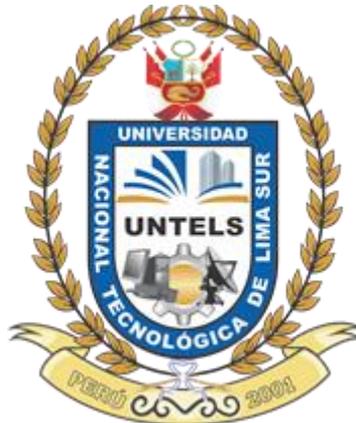


**UNIVERSIDAD NACIONAL TECNOLÓGICA DE LIMA SUR**

**FACULTAD DE INGENIERÍA Y GESTIÓN**

**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA**



**“DISEÑO DE UN FILTRO DE MANGAS SNAP BAND CON  
VENTILADOR DE SUCCIÓN CENTRIFUGO, PARA EL BAGHOUSE DE  
LA PLANTA DE MOLIENDA DE CARBÓN DE CEMENTOS  
PACASMAYO S.A.C.”**

**TRABAJO DE SUFICIENCIA PROFESIONAL**

Para optar el Título Profesional de

**INGENIERO MECÁNICO ELECTRICISTA**

**PRESENTADO POR EL BACHILLER**

**DURAN NEYRA, NEIL AYRTON**

**Villa El Salvador  
2018**

**DEDICATORIA:**

Dedico el presente trabajo a mis padres, a mi hijo y esposa por su constante inspiración a seguir creciendo y estudiando, y a nunca parar de soñar.

### **AGRADECIMIENTO:**

A mi familia, por ser un apoyo incondicional, a mis maestros de la Untels por sus constantes aportes que llevaron a la finalización de este trabajo.

## ÍNDICE

<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	07
<b>CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA</b>	
1.1. Descripción de la Realidad Problemática.....	09
1.2. Justificación del Proyecto.....	10
1.3. Delimitación del Proyecto.....	11
1.3.1. Teórica.....	11
1.3.2. Espacial.....	11
1.3.3. Temporal.....	11
1.4. Formulación del Problema.....	12
1.4.1 Problema General.....	12
1.4.2 Problemas Específicos.....	12
1.5. Objetivos.....	12
1.5.1 Objetivo General.....	12
1.5.2 Objetivos Específicos.....	12
<b>CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO</b>	
2.1 Antecedentes de la Investigación.....	14
2.2 Bases Teóricas.....	16
2.3 Marco Conceptual.....	46
<b>CAPÍTULO III: DESCRIPCIÓN Y DESARROLLO DEL PROYECTO</b>	
3.1 Descripción del proyecto.....	48
3.2 Desarrollo del proyecto.....	51
3.3 Revisión y consolidación de resultados.....	59
<b>CONCLUSIONES</b> .....	66
<b>RECOMENDACIONES</b> .....	67
<b>BIBLIOGRAFÍA</b> .....	68
<b>ANEXOS</b> .....	69

## LISTADO DE FIGURAS

Figura N° 01: Ciclón colector de polvo.....	19
Figura N° 02: Precipitador electrostático.....	21
Figura N° 03: Filtros de manga.....	26
Figura N° 04: Filtros de mangas de sacudido.....	33
Figura N° 05: Filtros de mangas de aire reverso.....	35
Figura N° 06: Filtros de mangas Pulse - Jet.....	37
Figura N° 07: Diagrama general de la instalación.....	42
Figura N° 08: Ventilador centrifugo.....	44
Figura N° 09: Dámper.....	44
Figura N° 10: Diseño del filtro de mangas Snap Band.....	50
Figura N° 11: Dimensionamiento de la manga Snap Band.....	53

## LISTADO DE TABLAS

Tabla N° 01:	Condiciones de diseño.....	51
Tabla N° 02:	Características de operación.....	53
Tabla N° 03:	Datos del área de mangas.....	54
Tabla N° 04:	Condiciones de funcionamiento del sistema de limpieza.....	55
Tabla N° 05:	Características de la caída de presión.....	56
Tabla N° 06:	Características del ventilador.....	58
Tabla N° 07:	Comparación del electrofiltro y del filtro de mangas en relación con las emisiones de partículas contaminadas – día 1.....	60
Tabla N° 08:	Comparación del electrofiltro y del filtro de mangas en relación con las emisiones de partículas contaminadas – día 2.....	61
Tabla N° 09:	Comparación del electrofiltro y del filtro de mangas en relación con las emisiones de partículas contaminadas – día 3.....	62
Tabla N° 10:	Comparación del electrofiltro y del filtro de mangas en relación con las emisiones de partículas contaminadas – día 4.....	63
Tabla N° 11:	Comparación del electrofiltro y del filtro de mangas en relación con las emisiones de partículas contaminadas – día 5.....	64
Tabla N° 12:	Presupuesto del diseño del filtro de mangas Snap Band.....	65

## INTRODUCCIÓN

Hoy en día las empresas cementeras buscan reducir los daños ocasionados por las emisiones de carbón y otras partículas contaminantes provenientes de la extracción del Clinker, que al ser expuestas al ambiente producen daños irreparables. Además, toda empresa tiene la obligación de cumplir con las Normas Ambientales que determinan los límites máximos permisibles de emisiones en las plantas procesadoras de este material. Es así como, en la búsqueda de generar una solución a este problema, nace la idea de poseer equipos y mecanismos que limpien el aire antes de ser expuestos al medio ambiente.

Los filtros de mangas son capaces de recoger altas cargas de partículas resultantes de procesos industriales de muy diversos sectores, tales como: cemento, yeso, cerámica, caucho, química, petroquímica, siderúrgica, automovilística, cal, minera, amianto, aluminio, hierro, coque, silicatos, almidón, carbón, fibras, granos, etc. La función principal de un filtro de mangas es la de separar el material particulado del aire, esto se logra al forzar que el aire sucio pase a través de una mangas o talegas fabricadas de un material textil, previamente seleccionado para cada aplicación, de manera que las partículas sólidas queden atrapadas en estas y el aire, ahora limpio, pueda ser descargado a la atmósfera.

En ese sentido y con la finalidad de tener un sistema de evacuación y limpieza de emisiones de gases y partículas contaminantes de mayor efectividad en la industria cementera, se propone como alternativa de solución el diseño de un filtro de mangas Snap Band para la planta de molienda de carbón de la empresa cementera

Pacasmayo S.A.C., a continuación, presento mi Trabajo de Suficiencia Profesional el cual está dividido en 3 capítulos.

En el Capítulo I, se describe el planteamiento del problema, que está relacionado con las emisiones salientes de partículas contaminadas, debido al erróneo dimensionamiento de las mangas y del ventilador del sistema de filtración de cementos Pacasmayo SAC.

En el Capítulo II, se describe el marco teórico en la cual se sustenta la propuesta de solución, referente a los tipos de colectores de polvo, clasificación, aplicación, diseño y todo lo referente a las mangas filtrantes, tipos, características, componentes del sistema colector de mangas, así también a los tipos de ventiladores utilizados para este sistema.

En el Capítulo III, se describe la propuesta de solución a implementar identificando los parámetros de diseño, luego se calcula todo lo referente a las mangas de filtración Snap Band para el Baghouse. Finalmente se determina la potencia del ventilador centrífugo a utilizar en el Baghouse de la planta de molienda de carbón de la empresa de Cementos Pacasmayo S.A.C.

## **Capítulo I**

### **Planteamiento del Problema**

#### **1.1 Descripción de la Realidad Problemática**

La cementera Pacasmayo SAC, presenta un grave problema en su planta de molienda de carbón, ya que cuenta con un equipo Baghouse que no tiene un funcionamiento eficiente, esto se ve reflejado en los niveles altos de partículas contaminantes presentes en el área de molienda, ya que el sistema no es capaz de capturar correctamente todas las partículas en la salida del aire, lo que viene contaminando al medio ambiente, a los trabajadores y a los pobladores aledaños a la cementera.

El erróneo dimensionamiento de las mangas y del ventilador del sistema de filtración de cementos Pacasmayo SAC, genera un mal confinamiento en el sistema, ya que se viene presentando acumulación de polvo y otros materiales,

esta acumulación dificulta el cierre de la válvula y puede causar corrosión en ella, especialmente si hay humedad.

Así mismo como el aire contaminado y limpio no circulan correctamente por tener un ventilador mal dimensionado, las mangas se han desgastado rápidamente, lo que produce emisiones de partículas contaminantes al medio ambiente, que están entre los valores de 245-295 mg/m<sup>3</sup>, estos valores se encuentran muy por encima de lo estipulado por las Normas ambientales peruanas, ya que el límite permisible de partículas o sustancias contaminadas expuestas al medio ambiente es de 50 mg/m<sup>3</sup> según lo estipulado por los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Aire N° 003-2017-MINAM, por lo cual se estaría incumpliendo con el reglamento ambiental.

## **1.2 Justificación del Proyecto**

El trabajo de suficiencia profesional se justifica ya que al diseñar correctamente las mangas y el ventilador para el Baghouse de la planta de molienda de carbón de la cementera Pacasmayo SAC, el sistema reducirá las emisiones de partículas contaminadas, debido a que el Baghouse está diseñado para una eficiencia de filtración del 99.9% y la calidad del aire estará dentro de los estándares establecidos por las Normas Ambientales peruanas.

Así también las emisiones al medio ambiente llevarán un control cada vez más estrictos, ya que un filtro de mangas Snap Band, correctamente diseñado captura tanto partículas, gruesas como finas, y además ofrece una operación

sencilla, a su vez el ventilador funcionara de manera adecuada, siendo una parte integral del sistema de control para la contaminación ambiental.

Cabe señalar que las mangas se limpian periódicamente en el interior del filtro por medio de un sistema de limpieza, lo cual no será un problema ya que se realizara un mantenimiento mucho más rápido, debido a que la temperatura al interior del colector será la adecuada, para que el personal encargado del mantenimiento proceda a realizar los trabajo encomendados, evitando así la corrosión y oxidación del equipo.

### **1.3 Delimitación del Proyecto**

#### **1.3.1 Teórica**

El Trabajo de Suficiencia Profesional desde el punto de vista teórico abarca solo el diseño de las mangas Snap Band y el ventilador centrifugo del equipo Baghouse.

#### **1.3.2 Espacial**

El presente trabajo de suficiencia profesional se desarrollará para la empresa Cementera Pacasmayo S.A.C., ubicada en la Carretera de la Panamericana Norte - Km. 667 - Pacasmayo - La Libertad

#### **1.3.3 Temporal**

El trabajo de suficiencia profesional se desarrolló en noviembre de 2017.

## **1.4 Formulación del Problema**

### **1.4.1 Problema General**

¿Cómo diseñar el filtro de mangas Snap Band y el ventilador de succión centrífugo para el Baghouse de la planta de molienda de carbón de Cementos Pacasmayo S.A.C.?

### **1.4.2 Problemas Específicos**

- ¿Cómo determinar el número de mangas y su dimensionamiento, que serán utilizadas en el Baghouse de la planta de molienda de carbón de Cementos Pacasmayo S.A.C.?
- ¿Cómo determinar la potencia de consumo adecuada que necesitará el ventilador de succión centrífugo para el Baghouse de la planta de molienda de carbón de Cementos Pacasmayo S.A.C.?

## **1.5 Objetivos**

### **1.5.1 Objetivo General**

Diseñar el filtro de mangas Snap Band y el ventilador de succión centrífugo para el Baghouse de la planta de molienda de carbón de Cementos Pacasmayo S.A.C.

