

**DISEÑO DE UN SISTEMA DE DESEMPOLVADO POR FILTRO DE MANGAS
TIPO PULSE JET PARA EL ÁREA DE MOLIENDA DE LA EMPRESA CEMEX
S.A. PLANTA DE CEMENTO BUCARAMANGA**

**ERIKA JULIETH PILONIETA MARÍN
JOSE GABRIEL TORTELLO NIETO**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA**

2016

**DISEÑO DE UN SISTEMA DE DESEMPOLVADO POR FILTRO DE MANGAS
TIPO PULSE JET PARA EL ÁREA DE MOLIENDA DE LA EMPRESA CEMEX
S.A. PLANTA DE CEMENTO BUCARAMANGA**

**ERIKA JULIETH PILONIETA MARÍN
JOSE GABRIEL TORTELLO NIETO**

**Trabajo de grado para optar al título de
Ingeniero Mecánico**

Director

**PEDRO JOSÉ DÍAZ GUERRERO
Ingeniero Mecánico**

Codirector

**JAVIER RUGELES PÉREZ
Ingeniero Mecánico**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA**

2016

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	13
1. GENERALIDADES DEL PROYECTO.....	14
1.1. TÍTULO	14
1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	14
1.3. JUSTIFICACIÓN DEL PROBLEMA	15
1.4. OBJETIVOS DEL TRABAJO DE GRADO	16
1.4.1. Objetivo General	16
1.4.2. Objetivos Específicos	16
2. METODOLOGÍA DEL PROYECTO	18
3. MARCO TEÓRICO	20
3.1. PROCESO DE FABRICACIÓN DEL CEMENTO	20
3.1.1. Las materias primas. Extracción, trituración, secado y molienda:	21
3.1.2. Composición del cemento producido en CEMEX S.A.	26
3.2. CALIDAD DEL AIRE	26
3.2.1. Contaminantes del aire	27
3.3. SISTEMAS DE DESEMPOLVADO.....	27
3.4. MÓDULOS OPERATIVOS DE UN SISTEMA DE DESEMPOLVADO.	29
3.4.1. Módulo de Limpieza.	30
3.4.2. Módulo de Transporte.	38
3.4.3. Módulo de Potencia.....	44
3.4.4. Módulo de Control.....	47
3.4.5. Módulo de Alimentación.....	48
4. PROCESO DE DISEÑO DEL SISTEMA DE COLECCIÓN DE POLVOS CON BASE A LAS CONDICIONES DE OPERACIÓN DE LA ZONA DE MOLIENDA.	50
4.1. DESCRIPCIÓN Y BASE DE DISEÑO PARA LOS EQUIPOS QUE INTEGRAN EL SISTEMA DE DESEMPOLVADO.	52
4.2. CÁLCULO DEL TAMAÑO DEL FILTRO.	53
4.3. RELACIÓN AIRE – TELA	54
4.4. CAÍDA DE PRESIÓN.....	55

4.5.	DISEÑO DE DUCTOS	55
4.5.1.	Cambios de presión en el sistema:	56
4.5.2.	Determinación del tamaño del ducto:	57
4.5.3.	Pérdidas en ductos:.....	58
5.	PROCEDIMIENTO DE DISEÑO	64
5.1.	MÉTODO DE DISEÑO POR MEDIO DE LA PRESIÓN DINÁMICA	64
5.2.	DISTRIBUCIÓN DEL CAUDAL.....	65
5.2.1.	Método de equilibrado por diseño:	66
5.2.2.	Método de equilibrado por compuertas:	66
5.3.	DISEÑO DEL SISTEMA DE DESEMPOLVADO POR FILTRO DE MANGAS TIPO PULSE JET PARA EL ÁREA DE MOLIENDA.	66
5.3.1.	Diseño de ductos:.....	68
5.3.2.	Longitud y accesorios de los ductos:.....	70
5.3.3.	Diseño de la chimenea:.....	72
5.3.4.	Pérdida de carga en el sistema	74
5.4.	SELECCIÓN DEL VENTILADOR.....	79
5.5.	SELECCIÓN DE LA TELA FILTRANTE DE LAS MANGAS.	84
5.6.	ELEMENTOS DEL SISTEMA DE DESEMPOLVADO PROPORCIONADOS POR LA PLANTA CEMEX S.A.	85
5.6.1.	Sistema de descarga:.....	85
5.6.2.	Sistema de filtrado:.....	86
6.	ANÁLISIS DE COSTOS DEL DISEÑO DE UN SISTEMA DE DESEMPOLVADO POR FILTRO DE MANGAS TIPO PULSE JET PARA EL ÁREA DE MOLIENDA DE LA EMPRESA CEMEX S.A. PLANTA CEMENTO BUCARAMANGA.....	88
6.1.	COSTOS DIRECTOS	88
6.2.	COSTOS INDIRECTOS.....	94
6.3.	COSTO TOTAL DEL PROYECTO.....	94
7.	ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	96
8.	CONCLUSIONES	98
9.	RECOMENDACIONES	101
	BIBLIOGRAFÍA.....	103

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Esquema general de la fabricación del cemento.	21
Figura 2. Molino horizontal de rodillos.	24
Figura 3. Diagrama general de un sistema de desempolvado.	29
Figura 4. Módulos operativos del sistema de desempolvado.	30
Figura 5. Despiece de un filtro de mangas.	32
Figura 6. (A). Placa portamangas y bolsas filtrantes. (B). Tipos de mangas filtrantes.	34
Figura 7. Tipos de construcciones de la parte superior de canastillas.	35
Figura 8. Venturries utilizados para filtros de mangas.	36
Figura 9. Placa espejo para filtros de mangas tipo Pulse Jet.	37
Figura 10. Válvula diafragma con solenoide.	37
Figura 11. Emisiones capturadas / Fugitivas	38
Figura 12. Tipos de campanas de captura.....	40
Figura 13. Coeficientes de pérdidas en campanas de extracción.	42
Figura 14. Campanas en bandas transportadoras.	42
Figura 15. Manómetros diferenciales.	48
Figura 16. Cambios de presión en el sistema.	56
Figura 17. Diagrama de Moody.....	59
Figura 18. Relación r/D de codos en ductos.	61
Figura 19. Pendiente para los ductos del transporte de caliza y cemento. ...	61
Figura 20. Pendiente para los ductos del transporte de Clinker y yeso.	62
Figura 21. Velocidad constante en ductos.	63
Figura 22. Esquema del diseño del sistema de desempolvado.	68
Figura 23. Chimenea.	72
Figura 24. Unión con ductos laterales a 30°	76
Figura 25. Unión con ducto lateral a 45°	76
Figura 26. Configuración de unidades	80
Figura 27. Introducción de los requerimientos previa selección.	80
Figura 28. Selección del ventilador.	81
Figura 29. Curva característica del ventilador.....	81
Figura 30. Datos del punto de operación.	81
Figura 31. Ventilador seleccionado.....	82
Figura 32. Tela filtrante o Manga.	84

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Composición química del cemento.	26
Tabla 2. Rango de velocidades de captura.....	43
Tabla 3. Ventiladores Centrífugos.....	45
Tabla 4. Especificaciones de las válvulas limpieza.....	49
Tabla 5. Tabla con las propiedades del aire circundante en la planta CEMEX, para una altura de 959 msnm a una presión de 0,9 Atm.	51
Tabla 6. Relación aire – tela.	54
Tabla 7. Caudal total de aire y capacidad del filtro.	67
Tabla 8. Recalculo de caudal de aire necesario con ductos estandarizados.	70
Tabla 9. Longitud y accesorios para los conductos.	71
Tabla 10. Pérdidas de cargas en codos de sección circular.	71
Tabla 11. Pérdidas de carga en las uniones.	72
Tabla 12. Velocidades de salida de aire.	73
Tabla 13. Rugosidad superficial absoluta.	74
Tabla 14. Dimensiones de las campanas.	77
Tabla 15. Pérdida total de carga en el sistema.	78
Tabla 16. Requerimientos del sistema para selección del ventilador.....	79
Tabla 17. Especificaciones del motor impulsor.	83
Tabla 18. Materiales usados para las mangas.....	85
Tabla 19. Especificaciones de la válvula rotatoria.	86
Tabla 20. Especificaciones del filtro de mangas.	86
Tabla 21. Costo de los lotes de ductos y accesorios para fabricación y montaje. .	90
Tabla 22. Costo de los equipos del sistema de desempolvado.	90
Tabla 23. Costo de la tela filtrante.	91
Tabla 24. Costo de equipos y herramientas.	91
Tabla 25. Costo de la mano de obra.....	93
Tabla 26. Costo del transporte.....	93
Tabla 27. Costos indirectos.	94
Tabla 28. Análisis de los diseños de ductos y accesorios.	96
Tabla 29. Análisis y resumen de los módulos del sistema de desempolvado.....	97

LISTA DE ANEXOS

Anexo A. Datos Ventilador by Fanware Casals.

