertura de la tela, una limpieza más frecuente, y una reducción en la vida de las bolsas debido al aumento de la frecuencia de los ciclos de limpieza. Una estimación de la relación de gas-tela demasiado baja, aumenta el tamaño y el costo del filtro de mangas innecesariamente.

El procedimiento de diseño requiere estimar una relación de gas-tela que sea compatible con la selección de la tela y el tipo de limpieza. Un método de estimación del valor de esta relación es adoptando valores dados por aplicaciones similares y que han sido recompilados de la práctica. En la Figura 10 se listan en la primera columna los polvos típicos y en las siguientes columnas se dan los valores para la relación gas-tela para telas tejidas y afelpadas. Los valores indicados en dicha figura representan el cociente de flujo volumétrico total en pies cúbicos por minuto divididos entre el área neta de tela en pies cuadrados.

Después de que se ha seleccionado un tipo de tela y una relación inicial de gas-tela de la Figura 10 es apropiado afectar este valor por un coeficiente según la aplicación. Estos valores se encuentran especificados en la Tabla 7.

Finalmente, el área neta de tela se determina dividiendo la velocidad de flujo del gas de escape en las condiciones reales de presión y temperatura a la que opera el sistema, por la relación de gas-tela de diseño.

Polvo	Agitador/Tela Tejida Aire a la Inversa/Tela Tejida	Chorro a Pulso/Tela de Felpa Aire a la Inversa/Tela de Felpa
Oxido de Aluminio (Alúmina)	2.5	8
Asbesto	3.0	10
Bauxita	2.5	8
Carbón Negro	1.5	5
Carbón	2.5	8
Cacao, Chocolate	2.8	12
Arcilla	2.5	9
Cemento	2.0	8
Cosméticos	1.5	10
Residuo de Esmalte	2.5	9
Alimento de Ganado, Granos	3.5	14
Feldspar	2.2	9
Fertilizante	3.0	8
Harina	3.0	12
Ceniza Flotante	2.5	5
Grafito	2.0	5
Yeso	2.0	10
Mineral de Hierro	3.0	11
Oxido Férrico	2.5	7
Sulfato Férrico	2.0	6
Oxido de Plomo	2.0	6
Polvo de Piel	3.5	12
Cal	2.5	10
Piedra Caliza	2.7	8
Mica	2.7	9
Pigmentos de Pintura	2.5	7

Figura 10: Relacion gas-tela (Unidades dadas en $[(\text{pie}^3/\text{min})/\text{pie}^2]$), (Mussatti, 2002).

3.8. Ventilador

En el diseño de los sistemas de ventilación se especifican siempre el caudal y la presión estática, es decir, se escoge por adelantado el punto de operación. Se debe seleccionar el ventilador que tenga una velocidad de rotación tal que caiga en el punto de operación del sistema de ventilación para que proporcione el caudal de aire y la presión estática necesaria. Los fabricantes presentan esta información en forma de gráficas (curvas características) o tablas de datos.

Una vez determinado el caudal requerido para los equipos instalados, Q_d , y determinada la pérdida de carga total, ΔP_T , generada por las conducciones de la instalación, se selecciona el ventilador que satisfaga estos requisitos de caudal y presión y lo haga a un costo razonable. Además de los requisitos de caudal y presión, se debe tener en cuenta si se movilizan partículas junto con el aire.

De los muchos tipos de ventiladores que existen, la configuración de los ventiladores centrífugos del tipo radial permite alcanzar las velocidades necesarias para el transporte de materiales. La disposición radial de las palas evita la acumulación de partículas sobre las mismas. Es común ver este tipo de equipo en sistemas de ventilación localizada donde el aire vehiculado carga con una cantidad importante de partículas. Los ventiladores radiales pero con palas inclinadas hacia atrás, es decir, contrarias al sentido de rotación, presentan mayores rendimientos que los radiales

Tabla 7: Factor de aplicación para telas (Londoño, 2021.)

Tipo de proceso	Factor de aplicación
Ventilación de emisiones molestas, alivio de los puntos de transferencia, transportadores, estaciones de embalaje, etc.	1,0
Recolección de producto, transporte-ventilación del aire, molinos, secadoras relámpago, clasificadores, etc.	0,9
Filtración del gas de proceso, secadoras por aspersión, hornos, reactores, etc.	0,8

y con un menor nivel sonoro. La forma de las palas condiciona la acumulación de materiales con lo cual debe restringirse el uso de estos ventiladores a las condiciones apropiadas. Las palas macizas de espesor uniforme permiten trabajar con aire ligeramente sucio o húmedo, debe evitar usarse con materiales sólidos ya que existe tendencia a acumularse en el dorso de la misma. Un ala portante permite mayores rendimientos y operación silenciosa, tiene la contra que se erosionan más fácilmente ocasionando el efecto contrario.

Se debe elegir el equipo que presente mejor rendimiento pero que sea del tamaño y peso acorde al lugar de emplazamiento y de fácil acceso para su mantenimiento. Es preferible que el acoplamiento del motor y ventilador sea del tipo por correas, y no directo, ya que esto otorga flexibilidad e intercambiabilidad en caso de rotura o *upgrade* de la instalación. Permite variar fácil y económicamente la velocidad de giro ajustando la relación de tamaños de las poleas, aunque esta configuración conlleva más mantenimiento. El nivel de ruido generado por las turbulencias internas y que varían según el tipo de ventilador es un dato que debe ser solicitado al fabricante y tenido en cuenta en caso de que se generen frecuencias que puedan ser perjudiciales para la estructura o equipos aledaños.

4. CÁLCULOS Y CRITERIOS PARA SELECCIÓN DE EQUIPOS

La propuesta de modificación consiste en independizar el circuito de producción y despolvamiento en la etapa de despacho de los distintos equipos que conforman la Línea 2. De acuerdo a lo expuesto hasta ahora se opta por un filtro de mangas tipo Pulse Jet como equipo de control del material particulado.

En primer lugar, se realiza un relevamiento pormenorizado del circuito bajo estudio haciendo hincapié en los puntos de captación (despolvamientos). Se registra el trayecto de las cañerías desde el equipo en cuestión hasta el filtro actual, diámetros y tipo de accesorios presentes.

En la Figura 11 se observa el desarrollo real a través de los seis pisos del edificio. Se han dibujado líneas de colores sobre los conductos de la imagen con el objetivo de poder “seguirlas” a lo largo de su recorrido. Las líneas de color verde son cañerías que pertenecen a los conductos de despolvamiento de la Línea 2 (estas son las cañerías de interés para el sistema de ventilación bajo estudio). Las líneas de color violeta pertenecen al circuito de la Línea 1 y, las líneas rojas y negras pertenecen al cricuito de recupero de la Máquina Rotativa (son de diferentes colores porque no hay una continuidad entre ellas, corresponden a distintas etapas del mismo proceso). Además, en la figura se indican los niveles o pisos que representan una división física del sistema analizado. En el nivel denominado sótano se encuentra el “fluidor de descarga” que conecta los silos de almacenamiento con el elevador de cangilones, además, en este mismo nivel está el “pie del elevador”. En planta baja se encuentra la descarga del actual “filtro 2” y en el primer piso se ubican las cámaras del filtro propiamente dicho. Siguiendo hacia el segundo y tercer piso se tienen más conducciones para finalmente llegar al cuarto piso donde se halla la “zaranda 2” y el “cabezal del elevador”. Los equipos y puntos mencionados en este párrafo son los puntos de extracción del sistema de ventilación.

4.1. Datos preliminares

Tabla 8: Datos característicos del proceso.

DATOS PRELIMINARES	
Material a filtrar:	Cemento Portland
Tamaño de partículas:	0,5 - 10 μm
Velocidad de captura:	2,5 m/s
Velocidad de transporte: (en ductos)	18 m/s
Temperatura del proceso:	80° C
Altura geográfica del sistema:	700 msnm
Presión atmosférica del lugar:	698 mmHg

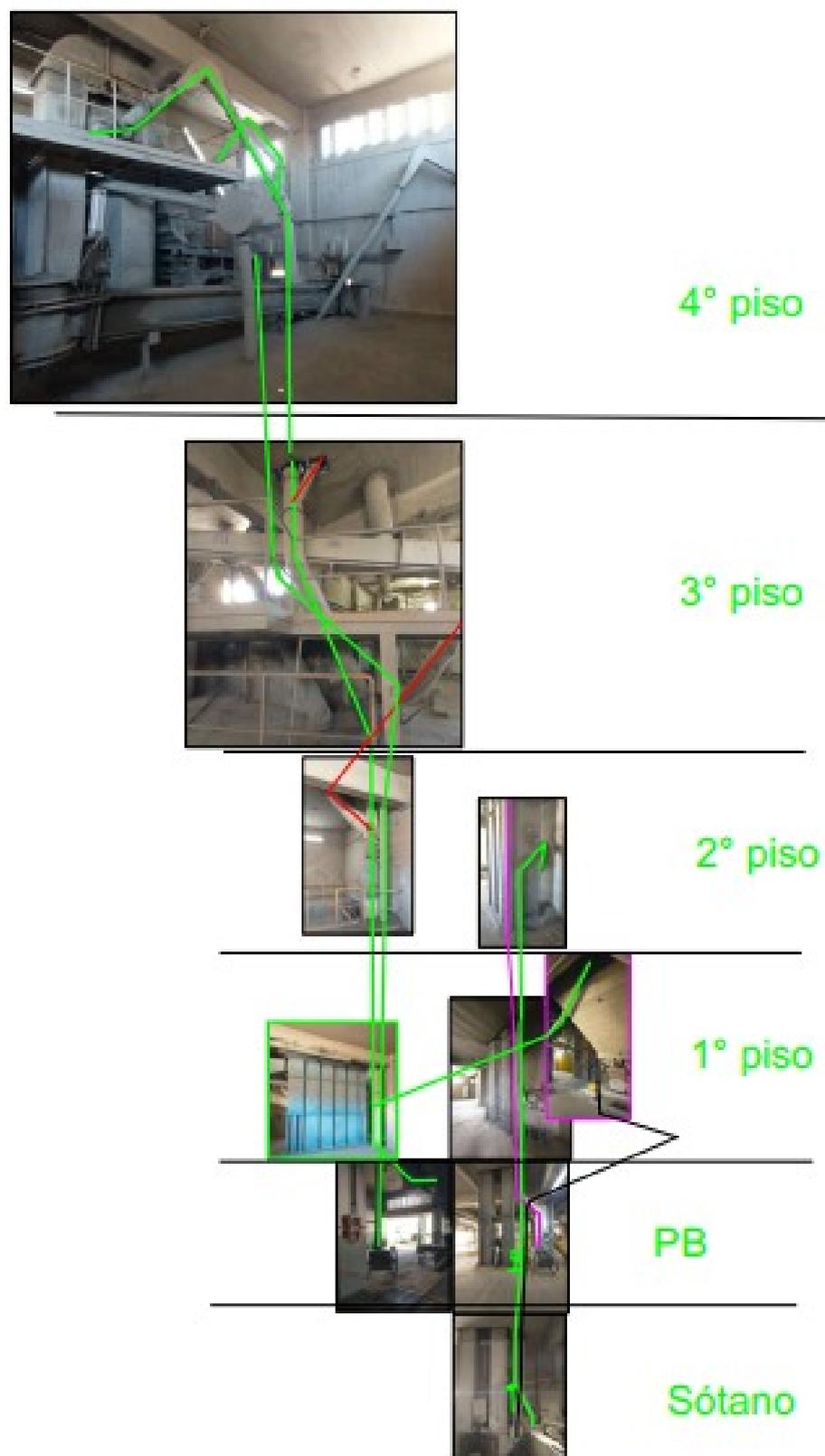


Figura 11: Relevamiento del circuito de despolvamiento por piso.

4.2. Fuentes de emisión del sistema

Se debe identificar cada punto de aspiración y determinar la cantidad de aire a movilizar en cada caso. Para ello se utilizan datos empíricos dados para los equipos típicos de la industria cementera según se muestra en la Figura 40 obtenidos de *Holcim Design Criteria* (2005). Dicha figura se encuentra agrupada con otros datos técnicos en el Anexo del Capítulo 8.

En la Figura 12 se identifican los puntos de extracción (entradas) de aire y en la Tabla 9 se indican las operaciones y el caudal mínimo necesario. La campana ubicada en el nodo “a” es la encargada de captar el caudal de despolvamiento del fluidor de descarga (evacua material desde el silo) y el polvo generado en el pie del elevador de cangilones. Por lo tanto, el caudal de aire que debe manejar es la suma del caudal de despolvamiento generado por estos dos equipos. La campana identificada como “l” es la que capta el polvo generado en las piernas del elevador y en la descarga del mismo, por lo tanto se ubica en el cabezal. El punto “j” se ubica sobre la parte superior de la zaranda vibratoria, justo encima del punto donde descarga el elevador.