### **1.5.2 Objetivos Específicos**

- Determinar el número de mangas y su dimensionamiento, que serán utilizadas en el Baghouse de la planta de molienda de carbón de Cementos Pacasmayo S.A.C

- Determinar la potencia de consumo adecuada que necesitará el ventilador de succión centrífugo para el Baghouse de la planta de molienda de carbón de Cementos Pacasmayo S.A.C

## Capítulo II

### Marco Teórico

#### 2.1. Antecedentes de la Investigación

Hernández, J. (2011), *Ingeniería de detalle para un sistema de desempolvado en las balanzas pesadoras de dosificación de Holcim (Venezuela) C.A. Planta Cumarebo* en la Escuela de Pre Grado de la Universidad Nacional Abierta de Caracas, concluye que: “Mediante la instalación del nuevo sistema de desempolvado se reducen los costos de limpieza y mantenimiento de equipos extendiendo así la vida útil de los mismos. Con el ventilador y el motor seleccionado operando a las condiciones de diseño se garantiza la succión del flujo de aire a través del sistema. El diseño satisface las bases y criterios de ingeniería establecidas. El factor de seguridad obtenido en los soportes del filtro es justificable puesto que el sistema pulse Jet origina vibraciones en el momento del intenso disparo de aire del ciclo de limpieza del filtro, garantizando con esto que dichos soportes no fallen”.

Gómez, E. (2016). *Conversión de un precipitador electrostático a filtro de mangas (PULSE-JET) en la planta de molienda de carbón en la Cementera UNACEM – Atocongo*, en la Escuela de Pre Grado de la Universidad Tecnológica del Perú concluye que: “Después de realizar el monitoreo de partículas al filtro convertido y electrofiltro por el lapso de diez días, en un intervalo de tiempo de una hora se observa una gran reducción de  $256 \text{ mg/m}^3$  a  $22 \text{ mg/m}^3$  con respecto a las emisiones. Con la conversión se logra mejorar el sistema de filtrado, con el fin de aminorar el impacto ambiental, además de estar por debajo del límite máximo permisible peruana con respecto a emisiones de partículas”.

Ángel, J. (2017), *Diseño de un sistema de evacuación y limpieza de emisiones en el proceso de fundición de plomo secundario en la Empresa Recuperación De Metales S.A.*, en la Escuela de Pre Grado de la Universidad de América de Bogotá, concluye que: “La alta inversión del sistema resulta rentable a largo plazo, en la medida en que se evitan sanciones cuantiosas de tipo ambiental. La reincorporación del material particulado en el proceso de extracción representa mayor recuperación de plomo, incrementando el material disponible para el reciclaje. Con el sistema de extracción implementado en la empresa se reduce la contaminación ambiental y se reduce además la exposición de los empleados y de la población aledaña”.

## **2.2. Bases Teóricas**

### **2.2.1 Medio de Captación de Partículas**

Según Duda (2003) el control de las emisiones en la actualidad forma parte fundamental de cualquier proceso, en donde existen varios puntos a considerar tales como la extracción, el transporte, almacenamiento y procesamiento de grandes cantidades de material es su mayor parte seco, siendo esto una obvia fuente de polvo fugitivo y material derramado. En cuanto al rendimiento de los equipos, debemos decir que cada tonelada de material que se escapa del proceso es una pérdida, mientras los equipos siguen trabajando normalmente consumiendo energía. Las toneladas por hora se reducen, haciendo que el consumo específico de los equipos sea mayor, presentándolos como menos eficientes y con bajos rendimientos.

Esta idea surge porque no se aprovecha todo el material que ingresa a la línea de producción, porque existen puntos por donde se escapa; es cierto que luego gran parte de este material se recupera, pero eso genera costos de alquiler de equipos, y horas que pudieran ser innecesarias de trabajo adicional para el personal, por eso es importante un mantenimiento preventivo de los equipos para evitar pérdidas, de esta manera aumentaría la eficiencia, funcionando de manera efectiva el sistema de desempolvado. El material particulado son aquellas sustancias suspendidas en el aire, que pueden tener un tamaño de entre  $10^{-2}$  y  $10^2 \mu\text{m}$ , de ahí su nombre PM2.5 y PM10. La fuente de estas

emisiones es proveniente del transporte o de las industrias cementeras, de concreto, de cerámicas o de mineras.

Pueden contener composiciones químicas como aluminio, silicio, calcio, potasio, hierro, zinc, vanadio, plomo, titanio y otros orgánicos de elevada toxicidad. Estas composiciones afectan el sistema respiratorio humano ocasionando grandes peligros y enfermedades; así mismo, afectan el ambiente, animales y vegetales. En general, se define material particulado grueso (MP gruesa) cuando se refiere a MP10, mientras que material particulado fino (MP fina) cuando se refiere a MP2.5. Las partículas son aproximadamente el 10% de la masa total de contaminantes emitidos al ambiente, el comportamiento de estas partículas en la atmosfera depende fundamentalmente de su tamaño, para realizar el control de emisiones al medio ambiente se usan diferentes métodos y dispositivos dependiendo de las características de la emisión. El conjunto ventilación local exhaustiva y equipo de control de contaminación, es una alternativa viable para el control de emisiones.

Según Labahn (2000) los filtros de mangas son equipos comúnmente empleados, pero algunos no sirven cuando hay gases a altas temperaturas, pues las mangas normalmente son fabricadas de material sintético. También se utilizan precipitadores electrostáticos, torres lavadoras, ciclones, entre otros dispositivos. La finalidad de los captadores de material particulado (MP), es coleccionar la mayor cantidad de MP y de esta manera controlar las emisiones al medio ambiente. Por

ello se necesita conocer el funcionamiento del equipo colector, además se tiene que realizar el correcto mantenimiento para que su trabajo sea óptimo, de tal manera que no se vea afectada la eficiencia del colector.

Según Labahn (2000) los medios de captaciones partículas usuales son los siguientes:

- Ciclones.
- Precipitadores electrostático o electrofiltros.
- Filtro de mangas.

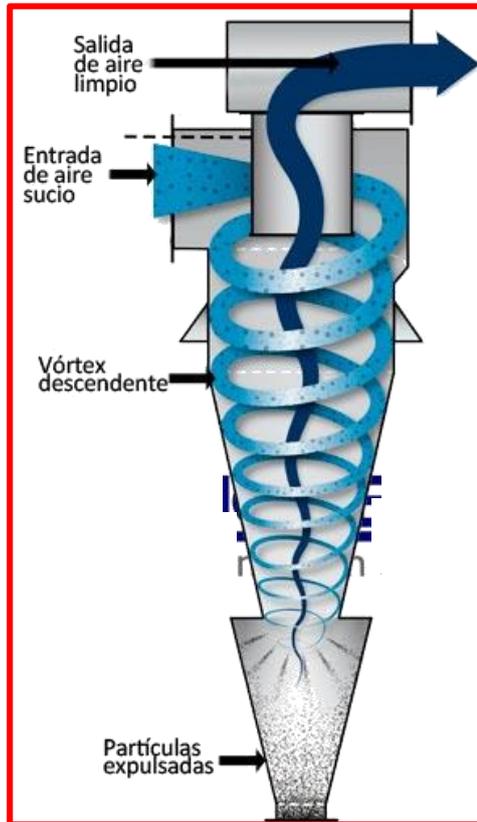
#### **2.2.1.1 Tipos de colectores de polvo**

Los colectores de polvo se pueden clasificar en 4 grupos que se definen a continuación:

##### **a) Por su principio de operación**

- **Ciclones**

Según Muñoz (2013) los ciclones son colectores centrífugos donde la entrada de partículas es tangencial al cuerpo del cono, forzando el material hacia la parte externa lo que disminuye la velocidad del aire y propicia el desprendimiento de partículas. El aire limpio sale por la parte superior del ciclón. Muchas veces los ciclones se instalan en zonas donde se mueven o descargan grandes cantidades de partículas, para reducir la cantidad de material que va al filtro de mangas.



**Figura N° 01:** Ciclón colector de polvo  
Fuente: Muñoz (2013)

El promedio de eficiencia de un ciclón es aproximadamente 65% cuando filtra partículas de 40 micras en tamaño, con una pérdida de carga entre 20 y 40 mmcda, bajo costo, falta de partes móviles, por lo tanto, pocos requerimientos de mantenimiento y bajos costos de operación, colección y disposición en seco. Una de las desventajas es la eficiencia de recolección de partículas suspendidas totales relativamente bajas, particularmente para partículas menores de 10  $\mu\text{m}$ , no pueden manejar materiales pegajosos o aglomerantes.

- **Colectores de procesos húmedos**

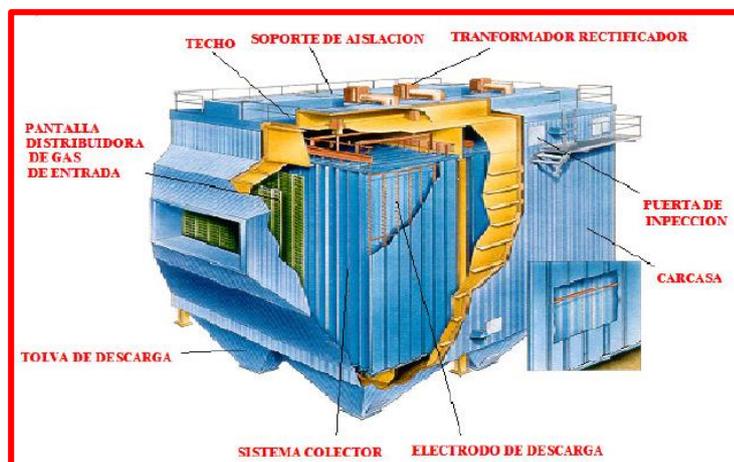
Según Muñoz (2013) Este tipo de colectores usan agua para saturar las partículas, y así poder separarlas. Hoy en día se usan dos tipos de colectores húmedos, los sistemas de filtración húmedos que saturan las partículas llevándolas a un decantador, y precipitadores hidroeléctricos que saturan las partículas cargadas y pasan la solución entre placas de metal con cargas opuestas. Los colectores húmedos son relativamente ineficaces y crean lodo o fango, un problema de contaminación secundaria que también debe considerarse.

Una de las ventajas es que puede recolectar partículas y gases al mismo tiempo; disuelven las partículas solubles; tienen el doble de enfriadores y equipos de control de la contaminación; evitan los riesgos de explosión por la presencia de polvos y gases combustibles; son equipos compactos; de tamaño generalmente pequeño y costo inicial bajo. También tiene desventajas como la cristalización de las sustancias solubles; presentan dificultades para la remoción de lodos; pueden generarse problemas de taponamiento, requiere de equipo auxiliar, como bombas y tanques, alta acción corrosiva; las

partículas menores a 1mm son recolectada con bajas eficiencias.

- **Precipitadores electrostáticos**

Según Gallego (2012) el proceso físico por el cual las partículas en suspensión en un flujo gaseoso se cargan eléctricamente y son separados de dicho flujo. El principio de recolección se basa en el hecho de poder impartir carga negativa a las partículas de la corriente de gas, causando con esto que se adhieran a las placas del colector que se encuentran cargadas positivamente. La diferencia de voltaje entre electrodo y placa para casi todos los diseños es de 60 – 70 mil voltios. Como en los colectores o filtro de mangas, los precipitadores son extremadamente eficientes y se usan por lo general en las industrias del cemento, electricidad, pulpa, papel y acero. El grado de limpieza esperado es hasta de 99% para partículas menores de 5 micras.