Anexo B. Motores WEG.

Anexo C. Valvula Rotatoria.

Anexo D. Hoja de seguridad para cemento hidráulico.

Anexo E. Resolución 218 PEA Planta Bucaramanga.

Anexo F. Política Ambiental CEMEX.

Anexo G. Uso General del Cemento.

Anexo H. Granulometría.

Anexo I. Planos.

Anexo J. Manual de Operación y Mantenimiento.

NOTA: VER ANEXOS EN CARPETA ADJUNTA EN CD.

RESUMEN

TITULO: DISEÑO DE UN SISTEMA DE DESEMPOLVADO POR FILTRO DE MANGAS TIPO PULSE JET PARA EL ÁREA DE MOLIENDA DE LA EMPRESA CEMEX S.A. PLANTA CEMENTO BUCARAMANGA*

AUTORES: ERIKA JULIETH PILONIETA MARÍN
JOSE GABRIEL TORTELLO NIETO[‡]

PALABRAS CLAVE: FILTRO DE MANGAS, DISEÑO, VENTILACIÓN INDUSTRIAL, EMISIONES, MEDIO AMBIENTE, TRANSPORTE NEUMÁTICO, SISTEMA.

DESCRIPCIÓN:

Al encontrarse con un crecimiento y desarrollo en el sector de la construcción y al ser el cemento una de las partes importantes para llevar a cabo la elaboración del hormigón y con este poder realizar las construcciones de edificios y vías, CEMEX S.A. busca con sus productos solventar las necesidades de los clientes, brindando soluciones con productos de calidad y que cumplan con la normativa de calidad del país.

El dinamismo del sector de la construcción lleva a que CEMEX S.A. planta cemento Bucaramanga, se comprometa con el cumplimiento de la calidad en la elaboración del cemento y en la mejora continua, sin descuidar el cuidado del medio ambiente y del personal operativo. Por tal motivo y teniendo en cuenta estas dos premisas, se decide la elaboración de este proyecto, el cual consiste en el diseño de un sistema de desempolvado para el área de molienda de la planta, con el fin de afianzar las relaciones industria – universidad que ayuden a suplir las necesidades del sector productivo y a su vez contribuir con la misión de la Universidad Industrial de Santander.

En el área de molienda es dónde se finaliza el proceso de elaboración del cemento, es allí donde se dosifica los materiales necesarios para la elaboración del mismo con los más altos estándares de calidad, estos materiales son transportados por medio de bandas a un molino de bolas horizontal donde se lleva a cabo el proceso de molienda. Para cumplir con la finura, el material es llevado a un segundo molino, el cual cumple la función de refinar el cemento. Teniendo en cuenta esto, el material particulado ocasionado por la dosificación de materiales y por el transporte del cemento ya finalizado a los silos, necesita ser captado.

* Trabajo de Grado

[‡] Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica. Director: MSc. Pedro José Díaz.

ABSTRACT

TITLE: DESIGN OF A PULSE JET SLEEVE FILTER DUSTING SYSTEM FOR THE COMPANY'S MILLING AREA CEMEX S.A. BUCARAMANGA CEMENT PLANT*

AUTHORS: ERIKA JULIETH PILONIETA MARÍN
JOSE GABRIEL TORTELLO NIETO[‡]

KEYWORDS: SLEEVE FILTER, DESIGN, INDUSTRIAL VENTILATION, EMISSIONS, ENVIRONMENT, TRANSPORT PNEUMATIC, SYSTEM.

DESCRIPTION:

CEMEX S.A. has been growing and developing in the construction sector and cement being one of the important parts to carry out the preparation of concrete and with this power to carry out the construction of buildings and roads. It seeks with its products to meet the needs of customers, providing solutions with quality products and comply with the quality standards of the country.

The dynamism of the construction sector leads CEMEX S.A. Cement plant Bucaramanga, is committed to quality compliance in the development of cement and continuous improvement, without neglecting the care of the environment and operational personnel. For this reason and taking into account these two premises, it is decided to elaborate this project, which consists of the design of a dedusting system for the grinding area of the plant, in order to strengthen the industry - university relations that Help to meet the needs of the productive sector and in turn contribute with the mission of the Universidad Industrial de Santander.

In the milling area is where the process of making cement is finished, that is where the materials needed for its preparation with the highest quality standards, is dosed these materials are transported by means of bands to a ball mill Horizontal where the milling process is carried out. To fulfill the fineness, the material is taken to a second mill, which serves the function of refining the cement. With this in mind, the particulate matter caused by the dosing of materials and the transportation of the finished cement to the silos needs to be captured.

* Bachelor Thesis

[‡] Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica. Director: MSc. Pedro José Díaz.

INTRODUCCIÓN

Contar con un ambiente propicio de trabajo que cumpla con los estándares ambientales exigidos por las empresas y por las entidades que monitorean e inspeccionan las emisiones de material particulado, es uno de los objetivos de este proyecto. El material particulado generado en las diferentes etapas del proceso de producción de cemento, se ha convertido en un problema que afecta al medio ambiente, el cual ocasiona el incumplimiento de los valores límites permitidos en materia de emisiones que exige la autoridad ambiental. Se presentan problemas operacionales, ya que dificulta las tareas de revisión e inspección de los equipos, además, de que se afectan partes internas de estos debido a la suciedad del ambiente, como es el caso de los rodamientos. Problemas de seguridad, puesto que, en ocasiones, se hace difícil la visibilidad de los sectores circundantes al proceso, lo cuales se están viendo afectados por la polución, además, se afecta la salud de los trabajadores.

Teniendo en cuenta estos problemas e identificando los focos de proliferación de partículas al ambiente, al tener los conocimientos básicos del funcionamiento de las tecnologías que ayudan a mitigar la emisión de material particulado, los criterios establecidos por la autoridad ambiental para establecer los valores límites permisibles de emisiones, las necesidades operativas con las que cuenta actualmente la planta CEMEX S.A. Bucaramanga en el sector de molienda, se busca, mediante este proyecto, diseñar e implementar un filtro de mangas tipo pulse jet en el área de dosificación de materias primas para la de elaboración de cemento, el cual eliminará la necesidad de mitigar los problemas de emisión de material particulado, además de incrementar el ahorro económico que se verá reflejado en el incremento de la producción debido a que se recupera el material fugitivo y se devuelve al proceso.

1. GENERALIDADES DEL PROYECTO

1.1. TÍTULO

DISEÑO DE UN SISTEMA DE DESEMPOLVADO POR FILTRO DE MANGAS TIPO PULSE JET PARA EL ÁREA DE MOLIENDA DE LA EMPRESA CEMEX S.A. PLANTA DE CEMENTO BUCARAMANGA

1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Actualmente la industria cementera se encuentra en ascenso debido al gran desarrollo en el sector de la construcción, esto se puede evidenciar en el incremento de las obras civiles en municipios y grandes ciudades en todo el país, por tal motivo, CEMEX S.A. una empresa multinacional, con presencia en más de 50 países centra sus esfuerzos en elaborar productos con los más altos estándares de calidad, además, de proporcionar seguridad a sus empleados y cuidado del medio ambiente en su proceso de elaboración.