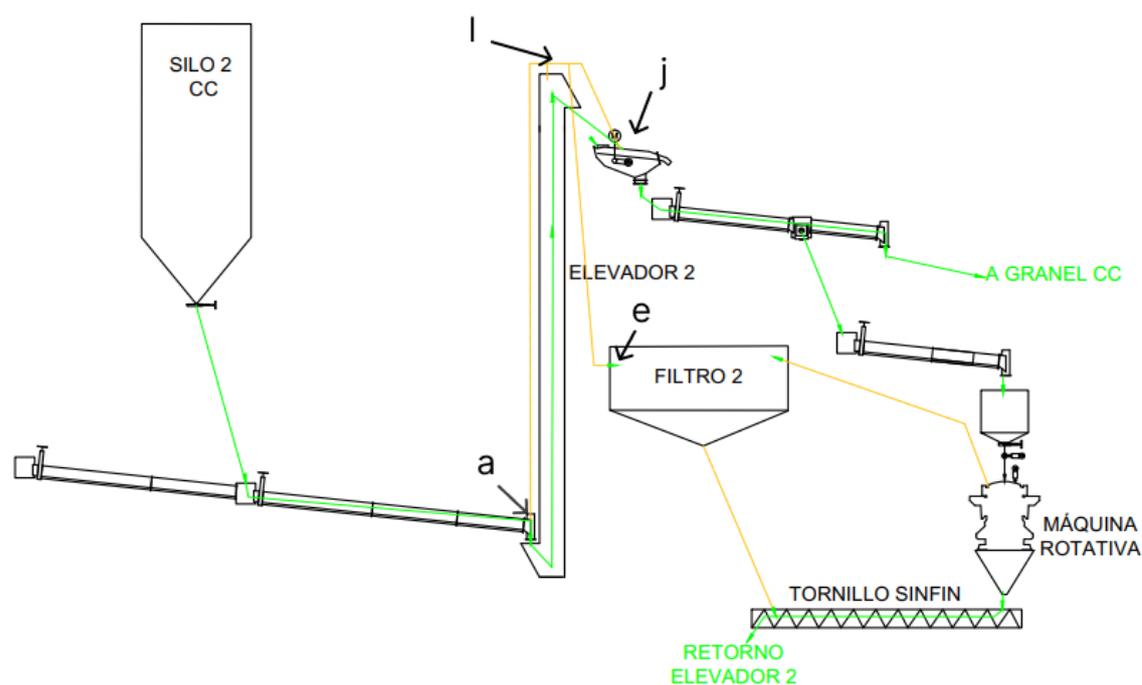


Figura 12: Identificación de puntos de extracción.

4.2.1. Campana de captación

Como se indicó en la Sección 3.4 se debe seleccionar una velocidad de captación acorde al sistema de ventilación que se está diseñando. De la Tabla 3 y de acuerdo a la condición de dispersión indicada como: “generación activa en una zona de rápido movimiento de aire”, el rango de velocidad está entre 1 y 2,5 m/s . Luego, de la Tabla 4 de factores de dispersión, se tienen criterios para fijar

Tabla 9: Detalle de operaciones.

Equipo	Campana	Caudal [m^3/s]	Otros datos:
Fluidor de descarga: 0,45 x 0,45 x 16 m	a	0,28	Caudal del soplador asociado = 0,23 m^3/s
Pie elevador de cangilones: 0,5 x 20 m	a	0,27	
Cabezal elevador de cangilones: 0,5 x 20 m	l	0,41	
Zaranda vibratoria: 2,15 m^2 (criba)	j	0,54	

un valor de velocidad dentro del rango dado. Un criterio que se ajusta a las características del sistema y que orienta la decisión hacia el límite superior indica: “gran producción u operaciones continuas”. Por lo tanto, se adopta $V_c = 2,5 m/s$.

Conociendo este parámetro y el caudal de despolvamiento de cada equipo, se determina, utilizando la Ecuación 8, la sección de entrada de cada campana y de allí se despeja el diámetro de entrada para el diseño. En la Tabla 10 se muestran los cálculos obtenidos del procedimiento y en la Figura 13 se tiene una representación de la forma elegida para las campanas. El diámetro “D1” corresponde al diámetro de salida y el “D2” es el diámetro de entrada a la campana.

Tabla 10: Datos para el diseño de las campanas de captación.

Equipo	Campana	Caudal mínimo [m^3/s]	Velocidad de captación [m/s]	Sección [m^2]	Diámetro de entrada [m]	Diámetro de salida [m]
Fluidor de descarga + pie elevador de cangilones	a	0,55	2,5	0,220	0,53	0,15
Cabezal elevador de cangilones	l	0,41	2,5	0,164	0,46	0,15
Zaranda vibratoria	j	0,54	2,5	0,216	0,52	0,15

4.3. Pérdidas en accesorios y conductos

Para mayor claridad se realiza, como referencia, el esquema unifilar de los conductos (mostrado en la Figura 14), indicando longitudes y diámetros de cada tramo y de los accesorios que componen el sistema. Los accesorios son identificados con una letra en imprenta minúscula y cada tramo de cañerías con la dupla de letras entre las cuales está comprendido.

Si bien se plantea un sistema completamente nuevo e independiente del sistema actual, el trazado de cañerías necesarias para conducir el aire y el polvo hasta el nuevo filtro se aproxima en distribución y requisitos al ya existente, con lo cual, para un primer cálculo se contabilizan

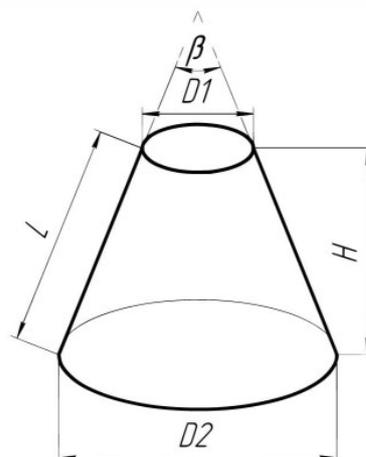


Figura 13: Forma de las campanas de captación.

los accesorios del sistema instalado, así como el diámetro y longitud de los conductos. Luego, se verificará y refinarán los cálculos.

A continuación, se resume la información obtenida y los cálculos realizados en una serie de tablas. En la Tabla 11 se listan los accesorios, con una descripción y el cálculo de pérdida de carga a través de los mismos.

Tabla 11: Datos y pérdida de carga en accesorios.

Accesorio	Descripción	Factor de fricción (n)	Pérdida de carga [mm.c.a.]
a	Entrada en forma de campana	0,04	0,79
b	Codo 90° - R/D=1,25	0,55	10,90
c	Unión a 30°	0,18	3,57
e	Entrada en forma de campana	0,04	0,79
f	Codo 30° - R/D=2,5	0,22	4,36
g	Codo 60° - R/D=2,5	0,22	4,36
h	Unión a 45°	0,28	5,55
i	Cuello de cisne - Codo 90° - R/D=1,25	0,55	10,90
j	Entrada en forma de campana	0,04	0,79
l	Entrada en forma de campana	0,04	0,79
k	Cuello de cisne - Codo 90° - R/D=1,25	0,55	10,90

Una vez definidos los requisitos de caudal para realizar el despolvamiento óptimo de cada equipo, se procede a calcular el tamaño óptimo de la cañería para movilizar dicho caudal a la velocidad de transporte. En la Tabla 12 se identifican los tramos de cañerías, la cantidad de aire y la velocidad

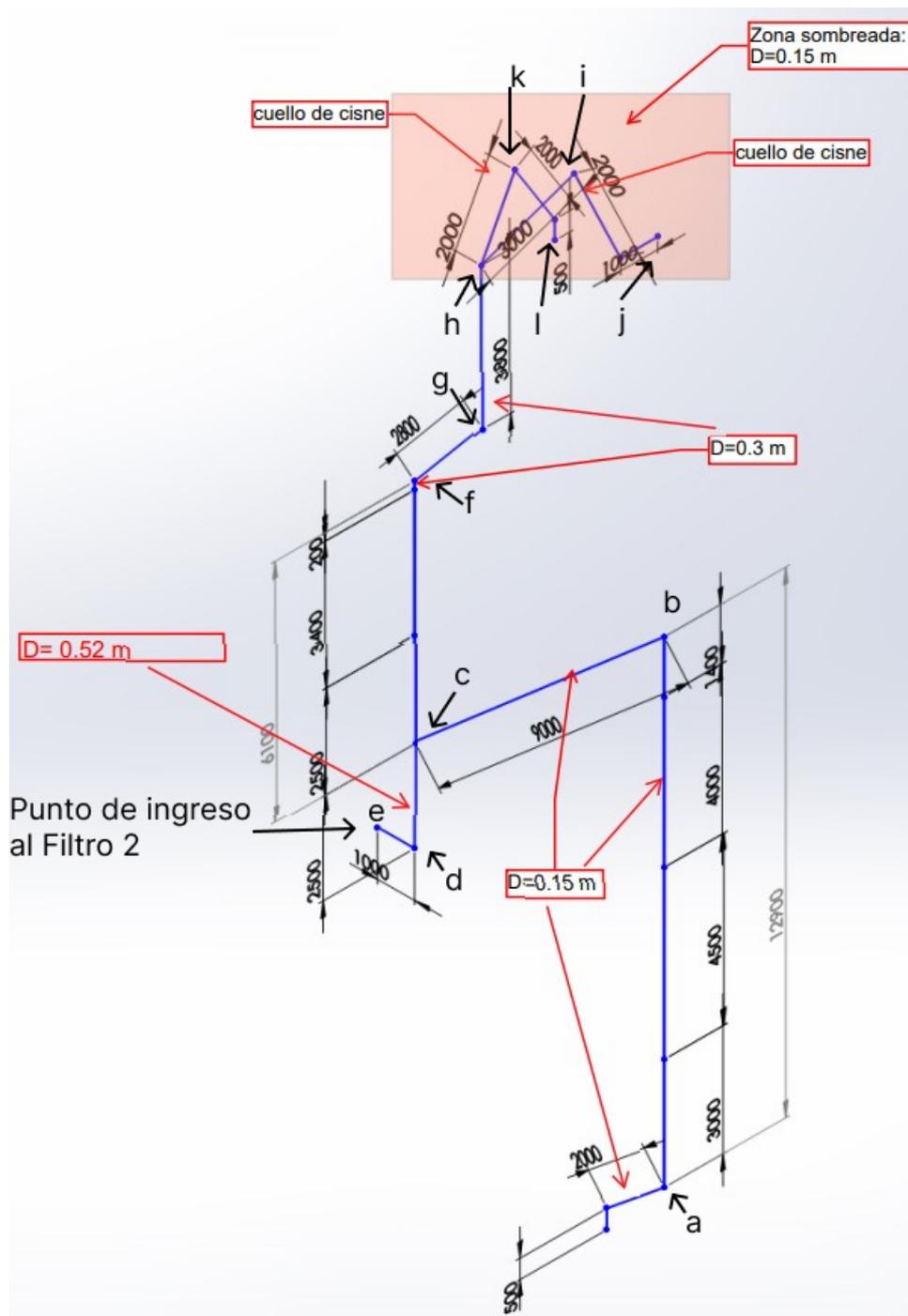


Figura 14: Trazado actual de cañerías.

de transporte necesaria, como así también la longitud y el diámetro actual del tramo en cuestión.

El caudal de diseño debe ser corregido por la diferencia de presión atmosférica del lugar de emplazamiento y temperatura característica del proceso según la Ecuación 14. Esto redefine el diámetro necesario de cañería. Finalmente las pérdidas se calculan por la Ecuación 15. Se muestra un resumen en la Tabla 13.

Tabla 12: Datos de conducciones rectas.

Tramo recto	Caudal [m^3/s]	Vel. de transporte [m/s]	Longitud [m]	Diámetro actual [m]	Presión dinámica [$mm.c.a.$]
a-b	0,55	18	12,9	150	19,82
b-c	0,55	18	9	150	19,82
c-d	1,5	18	1,5	520	19,82
d-e	1,5	18	1,5	520	19,82
c-f	0,95	18	6,1	300	19,82
f-g	0,95	18	3	300	19,82
g-h	0,95	18	2	150	19,82
h-j	0,54	18	5	150	19,82
h-l	0,41	18	4	150	19,82

Tabla 13: Pérdida de carga en tramos rectos.