**Figura N° 02:** Precipitador electrostático  
Fuente: Duda (2003)

Los precipitadores electrostáticos tiene como ventaja una eficiencia de recolección muy alta para partículas gruesas y finas, lograda con un gasto relativamente bajo de energía; Recolección en seco; Diseñados para operación continua con requerimientos mínimos de mantenimiento; Costo de operación relativamente bajo; Capacidad para operar a altas presiones o al vacío; Capacidad para operar a altas temperaturas, del orden de los 370 a los 540°C; Capacidad para manejar en forma eficiente velocidades de flujo de gas relativamente altas.

Entre sus desventajas encontramos un alto costo de capital; Muy sensible a cambios en las condiciones de la corriente gaseosa, especialmente el flujo, la temperatura, la composición del gas y las partículas (con su respectiva carga); Se requieren espacios grandes, a veces mayores que los filtros; Riesgo de explosión al recolectar partículas o tratar gases combustibles; se requieren medidas especiales de seguridad para proteger al personal de una descarga; Se requiere personal de mantenimiento altamente capacitado.

- **Filtros de Cartucho**

Según Gallego (2012) los sistemas de cartuchos funcionan usando medios filtrantes con pliegues de

aproximadamente 60 a 90cm de largo, hechos de papel. Los colectores de cartuchos se usan típicamente en procesos industriales de menor volumen, con flujos de gases inferiores a 700 m<sup>3</sup>/h.

Entre las ventajas los filtros de cartucho proporcionan altas eficiencias de recolección tanto para materia particulada gruesa como para la de tamaño fino (submicras); El aire de salida del filtro está muy limpio y en muchos casos puede ser recirculado a la planta; La operación es relativamente simple; A diferencia de los precipitadores electrostáticos, los sistemas de filtros de cartucho no requieren de altos voltajes, por lo que su mantenimiento se simplifica y puede recolectarse polvo inflamable con el cuidado apropiado.

Y entre sus desventajas para temperaturas muy por encima de los 95°C (200°F), se requieren medios filtrantes especiales, los cuales pueden ser caros. Pueden arder si se recolecta polvo rápidamente oxidable. Tienen requisitos de mantenimiento relativamente altos; cambio frecuente de los cartuchos. La vida de los filtros puede ser acortada a altas temperaturas y en presencia de constituyentes ácidos o alcalinos que puedan estar presentes como gases

o particulados. No pueden operarse en ambientes húmedos.

- **Filtros de Mangas**

Según Labahn (2000) los filtros de mangas son aparatos de los llamados filtros por vía seca. Son los filtros o instalaciones para control de contaminación de aire más eficaces ya que permiten cumplir las más estrictas normativas en cuanto a niveles de emisión de partículas sólidas, con un correcto diseño, su utilización no compromete la cantidad ni la calidad de la producción, permitiendo realizar su mantenimiento sin afectar al proceso productivo de la fábrica. El costo de inversión es menor que el de otro tipo de instalaciones. Si tienen las dimensiones adecuadas y el mantenimiento preventivo necesario, los costos de explotación de este tipo de unidades son razonablemente bajos.

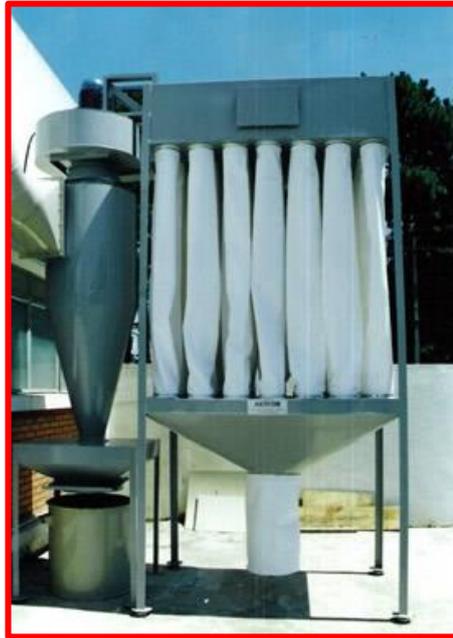
Los filtros de mangas son estructuras metálicas cerradas en cuyo interior se disponen los genéricamente llamados elementos filtrantes textiles, que según sea el diseño del constructor, tienen formas tubulares llamados mangas, o bien formas rectangulares y se llaman sacos o bolsas. Generalmente las mangas están dispuestas en el filtro en posición vertical. El aire/gas cargado de sólidos es

forzado a pasar a través del textil, sobre el que se forma una capa de polvo que separa las partículas sólidas del aire/gas. Las mangas se limpian periódicamente en el interior del filtro por medio de un sistema de limpieza que varía según el diseño del constructor.

Como ventajas estos filtros tienen eficiencia de recolección muy alta de partículas gruesas y finas; El aire de salida del filtro se puede recircular a la planta; El material recolectado se recupera seco, para su posterior procesamiento; La corrosión y oxidación de las partes no es problema; Mantenimiento y reparaciones son sencillas; Se dispone de diversos filtros, por lo que hay gran variedad de dimensiones para adecuarse a los requerimientos de la instalación. Operación relativamente sencilla.

Entre sus desventajas los filtros de mangas que excedan temperaturas de 288°C requieren material refractario especial o telas metálicas costosas; Ciertos tipos de polvos requieren telas tratadas; Las concentraciones de algunos polvos en el colector constituyen un riesgo de incendio o explosión si penetran chispas o llamas por accidente; Requerimientos de mantenimiento relativamente altos (reemplazo de las mangas, etc.); A temperaturas elevadas se puede acortar

la vida de la tela, así como en presencia de partículas ácidas o alcalinas y componentes gaseosos.



**Figura N° 03:** Filtros de manga  
Fuente: Muñoz (2013)

## **b) Por su principio de aplicación**

- **Filtros auxiliares**

Según Duda (2003) es una unidad que no es crítica para la operación continua de la planta industrial, o que no representa peligro inmediato ya sea para los trabajadores o para el medio ambiente. Un filtro auxiliar puede ser usado para recolectar partículas de polvo en una planta maderera o en el transporte de material. En una planta cementera o de morteros, generalmente se encuentran en los puntos de transferencia de las bandas transportadoras, elevadores, aerodeslizadores, ensacadoras, zarandas, etc., en donde, si bien es cierto no pararían la producción inmediatamente, pero dependiendo del problema, puede generar una

cadena de eventos que pararía algún equipo principal, dependiendo del lugar donde va a funcionar, hay que considerar la temperatura, el material que se va a filtrar, la humedad, ácidos, etc., para de esa manera, tener un buen criterio de diseño del filtro.

- **Filtros de procesos**

Según Duda (2003) Este tipo de filtros en cambio son críticos, forman parte del proceso de producción. Puede ser usado continuamente las 24 horas del día, 365 días al año. Normalmente procesa volúmenes extremadamente altos y puede ser sometido a altas temperaturas, materiales abrasivos, partículas minúsculas, altas concentraciones de contaminantes y sustancias corrosivas. La definición de filtro de proceso es que, si el colector funciona mal, la producción de la planta se detiene. Por ejemplo, en una planta de asfalto, si el filtro no funciona adecuadamente, la producción de la planta es reducida. Si el filtro deja de funcionar completamente, la planta entera deja de funcionar. Además, cuando gases tóxicos están presentes, el buen funcionamiento del colector es esencial ya que es importante que estas sustancias tóxicas no salgan al ambiente. Debido a estos factores, los colectores de proceso son mantenidos en manera diferente a la de los auxiliares.

### **c) Por su diseño de filtración**

- **Filtración exterior**

Según Labahn (2000) son llamados así porque las partículas se recolectan en la superficie externa de la manga, y el aire limpio sale a través del interior. Entre los que utilizan este tipo de filtración tenemos los filtros de manga pulse-jet.

- **Filtración interior**

Según Labahn (2000) en los filtros de mangas con filtración interna (los filtros de aire reverso, por ejemplo), las partículas son recolectadas en el lado interior de las mangas.

### **d) Por la presión en el sistema**

- **Presión positiva**

Según Labahn (2000) los gases contaminados son impulsados o succionados al colector por un ventilador, cuando el gas contaminado es impulsado hacia el colector por medio de un ventilador colocado antes del colector, el colector se llama colector de presión positiva. Se pueden construir colectores de presión positiva con estructura más débil, ya que la presión positiva es contrarrestada por la presión atmosférica que actúa en la estructura o cámara del colector. Sin embargo, existen limitaciones ya que el

ventilador está localizado en la parte sucia del sistema, el deterioro prematuro de sus componentes puede ocurrir con este tipo de arreglo, siendo esto muy importante cuando se trata de mantenimiento y condiciones de operación del colector. El ventilador, es un componente integral del sistema; si presenta un mal funcionamiento, puede ocasionar el paro completo de operaciones. Collectores de presión positiva son menos costosos inicialmente debido a su estructura por ser más débil, pero más caros a largo plazo.

Este tipo de colectores, normalmente tienen pequeñas chimeneas o salidas en la parte superior del colector que se llaman monitores de techo. Esto es problemático cuando la prueba de emisiones es necesaria para determinar la efectividad de filtración. Sistemas de presión positiva son usados con mejores resultados cuando los gases son de poca humedad y de bajas concentraciones de polvo no abrasivo.

- **Presión negativa**

Según Labahn (2000) cuando el ventilador se encuentra en la parte limpia del colector, el aire contaminado es succionado hacia el colector, y el sistema se llama colector de presión negativa. La estructura de este tipo de

colectores debe ser reforzada ya que la presión negativa actúa junto con la presión atmosférica. Al tener presión negativa, no pueden existir fugas de aire contaminado, y la limpieza en los alrededores del colector es reducida. El deterioro del ventilador es mucho menor en los sistemas de presión negativa, ya que las partículas son separadas del aire antes de entrar al ventilador. Esto puede ser el factor más importante en seleccionar colectores de presión negativa.

Sistemas de presión negativa son usados cuando los gases son corrosivos, contienen alta humedad o gran concentración de polvo abrasivo. Una vez que el gas entra al colector, las partículas son capturadas por el material de filtración. Los colectores normalmente son construidos usando grandes cantidades de filtros cilíndricos o bolsas que son colgados verticalmente en el colector. El número de bolsas puede variar de cien a mil o más, dependiendo del tamaño del colector y los requerimientos de volumen de aire del sistema. Cuando la capa de polvo crece hasta cierto espesor, la bolsa es limpiada, causando que las partículas caigan a la tolva de recolección.

Estas partículas son guardadas en la tolva temporalmente y luego son retirados por medio de

transportadores neumáticos o tornillos sin fin. El aire limpio es llevado al ambiente a través de la chimenea o en algunos casos, puede ser recirculado dependiendo de las necesidades del proceso.

### **2.2.1.2 Tipos de mangas filtrantes**

#### **a) Por el tipo de limpieza de la manga**

Existen tres tipos de mangas: de sacudido, aire reverso y pulse jet.

- **Filtros de mangas de sacudido**

Según Gallego (2012) este tipo de filtros colectan el polvo en el interior. La estructura generalmente tiene dos o más compartimientos para permitir que uno de ellos pueda desconectarse para su limpieza. Las mangas filtrantes cuelgan de forma vertical en filas con la parte superior cerrada, permitiendo así que se conecten al mecanismo de sacudido a lo ancho del colector. La parte inferior de las mangas está abierta y se conecta a la placa portamangas.