Teniendo en cuenta lo anterior, la empresa busca tener un rango de tolerancia lo más bajo posible en cuanto al impacto ambiental que concierne en el proceso de elaboración de cemento, y de esta forma prevenir comparendos ambientales por altas emisiones, además, de evitar la afectación a la salud de sus empleados y comunidades cercanas a la planta, brindando una mejor calidad de vida en la operación.

En el área de molienda de la planta Bucaramanga, se encuentran falencias en emisiones de material particulado ocasionado por la dosificación del material necesario para la elaboración del cemento, estos materiales son yeso triturado, caliza y Clinker. Además, de mejorar las condiciones ambientales, se busca reducir al mínimo las pérdidas del material ocasionado por las emisiones, ya que se está presentando demasiado desperdicio, esto influyendo de forma negativa en el orden y aseo de la zona, siendo otro de los programas implementados en las

políticas de la planta que se está viendo afectado, además, de las afectaciones en la producción del cemento.

Se debe buscar la forma de mitigar la polución existente en esta zona, cumpliendo con los estándares ambientales exigidos por la norma. La empresa, busca una solución de diseño ingenieril que cumpla con las necesidades básicas y de operación para su implementación y puesta en marcha.

1.3. JUSTIFICACIÓN DEL PROBLEMA

Para solucionar los problemas anteriormente expuestos, se hace uso de los conocimientos obtenidos a lo largo de la carrera y de las herramientas tecnológicas disponibles, con lo que se realizarán las labores de diseño, para la posterior implementación de un sistema de desempolvado por medio de filtro de mangas tipo pulse jet en el área de molienda de la planta CEMEX S.A. Bucaramanga, evitando de esta manera el desperdicio de materia prima, y de igual forma, garantizando la calidad del aire circundante y la calidad de vida de los operarios que trabajan en esta zona, además, de mejorar las condiciones de orden y aseo, la cual es una política implementada por la empresa. Por consiguiente, la producción será mejor, viéndose esto reflejado en una mejor economía y en un incremento en el rendimiento del molino.

La finalidad de este proyecto es contar con una solución definitiva que permita espacios libres de contaminación, mejores condiciones laborales para el personal y el aumento en los activos de la compañía.

1.4. OBJETIVOS DEL TRABAJO DE GRADO

1.4.1. Objetivo General

Contribuir a la misión de la Universidad Industrial de Santander en el desarrollo e implementación de tecnologías que contribuyan al beneficio de la industrias y cuidado del medio ambiente mediante actividades que solucionen sus necesidades, garantizando una mejora continua en su operación, por tal motivo se decide realizar el diseño de un sistema de desempolvado por filtro de mangas tipo pulse jet para el área de molienda de la empresa CEMEX S.A. planta cemento Bucaramanga.

1.4.2. Objetivos Específicos

Diseñar un sistema de desempolvado por filtro de mangas tipo pulse jet para el área de molienda de la empresa CEMEX S.A. planta cemento Bucaramanga, que cumpla con los requerimientos ambientales y de funcionamiento, teniendo en cuenta el diseño óptimo de los subsistemas que constituyen el filtro de mangas, tales como:

- ✓ Campanas extractoras ubicadas en los focos críticos de emisión.
- ✓ Ductos óptimos para el transporte del material particulado.
- ✓ Selección y ubicación del transporte neumático (ventilador).
- ✓ Descarga compuesta por sinfín y chute.
- ✓ Selección del material de las mangas de acuerdo a los requerimientos del material particulado a recuperar.

Todo lo anterior, teniendo en cuenta la reducción de la concentración de PPM de las emisiones del área de molienda a niveles permitidos por la resolución 0909 del 2008 y normas ambientales formuladas en la guía minero-ambiental de la industria del cemento, redactada por el ministerio de minas y energía, ministerio de

ambiente, vivienda y desarrollo territorial y el ICPC (Instituto Colombiano de Productores de Cemento)

- ❖ Realizar levantamiento de plano del área de molienda y generar modelamiento 3D de la estructura por medio de la herramienta SolidWorks, para su posterior construcción e implementación por parte de la compañía, permitiendo de esta manera, dar mayor claridad a la hora de realizar el montaje y ensamblado de las piezas, facilitando la coordinación de actividades de izaje del sistema.
- ❖ Elaborar y entregar un manual de funcionamiento instructivo de operación y labores de mantenimiento que permita un correcto uso y una vida funcional óptima del nuevo sistema de desempolvado.

2. METODOLOGÍA DEL PROYECTO

Para que el presente proyecto cumpla a cabalidad con los objetivos planteados y pueda cumplir con las necesidades de la empresa, se hará una visita guiada al área de molinos con el ingeniero a cargo del mantenimiento de la planta, se observará, analizará e indagará a cerca del proceso de molienda de cemento, se tendrá especial atención a los puntos de emisiones a atacar y controlar. A partir de allí, se escucharán las alternativas y las condiciones de la empresa para llegar a suplir la necesidad. Luego de esto, se recopilará información con los planos del lugar, además se tomarán medidas de la ubicación de los focos de interés usando decámetro, metro y nivel. Con esta información, se hará un levantamiento del sitio con ayuda de la herramienta informática SolidWorks, para que de esta forma se puedan plantear diversas alternativas de ubicación del colector de polvos.

Una vez realizado esto, y teniendo las diferentes propuestas de la ubicación del filtro de mangas, se expondrán a los ingenieros encargados. Luego de que ellos determinen cual es la opción más fiable y rentable, se realizará con más detalle los cálculos necesarios para su diseño, teniendo presente los parámetros necesarios para esto, como lo es tipo de material a recolectar y volumen, luego se calculará capacidad del filtro, tipo de material filtrante para las mangas, distribución dentro del colector de las mismas, área filtrante, tamaño del colector, número de campanas, ductos y accesorios a implementar, pérdidas, además de la capacidad del ventilador. Se deberá tener en cuenta las condiciones espaciales del sitio, con el fin de que las columnas, equipos, acometida y demás elementos presentes, no interfieran de manera considerable en la ubicación de los ductos, codos, bifurcaciones y campanas, para que se puedan evitar desviaciones e incrementos de las longitudes innecesarias de los mismos que ocasionen pérdidas de presión en el sistema.

Prosiguiendo con el avance del proyecto, se deberá seleccionar el ventilador y el tipo de colector de polvo, que en este caso será un filtro de mangas tipo pulse jet, se seleccionaran con el caudal total de aire del sistema. Cumpliendo con uno de los objetivos del proyecto como lo es la disminución de las PPM en el aire que conlleve a cumplir con el estándar de valores límites exigidos por la autoridad ambiental. Se procederá a implementarse y realizar las verificaciones necesarias de este dispositivo de desempolvado que cumpla con las exigencias interpuestas por la empresa. Se realizarán tomas de medida de presión dinámica en diferentes puntos estratégicos de cada uno de los ductos mediante tubos Pitot, anemómetros y manómetros, con el fin de conocer la velocidad de transporte de aire en su interior.

Una vez finalizada esta etapa, se procede a realizar el manual de funcionamiento y operatividad para el sistema de desempolvado, además se entregará un balance de los costos del proyecto.

3. MARCO TEÓRICO

En este capítulo se dará a conocer los conceptos teóricos necesarios para comprender los sistemas de desempolvado, sus componentes, control y manejo de material particulado por parte de la industria, normativas ambientales a tener en cuenta, además de profundizar en temas de ventilación industrial localizada. Todo esto con el fin de que el lector tenga una guía a la hora de implementar el proyecto.