Tramo recto	Caudal corregido por P y T [m^3/s]	Diámetro calculado [mm]	Pérdida de carga: h_f [$mm.c.a.$]
a-b	0,43	174,46	21,54
b-c	0,43	174,46	15,03
c-d	1,17	288,11	1,39
d-e	1,17	288,11	1,39
c-f	0,74	229,28	7,38
f-g	0,74	229,28	3,63
g-h	0,74	229,28	2,42
h-j	0,42	172,86	8,44
h-l	0,32	150,63	7,94

4.4. Dimensionamiento de calderería

Con los datos obtenidos hasta acá se pueden definir los materiales necesarios y sus cantidades con el objetivo de dimensionar de forma aproximada el pedido de calderería a realizar. Se tienen en cuenta las siguientes hipótesis:

- Las campanas, conductos y demás accesorios son realizados a pedido y bajo plano en metalúrgicas locales.
- Los cálculos de peso de material para los conductos se realizan en función de un espesor de chapa de acero al carbono de 6.35 mm. Este espesor presenta una resistencia al desgaste por

abrasión aceptable.

- Los cálculos de peso de material para las campanas de entrada se realizan en función de un espesor de chapa de acero al carbono de 4 mm. En las campanas se admite un espesor de chapa menor ya que la velocidad del aire dentro de ellas es menor que en los conductos.
- La chapa seleccionada es de calidad comercial. No debe soportar cargas más que su propio peso y el del material que transporta con lo cual, no se requiere garantizar propiedades mecánicas o composición química.

En la Tabla 14 se muestran los datos obtenidos del catálogo de productos de acero PRADCON (2024).

Tabla 14: Espesores de chapa.

Espesor de Chapa	Peso [kg/m^2]
4 mm	31,7
6,35 mm	50

De la Tabla 10 y de la Figura 13 se obtiene la geometría del tipo de campana seleccionado. En la Tabla 15 y en la Tabla 16 se muestran los resultados de los cálculos de área y peso de las campanas y de los tramos de cañerías respectivamente.

Como resumen, se tiene que las tres campanas de captación pesan 17 kg en chapa de 4 mm de espesor y la suma del peso de los conductos es de 1392 kg al ser fabricados en chapa de 6,35 mm de espesor.

Tabla 15: Datos para dimensionar las campanas de captación.

Campana	D2 [m]	D1 [m]	Área [m^2]	Peso [kg]
a	0,53	0,17	0,20	6,27
l	0,46	0,15	0,14	4,56
j	0,52	0,17	0,18	5,84
Total =				17

4.5. Dimensionamiento del filtro de mangas

4.5.1. Velocidad del frente

La relación gas/tela es la principal variable del diseño del filtro de mangas y se utiliza para obtener el parámetro de operación más importante: la pérdida de carga que representa el filtro.

Usualmente se simplifica la expresión G/T y se la denomina “Velocidad del frente”, V_f , y se define según la Ecuación 17:

Tabla 16: Datos para dimensionar los conductos.

Tramo	D [m]	L [m]	Área [m ²]	Peso [kg]
a-b	0,17	12,9	7,07	354
b-c	0,17	9	4,93	247
c-d	0,29	1,5	1,36	68
d-e	0,29	1,5	1,36	68
c-f	0,23	6,1	4,39	220
f-g	0,29	3	2,73	137
g-h	0,23	2	1,45	72
h-j	0,17	5	2,67	134
h-l	0,15	4	1,88	94
Total =				1392

$$V_f = \frac{Q_{aire}}{A_{neta}} \quad (17)$$

El caudal de aire adoptado será el valor obtenido de la suma de todos los equipos a despolver, adicionando un coeficiente de operación del 20 %. Este coeficiente se adopta en los diseños de sistemas de despolvamiento como criterio conservativo, interno de la compañía, sustentado en la posibilidad de modificaciones durante la operación normal. El caudal de diseño resulta ser 6480 m³/h.

En lo que respecta al área filtrante es altamente dependiente del tipo de tela a usar y esta a su vez depende del método de limpieza utilizado. En este caso, como ya se dijo, se adopta la tecnología Pulse Jet por los motivos que se listan a continuación:

- Tecnología sencilla y eficaz que proporciona altos rendimientos.
- Bajos costos de operación. En este ítem se tienen en cuenta los costos de mantenimiento de este tipo de tecnología versus los agitadores mecánicos, muy populares algunas décadas atrás.
- Al ser una tecnología altamente probada y con buenos resultados hay gran oferta de partes de recambio en el mercado local, siendo este punto clave en la selección de un equipo crítico.

Para finalmente decantarse por un tipo de tela se recurre además, a la información y experiencia técnica suministrada por los proveedores de filtros de mangas. En la Figura 41 (del Anexo del Capítulo 8) se muestran los tipos de telas comercialmente disponibles. Se los compara según su resistencia a la abrasión, al ataque por álcalis, por ácidos y su comportamiento con temperatura. Además, se indican los tipos de fijación de la manga a la placa espejo del filtro.

El tipo de tela apropiado a la tecnología Pulse Jet debe ser del tipo afelpada o punzonada y con muy buena resistencia a la abrasión, ya que el cemento es un material fuertemente abrasivo. Debe tenerse en cuenta que más de un tipo de material de tela puede ser usado para esta aplicación pero, al exigir más requisitos al género de filtrado se tiene un mayor impacto en los costos de adquisición

de cada manga. Típicamente el poliéster punzonado es apropiado para el fin requerido, ya que presenta excelente resistencia a la abrasión en un rango de temperaturas muy aceptable. Otro tipo de mangas con cada vez mayor difusión son las de poliéster con tratamiento PTFE debido a sus propiedades ignífugas.

En lo que respecta a la fijación, se prefiere el método *Snap Band* ya que su instalación es sencilla. En la Figura 15 se muestra la secuencia de instalación de este tipo de mangas.



Figura 15: Secuencia de montaje de manga con fijación tipo *Snap Band* (VENTEC, 1999).

De la Figura 10 se obtiene el dato de velocidad del frente (V_f) con la que idealmente se opera un filtro de mangas para el filtrado de partículas de cemento.

$$V_f = 8 \frac{pie}{min} = 2,43 \frac{m}{min} \quad (18)$$

Esta velocidad se afecta por un factor de aplicación dado por la Tabla 7. Como se trata de un filtro de proceso se adopta un coeficiente de 0,8, con lo que resulta:

$$\Rightarrow V_f = 1,94 \frac{m}{min} \quad (19)$$

4.5.2. Dimensionado de mangas

Luego, en la Ecuación 17 se reemplaza V_f y el valor del caudal de diseño. Se obtiene el área de filtración neta: 60 m^2 .

Una vez definido el tipo de tela a usar, se debe elegir el tamaño de la manga. Las dimensiones típicas de las mangas se encuentran en 120 a 160 milímetros de diámetro y entre 3 y 7 metros de longitud.

En este caso se adopta un diámetro de manga de $D_m = 120 \text{ mm}$. Este es un tamaño bastante típico de mangas y contribuye al objetivo de estandarizar el stock en los almacenes de la compañía. En cuanto al largo de la misma, existe una relación que depende de cuestiones geométricas y de imprecisiones en el montaje, que, para prevenir el desgaste por fricción entre las mangas se recomienda cumplir con:

$$\frac{L_m}{D_m} \leq 25 \quad (20)$$

De acuerdo con la ecuación anterior y el diámetro de mangas adoptado, resulta $L_m = 3 \text{ m}$.

Al seleccionarse una manga de 3000 mm de longitud y 120 mm de diámetro, el área superficial de la manga, supuesta con geometría cilíndrica dada por la Ecuación 21, resulta $A_m = 1,14 \text{ m}^2$.

$$A_m = \pi \cdot D_m \cdot L_m + \pi \cdot \frac{D_m^2}{4} \quad (21)$$

4.5.3. Cantidad de mangas

La cantidad de mangas necesarias para tratar el caudal de diseño viene dado por la Ecuación 22:

$$\begin{aligned} N^{\circ} \text{ mangas} &= \frac{A_{\text{neto}}}{A_m} \\ \implies N^{\circ} \text{ mangas} &= 52 \end{aligned} \quad (22)$$

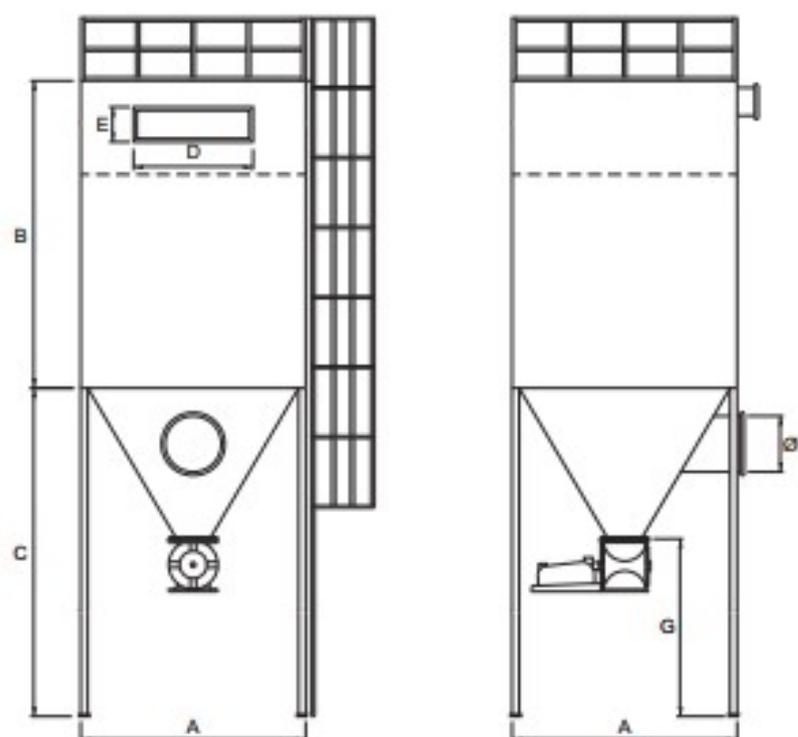
4.5.4. Caída de presión en el filtro

Típicamente la caída de presión a través del filtro de mangas se expresa mediante ecuaciones que combinan parámetros tales como: densidades, viscosidades, presiones, velocidades de filtración, presión del pulso de limpieza, método de limpieza, entre otros. Existen varios modelos propuestos por varios autores pero todos ellos requieren de parámetros que, a priori, no son conocidos o son muy complejos de determinar. Por lo tanto, la bibliografía consultada informa que los valores típicos de caída de presión van desde los 125 a los 500 mm.c.a. (ACGIH, 1998). Por comparación con el punto de funcionamiento del actual Filtro 2 se adopta para el cálculo un valor de pérdida de carga de: $130 \text{ mmH}_2\text{O}$.

4.6. Ubicación del filtro de mangas

Dado que son equipos voluminosos, el sector de emplazamiento es un tema no menos importante.

La Figura 16 se obtuvo de la consulta a un proveedor de filtros de mangas. Allí se ven una serie de modelos de filtros, sus dimensiones, cantidad de mangas admitidas, el peso total del mismo y el área filtrante total. Cabe aclarar que esta información fue suministrada en base al tipo de material a procesar, es decir, en función del tipo de tela de las mangas seleccionado.



Modelo	A mm	B mm	C mm	D mm	E mm	Ø F mm	G mm	Cant. de Mangas	Peso Kg	Area Filt. (m ²)
1016 - 106	1000	3500	2500	300	300	200	1500	16	1110	21
1025 - 106	1200	3500	2700	450	300	250	1500	25	1350	33
1036 - 106	1400	3500	2900	600	300	300	1500	36	1610	47
1049 - 106	1600	3500	3100	750	300	350	1500	49	1890	64
1064 - 106	1800	3500	3300	900	300	400	1500	64	2190	83
1081 - 106	2000	3500	3500	1050	300	450	1500	81	2500	105
1111 - 106	2400	3800	3900	1200	600	600	1500	121	3590	156
1313 - 106	2800	3800	4300	1500	600	750	1500	169	4440	218
1515 - 106	3200	3800	4700	1800	600	900	1500	225	5380	291

Figura 16: Modelos de filtros de mangas.

Dicho equipo se estima que ocupe un volumen no menor a los 50 m³. Este dato es estimado a partir del cálculo del volumen hallado en la Figura 16 y agregando un volumen extra de similares características para alojar el ventilador, motor eléctrico y los conductos de entrada de aire sin filtrar y su salida respectivamente.

En la Figura 17 se muestra un corte del edificio, y en línea de color verde se trazó a escala el filtro de mangas y una aproximación del trazado de cañerías.