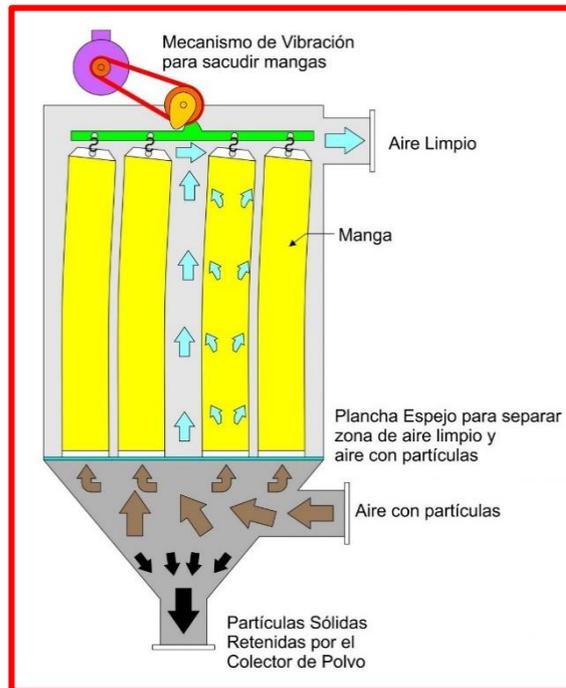
Durante el proceso de limpieza o filtración, el aire sucio entra al colector y se acumula en la parte interior de la manga. La capa de polvo mantiene la manga abierta. Para comenzar el proceso de limpieza, la compuerta de entrada

se cierra y se inicia el movimiento del mecanismo de sacudido creando una onda sinusoidal que comienza en la parte superior de la manga y crea ondas a lo largo de esta.

La capa de polvo se desprende y cae en la tolva. La mayoría del polvo es recolectado en los primeros 5 a 10 segundos de limpieza. En sistemas de filtros industriales, se necesita un motor para activar el mecanismo de sacudido, para poder mover la barra a la que se conectan los filtros de mangas. Este proceso requiere poca energía para producir una onda que desprende las partículas del interior de las mangas. Otro problema frecuente es la acumulación de polvo u otro material en la tolva alrededor de la base de la válvula. Esta acumulación puede dificultar el cierre de la válvula, especialmente si hay humedad. Corrosión en la base de la válvula también puede evitar que se cierre por completo. El mantenimiento de la válvula y de la compuerta de entrada asegurará un funcionamiento eficaz y sin problemas.

Debido al gran número de partes móviles, los filtros de sacudido suelen necesitar más mantenimiento que otro tipo de unidades. Las mangas se desgastan más rápidamente y fallan más que en otros sistemas de limpieza no mecánicos. La limpieza acústica puede

complementar, y en algunos casos eliminar el uso de mecanismos de sacudido ya que reduce el tiempo y la frecuencia de los ciclos de limpieza. Para que la limpieza acústica sea eficaz se necesita que las mangas tengan la tensión adecuada.



**Figura N° 04:** Filtros de mangas de sacudido  
Fuente: Gallego (2012)

- **Filtros de mangas de aire reverso**

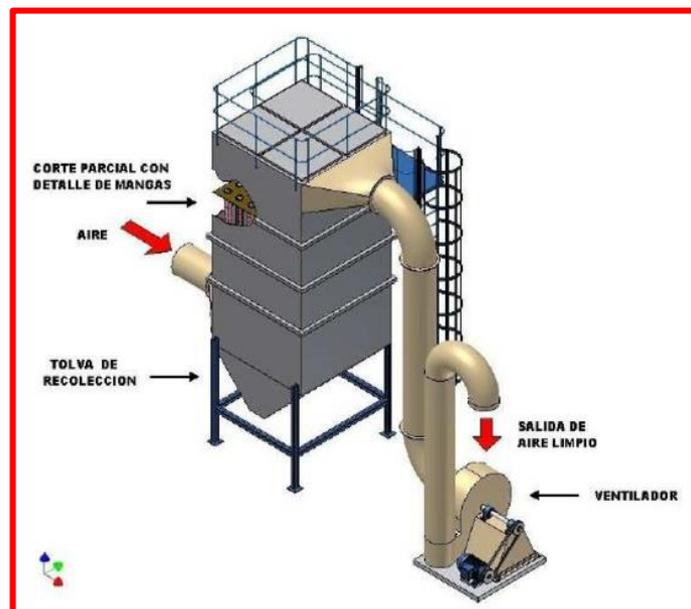
Según Gallego (2012) la estructura de los filtros de mangas generalmente está constituida de varios compartimientos que permiten su aislamiento durante el ciclo de limpieza. En un sistema de aire reverso, el gas cargado de polvo entra a través de la parte inferior del filtro y es dirigido hacia las mangas filtrantes por medio de deflectores. Las partículas se recogen en el interior de las

mangas que cuelgan verticalmente, mientras que el aire limpio se encuentra en el exterior de las mangas.

Normalmente, las mangas en colectores de aire reverso son muy grandes y tienen anillos de soporte cosidos en la parte exterior para evitar el colapso de estas durante el proceso de limpieza. El número de anillos o aros de soporte se determina según la longitud de la manga y la aplicación específica. La parte superior de la manga se conecta a un tensor que tiene un gancho en el centro. Dicho tensor permite la flexión necesaria en las mangas para obtener un buen desprendimiento de la capa de polvo. La parte inferior de las mangas se sujeta a un collarín o directamente a la placa separadora, manteniendo así las mangas fijas, actuando a la vez como barrera entre el plenum limpio y el sucio. Durante el ciclo de limpieza, se cierra el aire sucio en un compartimiento determinado.

Este compartimiento es presurizado con una corriente de aire limpio de baja presión generada por un ventilador o una fuente ambiental. Las mangas colapsan y la acción permite el desprendimiento del polvo hacia la tolva. Este tipo de limpieza es bastante fuerte por los cambios de presión en el sistema. La frecuencia de limpieza depende

de la concentración de polvo a la entrada del filtro. Puede ser continua o extenderse durante varias horas. Un ciclo completo consta de la apertura de la válvula, el cierre de esta y el asentamiento de polvo; por lo general el ciclo de limpieza completo dura alrededor de los 30s. Cuando el compartimiento es aislado, cualquier otra lectura que no sea cero indica que la compuerta de entrada no está cerrada como debería. Este flujo de aire causado por una fuga puede afectar severamente la eficacia de la limpieza. Todos los medidores de presión diferencial deben estar calibrados adecuadamente y recibir mantenimiento constante.



**Figura N° 05:** Filtros de mangas de aire reverso  
Fuente: Gallego (2012)

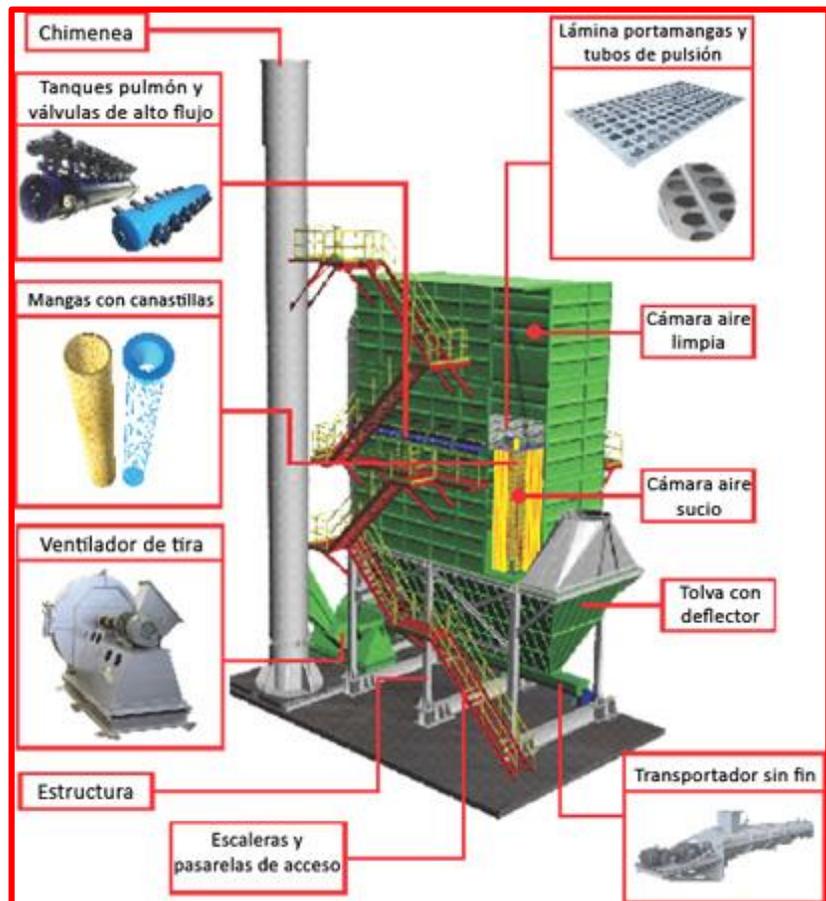
- **Filtros de mangas Pulse Jet**

Según Gallego (2012) este tipo de filtros permite una mejor cantidad de aire con igual área en el colector, es

decir mayor relación de aire-tela. El sistema pulse-jet funciona generalmente con una relación de aire a tela de 1.2-1.8m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>/min. Esto significa que la estructura general del filtro es de menor tamaño, lo que lo hace más económico al construirse. Las mangas filtrantes cuelgan verticalmente dentro de la unidad y se sujetan por la parte superior con abrazaderas y la parte inferior de la manga es cerrada. En estos sistemas, las mangas tienen canastillas internas de alambre. El aire sucio entra al sistema y es filtrado depositando el polvo en la superficie externa de la manga. Durante el ciclo de limpieza, el polvo se desaloja usando un chorro de aire comprimido que se inyecta en la parte superior de las mangas filtrantes. Este aire se proporciona a través de un tubo con boquillas que alimenta los venturis localizados en la parte superior de las bolsas.

El chorro de aire a alta presión interrumpe el flujo normal de aire a través del filtro. También crea una onda que al desplazarse a lo largo de la manga hace que esta se flexione, rompiendo la capa de polvo que cae hacia la tolva. En muchos casos, el venturi se usa para aumentar la velocidad del chorro de aire creando un impulso suficientemente grande para que pueda desplazarse a lo largo de la manga y regresar al punto de origen. El ciclo de limpieza para filtros pulse-jet debe estar diseñado para

producir un impulso corto y conciso para lograr una limpieza eficaz. La duración de éste es de 0,10 a 0,15 segundos usando presiones de pulsación de 4-7 bares (60-100psi).



**Figura N° 06:** Filtros De Mangas Pulse – Jet  
Fuente: Duda (2003)

La frecuencia de limpieza es un factor de importancia para la retención de cierta capa de polvo sobre la manga. Los intervalos entre los ciclos de limpieza pueden variar de 1 a 30 segundos o más. La frecuencia debe adaptarse para mantener la presión diferencial entre 2 y 6 pulgadas de agua. Este sistema no tiene partes móviles, y limpia continuamente sin necesidad de aislamiento. Sin embargo,

debido a la presión de aire que se utiliza, es necesario escoger textiles con mayor estabilidad dimensional y resistencia a la tensión.

#### **b) Por su secuencia de limpieza**

Todos los colectores se pueden identificar por su secuencia de limpieza.

- **Limpieza intermitente**

Según Duda (2003) estos filtros de mangas tienen un compartimiento, generalmente de sacudido y es necesario apagar el ventilador para que el mecanismo de limpieza pueda iniciarse.

- **Limpieza continua**

Según Duda (2003) los filtros tienen varios compartimientos o secciones. Cada compartimiento se limpia con una secuencia rotatoria desconectándose de los demás durante la limpieza. El aire sucio se desvía a otro compartimiento, gracias a esto, se puede continuar filtrando durante la limpieza, por ejemplo, los filtros de aire reverso.

- **Limpieza continua en línea**

Según Duda (2003) los filtros son completamente automáticos y generalmente están en línea durante la

limpieza. El proceso de filtración se interrumpe momentáneamente debido al aire comprimido que limpia las mangas en los filtros pulse-jet. Los filtros grandes de limpieza continua generalmente tienen varios compartimientos para evitar tener que apagarse durante el mantenimiento.