3.1. PROCESO DE FABRICACIÓN DEL CEMENTO

La fabricación de cemento está constituida por una amplia gama de subprocesos cada uno con sus condiciones individuales bien definidas, se presentan procesos mecánicos, térmicos y químicos a lo largo del mismo, teniendo como fin obtener el producto de mejor calidad posible para la satisfacción de los clientes y beneficio de accionistas y empleados.

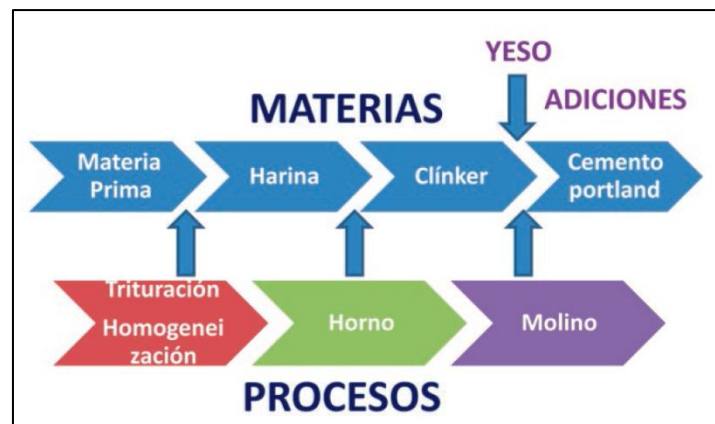
Estos procesos pueden ser nombrados como, la reducción del tamaño de la piedra para que luego pueda ser molida, el análisis químico de los materiales que ingresarán a la molienda para determinar las proporciones en las que deben ingresar en combinación con gases del mismo proceso para facilitar la molienda, el almacenamiento y homogenización del material en silos, el proceso termoquímico que se llena dentro del horno, la molienda de cemento, así mismo con las proporciones exactas acorde al tipo de cemento que se esté fabricando, el envase y el despacho, contando con modernos equipos para disminuir el tiempo de entrega de los sacos de cemento.

La fabricación del cemento es un proceso industrial que se realiza en instalaciones de gran escala. Básicamente, la fabricación de cemento consiste en:

- a. Obtención, almacenamiento y preparación de materias primas (caliza, marga, arcilla) que son finamente molidas para obtener el crudo.

- b. Almacenamiento y preparación de combustibles.
- c. Cocción del crudo en un horno rotatorio hasta temperaturas de 1.450°C (2.000°C de temperatura de llama) para la obtención de clínter de cemento.
- d. Molienda conjunta del clínter con otros componentes (cenizas volantes, escoria, puzolana natural, yeso, etc.) para obtener el cemento.
- e. Almacenamiento, ensacado y expedición de cemento.

Figura 1. Esquema general de la fabricación del cemento.



Fuente: SANJUÁN BARBUDO, Miguel Ángel y CHINCHÓN YEPES, Servando. *Introducción a la fabricación y normalización del cemento portland*

De manera muy general se puede dividir el proceso de fabricación de cemento en 6 partes:

3.1.1. Las materias primas. Extracción, trituración, secado y molienda:

Los componentes principales del cemento portland son: CaO, sílice, óxido de hierro y alúmina, del Clínter y el sulfato cálcico añadido en la fase final de la molienda. Las materias primas aportan, además, otros compuestos secundarios como óxidos de magnesio, sodio y potasio. Por tanto, hay que conseguir unas materias primas que contengan estos componentes.

❖ **Obtención de materias primas:** En la tierra existe carbonato cálcico en forma de caliza, marga o creta. La sílice, el óxido de hierro y la alúmina se encuentran en la arena, pizarra, arcilla, mena de hierro, etc. También se pueden emplear subproductos y residuos como sustitutos parciales de las materias primas naturales. En este proceso se emplean fundamentalmente:

- Escoria de horno alto.
- Cascarillas de hierro.
- Arenas de fundición.
- Lodos de papeleras.
- Cenizas volantes de central térmica.

La extracción de las materias primas naturales se hace en canteras, normalmente, a cielo abierto próximas a la planta (caliza, marga y arcilla). Las operaciones de extracción incluyen perforación de rocas, voladuras, excavaciones, acarreo y trituración. Después de la trituración primaria, las materias primas se transportan a la planta de cemento para su almacenamiento y homogeneización. Otras materias primas se suministran a través de fuentes externas (p.e. minerales de hierro, arenas de fundición, etc.).

❖ **Trituración de materias primas:** En la trituración de materias primas, el material que ingresa debe ser reducido de tamaño para su posterior almacenaje con el fin de que en la mezcla correcta todos los materiales ingresen a la molienda de crudo; el tamaño máximo lo determina el tipo de molino para el crudo. En el proceso de trituración se tiene en cuenta los conceptos físicos de masa, velocidad, energía cinética y gravedad.

En general el número de etapas de trituración requeridas es determinado por el rango de reducción deseado y la abrasividad de la roca. Para lograr este rango de

reducción, usualmente se necesitan dos o más fases de trituración (Primaria, secundaria, terciaria) y el tipo de trituradora depende de factores como abrasividad, pegajosidad, producción (ton/h) tamaño de la alimentación y consumo de energía.

❖ **Molienda de materias primas:** Un crudo de composición química homogénea se consigue dosificando las materias primas que se alimentan al molino con exactitud. Esto es importante para un buen funcionamiento del horno y para la eficiencia energética del sistema de molienda. El equipo de dosificación de las materias primas a los molinos más habitual consta de tolvas intermedias, con extracción sobre básculas dosificadoras y un alimentador de banda para introducir el material al molino.

La mayoría de los molinos trabajan en circuito cerrado (separan el cemento con la finura requerida y devuelven el material grueso al molino). Los equipos de pesaje y dosificación más utilizados son las básculas de banda. Para las cenizas volantes se emplean dosificadores basados en el efecto de coriolis. Debido a la variedad de tipos de cemento requeridos por el mercado, predominan los sistemas de molienda de última generación equipados con separador dinámico de aire. Los sistemas de molienda más empleados son:

— molino de bolas en circuito cerrado (el porcentaje de adiciones es bastante limitado, si no están secas).

— molino vertical de rodillos (mejor adaptado tanto para porcentajes de adición altos, debido a su capacidad de secado, como para la molienda separada de las adiciones).

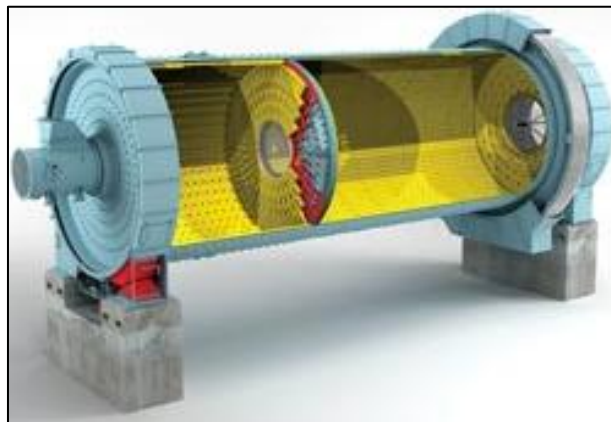
— prensa de rodillos (el porcentaje de adiciones es bastante limitado, si no están secas).

Y los sistemas de molienda menos empleados son:

- molino de bolas en circuito abierto;
- molino de bolas en circuito cerrado con separador mecánico de aire o separador de aire de ciclones de primeras generaciones;
- molino horizontal de rodillos.

Un desarrollo más reciente de la molienda de cemento es el molino de rodillos horizontales. Éste consta de una carcasa anular de gran diámetro y corta longitud. Dentro del anillo hay un rodillo horizontal que gira libremente y el material se muele entre el rodillo y el cuerpo cilíndrico. El material triturado que sale del molino se lleva a un separador y la fracción gruesa se retorna al molino.

Figura 2. Molino horizontal de rodillos.