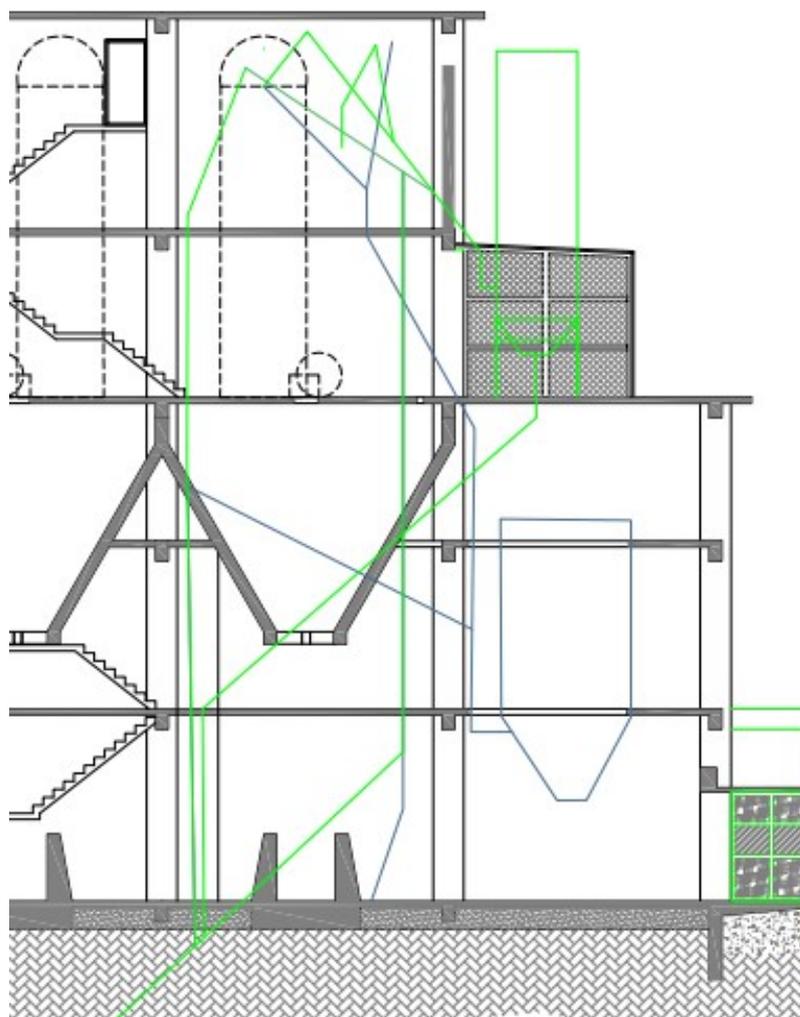


Figura 17: Ubicación del nuevo filtro de mangas.

De las opciones estudiadas ésta es la que prevaleció debido a que presenta una distribución de ductos más sencilla (similar al trazado actual de cañerías), más accesible para la instalación y el posterior mantenimiento, ya que quedaría emplazado en el exterior del edificio y se ubicaría a corta distancia del sector más comprometido a nivel de cantidad de puntos a despolvar (equipos del cuarto piso).

4.7. Selección del ventilador

Una vez determinado el caudal requerido para los equipos instalados (Q_d) y determinada la pérdida de carga (ΔP_T) a través de todo el sistema, se debe seleccionar el ventilador que satisfaga estos requisitos de caudal y presión. Para este caso se considera el caudal requerido con un margen de seguridad del 20 %, lo que resulta en un valor de $Q_{dv} = 7776 \text{ m}^3/h$. La caída de presión a satisfacer es, como mínimo, $\Delta P_T = 253 \text{ mm.c.a.}$

La elección del ventilador se opta por uno del tipo centrífugo con palas curvadas hacia atrás. No obstante, es habitual que se utilicen ventiladores con palas radiales y rectas, ya que ésta configuración evita la excesiva acumulación de partículas sobre las palas. En este caso se prefiere un equipo que admita modificaciones del punto de trabajo sin afectar en gran medida el rendimiento. Además, este tipo de ventiladores poseen un nivel de ruido más bajo, lo que es apropiado debido a que se ubicará en un sitio muy transitado por operadores y transportistas.

La selección del ventilador se realiza mediante el catálogo de un fabricante de ventiladores industriales (Euroventilatori, 2006). El fabricante separa sus productos según sea baja, media o alta presión. Este caso se encuentra en el segmento de baja presión, con la cual, se recurre al uso de los diagramas característicos de la serie EU-EUM-MPR, allí se muestra el rango o zona de operación de cada modelo. Estas curvas se pueden apreciar en la Figura 18.

Según la descripción del fabricante, estos modelos de ventiladores son apropiados para aspirar aire muy polvoriento, con diferentes tipos de materiales en suspensión. La característica principal de esta serie es la asociación del elevado rendimiento (derivado del empleo de una rueda de paletas invertidas, perfil especial) con la aspiración de fluidos polvorientos. Dichos ventiladores también se caracterizan por una curva de potencia absorbida muy plana, para no sobrecargar el motor, ni siquiera cuando funciona sin resistencia. Típicamente se instalan en los transportes neumáticos de las fábricas de cemento y, en general, en todas las aplicaciones donde se requiere el transporte de aire sucio, con baja o media presión. La temperatura del fluido aspirado no tiene que superar 80°C . En caso de temperaturas superiores, hay que efectuar algunas modificaciones en la construcción del ventilador.

Se ingresa al gráfico de la Figura 18 con $Q_{dv} = 130 \text{ m}^3/\text{min}$ y $\Delta P_T = 253 \text{ mmH}_2\text{O}$, el cual indica que la zona de operación corresponde a dos tipos de ventiladores, a saber, modelos EU de 2 polos o TR de 4 polos. Luego, se utiliza la tabla de la Figura 20 para seleccionar el modelo que proporciona el caudal y la presión necesaria, este es el **EU 502 - centrífugo**. En la Figura 19 se muestra el tipo de ventilador que cumple con los requisitos de operación.

En este caso de debe realizar una interpolación lineal simple para obtener la caída de presión del ventilador en función del caudal requerido ($130 \text{ m}^3/\text{min}$). Como resultado de esta operación se obtiene la Tabla 17. El valor de presión hallado corresponde al régimen de velocidad de 2900 rpm.

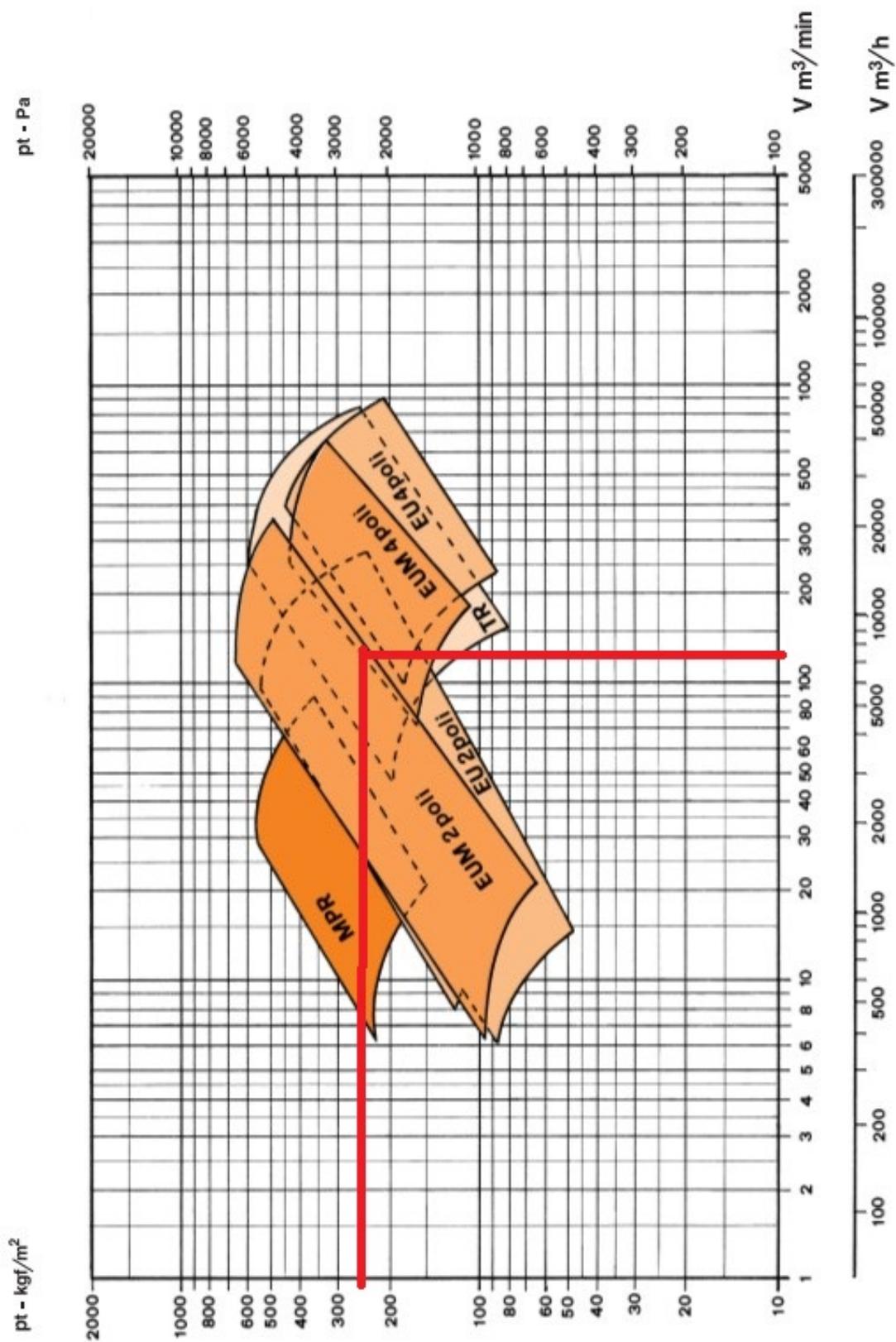


Figura 18: Zonas de operación de la serie EU-EUM-MPR (Euroventilatori, 2006).



Figura 19: Ventilador serie EU (Euroventilatori, 2006).

Tabla 17: Interpolación lineal para $n=2900$ rpm.

Q [m^3/min]	ΔP [kgf/m^2]
$Q_1 = 125$	$P_1 = 285$
$Q_{vd} = \mathbf{130}$	$P_T = \mathbf{270}$
$Q_2 = 140$	$P_2 = 240$

En la Figura 20 se suministra además, información del motor apropiado para este fin:

- Tamaño de carcasa: 132 MB2
- Potencia: 9 kW
- Tipo de corriente: Trifásica
- Cantidad de Polos: 2
- Intensidad acústica (conjunto motor ventilador): 83 dB/A.
- Velocidad síncrona: 3000 rpm

Del Catálogo de Czerweny (2024), se selecciona el motor **TE 1A 132 M P2**. Es un motor de dos polos, de la serie 1A, de 10 kW de potencia y una velocidad de giro de 2900 rpm.

4.7.1. Rendimiento del ventilador

Una vez obtenidas las características básicas del ventilador se debe calcular el rendimiento con el que trabaja.

El rendimiento η , Ecuación 23, se define como el cociente entre la potencia que entrega el ventilador al aire, Pot_a , dividida por la potencia que el ventilador recibe en su eje, Pot_V , ambas expresadas en las mismas unidades:

$$\eta = \frac{Pot_a}{Pot_V} \quad (23)$$

La potencia entregada al aire por el ventilador depende del caudal de aire que circula y de la presión necesaria para vencer las pérdidas que ofrece el sistema de conductos y se puede expresar como (Ecuación 24):

$$Pot_a = \frac{Q_{dv} \cdot \Delta P_T \cdot g}{1000} \quad (24)$$

Donde:

Pot_a = Potencia entregada al aire por el ventilador [kW].

Q_{dv} = Caudal de diseño [m^3/s].

ΔP_T = Caída de presión total [$mm.c.a.$].

g = Aceleración de la gravedad [m/s^2].

La potencia que recibe el ventilador en su eje se obtiene de los datos suministrados por los fabricantes (y depende del tamaño del ventilador seleccionado para una situación determinada).

Cuando las condiciones del ambiente local son distintas a las estándar se debe corregir la presión estática. Esto se realiza aplicando las leyes de los ventiladores, en particular la Segunda Ley (Escoda, 2002), en la cual varía la densidad del aire mientras que el caudal, el sistema de ventilación, el tamaño del ventilador y la velocidad de rotación de este se mantienen constantes, la presión estática se modifica según:

$$P_{e2} = P_{e1} \cdot \frac{P_2 \cdot T_1}{P_1 \cdot T_2} \quad (25)$$

En este caso, los subíndices “2” son los parámetros transformados a condiciones estándar y el subíndice “1” son las condiciones de presión y temperatura estándar. Al reemplazar valores en la Ecuación 25 resulta:

$$P_{e2} = 253 \text{ mmH}_2\text{O} \cdot \frac{760 \text{ mmHg} \cdot (30 + 273) \text{K}}{698 \text{ mmHg} \cdot (20 + 273) \text{K}} \quad (26)$$

$$P_{e2} \implies \Delta P_T' = 285 \text{ mmH}_2\text{O}$$

Este valor de presión estática corregida se corresponde al mismo tipo de ventilador pero a un régimen de velocidad distinto. En este caso al variarse la velocidad de giro del ventilador y manteniéndose los otros parámetros constantes, se puede despejar de la Primera Ley para ventiladores (Escoda, 2002), el valor de la nueva velocidad. Dicha ley se puede expresar como:

$$P_{e2} = P_{e1} \cdot \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2 \quad (27)$$

Donde: $P_{e2} = 285 \text{ mmH}_2\text{O}$, $P_{e1} = 270 \text{ mmH}_2\text{O}$ y $n_1 = 2900 \text{ rpm}$.