### **2.2.1.3 Componentes de un sistema colector de mangas**

Según Muñoz (2013) para que un filtro de mangas pueda cumplir su función, necesita además de otros componentes para poder generar un sistema colector de polvos. El filtro como tal, no podría trabajar correctamente sin que existiera confinamiento en el sistema, ductos a través de los cuales el aire contaminado y limpio circulan, un ventilador para el transporte del fluido, sistemas de acondicionamiento a la entrada del filtro dependiendo las condiciones del proceso, sin olvidar la salida de los gases limpios por medio de chimeneas o salidas simples a raíz del ventilador. Detallaremos de manera breve los componentes de un sistema colector de mangas. La instalación empieza con la campana de aspiración en el punto donde se desea captar el aire o gas contaminado. En cualquier sistema de ventilación, la idea de mejorar el ambiente y controlar emisión necesariamente tiene que ir de la mano con algún tipo de confinamiento para poder aumentar la velocidad del aire o gas a la entrada al sistema.

A medida que el gas pasa a través de la tubería hacia el filtro, en algunos casos, es necesario proporcionar algún tipo de sistema de enfriamiento para evitar temperaturas altas. Existen varios métodos de enfriamiento, por ejemplo, la dilución del gas utilizando aire ambiente, es el método de enfriamiento más simple y económico, especialmente para temperaturas muy elevadas. La dilución de aire aumenta el volumen de gas en forma considerable, por lo tanto, requiere la utilización de un filtro de mangas más grande que pueda manejar mayor volumen de aire. Por lo general, la máxima temperatura que soportan las mangas se encuentra alrededor de los 260 °C, y ante esto, tenemos por ejemplo serpentines, intercambiadores, torres de acondicionamiento, compuertas de aire de dilución (aire frío mezclado con aire caliente). El enfriamiento radiante utiliza tubos sin aislamiento que permite el enfriamiento del flujo del gas a medida que atraviesa el sistema. La tubería puede tener un diseño en forma de U para contar con mayor superficie de tubo expuesta al enfriamiento.

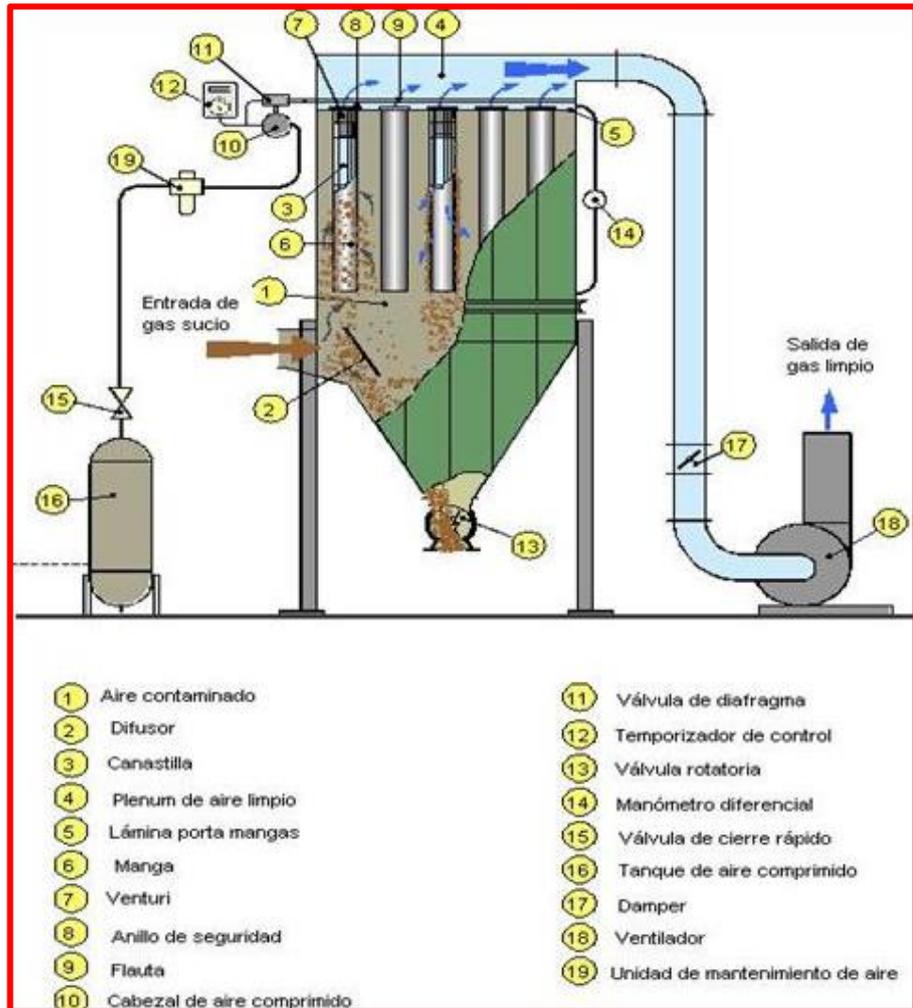
En aplicaciones en las que se utiliza este método de enfriamiento, es difícil mantener temperaturas exactas y se corre el riesgo de obstrucción en la tubería por acumulación de partículas. La entrada al filtro de mangas es el lugar por donde el aire que se mueve por la tubería entra al colector. Una buena distribución del flujo de gas no necesariamente significa tener

también una buena distribución del polvo, sin embargo, una buena distribución de gas va de la mano con una mejora en la distribución del polvo. El flujo de gas con polvo que ingresa no es muy positivo si entra en contacto directo con las paredes internas del filtro y con las mangas; una mala distribución da como resultado cortos ciclos de limpieza, alto consumo de aire comprimido y una vida de mangas corta.

Usualmente se acostumbra a colocar una plancha deflectora a la entrada al filtro, causando que el polvo con gas impacte contra ella precipitando las partículas grandes a la parte inferior de la tolva, pero debido al tiro producido por el ventilador, el flujo de aire con polvo fino sigue su camino hacia las mangas, pero no lo hace de manera distribuida. La corriente de aire con polvo circula bastante cerca de las paredes de la tolva y siempre en dirección de las mismas mangas causando un desgaste prematuro en ellas. Este caso es más crítico en tolvas angostas.

Las tolvas y las mangas sufren desgaste por abrasión. Otra consideración que se debe tener es evitar que el número de entradas al filtro sea mayor a una. Una sola entrada garantiza una circulación del flujo normal, en tanto que, si al filtro llegan 2 o más ductos, sus flujos respectivos se encontrarían causando turbulencia a la entrada, generando más pérdidas en el sistema, como nuestro material no es abrasivo, se omitirá la plancha

deflectora. El ventilador es el corazón del sistema. Controla el flujo de gas en el punto de generación de la contaminación y en el resto del sistema y sus componentes. Proveen la energía necesaria para que el flujo logre vencer la resistencia (o caída de presión) a través de la ductería y colector.



**Figura N° 07:** Diagrama general de la instalación  
Fuente: Duda (2003)

Los ventiladores pueden clasificarse según la presión desarrollada y según la dirección del flujo de aire. Según la presión desarrollada:

- De baja presión: La presión total desarrollada es inferior a 100mm H<sub>2</sub>O. (Ventiladores propiamente dichos).

- De media presión: La presión total desarrollada es superior a 100mm H<sub>2</sub>O e inferior a 300mm H<sub>2</sub>O (soplantes).
- De alta presión: La presión total desarrollada es superior a 300mm H<sub>2</sub>O e inferior a 1000mm H<sub>2</sub>O (turbo axial).
- De muy alta presión: mayor a 2500mm H<sub>2</sub>O (turbocompresores).

Según la dirección del flujo:

- De flujo radial (centrífugos)
- De flujo semiaxial (helico-centrífugos)
- De flujo axial

#### **a) Ventiladores Centrífugos**

Según Muñoz (2013) un ventilador centrífugo tiene una turbina compuesta por un número de aletas montadas alrededor de la manzana. El gas desde el lado de la turbina, gira 90°, acelera y pasa hacia las aletas del ventilador. Los ventiladores centrífugos pueden alcanzar altas presiones en el flujo de gas, por lo tanto, son los más eficaces para procesos industriales y para los sistemas de control de la contaminación.

Las características que reúnen los ventiladores centrífugos son:

- Caudales algo menores.

- Presiones más elevadas.
- Buen rendimiento.
- Son más utilizados en sistemas de control de la contaminación.



**Figura N° 08:** Ventilador centrífugo  
Fuente: Duda (2003)

El uso de dampers a la entrada o salida del ventilador es frecuente; son utilizados para controlar el flujo de gas al o desde el ventilador, los dampers en la salida imponen una resistencia al flujo que es utilizado para el control del flujo de gas; mientras que los dampers colocados a la entrada se ajustan a las diferentes condiciones del proceso de acuerdo con el flujo de gas que el ventilador debe manejar.



**Figura N° 09:** Dámper  
Fuente: Duda (2003)

### **a.1) Tipos de turbinas en ventiladores centrífugos**

Según Muñoz (2013) existen 3 tipos de turbinas:

- **Curvas hacia delante**

En el sentido de la rotación del ventilador. Son afectados enormemente por flujos de gas con material particulado. No son utilizados en sistemas colectores.

- **Curvas hacia atrás**

Este tipo de ventiladores están diseñados para manejar flujos de gases con una pequeña concentración de material particulado. Son más eficientes.

- **Radiales**

Las aletas radiales son las que mejor desempeño tienen para flujo de gases con alta concentración de material particulado.

### 2.3 Marco Conceptual

- Área de filtración: Es el área de un filtro de aire, u otro dispositivo de tratamiento del aire, por el que pasa el aire. El área de filtración se mide normalmente en metros/pies cuadrados.
- Área neta efectiva de media filtrante: Es la medida de media utilizable en un filtro.
- Área total de media filtrante: Es el área total de media filtrante utilizada en la producción de un filtro.
- Capacidad de retención de un filtro: Es la cantidad específica de aire, recomendada por el fabricante, que deberá manejar un filtro.
- Filtro de aire: Es un dispositivo para capturar partículas, o contaminantes, gaseosos, en una corriente de aire.
- Filtro de efecto ciclónico: Filtro que actúa a través de la fuerza centrífuga.
- Filtro Electrostático: Con este equipo el aire contaminado pasa por dos sistemas de filtración, pre-filtros y filtros electrostáticos, eliminando humos, removiendo del aire partículas de grasa y otros.
- Filtro final: Es el último filtro de dos, o más, filtros en serie, para la limpieza de la misma corriente de aire.
- Filtro de mangas: Un filtro mangas es un dispositivo para la separación de partículas sólidas en suspensión de una corriente gaseosa.
- Filtro plano: Es un filtro en el que la velocidad de la media es igual a la velocidad en la superficie frontal.
- Filtro tipo: Filtro compuesto por varias camas de rede que se asemejan a una tela.

- mmcda: Un milímetro de columna de agua es una unidad de presión del sistema técnico de unidades, que equivale a la presión ejercida por una milésima parte de una columna de agua pura (a 4 °C) de un metro de altura y al nivel del mar.
- Polvo: Son partículas en suspensión de cualquier material sólido, normalmente con partículas menores en tamaño a 100 micrones.
- Ventilador: Es un dispositivo de flujo radial o axial, que se usa para mover o producir, corrientes artificiales de aire.
- Ventilador Centrifugo: En estos ventiladores el aire ingresa en dirección paralela al eje del rotor, por la boca de aspiración, y la descarga se realiza tangencialmente al rotor, es decir que el aire cambia de dirección noventa grados (90°).