Fuente: <http://www.cemnet.com/Articles/story/39865/ball-mill-low-cost-of-ownership.html>

Las adiciones son compuestos minerales de carácter natural o industrial que se muelen generalmente junto con el Clinker y el yeso. Para moler por separado las adiciones, se pueden emplear los mismos sistemas para la molienda seca/semiseca de las materias primas. Si hay un alto contenido de humedad en la mezcla, será necesario un presecado; para el cual se pueden emplear sistemas de

secado usando tanto los gases de salida del horno como el aire de salida del enfriador, o utilizar un generador independiente de aire caliente.

Para la molienda combinada (moler adiciones junto con el Clinker y el yeso) la mayoría de los sistemas están limitados por el contenido de humedad de la mezcla alimentada cuyo máximo se sitúa en el 2% o 4% si se emplea un aporte de gases calientes.

❖ **Empaque y distribución:** Para el empaque y distribución de cemento existen máquinas envasadoras automáticas con sistemas aplicadores, obteniendo un rendimiento mayor y un ambiente libre de polvo. El cemento es despachado desde la planta ya sea en sacos de papel o al granel.

Desde los silos, el cemento es extraído neumática y mecánicamente por aerodeslizadores y por elevadores para ser llevados a una tolva; luego pasarán por una zaranda para la eliminación de cualquier objeto o tamaño no deseado del grano, así el cemento es ensacado y todo polvo va hacia los filtros.

Los sacos son transportados por bandas hacia las paletizadoras automáticas y montacargas llegan los pallets de sacos de cemento a su lugar de almacenamiento

3.1.2. Composición del cemento producido en CEMEX S.A.

En la industria cementera cada planta utiliza propios sus métodos y materias primas para la conformación del cemento. En CEMEX Planta Bucaramanga se produce cemento que tiene la siguiente composición.

Tabla 1. Composición química del cemento.

COMPONENTE	FRACCIÓN DE MASA (%)	COMOPONENTE	FRACCIÓN DE MASA (%)
CaO	64.0	K ₂ O	0.70
SiO ₂	20.7	TiO ₂	0.30
Al ₂ O ₃	4.7	P ₂ O ₅	0.12
Fe ₂ O ₃	3.2	Na ₂ O	0.07
SO ₃	2.4	MgO	2.2
Perdido en ignición	1.67		

Fuente. CEMEX S.A.

3.2. CALIDAD DEL AIRE

La calidad del aire tiene que ver con la composición el aire y lo adecuado que sea para determinadas aplicaciones. La calidad del aire se establece de acuerdo a la presencia o ausencia de diferentes sustancias, la concentración con que se encuentren, si son sustancias contaminantes, la apariencia visible y la presencia de microorganismos. Este tema es de suma importancia hoy día en los países industrializados, en los cuales se maneja una política de conservación ambiental y que cuentan con el apoyo de organizaciones tales como la OMS, EPA, OSHAS. En Colombia, este tema es regulado por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible el cual está contemplado en el Decreto 948 de 1995.

3.2.1. Contaminantes del aire

Se define contaminante como: “Fenómenos físicos o sustancias, o elementos en estado sólido, líquido o gaseoso, causantes de efectos adversos en el medio ambiente, los recursos naturales renovables y la salud humana que, solos o en combinación, o como productos de reacción, se emiten al aire como resultado de actividades humanas, de causas naturales, o de una combinación de estas”.¹

Uno de los aspectos más preocupantes respecto a las sustancias tóxicas es que sean liberados al aire y que posteriormente lo contaminen, como se sabe, el aire está compuesto principalmente por gases, y su contaminación se puede presentar en cualquiera de los tres estados de la materia.

El hecho de que el aire este constituido por varios gases y que algunos contaminantes estén en estado gaseoso hace que sea de mucha facilidad la mezcla entre éstos.

3.3. SISTEMAS DE DESEMPOLVADO.

También llamados sistemas colectores de polvo, su importancia radica en ayudar a las industrias a generar el menor número de emisiones atmosféricas posibles. El manejo de sólidos tanto en su carga, como en su transporte neumático o mecánico, lleva implícito que se genere polución en su manejo, que obliga a una depuración de los polvos y cuidadosa selección de los equipos para tal fin.

La función principal de un sistema de desempolvado es evitar que estas partículas en suspensión sean liberadas directamente a la atmósfera y de esta manera, reducir la contaminación ambiental generada en los diversos procesos productivos, tales como: moliendas, trituración, fundición, generación de energía, acerías, minería, cementos, entre otros. El objetivo es trabajar en búsqueda de un

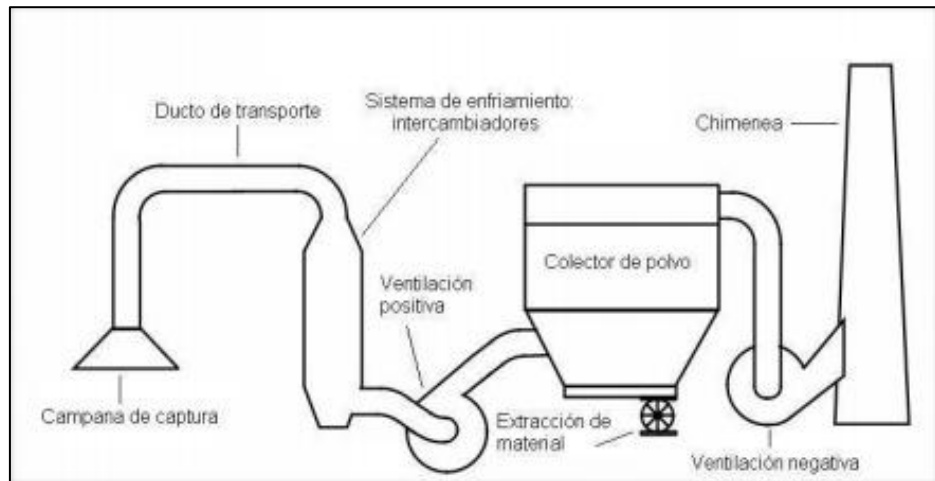
¹ COLOMBIA. MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL. Resolución 0610 (24, marzo, 2010). Modificación de la norma de calidad del aire o nivel de inmisión. Diario oficial. Bogotá, 2010. No. 47672.

medio ambiente más limpio y sin emisiones. Las ventajas de un sistema colector de polvos son:

- Son sistemas completos con dispositivos para reducir las partículas en suspensión.
- Usan elementos filtrantes adecuados a las necesidades del proceso.
- Incrementan la relación, Higiene - confort – seguridad.
- Tienen control de emisión sobre partículas contaminantes.
- Reaproveen el material colectado de los procesos productivos.
- Reducen los olores y gases, evitando incendios y explosiones.
- Preservan las instalaciones industriales, dejando el ambiente más seguro y confiable.

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.

Figura 3. Diagrama general de un sistema de desempolvado.



Fuente: ARIAS. Juan A. Auditoría al sistema de desempolvado del Área de Trituración de caliza en la planta cerro blanco de Holcim Ecuador S.A. Espol Facultad De Ingeniería Mecánica y Ciencias de la Producción, Guayaquil, 2006.