Despejando de la Ecuación 27 se obtiene: $n_2 = 2980 \text{ rpm}$.

La potencia que recibe el ventilador en su eje se corrige usando otra forma de la Segunda Ley de los ventiladores que incluye la potencia en función de la velocidad según (Ecuación 28):

$$Pot_2 = Pot_1 \cdot \frac{P_2 \cdot T_1}{P_1 \cdot T_2} \quad (28)$$

Reemplazando valores en la Ecuación 28 resulta:

$$Pot_2 = 8,7 \text{ kW} \cdot \frac{698 \text{ mmHg} \cdot (20 + 273) \text{K}}{760 \text{ mmHg} \cdot (30 + 273) \text{K}} \quad (29)$$

$$Pot_2 \implies Pot_V' = 7,72 \text{ kW}$$

Finalmente, se calcula la eficiencia con la que trabaja el ventilador sobre el sistema de ventilación como:

$$\eta = \frac{Q_{dv} \cdot \Delta P_T' \cdot g}{1000 \cdot Pot_V'} \quad (30)$$

$$\eta = 0,78$$

En resumen, se requiere un ventilador serie EU-502 que gire a 2980 rpm y reciba en su eje 7.72 kW con un rendimiento del 78 %.

5. PLAN DE MANTENIMIENTO

En esta sección se describe una forma de abordar el mantenimiento del equipo de filtración.

Lo primero que se tiene en cuenta respecto a estos equipos es la función que cumplen dentro del proceso. En este caso no solo es un equipo de filtración de material de reproceso, sino que es el equipo que permite la operación del despacho sin que se produzcan atoraduras en el circuito o polución en el ambiente. Debido a esto se lo clasifica como **equipo crítico**.

Otra forma de analizar la criticidad de los equipos involucrados es pensar en qué consecuencias trae aparejada una parada imprevista, o preguntarse qué sucede si el equipo queda fuera de servicio, por ejemplo, durante todo un turno de 8 horas completo. Las consecuencias a las personas se aprecian en lo inmediato: polución en el ambiente dificultando o imposibilitando la operación normal. Luego, se tiene el impacto en la producción y el lucro cesante, además, se ve afectada la confiabilidad y el compromiso con el cliente.

El concepto de criticidad planteado anteriormente es un criterio mucho más amplio que solo un conjunto de tareas a realizar, es el punto de partida que prioriza al equipo sobre otros. Define qué cantidad de recursos se deben dedicar a este y en qué tiempo.

5.1. Componentes básicos del plan de mantenimiento

A continuación, se describe el significado y la importancia de los conceptos que aparecen en la tabla de la Figura 21. Se presenta el plan de mantenimiento planteado para el filtro de mangas y el ventilador, ambos componentes principales del sistema de filtrado. Se subdivide el total de tareas siguiendo los conceptos y criterios apropiado para cada caso.

5.1.1. Tipo de mantenimiento

En la segunda columna de la Figura 21 se muestra el “tipo de mantenimiento”:

- MPR: Mantenimiento programado.
- MPD: Mantenimiento predictivo.
- PRE: Mantenimiento preventivo.
- LUB: Lubricación.

Esta clasificación permite organizar el plan de mantenimiento en grupos de tareas de acuerdo al objetivo al que apuntan.

El MPR es el tipo de mantenimiento que tiene como objetivo mantener la funcionalidad del equipo a sabiendas que, con el uso del mismo, éste sufre un desgaste normal y cada cierto tiempo deben ser restablecidos sus componentes, partes y parámetros para cumplir una función. La perio-

EQUIPO	TIPO DE MANTENIMIENTO	Nº DE TAREA	TAREA	ESTADO DE LA INSTALACIÓN	TIPO DE TAREA	BAJA FRECUENCIA (>1M)	ALTA FRECUENCIA (<1M)	Nº DE PERSONAS	TIEMPO ESTIMADO [h]
FILTRO DE MANGAS	MPR Vibraciones	1	Monitoreo de vibraciones	M	Inspección	1M		1	0.1
	MPR Filtro	2	Control de funcionamiento	M	Mecánica	1 M		2	8
	MPR Filtro	3	Control de instalación eléctrica	M	Eléctrica	3 M		1	1
	MPR Filtro	4	Limpieza conducto de aspiración	D	Mecánica	3 M		1	2
VENTILADOR	MPD Filtro	5	Vibraciones de equipos críticos - ruta de vibraciones	M	Inspección	2 M		1	0.5
	MPR Filtro	6	Recorrida Inspección	M	Inspección		1 D	1	0.1
	LUB Ventilador	7	Lubricación de rodamientos	D	Lubricación	3 M		1	0.5
	PRE Ventilador	8	Limpieza y control	D	Mecánica	3 M		1	0.1
VENTILADOR	PRE Ventilador	9	Limpieza y control	D	Mecánica	6 M		2	3
	PRE Ventilador	10	Control de instalación eléctrica	D	Eléctrica	3 M		2	2
	MPR Ventilador	11	Control estructural	M	Inspección	1 A		2	2
	MPD Ventilador	12	Vibraciones de equipos críticos - ruta de vibraciones	M	Inspección	2 M		1	0.5
	MPR Ventilador	13	Recorrida Inspección	M	Inspección		1 D	1	0.5

Figura 21: Plan de mantenimiento del filtro de mangas y del ventilador.

dicidad depende de análisis previos, conocimiento del principio de funcionamiento de los equipos, recomendaciones de fabricantes, experiencia de uso, entre otras técnicas.

El MPD es el nombre que se le asigna a las tareas orientadas a caracterizar el equipo. Su objetivo es poder conocer el comportamiento del equipo a lo largo del tiempo y así poder inferir cómo será su evolución en aspectos tales como la velocidad de desgaste, el nivel de vibraciones o mapas de temperaturas por mencionar algunos ejemplos. Al conocer como evolucionan estas variables, se trazan curvas o espectros que, con el conocimiento técnico de un especialista y mucho sentido común, permiten predecir la frecuencia más apropiada para realizar las tareas de mantenimiento. Ejemplo: ruta de vibraciones con análisis de espectros.

En cuanto al PRE o mantenimiento preventivo lo que se busca es determinar de manera puntual cómo se comporta el equipo en una condición específica. En este caso se buscan anomalías puntuales que, detectadas a tiempo, evitan una falla de mayor magnitud. Ejemplo: relevar valores de velocidad y aceleración de las vibraciones y contrastarlos con los valores óptimos.

La LUB es un caso especial del mantenimiento programado y preventivo. Se entiende que la lubricación para equipos con partes rotantes es fundamental para garantizar su performance. Representa un costo muy bajo frente a los beneficios que se obtienen, por ejemplo, la extensión de la vida útil de los componentes, con lo cual, se le dedica un grupo de tareas específicas a esta actividad.

5.1.2. Estado de la instalación

Avanzando en la lectura de la tabla, en la tercera columna se indica el “estado de la instalación”, esto es: máquina en *marcha* o máquina *detenida*.

Esto es sumamente útil al momento de la programación de las tareas. Permite decidir si una tarea puede realizarse en cualquier momento de la operación, siempre y cuando se tengan los recursos disponibles, o deberá realizarse en diferido cuando se den las condiciones de parada del equipo, ya sea específica de mantenimiento o por cuestiones operativas.

Algunas tareas requieren que el equipo esté en marcha para poder realizarlas pero, esto no significa que el estado de la instalación también lo sea. En estos casos se energizan y se marchan los equipos de manera discrecional de manera local o remota manualmente.

5.1.3. Tipo de tarea

En cuanto al tipo de tarea se ve en la sexta columna que pueden ser del tipo:

- Mecánico.
- Eléctrico.
- Inspección.

- Lubricación.

El tipo de tarea requerido define a quién va dirigida cada actividad específica, es decir, qué especialización debe tener el operador que realizará dicha tarea.

El caso de la inspección se la reserva para operadores más antiguos en el puesto que cuenten tal vez con más experiencia. Esto les permite desarrollar criterios más profundos y hacer interpretaciones más acertadas de los datos relevados.

5.1.4. Frecuencia

La frecuencia dicta el ritmo con el que se realizan las tareas. Por definición se tienen tareas de *baja frecuencia*, es decir que su repetición será como mínimo cada treinta días desde su primer ocurrencia. Las tareas de *alta frecuencia* se refiere a tareas que son realizadas diaria o semanalmente, o en un período inferior a los treinta días.

Las tareas de alta frecuencia son tareas relativamente sencillas, breves, rutinarias y ampliamente conocidas por la mayoría ya que se realizan muy seguido. Por su parte, las tareas de baja frecuencia requieren de mayor especialización, no son rutinarias y por lo general de mayor complejidad, requiriendo mayor cantidad de recursos para su concreción.

Las tareas de baja frecuencia pueden darse en paquetes de uno, dos, tres y seis meses, esto significa que habrá tareas que se repiten a los dos meses de la primer ocurrencia y otras nuevas tareas que se agregan según se corresponda con el período. Hay también, tareas anuales y bianuales, como ser calibraciones u *overhauls* y dependen exclusivamente del tipo de equipo, su función en el proceso, nivel de actividad, etc.

5.2. Planes de mantenimiento por equipo

En las Figuras 22 a 27 se proponen planes de mantenimiento para el filtro de mangas y para el ventilador respectivamente. Allí se incluyen los criterios descriptos anteriormente y se listan una serie de tareas específicas, indicando la cantidad de operarios requeridos y el tiempo que insume cada tarea. Estos parámetros permiten el cálculo de horas-hombre para su realización.

EQUIPO:		FILTRO DE MANGAS		
TIPO DE MANTENIMIENTO:		MPR, PRE, MPD Y LUB		
Nº	TAREA	ESTADO DE LA INST.	TIPO DE TAREA	FREC.
1.1	Monitoreo de Vibraciones: Tomar vibraciones en puntos definidos. Registrar valores en planilla correspondiente, observar el gráfico y realizar el Aviso y priorizarlo en caso de arrojar los valores definidos como alarma.	M	Inspección	1M
2.1	Control lectura Presión De Trabajo: Comparar lectura de PDT con indicación en Control y en caso de presentar un desvío superior al 10% realizar Aviso.	M	Mecánica	1M
2.2	Control de mangueras: Revisar mangueras y conexiones en busca de resquebrajamiento o desgastes pronunciados; en caso de detectarlos cambiarlas. La tarea se puede realizar con el resto del filtro en marcha, cortando el aire de comando.	M	Mecánica	1M
2.3	Control de sistema de aire: 1- Inspeccionar el vaso de FR y si se encuentra rayado de manera que dificulte la visión de presencia de agua y/o estado de filtro sinterizado, cambiarlo. Si sólo está sucio, descomprimir, desmontar y limpiar interior y exterior de vaso con agua y jabón desincrustante. 2- Regular presión en 6 bar. 3- Inspeccionar auditivamente para detectar pérdidas de aire en entrada y consumos aguas abajo.	M	Mecánica	1M
2.4	Control de movilidad de clapeta: Mover la clapeta de descarga para comprobar que no este trabada/pesada. En caso de anomalías reparar.	M	Mecánica	1M
2.5	Limpieza general: Quitar del equipo (tablero, cañones, válvulas, tablero neumático, FR, PDT, etc) restos de cemento y/o aceite con cepillo de cerda y trapo (si es necesario usar solvente).	M	Mecánica	1M
2.6	Control funcionamiento electroválvulas: Comprobar que estén trabajando todas las electroválvulas. En caso de anomalías reparar.	M	Mecánica	1M

Figura 22: Tareas para el plan de mantenimiento del filtro de mangas.