## **Capítulo III**

### **Descripción y Desarrollo del Proyecto**

#### **3.1 Descripción del Proyecto**

El funcionamiento del filtro Baghouse con mangas Snap Band y ventilador de succión centrífugo para la planta de molienda de carbón de la empresa de Cementos Pacasmayo, se dividirá en cinco etapas y será el siguiente:

##### **Etapas 1**

- El flujo con partículas de carbón recorrerá las etapas al interior del nuevo filtro convertido.

##### **Etapas 2**

- El flujo entra en contacto con la parte externa de las mangas, captando las partículas de carbón alrededor de estas y dejando pasar al flujo sin polvo.

### **Etapas 3**

- Para liberar el polvo adherido a las mangas se inyecta pulsos de aire que ingresa y limpia las mangas.

### **Etapas 4**

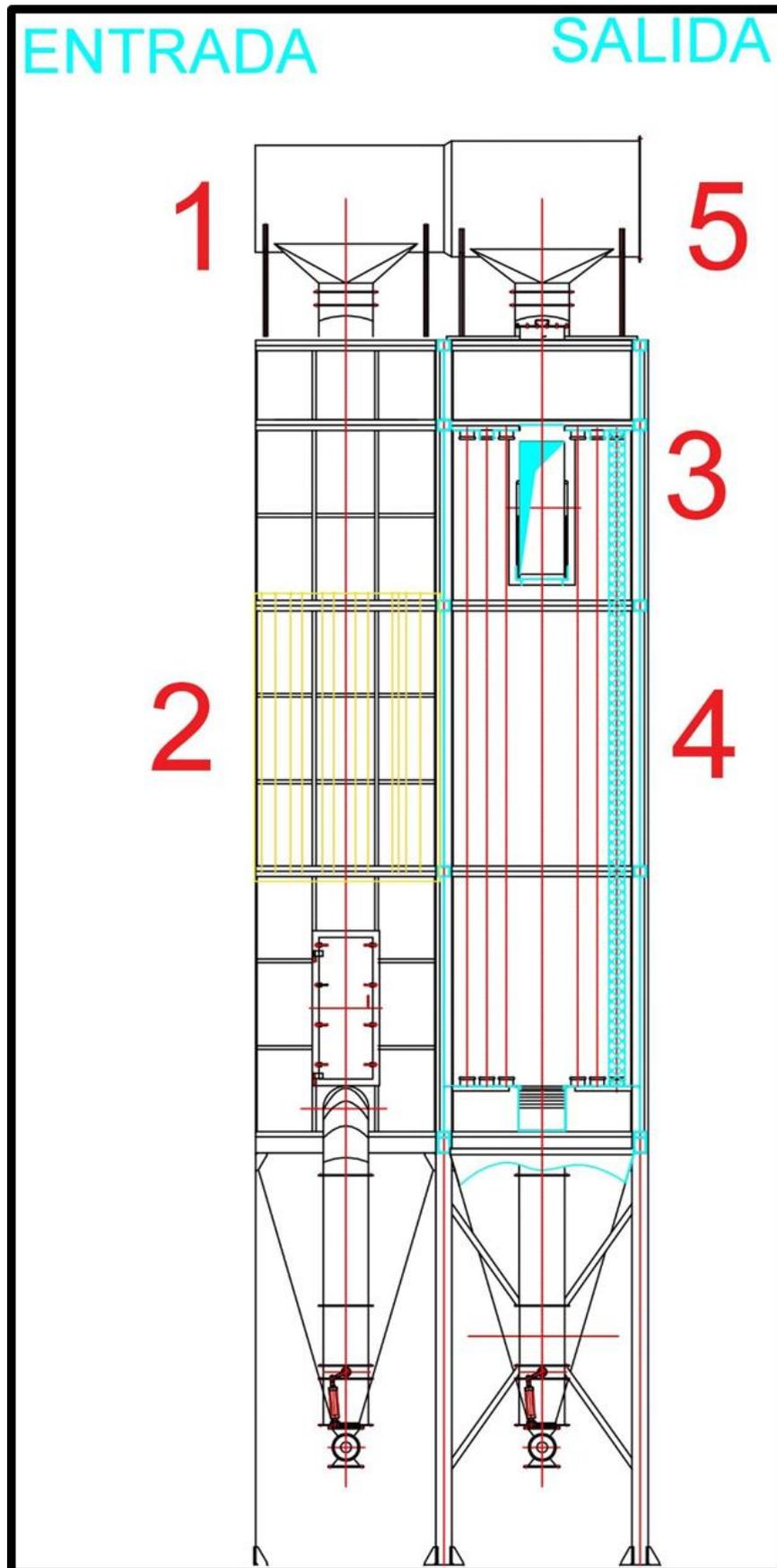
- Luego de limpiar las mangas, el polvo cae en la tolva para luego ser direccionado a los silos por medio de los espirales

### **Etapas 5**

- Finalmente termina el recorrido del aire que ya fue filtrado y es enviado al medio ambiente por la chimenea.

El filtro de mangas no presenta los inconvenientes que tiene un electrofiltro, ya que con su sistema de trabajo divide en dos cámaras al filtro convertido (cámara limpia y sucia) aun cuando suceda una parada repentina el flujo de partículas se quedarían en la cámara sucia y las partículas con mayor diámetro se sedimentarían hacia la tolva. Ahí radica la eficiencia de captación del filtro de mangas sin importar los cambios en el proceso de molienda.

A continuación, en la siguiente figura se muestra el diseño del Baghouse con filtro de mangas Snap Band y ventilador de succión centrifugo para la planta de molienda de carbón de la empresa de Cementos Pacasmayo S.A.C., en la figura se indicará las etapas mencionadas anteriormente.



**Figura N° 10:** Diseño del filtro de mangas Snap Band  
 Fuente: Elaboración Propia

### 3.2 Desarrollo del Proyecto

A continuación, se procederá a realizar los cálculos del filtro de mangas Snap Band y del ventilador de succión centrífugo para la planta de molienda de carbón de la empresa de Cementos Pacasmayo S.A.C.

Para poder realizar el diseño es necesario conocer las condiciones de entrada del flujo de aire que se va a filtrar, como son: caudal, la concentración de partículas en dicho caudal, su temperatura a la que se encuentra, el diámetro de partículas representativo y el tipo de partículas que se va a colectar; estas condiciones están en función del lugar donde va a operar dicho filtro.

De acuerdo con el lugar seleccionado para su utilización, estas condiciones se muestran en la siguiente tabla:

**Tabla N° 01**  
Condiciones de diseño

CONDICIONES DE DISEÑO	
<b>Caudal requerido</b>	3221 ft <sup>3</sup> /min
<b>Concentración</b>	0.5 gr/ ft <sup>3</sup>
<b>Temperatura del gas</b>	140 ° F
<b>Diámetro de partícula</b>	11µm
<b>Tipo de polvo</b>	Carbón

Fuente: Elaboración Propia

#### 3.2.1 Determinación de la velocidad de filtración

Los fabricantes han desarrollado ecuaciones que permiten obtener la relación gas - tela en las cuales se relacionan la temperatura de

operación, tamaño de la partícula, carga de las partículas y aplicación;  
para lo cual se tiene la siguiente ecuación:

$$V_F = 2.878 A B T^{0.2335} C^{-0.06021} (0.7471 + 0.0853 \ln D) \quad .. (1)$$

Fuente: Benítez (2000)

Donde:

$V_F$ = Proporción de gas - tela

A= Factor de material (10 – Ver Anexo 1)

B = Factor de aplicación (0.9 – Ver Anexo 1)

T= Temperatura de operación (entre 20 y 275 °F, para este caso es 140°F  
 $\approx 60^\circ\text{C}$ )

C= Carga de las partículas a la entrada (entre 0.05 y 100gr/ft<sup>3</sup>, para este caso es 0.5 gr/ft<sup>3</sup>)

D= Diámetro de partícula (entre 3 y 100μm, para este caso es 11μm)

Entonces reemplazando (1):

$$V_F = 2.878 \times 10 \times 0.9 \times 140^{0.2335} \times 0.5^{-0.06021} (0.7471 + 0.0853 \ln 11)$$

$$V_F = 8.11 \frac{ft}{min} \approx 247.2 \text{ cm/min}$$

### 3.2.2 Selección del medio filtrante

La determinación del tipo de tela y su dimensión dependen de las características de operación y sistema de limpieza que va a estar

sometida, y del proveedor o fabricante de quien se desee adquirir; se destacan a continuación dichas características las cuales se muestran en la siguiente tabla:

**Tabla N° 02**  
Características de operación

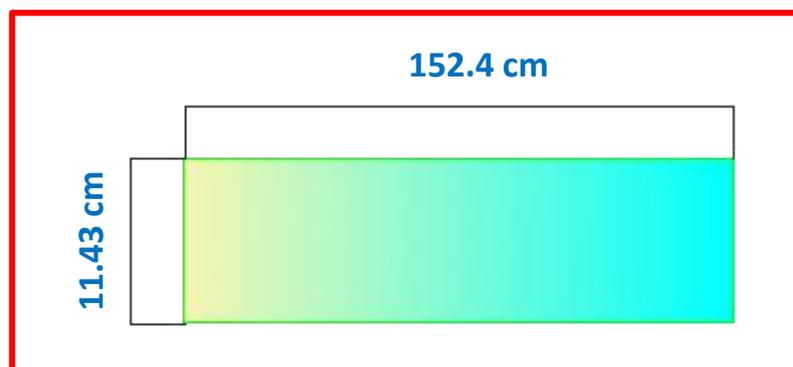
<b>CARACTERÍSTICAS DE OPERACIÓN</b>	
<b>Temperatura de operación</b>	140° F ≈ 60°C
<b>Punto de rocío</b>	78.8 ≈ 26°C
<b>Característica del carbón</b>	Alcalino y Abrasivo
<b>Tipo de limpieza</b>	Pulse - Jet

Fuente: Elaboración Propia

Para estas características el material de la tela será de polyester con diámetro de 11.43cm y una longitud de 152.4cm, considerando la bolsa como un cilindro mucho más largo. (Ver Anexo 2)

### 3.2.3 Determinación del número de mangas

De acuerdo con las dimensiones de la manga seleccionada se puede determinar el área total por manga calculando el área superficial de un cilindro como sigue:



**Figura N° 11:** Dimensionamiento de la manga Snap Band  
Fuente: Elaboración Propia

$$A_{manga} = \pi x D x L \quad \dots\dots\dots (2)$$

Fuente: Benítez (2000)

$$A_{manga} = \pi x 11.43 x 152.40$$

$$A_{manga} = 5472.44 \text{ cm}^2$$

Una vez obtenida el área de la manga individual se puede calcular el número real de mangas, en la siguiente tabla se muestra los valores correspondientes al Área neta y al Área de manga:

**Tabla N° 03**  
Datos del área de mangas

DATOS DEL AREA DE MANGAS	
Área neta	397 ft <sup>2</sup> ≈ 368977.43 cm <sup>2</sup>
Área de manga individual	5.89 ft <sup>2</sup> ≈ 5472.44 cm <sup>2</sup>

Fuente: Elaboración Propia

$$N_{mangas} = \frac{A_{neta}}{A_{mangas}} \quad \dots\dots\dots (3)$$

Fuente: Benítez (2000)

$$N_{mangas} = \frac{368977.43}{5472.44}$$

$$N_{mangas} = 68 \text{ mangas}$$

En la siguiente tabla se muestra las condiciones de funcionamiento del sistema de limpieza existente.