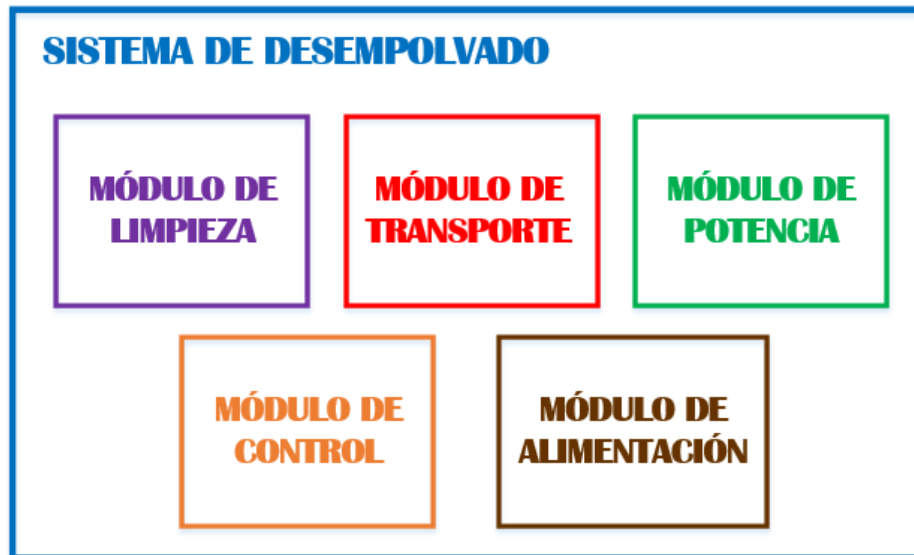
3.4. MÓDULOS OPERATIVOS DE UN SISTEMA DE DESEMPOLVADO.

Los módulos operativos consisten en elementos del sistema que en conjunto realizan una operación general. Para que un filtro de mangas pueda cumplir con su correcta función, necesita de otros componentes, como las campanas de extracción, ventilador, ductos entre otros, que en conjunto conforman un sistema colector de polvos completo y eficiente.

Como ya se mencionó anteriormente, el filtro como tal no podría trabajar correctamente sin que existiera confinamiento en el sistema, ductos a través de los cuales circula el aire contaminado y limpio, un ventilador que impulsa y facilita el transporte del fluido, sistemas de acondicionamiento a la entrada del filtro dependiendo de las condiciones del proceso, en este caso campanas extractoras; sin olvidar las salidas de los gases limpios a través de la chimenea. Además, se debe tener en cuenta el sistema eléctrico y de control que cumple la función de enviar las señales en los tiempos indicados, a las válvulas las cuales se encargan de emitir los chorros de aire que proporcionan la limpieza de las mangas. A

continuación, se describen los módulos operativos y los elementos que conforman a cada uno.

Figura 4. Módulos operativos del sistema de desempolvado.



3.4.1. Módulo de Limpieza.

❖ **Filtro de mangas:** Los filtros de mangas son aquellos aparatos que se usan para filtrar por vía seca, es decir, utilizan un medio poroso para eliminar las partículas sólidas de una corriente gaseosa. Estos filtros son estructuras metálicas cerradas en cuyo interior se disponen elementos textiles filtrantes en posición vertical. El aire cargado de partículas sólidas es forzado a pasar por dichos medios filtrantes, esto lo convierte en instalaciones para control de contaminación de aire más eficaces ya que permite cumplir las más estrictas normativas en cuanto a emisión de partículas sólidas. Para partículas de $0.5 \mu\text{m}$ alcanzan eficiencias del 99% y se obtienen eficacias aceptables para partículas de $0.01 \mu\text{m}$. Con un correcto diseño, su utilización no compromete la cantidad ni la calidad de la producción, permitiendo realizar su mantenimiento de una forma más fácil, sin llegar a afectar la producción.

Los filtros de limpieza tipo pulso de aire a presión (pulse jet), son los de más reciente utilización. Se diseñaron para una relación caudal de aire/superficie de la

tela (Q/A), mayor que en los otros sistemas, obteniéndose equipos más compactos. La frecuencia de limpieza es un factor determinante para la retención de la capa de polvo necesaria para la filtración.

El cuerpo principal del colector tiene 3 secciones; una sección de aire limpio (plenum limpio) en la parte superior, la cámara de filtrado que contiene un número de mangas cilíndricas en la parte central y una tolva para alojar el polvo en la parte inferior. Las tres partes, están separadas por una lámina que tiene como fin mantener la cámara de filtrado separada del plenum de aire limpio.

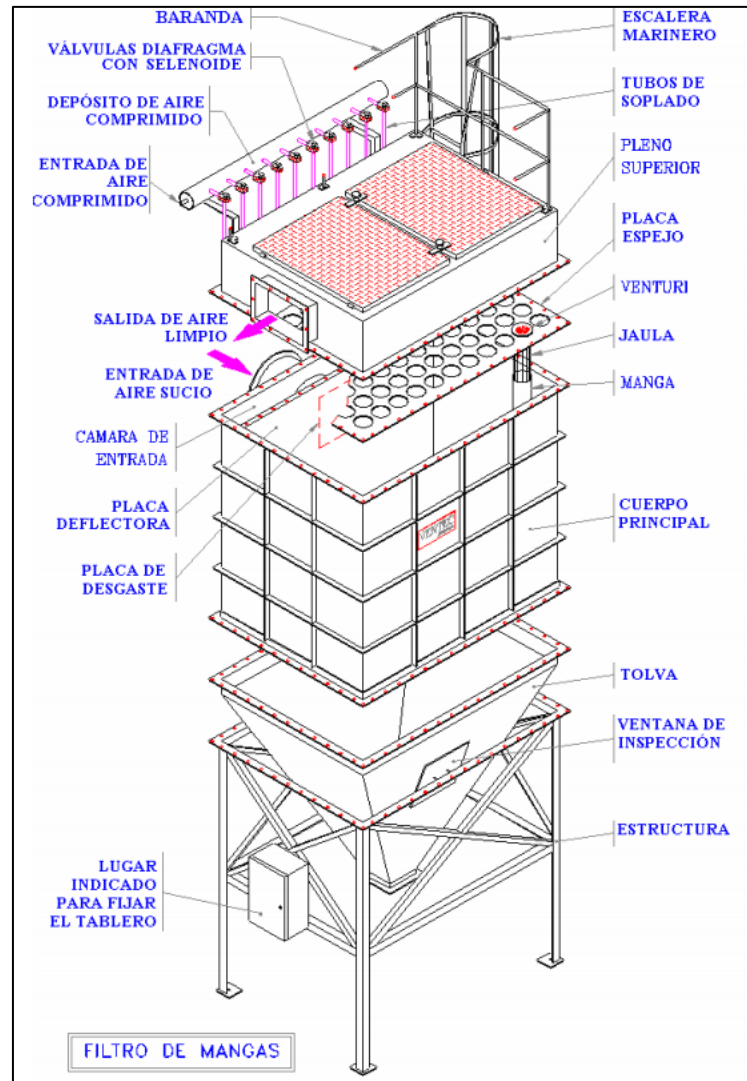
El aire contaminado entra al colector pasando por un difusor, que absorbe el impacto de las partículas, causa que las más pesadas se precipiten a la tolva para ser descargadas posteriormente fuera del filtro. El aire con las partículas más finas fluye hacia la unidad o cámara de filtrado depositando las partículas del polvo fino en la parte exterior de las mangas. El aire limpio continúa hacia el plenum limpio y llega finalmente a la atmósfera.

La filtración se produce como resultado de la formación de una capa de polvo primaria en la superficie de las mangas y una posterior acumulación de partículas de polvo con lo que se forma la "torta" sobre las mangas. Una vez formada la capa primaria, la penetración se hace muy baja y la filtración se produce por filtración superficial. Esta forma de limpieza utiliza un torrente de aire comprimido de aproximadamente 75 a 200 milímetros de columna de agua (mmH₂O). Los intervalos entre ciclos de limpieza varían típicamente entre 1 y 30 segundos. Un temporizador de control de pulsos lleva la secuencia de los ciclos de limpieza. En este punto se utiliza control por tiempo o por presión diferencial. El proceso de filtración continua hasta que la caída de presión se hace tan importante que requiere la limpieza del sistema.

Sin embargo, la continuación rápida del flujo deposita de nuevo la mayoría del polvo sobre la bolsa limpia o sobre las bolsas adyacentes. Esta acción tiene la desventaja de inhibir la caída del polvo sobre la tolva, pero tiene la ventaja de

reformar rápidamente la plasta de polvo que proporciona la recolección eficiente de las partículas.