2.7	Control de tiempo entre soplidos: Comprobar que el tiempo de recuperación entre soplidos sea menor a 10 segundos, sino regular desde el tablero de comando de válvulas.	M	Mecánica	1M
2.8	Control sellado válvulas: Comprobar que la presión se restablezca inmediatamente después del soplido de limpieza, si la presión no vuelve significa que la membrana de alguna/s válvula/s no está sellando. Cambiar la electroválvula.	M	Mecánica	1M
2.9	Búsqueda de manga rota: Colocar durante 5 minutos un papel secante húmedo en la salida del exhaustor, si detecta que se pegan partículas de cemento significa que hay al menos una manga rota. Solicite ayuda para localizar de acuerdo al soplado (observando en tablero eléctrico) de que línea de mangas proviene, una vez identificada: 1- Solicitar la detención del ventilador para despresurizar la cámara limpia. 2- Abrir la tapa de cámara limpia 3- Colocar el aparato de medición (caño de ½" para circular aire y caño en diagonal para producir la aspiración, conectado a la boca de la manga), de la manga rota saldrá polvo; realizar la misma prueba en cada una de las mangas de la línea identificada. En todos los casos se debe cambiar la manga.	M	Mecánica	1M
2.10	Control de sellado de aspiración: Inspeccionar sellos de tapas de inspección, bridas, etc para detectar entrada de aire falso y ante anomalías, reparar.	M	Mecánica	1M
2.11	Control velocidad de aspiración: Medir velocidad con anemómetro, en todas las tuberías de aspiración, debe encontrarse entre 18/20 m/seg; si se encuentra fuera de este rango comprobar: - que estén libres de obstrucciones las aspiraciones, golpear con martillo de goma suavemente las cañerías, se escucha claramente cuando se desprende el material, si el ruido es sordo está endurecido y se deberá usar otros métodos para destaparlo. - que no se encuentren atoradas las mangas.	M	Mecánica	1M

Figura 23: Tareas para el plan de mantenimiento del filtro de mangas (Continuación).

2.12	Control estado compensadores en caños: Inspeccionar los compensadores de las cañerías de aspiración y si detecta roturas en fuelle, bridas y/o abrazaderas, reparar.	M	Inspección	1M
2.13	Control integridad de conductos: Revisar los conductos, en especial en los lugares donde están instaladas las clapetas de regulación, codos y curvas. Al disminuir el diámetro del conducto en las regulaciones, las partículas aumentan considerablemente la velocidad provocando el desgaste del metal, en codos y/o curvas las mismas al cambiar de dirección se recuestan sobre la pared del conducto, en conductos rectos se mueven en el interior sin tocar las paredes.	M	Inspección	1M
3.1	Observar los cables de instalación eléctrica, especialmente en la boca de las cañerías y si presentan cortes en la aislación reparar o cambiar el tramo dañado del cable. Comprobar que las cajas de paso o mandos tengan bien colocadas las tapas (con todos los tornillos ajustados) y prensacables ajustados.	D	Eléctrica	3 M
4.1	Limpieza conducto de aspiración: Quitar material sedimentado en acometida a cámara sucia, desde tapa de inspección. Si no tiene tapa, realizar Aviso. Limpiar la toma de aspiración en la tolva y la cañería horizontal de distribución.	D	Mecánica	3 M
4.2	Ajustar Venturi: Los mismos tienen que girar aprox. 90° de su posición inicial.	D	Mecánica	3 M
4.3	Cambio de o´ring y filtro: En Filtro regulador de aire cambiar o´ring y filtro.	D	Mecánica	3 M
5.1	Ruta de vibraciones mediante Microlog,	M	Inspección	2 M

Figura 24: Tareas para el plan de mantenimiento del filtro de mangas (Continuación).

EQUIPO:		VENTILADOR		
TIPO DE MANTENIMIENTO:		MPR, PRE, MPD Y LUB		
Nº	TAREA	ESTADO DE LA INST.	TIPO DE TAREA	FREC.
6.1	Lubricación rodamientos: en exhaustores y ventiladores se lubrican los soportes del eje. Realizar aviso si se encuentran anomalías.	M	Lubric.	3 M
7.1	Control temperatura de correas: Enfocar el pirómetro infrarrojo en la zona cercana a las poleas. La temperatura máxima aceptable para una correa es de 70°C, si la supera se deben realizar con la misma OT, inspecciones de alta frecuencia hasta determinar la falla y realizar el Aviso.	M	Mecánica	3 M
7.2	Limpieza y control álabes: retirar la tapa de inspección y con aire a baja presión soplear los álabes. Antes de hacerlo observar y si hay demasiada acumulación de polvo tomar las precauciones necesarias para contener el polvo. Revisar luego si hay mangas rotas y reparar. Observar los álabes y si presentan deformaciones y/o desgastes realizar Aviso.	M	Mecánica	3 M
7.3	Control de correas: quitar protección y marchar en forma MANUAL. Enfocar con lámpara estroboscópica en busca de algún efecto de patinamiento o correas sueltas. Para este caso recurrir a las "Guías de mantenimiento".	M	Mecánica	3 M
8.1	Limpieza de poleas: en caso de presencia de aceite o grasa quitar usando desengrasante, observar de dónde proviene, si dispone de recursos reparar, sino realizar una acción interina y Aviso.	M	Mecánica	6 M
8.2	Control de desgastes y ajuste: con la galga comprobar estado de canales, debe apoyar totalmente en los laterales y no llegar al fondo, si presenta desgaste o fisuras realizar Aviso. Comprobar que no exista juego en la chaveta, si se detectan realizar Aviso. Ajustar bulones de manguitos. Cambiar bulones de sujeción de protección, son propensos a sufrir fatiga.	M	Mecánica	6 M

Figura 25: Tareas para el plan de mantenimiento del ventilador.

8.3	Control alineación de poleas en V: Marchar en forma MANUAL y acercarse a las poleas a escuchar posibles ruidos agudos en la transmisión.	M	Mecánica	6 M
8.4	Limpieza y control de protección poleas: quitar y limpiar la protección, si nota óxido o falta de pintura, realizar Aviso. En caso de deformaciones y/o roturas reparar.	M	Mecánica	6 M
8.5	Control tacos de amortiguación: Medir altura de tacos y si están desparejos realizar Aviso para cambiarlos.	M	Mecánica	6 M
8.6	Limpieza general: quitar del equipo restos de cemento y/o aceite con cepillo de cerda y trapo. Si es necesario utilizar desincrustantes y desengrasantes autorizados. Limpieza chapa de datos: limpiar la/s chapas de datos característicos e identificación SAP y colocarle una fina película de grasa o vaselina para facilitar la limpieza en el próximo mantenimiento. En caso de deterioro de la identificación de SAP realizar Aviso.	M	Mecánica	6 M
9.1	Control de instalación eléctrica: observar los cables de instalación eléctrica, especialmente en la boca de las cañerías y si presentan cortes en la aislación reparar o cambiar el tramo dañado del cable. Comprobar que las cajas de paso o mandos tengan bien colocadas las tapas (con todos los tornillos ajustados) y prensacables ajustados. Comprobar ajuste de prensacables, la aislación que abraza a los cables unifilares debe quedar adentro del prensacables sobrepasando 3 mm por lo menos hacia adentro. En caso de anomalías normalizar.	D	Eléctrica	3 M
9.2	Ajustar y comprobar fijación sensores: Ajustar tuercas de los sensores en caso de ser cilíndricos. Ajustar tornillos de fijación del sensor al soporte y del soporte a la estructura. En sensores inductivos regular la distancia de sensado en 3 mm.	D	Eléctrica	6 M
9.3	Comprobar fijación de cañerías.	D	Eléctrica	1M

Figura 26: Tareas para el plan de mantenimiento del ventilador (Continuación).

9.4	Ajustar los bornes de todos los elementos (control de giro, sensores, vigías, llaves de marcha manual, etc). En caso de empalmes estos deben ser soldados y aislados con termocontraíble, si no están así, normalizar.	D	Eléctrica	1M
9.5	Control y ajuste sensor de giro: Con equipo detenido, alejar el sensor de control de giro y solicitar marcha MANUAL a Control Central, si marcha significa que la señal está permanente, revisar y normalizar. De encontrarse anomalías, realizar Aviso y tomar las medidas interinas correspondientes para minimizar la posibilidad de afectar a personas, medio ambiente sustentabilidad o instalaciones o pérdidas de productividad.	D	Eléctrica	3 M
10.1	Control de bulones de base y motor: Ajustar bulones de fijación de exahustor a la base. Si están flojos se debe comprobar alineación.	M	Inspección	1 A
10.2	Control de estructura de máquina: mediante observación con lupa intentar detectar soldaduras quebradas. Si se detectan evaluar la reparación o realizar Aviso Urgente realizando las acciones interinas correspondientes. En caso de dudas aplicar tinta penetrante. Si existen bulones y/o soldaduras inaccesibles realizar Aviso para realizar modificación que permita el acceso. Si algún bulón se encontró muy flojo determinar la causa, reparar o realizar Aviso. Si la pintura está atacada por óxido realizar Aviso.	M	Inspección	1 A
11.1	Ruta de vibraciones mediante Micrológ.	M	Inspección	2 M

Figura 27: Tareas para el plan de mantenimiento del ventilador (Continuación).

6. ANÁLISIS DE VIABILIDAD

Para llevar a cabo este análisis, en paralelo al desarrollo del trabajo de relevamiento, se realizó un *análisis de tiempos* de operación con cada uno de los productos (Figura 28).

Análisis de tiempos (enero a diciembre)		
Horas de parada circunstancial	De mercado	95,0
	Por stock	1099,2
	TOTAL	1194,2
HR PROMEDIO DISPONIBLES POR MES		99,5

Figura 28: Análisis de tiempos para obtener la disponibilidad de la Máquina Rotativa.

Se determinó cuales fueron los tiempos muertos que tuvo la Máquina Rotativa en el transcurso de un año calendario (esto permite tener en cuenta las estacionalidades del mercado), con la actual configuración de los equipos. El objetivo era obtener la disponibilidad de la MR para marchar, es decir, cuantas horas más a la semana puede la MR estar operativa. En la Figura 28 se muestran las horas de parada contabilizadas y con posibilidad de ser aprovechadas, es decir, que no se han tenido en cuenta las paradas programadas, por ejemplo, horas destinadas al mantenimiento de los equipos. En el análisis de tiempos se consideraron las horas de parada circunstanciales. Este tipo de paradas se debe a que: existe stock suficiente de los productos principales, entonces no hay necesidad de tener los equipos en funcionamiento o a un cambio en el mix de producción ya que se prioriza la producción según la demanda del mercado.

De dicho análisis, se encontró que la MR tiene un espacio de tiempo ocioso, en promedio, de aproximadamente 100 *h/mes*. A este dato se lo denomina “disponibilidad de la MR”.

Por otro lado, se debe conocer la productividad de la MR para fabricar bolsas de CL. Este valor de productividad se expresa en toneladas de material procesado por hora. En la Figura 29 se muestran los valores obtenidos y que serán utilizados para los cálculos del análisis de viabilidad.

Hipótesis de trabajo	
Disponibilidad de la MR	100 h/mes
Productividad de la MR	25 t/h
Δ Producción CL	2488 t/mes
Δ Pretendido (beneficio)	1500 t/mes

Figura 29: Datos de disponibilidad y productividad de la Máquina Rotativa para los cálculos.

Con el dato de disponibilidad y el de productividad de la MR, se puede estimar el aumento de producción que podría obtenerse empleando los tiempos muertos por paradas circunstanciales. Se concluye que podrían fabricarse 2500 *t/mes* adicionales, frente a las 1500 *t/mes* pretendidas (por demanda insatisfecha del mercado).

Luego, se realizó un análisis de los costos que dependen del volumen de producción, es decir, de los costos variables. En la Figura 30 se muestra que, a partir de los datos del precio de venta y del costo por cada tonelada de CL producido, se pueden estimar los ingresos que se generarían y los costos que deben asumirse.

Análisis de costos		
Precio de venta	63	USD/t
Costo Variable	44	USD/t
Δ Entradas por ventas	94500	USD/mes
Δ Costo energía nuevo motor	3455	USD/mes
Δ Costos Variables	69455	USD/mes

Figura 30: Datos de costos variables.

Por otro lado, la realización del proyecto en sí mismo conlleva gastos de obras. En la Figura 32 se muestra el desglose de los principales gastos de un proyecto de estas características.

Entre los conceptos involucrados se tienen: costos de fabricación e instalación de estructuras nuevas, obra civil, mano de obra, adquisición de nuevos equipos, flete, grúa e imprevistos.

En el caso de los conceptos “estructura metálica” y “calderería” el precio surge de un cálculo que se retroalimenta del proceso de diseño y selección de equipos realizado previamente y de datos comerciales, como el precio de chapas de acero. El precio de la “ingeniería y obra civil” es un valor que surge de la consulta a proveedores de servicios con experiencia en proyectos similares. En cuanto a los costos de mano de obra especializada, son valores habituales en la industria y se estipulan en los acuerdos laborales. En la Figura 31 se detalla cómo se obtuvo el precio de la mano de obra.