**Tabla N° 04**  
Condiciones de funcionamiento del sistema de limpieza

<b>CONDICIONES DE FUNCIONAMIENTO</b>	
<b>Presión de limpieza</b>	80 psi ≈ 0.55 Mpa
<b>Tiempo de apertura</b>	250 ms
<b>Número de mangas</b>	68

Fuente: Elaboración Propia

El sistema de limpieza que actualmente posee el filtro Baghouse cuenta con una válvula de 12500 Lt/min, la cual limpiara 10 mangas en un pulso de aire, y tiene un diámetro de orificio de salida de aire presurizado de 7mm, como el número de mangas calculados es de 68 por consiguiente se deben usar 7 válvulas que dará un total de 70 mangas, por lo tanto, existe un caudal adicional que debe ser compensado en la selección del ventilador, en la siguiente ecuación se calcula el caudal adicional.

$$q = A_n \times V_f \quad \dots (4)$$

Fuente: Benítez (2000)

$$q = 70 \times 5472.44 \text{ cm}^2 \times 247.19 \text{ cm}$$

$$q = 70 \times 5472.44 \text{ cm}^2 \times 247.19 \text{ cm}$$

$$q = \frac{94691271.05 \text{ cm}^3}{m} \approx \frac{94.69127105 \text{ m}^3}{m} \approx 3344 \text{ cfm}$$

### 3.2.4 Determinación de la caída de presión de diseño

Para poder establecer la caída de presión del filtro es necesario partir de una caída de presión presumida y establecer las características de operación del tiempo de filtración, tiempo de limpieza y de la presión de pulso; el rango típico de caída de presión está entre 2 y 10 pulgadas de H<sub>2</sub>O y asumiendo una caída de 4 pulgadas de H<sub>2</sub>O. Las características de operación se muestran en la siguiente tabla, la presión de pulso se obtiene de acuerdo con la válvula seleccionada:

**Tabla N° 05**  
Características de la caída de presión

CARÁCTERÍSTICAS DE OPERACIÓN	
Tiempo de filtración	60 seg
Tiempo de limpieza	250 msg
Presión de pulso	80 psi

Fuente: Elaboración Propia

Aplicando las siguientes ecuaciones que combinan el proceso de filtración con el proceso de limpieza, y tomando un valor de K<sub>s</sub> de 7 (rango de K<sub>s</sub> 1.2 – 30 o 40 [pulgadas H<sub>2</sub>O x ft x min]/lb), se tiene el siguiente calculo: (Ver Anexo 3)

$$(PE)_{\delta w} = 6.08 V_f P_j^{-0.65} \quad \dots (5)$$

Fuente: Benítez (2000)

Donde:

$$(PE)_{\delta w} = [S_e + (K_2)_c \times W_c] V_f$$

$V_f$  = Velocidad de la filtración (8.11 ft/min)

$P_j^{-0.65}$  = Presión del pulso de limpieza(80psi)

Reemplazando (5):

$$(PE)_{\delta w} = 6.08 \times 8.11 \times 80^{-0.65}$$

$$(PE)_{\delta w} = 2.86$$

$$\Delta P = (PE)_{\delta w} + K_s \times W_o \times V_f \quad \dots (6)$$

Fuente: Benítez (2000)

Donde:

$\Delta P$  = Caída de presión total

$$(PE)_{\delta w} = [S_e + (K_2)_c \times W_c] V_f$$

$K_s$ = Coeficiente de resistencia del Polvo (Carbón = 7)

$w_o$ = Densidad de área de las partículas

$V_f$ = Velocidad de la filtración

Reemplazando (6):

$$\Delta P = 2.86 + [7 (8.11)^2 \times (0.5/7000) \times 1]$$

$$\Delta P = 2.893 \text{ pulgada } H_2O \approx 3 \text{ pulgada } H_2O$$

### 3.2.5 Evaluación del sistema de succión

Para la generación del caudal que ingresa al filtro se selecciona el sistema de succión o de presión negativa que consta de un ventilador que debe de cumplir las siguientes características que se muestran en la siguiente tabla:

**Tabla N° 06**  
Características del ventilador

CARÁCTERÍSTICAS DEL VENTILADOR
Ventilador de succión
Tipo centrífugo
Aletas curvadas hacia atrás (alta eficiencia; $n = 0.7$ )
Operatividad en zona de aire limpio (no sufre abrasión)

Fuente: Elaboración Propia

La potencia de consumo adecuada que necesita el ventilador depende de la resistencia que debe vencer o caída de presión y del caudal que debe generar como sigue:

$$P = \frac{q \times \Delta P}{6356 \times n} \dots\dots\dots (7)$$

Fuente: Benítez (2000)

$$P = \frac{3344 \times 3}{6356 \times 0.7}$$

$$P = 2.25 \text{ Hp} \approx 2.5 \text{ Hp (adecuado)}$$

### **3.3 Revisión y Consolidación de Resultados**

Continuando con el desarrollo del proyecto y con la finalidad de mejorar el problema existente en la planta de molienda de carbón de Cementos Pacasmayo S.A.C., es que a continuación en las siguientes tablas se muestra la comparación de las emisiones de partículas contaminadas antes y después del diseño de las mangas Snap Band y el ventilador centrifugo para el sistema de filtración.

Antes del diseño se procedió a tomar los valores de emisiones por el lapso de 5 días, estos valores oscilan entre 245-295  $\mu/m^3$ , así también se obtuvieron los valores después del diseño lo cuales oscilan entre 19 a 22  $\mu/m^3$ .

Cabe señalar que el límite máximo permisible según lo establecido por los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Aire N° 003-2017-MINAM es de 25  $\mu/m^3$ . (Ver Anexo 4)

#### **DÍA 1**

Se obtiene los datos de emisiones de particuladas contaminadas en intervalos de 1 hora durante las 24 horas.

Es importante indicar que esto datos fueron otorgados por la empresa de Cementos Pacasmayo S.A.C.

**Tabla N° 07**

Comparación del electrofiltro y del filtro de mangas en relación con las emisiones de partículas contaminadas - día 1

ANTES DE LA IMPLEMENTACIÓN		DESPUÉS DE LA IMPLEMENTACIÓN	
Hora	Emisiones $\mu/ m^3$	Hora	Emisiones $\mu/ m^3$
00:00	242	00:00	18
01:00	240	01:00	15
02:00	240	02:00	17
03:00	245	03:00	17
04:00	246	04:00	17
05:00	248	05:00	17
06:00	246	06:00	20
07:00	247	07:00	18
08:00	296	08:00	25
09:00	325	09:00	24
10:00	286	10:00	23
11:00	296	11:00	22
12:00	278	12:00	22
13:00	325	13:00	22
14:00	296	14:00	22
15:00	324	15:00	22
16:00	284	16:00	24
17:00	294	17:00	24
18:00	323	18:00	24
19:00	282	19:00	21
20:00	291	20:00	25
21:00	296	21:00	16
22:00	241	22:00	15
23:00	245	23:00	22
00:00	321	00:00	18

Fuente: Elaboración Propia

## DÍA 2

Se obtiene los datos de emisiones de particuladas contaminadas en intervalos de 1 hora durante las 24 horas.

**Tabla N° 08**

Comparación del electrofiltro y del filtro de mangas en relación con las emisiones de partículas contaminadas - día 2

ANTES DE LA IMPLEMENTACIÓN		DESPUÉS DE LA IMPLEMENTACIÓN	
Hora	Emisiones $\mu\text{/ m}^3$	Hora	Emisiones $\mu\text{/ m}^3$
00:00	240	00:00	20
01:00	240	01:00	20
02:00	241	02:00	17
03:00	245	03:00	15
04:00	246	04:00	17
05:00	245	05:00	15
06:00	246	06:00	20
07:00	247	07:00	18
08:00	296	08:00	25
09:00	324	09:00	24
10:00	286	10:00	23
11:00	290	11:00	22
12:00	278	12:00	22
13:00	320	13:00	23
14:00	296	14:00	23
15:00	324	15:00	22
16:00	284	16:00	24
17:00	294	17:00	21
18:00	323	18:00	21
19:00	282	19:00	21
20:00	291	20:00	25
21:00	294	21:00	16
22:00	245	22:00	15
23:00	245	23:00	22
00:00	325	00:00	18

Fuente: Elaboración Propia

### DÍA 3

Se obtiene los datos de emisiones de particuladas contaminadas en intervalos de 1 hora durante las 24 horas.

**Tabla N° 09**

Comparación del electrofiltro y del filtro de mangas en relación con las emisiones de partículas contaminadas - día 3

ANTES DE LA IMPLEMENTACIÓN		DESPUÉS DE LA IMPLEMENTACIÓN	
Hora	Emisiones $\mu\text{/ m}^3$	Hora	Emisiones $\mu\text{/ m}^3$
00:00	240	00:00	18
01:00	240	01:00	15
02:00	240	02:00	17
03:00	245	03:00	17
04:00	246	04:00	15
05:00	248	05:00	17
06:00	246	06:00	20
07:00	247	07:00	18
08:00	295	08:00	23
09:00	322	09:00	24
10:00	286	10:00	23
11:00	296	11:00	22
12:00	278	12:00	22
13:00	320	13:00	22
14:00	298	14:00	22
15:00	324	15:00	22
16:00	288	16:00	21
17:00	298	17:00	24
18:00	323	18:00	21
19:00	282	19:00	21
20:00	291	20:00	25
21:00	295	21:00	16
22:00	241	22:00	13
23:00	243	23:00	21
00:00	312	00:00	15

Fuente: Elaboración Propia

## DÍA 4

Se obtiene los datos de emisiones de particuladas contaminadas en intervalos de 1 hora durante las 24 horas.

**Tabla N° 10**

Comparación del electrofiltro y del filtro de mangas en relación con las emisiones de partículas contaminadas - día 4

ANTES DE LA IMPLEMENTACIÓN		DESPUÉS DE LA IMPLEMENTACIÓN	
Hora	Emisiones $\mu\text{/ m}^3$	Hora	Emisiones $\mu\text{/ m}^3$
00:00	241	00:00	18
01:00	240	01:00	15
02:00	240	02:00	15
03:00	243	03:00	15
04:00	246	04:00	15
05:00	248	05:00	17
06:00	246	06:00	20
07:00	245	07:00	18
08:00	296	08:00	25
09:00	325	09:00	24
10:00	285	10:00	23
11:00	296	11:00	21
12:00	278	12:00	22
13:00	327	13:00	23
14:00	296	14:00	24
15:00	323	15:00	22
16:00	284	16:00	24
17:00	294	17:00	24
18:00	323	18:00	24
19:00	282	19:00	21
20:00	292	20:00	25
21:00	296	21:00	17
22:00	241	22:00	15
23:00	241	23:00	22
00:00	321	00:00	18

Fuente: Elaboración Propia

## DÍA 5

Se obtiene los datos de emisiones de particuladas contaminadas en intervalos de 1 hora durante las 24 horas.

**Tabla N° 11**

Comparación del electrofiltro y del filtro de mangas en relación con las emisiones de partículas contaminadas - día 5

ANTES DE LA IMPLEMENTACIÓN		DESPUÉS DE LA IMPLEMENTACIÓN	
Hora	Emisiones $\mu\text{/ m}^3$	Hora	Emisiones $\mu\text{/ m}^3$
00:00	237	00:00	16
01:00	240	01:00	16
02:00	240	02:00	16
03:00	240	03:00	16
04:00	246	04:00	16
05:00	248	05:00	16
06:00	246	06:00	23
07:00	245	07:00	18
08:00	296	08:00	23
09:00	325	09:00	24
10:00	287	10:00	13
11:00	296	11:00	15
12:00	278	12:00	17
13:00	325	13:00	22
14:00	296	14:00	20
15:00	325	15:00	21
16:00	285	16:00	24
17:00	295	17:00	24
18:00	323	18:00	24
19:00	282	19:00	21
20:00	290	20:00	20
21:00	296	21:00	16
22:00	236	22:00	14
23:00	245	23:00	22
00:00	318	00:00	17

Fuente: Elaboración Propia

Tal y como se observa en las tablas anteriores con el correcto diseño de las mangas y del ventilador centrífugo se logra reducir notablemente las emisiones de partículas contaminadas cumpliendo con las normas ambientales peruanas.