Figura 5. Despiece de un filtro de mangas.



Fuente: Ventec Ambiental. Filtro de Mangas.

Los filtros de mangas tipo pulse jet a su vez son compuestos por varios elementos, se presenta una breve descripción a continuación.

❖ **Mangas:** La selección del material de la manga o bolsa filtrante depende de la aplicación específica y de la asociación de la composición química del gas, la temperatura de operación, nivel de humedad, la carga de polvo y las características físicas y químicas de las partículas.

En filtros pulse jet, el polvo se recolecta en el lado exterior de las mangas. El aire cargado de polvo inunda el filtro y el aire limpio sale a través del interior de las mangas. Los tipos de mangas para filtros pulse jet, son las siguientes, de acuerdo a las necesidades de cada aplicación:

- ✓ Con puño tipo banda de compresión "Snapband": Estas mangas tienen una banda a presión con doble montura. El Snapband ha sido diseñado para un sellado eficiente. (1)
- ✓ Con brida superior: Estas mangas tienen un aro de tela cosida al extremo superior que actúa como sello al comprimirse entre la placa portamangas y el extremo superior de la canastilla (2).
- ✓ Con anillo superior: Las mangas tienen anillos en la parte superior cosidos a la brida (3).
- ✓ La sobre manga: Estas se utilizan en lugar de aquellas que tienen bordes crudos (o sin coser) para evitar el fruncimiento al doblar la bolsa en la canastilla (4).
- ✓ Con dobladillo superior: Las mangas de fibra de vidrio tienen un dobladillo para prevenir el deshilachado. (5).
- ✓ Con borde sin terminación: Las mangas de fieltro punzonado tienen un extremo abierto, sin dobladillo (6).

Figura 6. (A). Placa portamangas y bolsas filtrantes. (B). Tipos de mangas filtrantes.



Fuente: FERNÁNDEZ SANDOVAL, Edwin. *Mejoras en la eficiencia de los colectores de polvo tipo jet pulse y precipitador electrostático.*

De acuerdo a la experiencia, las especificaciones genéricas de las bolsas filtrantes, para obtener una óptima eficiencia de colección son las siguientes:

- Que el textil tenga una densidad mínima de 550 [g/m²].
- Que por lo menos tengan tres costuras verticales.
- Que el paso de las costuras no sea mayor a 3 [mm].
- Que la aguja de las costuras no sea demasiado grande para evitar fugas de polvo por hoyos.
- Se debe de usar siempre mangas filtrantes con fleje mecánico (banda de auto sujeción o también denominada como Snapband)
- Que el fleje mecánico de sujeción sea siempre de acero inoxidable (Snapband de acero inoxidable).
- Que el hilo usado para las costuras sea del mismo material del textil de la bolsa filtrante (nunca usar hilos diferentes de materiales diferentes)

- Que las bolsas tengan dimensiones estrictas y que no se excedan en longitud ni en diámetro.

❖ **Relación Aire –Tela:** La relación aire tela es una simple relación matemática utilizada para medir la cantidad de tela filtrante disponible para filtrar un volumen de aire dado a un caudal dado.

Existen relaciones aire-tela estándares basadas en el mecanismo de limpieza, utilizándolas para determinar los límites operacionales de un filtro de mangas, para el filtro de sacudido la relación es 0.75 - 0.90 m³/m²/min (2.5 - 3.0:1); para el de aire reverso es 0,60 - 0,75 m³/m³/min (2.0 - 2.5:1) y para el pulse jet es 1.50 - 1.80 m³/m²/min (5.0 – 6.0:1).

❖ **Canastillas:** Las mangas están montadas en canastillas o jaulas de soporte. Las canastillas evitan que las mangas se arruguen durante la etapa de filtración y contribuyen en la limpieza y redistribución de la capa de polvo. Una canastilla bien diseñada permite obtener un rendimiento óptimo del filtro y aumentar su durabilidad.

Figura 7. Tipos de construcciones de la parte superior de canastillas.



Fuente: FERNÁNDEZ SANDOVAL, Edwin. Mejoras en la eficiencia de los colectores de polvo tipo jet pulse y precipitador electrostático.

Las canastillas alargan la vida las mangas, a la vez disminuyen las fugas y la abrasión. Las abrazaderas se diseñan especialmente para garantizar el sellado de las mangas, así como para simplificar y agilizar la instalación en los filtros. Existen varios estilos y tamaños que se ajustan a los requisitos de los equipos. [1]

- ❖ **Venturies:** Consisten en tubos metálicos aceleradores que transforman la energía de velocidad del aire comprimido inyectado en energía de presión. Inducen aire a través de la manga filtrante y, debido a su magnitud respecto al caudal normal de aire, transmiten una onda de choque a la manga, limpiándola al desprender el material que estaba impregnado.

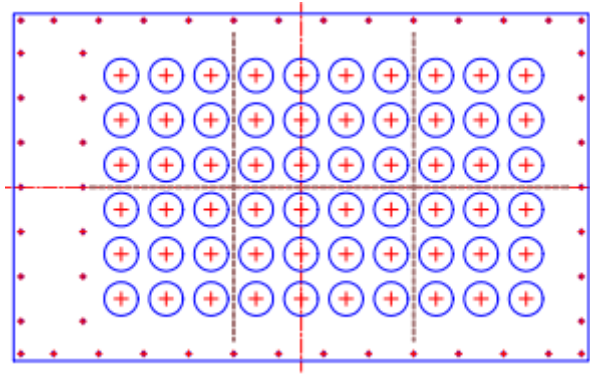
Figura 8. Venturies utilizados para filtros de mangas.



Fuente: Ventec Ambiental. Filtro de Mangas.

- ❖ **Placa espejo:** Es la placa donde se distribuyen y fijan los conjuntos de mangas filtrantes y jaulas. Su taladrado deber seguir rigurosamente las dimensiones de diseño para que sea posible alinear correctamente las tuberías de soplado (limpieza de las mangas) y que el sellado quede perfecto en región donde se fijan las mangas.

Figura 9. Placa espejo para filtros de mangas tipo Pulse Jet.



Fuente: Ventec Ambiental. Filtro de Mangas.

Válvulas de diafragma: Estas válvulas, también conocidas como de escape rápido, son válvulas que permiten el paso de un caudal de aire comprimido para limpiar las mangas. Estas válvulas se abren por medio de los pulsos neumáticos producidos por los solenoides. [2]

Figura 10. Válvula diafragma con solenoide.



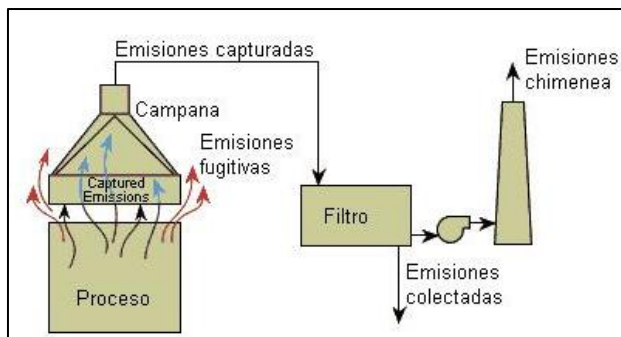
Fuente: Ventec Ambiental. Filtro de Mangas.

3.4.2. Módulo de Transporte.

❖ **Campanas de extracción:** Lo que se busca es que la polución generada durante el proceso sea capturada, para que a su vez se disponga de una forma adecuada sin afectar el proceso de producción, y mejorar la eficiencia de la molienda. Por tal motivo, el sistema de desempolvado debe contar con campanas extractoras que se encarguen de realizar tal fin.

Pequeñas variaciones en la eficiencia de captura de la campana pueden resultar en aumentos significativos de polvo fugitivo, siendo estos siempre mayores en porcentaje que las emisiones provenientes de chimeneas.