	Personal mecánico	Personal electricista
Cant. Personas	6	2
h/día	12	8
Cant. Días	28	28
TOTAL Horas	2016	448

Figura 31: Estimación de los costos de mano de obra.

Existen también, conceptos que son muy difíciles de calcular y es por esto que se expresan como

un porcentaje de otros costos. La “instalación eléctrica”, vital para el proyecto pero complejo para estimar costos, es función de la magnitud de la obra. En el caso de los “imprevistos”, se pueden expresar como función del costo estimado del proyecto. Además, al pie de la Figura 32 se realizan aclaraciones de cómo se componen algunos de los conceptos de la tabla.

Concepto	Descripción	Precio unitario	Unidad	Peso/ vol.	Precio [USD]
Estructura metálica*	Fabricación	5	USD/Kg	1883,22	9.416
Calderería	Fabricación	7,5	USD/Kg	1409	10.568
Ingeniería / obra civil	Reestructuración				8.000
Flete					1.000
Grúa					10.000
M.O.	Personal mecánico	43	USD/h	2016	86.688
	Personal electricista	20	USD/h	448	8.960
Instalación eléctrica		7%	del total de la obra		9.424
Equipo de filtración	Filtro de mangas, válvula celular, ventilador y motor				36.000
Descarga**	A definir	600	UDS/m	8	4.800
Imprevistos		7%	del total de la obra		9.424

*Estructura metálica: 20% del peso de calderería + 12 m IPN 300 + peso del ventilador y motor.

**Descarga: falta definir. Opciones para hacer la estimación: sin fin/fluidor o descarga en pendiente.

Figura 32: Estimación de los costos del proyecto.

Finalmente, del balance de los conceptos de la Figura 30 se puede calcular el beneficio esperado del proyecto. El “beneficio”, dado en *USD/mes*, se obtiene restando al incremento de entradas por ventas el costo variable, asociado este último, al aumento de la producción. Lo que respecta a costo del proyecto, no es más que la suma de los ítems descritos en la Figura 32, y está dado en *USD*.

De este modo, haciendo el cociente entre Costo del proyecto y el Beneficio que se obtendría del mismo, se puede obtener la cantidad de meses necesarios para amortizar los costos del proyecto. Para que un proyecto de este tipo sea considerado de interés, al menos para la planta industrial analizada, dicho período deberá ser menor o igual a 12 meses.

Como se muestra en la Figura 33, este período de retorno resulta ser de 8 meses, estando dentro de los límites establecidos como deseables.

Balance del proyecto		
Beneficio obtenido	25.045	USD/mes
Costo de proyecto	194.280	USD
Periodo de retorno	8	meses

Figura 33: Balance del proyecto.

7. CONCLUSIONES

En este trabajo se buscaba aumentar la producción de CL, para ello se realizó un análisis de la operatoria de la producción actual de los cementos. De ello surgieron una serie de posibilidades que permitirían aumentar la producción, ya que se utilizarían los tiempos muertos de los equipos disponibles. Se exploró una de las alternativas que permite despachar CL por bolsa mientras que el CC es enviado hacia los graneles, y sin interferencia alguna. Esto requiere una modificación en las líneas de envío. El CL deberá ser enviado por L1 hacia la MR en vez de L2. Esto implica que la L2 necesita ahora, un nuevo filtro de despolvamiento. Se tomaron en consideración todos los equipos que intervienen en el procesamiento del CC a través de la Línea 2. A partir de estos datos se dimensionó el equipo de filtración y el sistema de cañerías que permite realizar la tarea propuesta.

Luego de obtenidos los resultados técnicos se requirió una valorización del proyecto para poder estimar el período de retorno de la inversión. Resultando satisfactorio este valor, los beneficios se pueden resumir de la siguiente forma.

Los beneficios directos que se obtienen son:

- Posibilidad de aumentar la producción de CL en 2500 *t/mes*.
- Mayor flexibilidad en la operación.

Los beneficios indirectos:

- El F2 es de características modulares lo que permitiría anular parte de éste y operar con parámetros más bajos. Esto implica menor desgaste de los equipos.
- La mantenibilidad de filtros más pequeños es más sencilla (requiere menos recursos).
- Reducción del consumo eléctrico. Podría reemplazarse el gran motor del actual F2 (37 kW) por uno más chico (15 kW aproximadamente) y marcharse a demanda.

Como conclusión personal de este trabajo integrador de la carrera de Ingeniería Mecánica se puede destacar que se ha trabajado en el desarrollo de un proyecto de optimización, interdisciplinario, en un entorno industrial desafiante constituyendo esto una de las herramientas más importantes en la formación de un ingeniero. Las etapas de investigación y consulta con profesionales del rubro han sido sumamente enriquecedoras y han aportado una visión pragmática a los interrogantes que iban surgiendo. La secuencia de pasos descrita en este trabajo son un reflejo fiel del proceso llevado a cabo en la práctica.

En este trabajo se pone en evidencia, además, los compromisos que regularmente se presentan en la ingeniería, donde las decisiones están dentro de un rango óptimo en un balance entre los costos, los

riesgos y el desempeño para la selección de los equipos integrados en un proceso productivo. Siempre habrá más de una solución que responda a las especificaciones, pero los criterios seleccionados dependerán de los conocimientos adquiridos, el uso de normas existentes y la recopilación de soluciones similares que se encuentren operativas. Las variables presentes a la hora de sustentar un proyecto hacen que el profesional deba combinar todas las disciplinas desarrolladas en las distintas asignaturas, integrándolas desde una visión sistémica y a la vez práctica. Esto induce a que el resultado esperado desde la ingeniería, no pase por soluciones aisladas, sino que de paso a una ingeniería colaborativa.

8. ANEXO I

8.1. Datos de consulta

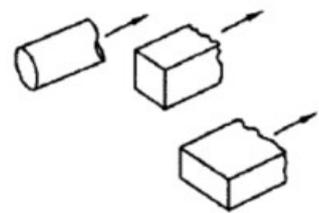
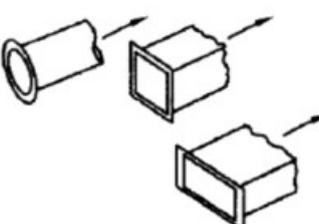
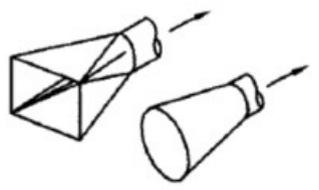
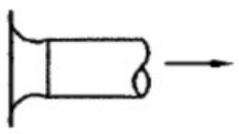
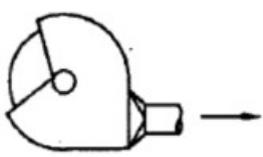
Tipo de campana	Descripción	C_e	H_e
	Abertura plana	0,72	$0,93 P_v$
	Abertura con pestaña	0,82	$0,45 P_v$
	Campana rectangular o cónica	Varía con el ángulo de la campana (ver figura 34)	
	Entrada en forma de campana	0,98	$0,04 P_v$
	Campana para esmerilado	Entrada a conducto en forma recta	
		0,78	$0,65 P_v$
		Entrada a conducto en forma de campana	
		0,85	$0,40 P_v$

Figura 34: Pérdidas a la entrada de la campana y coeficiente de entrada (Londoño, 2021).

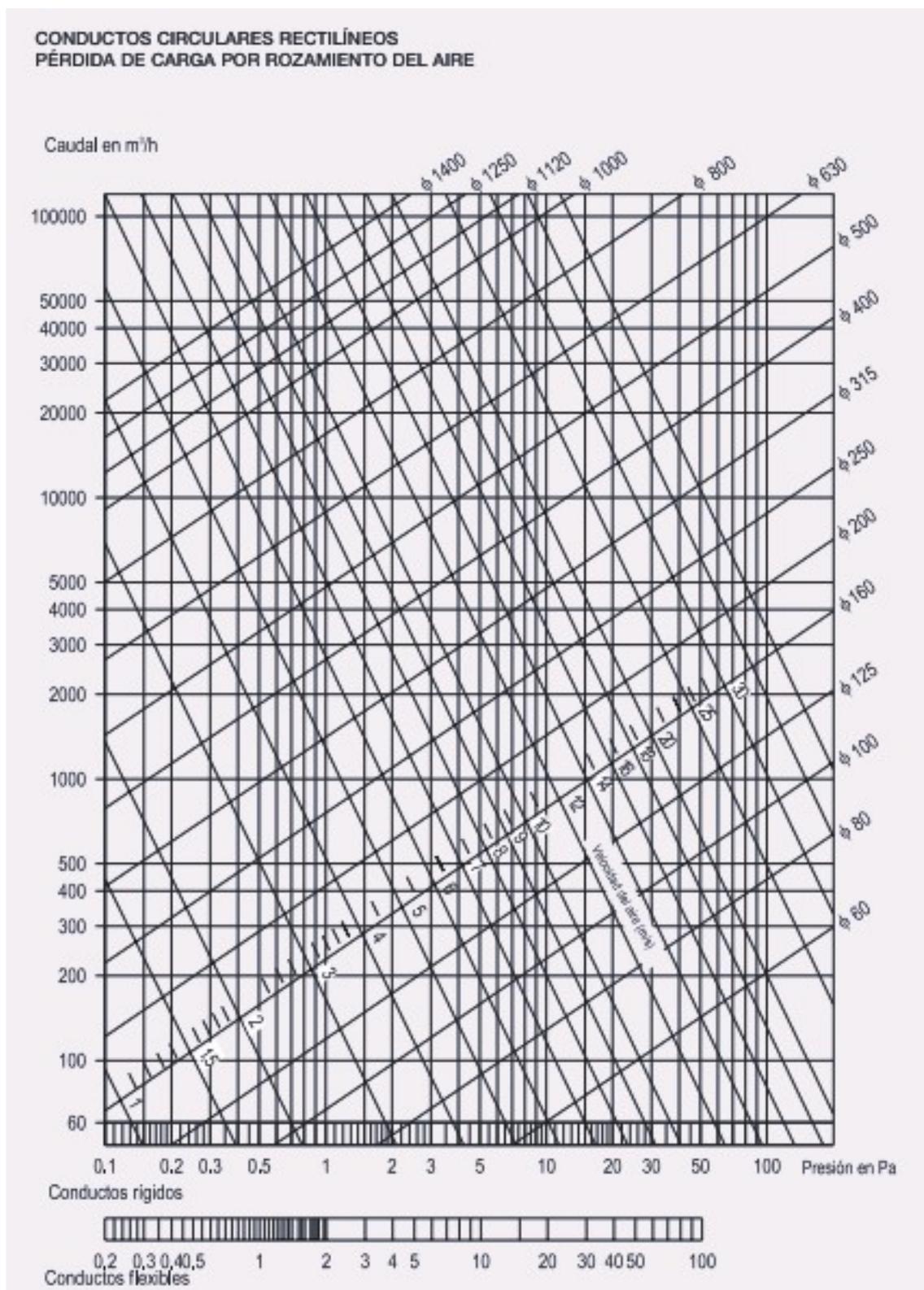


Figura 35: Pérdida de carga en conductos circulares rectilíneos en función del caudal y el diámetro (Escoda, 2002).