El costo que involucra el diseño de las mangas filtrantes está en función de la cantidad de tela necesaria para el proceso de filtración, es decir, del área neta de filtración; así también del correcto dimensionamiento del ventilador centrífugo, algunos precios son cotizaciones de empresas dedicadas al rubro, cabe señalar que los costos de la tela para las mangas de filtración suelen cambiar constantemente.

**Tabla N° 12**  
Presupuesto del diseño del filtro de mangas Snap Band

ITEM	EQUIPOS Y MATERIALES	CANTIDAD	COSTO UNITARIO	COSTO TOTAL
1	Tela Polyester	140m <sup>2</sup>	S/. 6.90	S/. 966.00
2	Ventilador Centrífugo 2.5 hp	1	S/. 6,300.00	S/. 6,300.00
3	Canastilla venturi	68	S/. 33.00	S/. 2,244.00
4	Codo de Tubería	7	S/. 262.50	S/. 1,837.50
5	Ductos de conducción	7	S/. 420.00	S/. 2940.00
6	Manguera	7	S/. 22.40	S/. 156.80
7	Tubos para inyección de aire	7	S/. 5.50	S/. 38.50
8	Válvula de seguridad	1	S/. 18.00	S/. 18.00
9	Accesorios	-	-	S/. 2,556.00
10	Montaje (10 días)	3 técnicos	S/. 185 x día	S/. 5,550.00
<b>Costo Total</b>				<b>S/. 22,606.80</b>

Fuente: Elaboración Propia

## CONCLUSIONES

- Se concluye que se determinó las características de diseño del filtro de mangas Snap Band y del ventilador de succión centrífugo, cuya velocidad de filtración y área de filtración es de 247.2 cm/min y 368977 cm<sup>2</sup> respectivamente, así también con el diseño del filtro se logra reducir notablemente las emisiones de partículas contaminadas en un 93%, este resultado es beneficioso para la planta de molienda de carbón de Cementos Pacasmayo SAC, ya que estaría cumpliendo con las normas ambientales peruanas en relación con los límites máximos permisibles de partículas contaminadas en suspensión.
- Se concluye que se determinó el número de mangas y su dimensionamiento que serán utilizadas en el filtro de mangas Snap Band para la planta de molienda de carbón de Cementos Pacasmayo SAC, con lo cual se obtiene los siguientes resultados: el filtro tendrá 68 mangas de polyester, el área de cada manga es de 5472.44 cm<sup>2</sup>, el un diámetro de las mangas es de 11.43cm y tienen una longitud de 152.40cm.
- Se concluye que se calculó la potencia de consumo adecuada que necesitará el ventilador de succión centrífugo en el diseño del filtro de mangas Snap Band para la planta de molienda de carbón de Cementos Pacasmayo SAC, la cual será de 2.5 HP.

## RECOMENDACIONES

- En relación con el diseño del filtro de mangas Snap Band con ventilador de succión centrífugo, se recomienda, elaborar un plan de mantenimiento, con la finalidad de tener un sistema seguro y confiable, así también se recomienda capacitar a los trabajadores en relación con el nuevo funcionamiento del sistema de filtración.
- En relación con las mangas filtrantes, se recomienda, revisar cada cierto tiempo si estas presentan perforaciones o algún defecto, con la finalidad de evitar fugas inesperadas de partículas contaminadas.
- En relación con el ventilador de succión centrífugo, se recomienda, solicitar impulsores nuevos y de calidad, ya que este debe girar a altas revoluciones por minuto, lo cual lo hace un accesorio delicado.

## BIBLIOGRAFÍA

- Ángel, J. (2017). *Diseño de un sistema de evacuación y limpieza de emisiones en el proceso de fundición de plomo secundario en la Empresa Recuperación De Metales S.A.* (Tesis de Pre Grado). Fundación Universidad de América. Bogotá, Colombia.
- Duda, W. (2003). *Manual Tecnológico del Cemento*. Sevilla, España: Reverté S.A.
- Gómez, E. (2016). *Conversión de un precipitador electrostático a filtro de mangas (PULSE-JET) en la planta de molienda de carbón en la Cementera UNACEM– Atocongo*. (Tesis de Pre Grado). Universidad Tecnológica del Perú. Lima, Perú.
- Hernández, J. (2011). *Ingeniería de detalle para un sistema de desempolvado en las balanzas pesadoras de dosificación de Holcim (Venezuela) C.A. Planta Cumarebo*. (Tesis de Pre Grado). Universidad Nacional Abierta. Caracas, Venezuela.
- Muñoz, M. (2013). *Ingeniería Química*. Madrid, España: UNED
- Labahn, K. (2000). *Prontuario del Cemento*. Barcelona, España: Reverté S.A.
- Gallego, A. (2012). *Contaminación Atmosférica*. Madrid, España: UNED
- Benítez, J. (2000). *Ingeniería de procesos y diseño para el control de la contaminación del aire*. New Jersey, EE. UU.: Prentice Hall

## **ANEXOS**

## ANEXO 1

### FACTOR DE MATERIAL: A

15	12	10	9.0	6.0
Mezcla de pastel	Asbestos	Alúmina	Amonio	Carbón activado
Polvo de cartón	En pulición	Aspirina	Fertilizantes fosfáticos	Carbón negro (molecular)
Cocoa	Material celuloso	Carbón negro	Petroquímicas secas	Detergentes y otros dispersantes
Fluor	Fundición	Cemento	Tintura	Productos directos de reacción de polvo de tocador, leche y jabón
Granos	Perlita	Pigmentos	Ceniza volátil	
Polvo de cueros	Caucho	Cerámica	Oxidos metálicos	
Polvo en acerrios	Arena	Arcillas	Pigmentos metálicos y sintéticos	
Tabaco	Sal	Ladrillos	Plásticos	
	Talco	Carbón de piedra	Resinas	
		Polvo de rocas y minerales	Silicatos	
		Sílica	Almidones	
		Acido sorbico	Acido tánico	
		Azúcar		

### FACTOR DE APLICACIÓN: B

Refiere a puntos de transferencia, estaciones de parqueo, etc	<b>1.0</b>
Colección de Productos: transporte de aire, molinos, clasificadores, conducción rápida	<b>0.9</b>
Filtración de gas: conducción de spray, hornos, reactores, etc	<b>0.8</b>

## ANEXO 2

TIPO DE LIMPIEZA	DIAMETRO DE MANGA (plg.)	PE	PP	NO	HA	FG	CO	TF	P8	RT	NX
Pulse-jet	4-1/2 a 5-1/8 6 a 8	0.75	0.81	2.17	1.24	1.92	NA	12.2	4.06	2.87	20.6
		0.67	0.72	1.95	1.15	1.60	NA	9.70	3.85	2.62	NA
Pulse-jet	4-1/2 a 5-1/8 6 a 8	0.53	0.53	1.84	0.95	1.69	NA	12.9	3.6	2.42	16.7
		0.50	0.60	1.77	0.98	1.55	NA	9.00	3.51	2.30	NA
Pulse-jet (cartucho)	4-7/8 6-1/8	2.95	NA	6.12	NA						
		1.53	NA	4.67	NA						
Sacudimiento	5	0.63	0.88	1.61	1.03	NA	0.70	NA	NA	NA	NA
Sacudimiento	5	0.61	1.01	1.53	1.04	NA	0.59	NA	NA	NA	NA
Aire reverso	8 11-1/2	0.63	1.52	1.35	NA	1.14	NA	NA	NA	NA	NA
		0.62	NA	1.43	NA	1.01	NA	NA	NA	NA	NA
Aire reverso	8 11-1/2	0.44	NA	1.39	NA	0.95	NA	NA	NA	NA	NA
		0.44	NA	1.17	NA	0.75	NA	NA	NA	NA	NA

NA = No aplicable

**MATERIALES:**

PE = 16 onzas de polyester

PP = 16 onzas de polypropileno

NO = 14 onzas de nomex

HA = 15 onzas de homopolimero acrílico

FG = 16 onzas de fiberglas con 10% de teflón

CO = 9 onzas de algodón

TF = 22 onzas de teflon afelpado

P8 = 16 onzas de p84

RT = 16 onzas de ryton

NX = 16 onzas de nextel

### ANEXO 3

<b>Material</b>	<b>Operación</b>
Óxido de Aluminio	2, 3, 4, 5, 6
Carbón Negro	4, 5, 6, 7
Cemento	3, 4, 5, 6, 7
Coque	2, 3, 5, 6
Pigmento de Cerámica	4, 5, 6, 7
Polvo de Arcilla y de Ladrillo	2, 4, 6, 12
Carbón	2, 3, 6, 7, 12
Kaolina	4, 5, 7
Piedra Caliza	2, 3, 4, 5, 6, 7
Roca, Polvo de Minerales	2, 3, 4, 5, 6, 7
Sílice	2, 3, 4, 5, 6, 7
Azúcar	3, 4, 5, 6, 7

## ANEXO 4

Parámetros	Periodo	Valor [µg/m <sup>3</sup> ]	Criterios de evaluación	Método de análisis <sup>[1]</sup>
Benceno (C <sub>6</sub> H <sub>6</sub> )	Anual	2	Media aritmética anual	Cromatografía de gases
Dióxido de Azufre (SO <sub>2</sub> )	24 horas	250	NE más de 7 veces al año	Fluorescencia ultravioleta (Método automático)
Dióxido de Nitrógeno (NO <sub>2</sub> )	1 hora	200	NE más de 24 veces al año	Quimioluminiscencia (Método automático)
	Anual	100	Media aritmética anual	
Material Particulado con diámetro menor a 2,5 micras (PM <sub>2,5</sub> )	24 horas	50	NE más de 7 veces al año	Separación inercial/filtración (Gravimetría)
	Anual	25	Media aritmética anual	
Material Particulado con diámetro menor a 10 micras (PM <sub>10</sub> )	24 horas	100	NE más de 7 veces al año	Separación inercial/filtración (Gravimetría)
	Anual	50	Media aritmética anual	
Mercurio Gaseoso Total (Hg) <sup>[2]</sup>	24 horas	2	No exceder	Espectrometría de absorción atómica de vapor frío (CVAAS) o Espectrometría de fluorescencia atómica de vapor frío (CVAFS) o Espectrometría de absorción atómica Zeeman.  (Métodos automáticos)
Monóxido de Carbono (CO)	1 hora	30000	NE más de 1 vez al año	Infrarrojo no dispersivo (NDIR) (Método automático)
	8 horas	10000	Media aritmética móvil	
Ozono (O <sub>3</sub> )	8 horas	100	Máxima media diaria NE más de 24 veces al año	Fotometría de absorción ultravioleta (Método automático)
Plomo (Pb) en PM <sub>10</sub>	Mensual	1,5	NE más de 4 veces al año	Método para PM <sub>10</sub> (Espectrofotometría de absorción atómica)
	Anual	0,5	Media aritmética de los valores mensuales	
Sulfuro de Hidrógeno (H <sub>2</sub> S)	24 horas	150	Media aritmética	Fluorescencia ultravioleta (Método automático)

## ANEXO 5

### DISEÑO DEL FILTRO BAGHOUSE