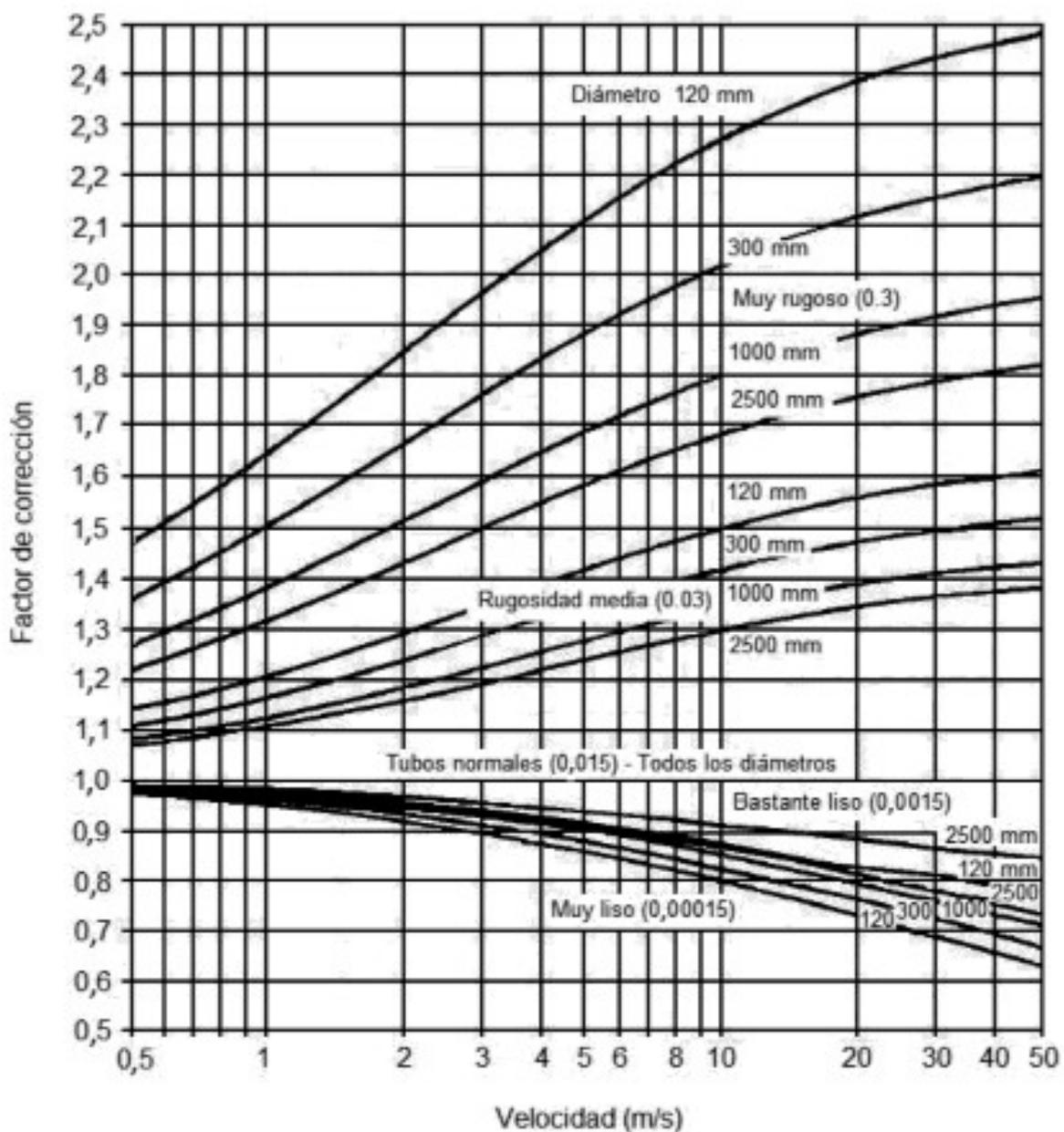


Figura 36: Factor de corrección para rugosidades vs. velocidad y diámetro de cañería (Londoño, 2021).

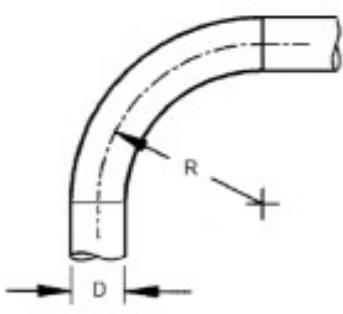
Accesorio	Radio de curvatura	n
	0,50 D	0,80
	1,00 D	0,52
	1,25 D	0,43
	1,50 D	0,39
	1,75 D	0,32
	2,00 D	0,27
	2,25 D	0,26
	2,50 D	0,22
	2,75 D	0,26

Figura 37: Coeficiente de pérdida por fricción para codo a 90° de sección circular (Londoño, 2021).

R/D	Pérdida de carga Fracción de PD
2,75	0,26
2,50	0,22
2,25	0,26
2,00	0,27
1,75	0,32
1,50	0,39
1,25	0,55

CODOS DE SECCIÓN CIRCULAR

Figura 38: Coeficiente de pérdida por fricción para codos de sección circular (ACGIH, 1998).

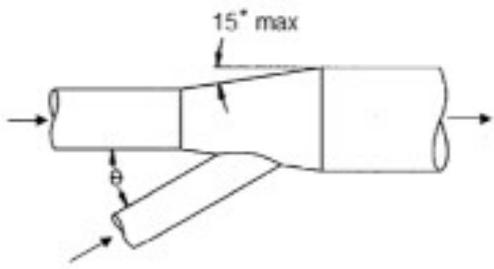
Accesorio	Ángulo (θ)	n
	10	0,06
	15	0,09
	20	0,12
	25	0,15
	30	0,18
	35	0,21
	40	0,25
	45	0,28
	50	0,32
	60	0,44
90	1,00	

Figura 39: Coeficiente de pérdida por fricción para unión de ramales (Londoño, 2021).

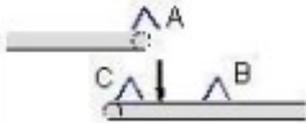
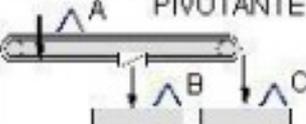
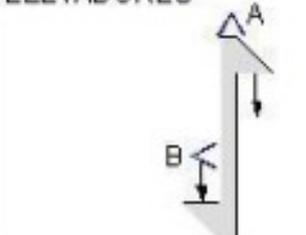
Equipo	Tam. (mm)	m³/h	Valores/consideraciones			m³/h	
			A	B	C		
BANDAS TRANSPORTADORAS 	650	4250	1500	1750	1000		
	850	5250	2000	2250	1000		
	1000	6500	2500	2750	1250		
	1200	7750	3000	3250	1500		
	1400	8750	3500	3750	1500		
	1600	10'000	4000	4250	1750		
ALIMENTADORES DE PLACAS 	800	6500	3500	2000	1000		
	1000	7500	4000	2500	1000		
	1200	8750	4500	3000	1250		
	1400	9750	5000	3500	1500		
	1600	10'000	5500	4000	1500		
ALIMENTADORES PIVOTANTES 	800		2500	9000	9000		
	1000		3000	10'000	10'000		
	1200		3500	11'000	11'000		
	1400		4000	12'000	12'000		
ELEVADORES 	400		CADENA m³/h		BANDA m³/h		
	500		A	B	A	B	
	630		1250	1000	2000	1000	
	800		1500	1000	2250	1000	
	1000		2000	1250	2500	1250	
	1250		2500	1250	3000	1250	
	1600		3000	1500	3500	1500	
			3500	1500	4500	1500	
		4000	1500	6000	1500		
RASCADORES Y TORNILLOS SIN FIN	200	500	POR CADA 10 METROS				
	250	500					
	315	500					
	400	750					
	500	750					
	630	1000					
	800	1000					
1000	1250						
DESLIZADORES			120% DEL SOPLADOR				
MALLA CLASIFICADORA		50	POR TON/H ABIERTO				
ZARANDA VIBRATORIA		450	POR M2 CERRADO				
MALLA GIRATORIA		600	POR M2 CERRADO				

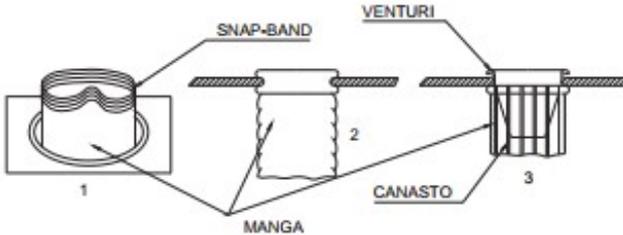
Figura 40: Caudal de aire a utilizar por equipo (Holcim, 2005).



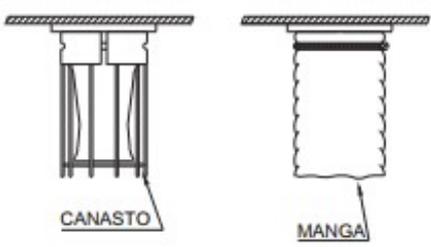
Mangas

645

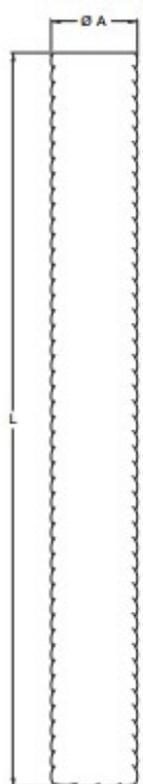
Sistema Snap-band



Sistema con abrazadera



Manga



MATERIALES DISPONIBLES:

- Polyester tejido ó punzonado.
- Polyester antiestático.
- Polyester Antihumedad.
- Polyester con tratamiento PTFE.
- Polipropileno.
- Nomex.
- Ryton.
- P 84.
- Otras.

CARACTERISTICAS:

- Fondo abierto ó cerrado.
- Con cordón.
- Snap-band.
- Refuerzo de fondo.

A COMPLETAR POR EL CLIENTE.

L:

Ø A:

Tipos de telas	Resistencia a abrasivos	Resistencia a ácidos	Resistencia a álcalis	Temperatura máxima constante - °C	Temperatura máxima periodos cortos - °C
Poliámidá (P-84)	Bueno	Bueno	Regular	260	290
Restex	Excelente	Excelente	Excelente	260	300
Fibra de vidrio	Malo	Bueno	Malo	260	290
Teflón	Bueno	Excelente	Excelente	230	260
Aramida (Nomex)	Excelente	Regular	Bueno	190	230
Ryton	Bueno	Excelente	Excelente	200	220
Polyester	Excelente	Regular	Regular	130	170
Dralon / Acrylic	Bueno	Bueno	Regular	120	140
Nylon	Excelente	Malo	Excelente	90	120
Lana	Regular	Regular	Malo	90	120
Polypropileno	Excelente	Excelente	Excelente	85	95
Algodón	Bueno	Malo	Excelente	80	85

Figura 41: Características para distintos tipos de telas (Tomadoni, 2022).

Referencias

- [1] ACGIH. *Ventilación Industrial. Manual de recomendaciones prácticas para la prevención de riesgo profesionales*. American Conference of Governmental Industrial Hygienists, Committee on Industrial Ventilation, Generalitat Valenciana, 1998.
- [2] Committee on Industrial Ventilation ACGIH. *Industrial ventilation: a manual of recommended practice*. American Conference of Governmental Industrial Hygienists, 1998.
- [3] CE Billings and J Wilder. Handbook of fabric filter technology. volume i. fabric filter systems study. 1970.
- [4] Schneider Electric Czerweny. *Motores Czerweny*. Schneider Electric Argentina, Viamonte 2850- Caseros - Bs. As., 1 edition, 1 2024. Página consultada 7.
- [5] Salvador Escoda. Manual práctico de ventilación. *Catálogo técnico. Segunda edición. Barcelona, España*, page 136, 2002.
- [6] Euroventilatori. *Ventiladores Industriales*. Euroventilatori International SpA, Italia, 1 edition, 1 2006. Páginas consultadas 15-24.
- [7] Filtex. Fluidor típico. http://www.filtex.com.mx/img/aerodeslizadores/aerodeslizadores_03.jpg, 2023. Consultado en: diciembre 2023.
- [8] Holcim. Holcim design criteria. Technical report, Holcim Group, 2005. Fabric Dust Collection.
- [9] Lochamp. Elevador de cangilones típico. <http://animalfeedcn.com.ar/1-8-3-bucket-elevator.html>, 2024. Consultado en: enero 2024.
- [10] Carlos Alberto Echeverri Londoño. *Ventilación industrial*. Ediciones de la U, 2° edición edition, 2021.
- [11] Daniel Charles Mussatti. Controles de materia particulada. In U.S. Environmental Protection Agency, editor, *EPA 452/B-02-002*, volume 452 of 2002, chapter 1, pages 1–1 a 1–58. Research Triangle Park, NC 27711, The address of the publisher, 3 edition, 7 2002.
- [12] PRADECON. *Catálogo de productos. Tablas de pesos y medidas*. Pradecon, Plaza Industrial Escobar Au. Panamericana (Km 57,5) - Escobar, 1 edition, 1 2024.
- [13] Emiliano Rueda. Tecnología básica de los cementos y marco normativo argentino, 2020. URL <https://icpa.org.ar/tecnologia-basica-cementos-marco-normativo-argentino>.
- [14] Industrias Tomadoni. *Catálogo de filtrado*. Industrias Tomadoni S.A., Alianza 345- Ciudadela - Bs. As., 1 edition, 1 2022. Página consultada 645.
- [15] VENTEC. *Manual Técnico de Instalación, Operación y Mantenimiento*. VENTEC AMBIEN-

TAL EQUIPAMENTOS E INSTALAÇÕES LTDA, Rua Cinco, nº 550 - Distrito Industrial Nova Era - Indaiatuba - São Paulo, 1 edition, 7 1999.

- [16] Kenneth Woodard. Documento de técnicas de control de mp fina proveniente de fuentes estaionarias. *CONTRATO NO. 68-D-98-026 DE LA EPA*, page 288, 1998.
- [17] Ziebttec. Filtro de mangas, 2024. URL <https://ziebttec.cl/wp-content/uploads/2021/11/Ziebttec-Filtros-de-Mangas.pdf>.