Figura 11. Emisiones capturadas / Fugitivas



Fuente: ARIAS. Juan A. Auditoría al sistema de desempolvado del Área de Trituración de caliza en la planta cerro blanco de Holcim Ecuador S.A.

Para el dimensionamiento del sistema se debe seleccionar, en primer lugar, la velocidad de captura. Se calcula el caudal de aire de aspiración. La pérdida de carga a la entrada de la campana, h_t , puede calcularse de acuerdo a la siguiente ecuación.

$$h_t = Pd_d + KP_d + K_rPD_r \quad \text{Ecuación (1)}$$

Donde K y K_r son los factores de pérdida en la campana y de pérdida de las ranuras respectivamente, y P_{Dr} es la presión dinámica en las ranuras (mmca).

La presión dinámica, a su vez, se expresa como:

$$PD = \left(\frac{V}{4,043} \right)^2 \quad \text{Ecuación (2)}$$

Donde V , es la velocidad en el ducto conectado a la campana.

❖ **Ubicación de la campana:** La ubicación de la campana es muy importante para la captura de las emisiones debido a que el caudal dentro del ducto del sistema varía con el cuadrado de la distancia entre la campana y el foco de contaminación.

$$Q = V_h (10X^2 + A) \quad \text{Ecuación (3)}$$

De donde:

Q : Caudal necesario en el punto de desempolvado

X : Distancia desde la cara del ducto que da hacia la fuente hacia el punto más lejano de la fuente.

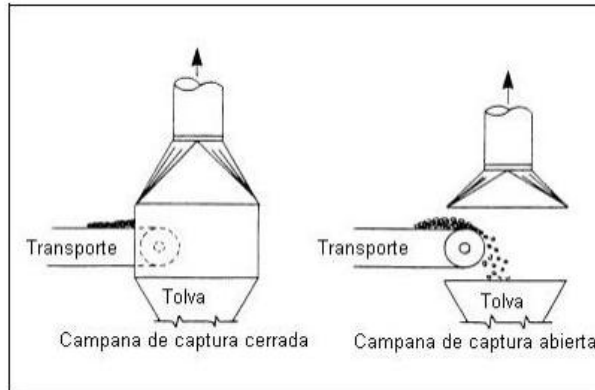
V_h : La velocidad de captura a la distancia X .

A : Área de la entrada de la campana.

El diseño de la campana de captura en los puntos de succión deberá otorgar el tiro suficiente para levantar las partículas que están en combinación con el aire ambiente, pero sin capturar el material que forma parte del flujo principal.

❖ **Diseño de las Campanas:** En la industria del cemento, se utilizan campanas de capturas cerradas que proveen un mejor control de las emisiones; las tapas de inspección y accesos deben ser lo más pequeños posibles.

Figura 12. Tipos de campanas de captura



Fuente: ARIAS. Juan A. Auditoría al sistema de desempolvado del Área de Trituración de caliza en la planta cerro blanco de Holcim Ecuador S.A.

Es posible optimizar las campanas de captura considerando los siguientes puntos:

- La campana debe ser ubicada lo más cercano posible a la fuente de contaminación.
- La entrada de la campana debe estar ubicada de tal manera que haga que al menos, el patrón de movimiento del fluido se desvíe hacia ella.
- El ancho de la campana debe ser mayor que el de la fuente de contaminación.
- Se pueden colocar aletas dentro de la campana para llevar el flujo hacia el ducto con menores pérdidas.

❖ **Pérdidas de presión en campanas:** Cuando el aire entra en la campana, pérdidas dinámicas ocurren, causando caídas de la presión total. Están dadas por:

$$\Delta P_e = K P_v \quad \textbf{Ecuación (4)}$$

Dónde:

ΔP_e : Pérdidas a la entrada de la campana.

K : Factor de pérdida (De acuerdo a la geometría)

P_v : Velocidad de Presión

El valor absoluto de presión estática en la succión de la campana es la siguiente:

$$P_{st} = P_v + \Delta P_e \quad \textbf{Ecuación (5)}$$

Siendo:

P_{st} : La succión de la campana

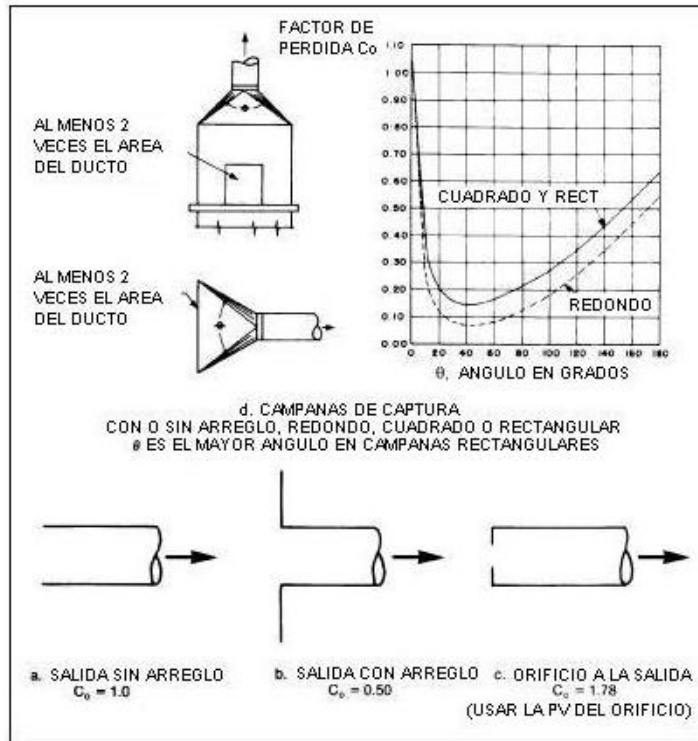
La succión de la campana es la presión estática negativa medida aproximadamente 3 diámetros del ducto luego de la campana.

Para campanas simples, la ecuación es la siguiente:

$$P_{st} = (1 + K)P_v \quad \textbf{Ecuación (6)}$$

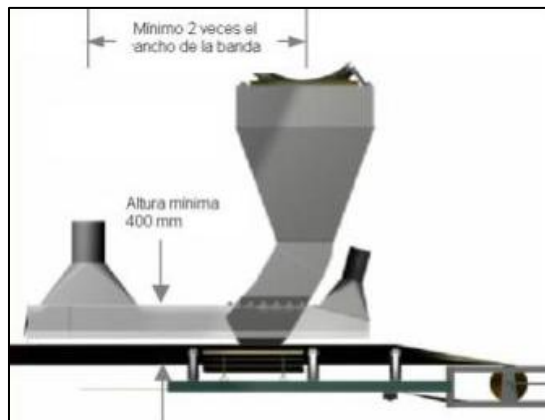
Para el factor de pérdida, existen tablas de donde se obtiene su valor de acuerdo a las dimensiones y forma de la campana.

Figura 13. Coeficientes de pérdidas en campanas de extracción.



Fuente: ARIAS. Juan A. Auditoría al sistema de desempolvado del Área de Trituración de caliza en la planta cerro blanco de Holcim Ecuador S.A.

Figura 14. Campanas en bandas transportadoras.



Fuente: ARIAS. Juan A. Auditoría al sistema de desempolvado del Área de Trituración de caliza en la planta cerro blanco de Holcim Ecuador S.A.

Para el diseño de las campanas de captura, se debe considerar que a la salida de estas y entrada al ducto, la velocidad de transporte de las partículas deberá llegar a 18 m/s como mínimo, siendo esta la velocidad promedio para polvos industriales provenientes de moliendas y manejo general de materiales.

- ❖ **Velocidad de captura:** Es el nombre con que se conoce a la velocidad de las partículas flotantes sobre la cama de material en sistemas transportadores antes de entrar a la campana de captura. El polvo se mezcla con el aire en el punto de generación y es transportado a lo largo del ducto.

Tabla 2. Rango de velocidades de captura.

RANGO DE VELOCIDADES DE CAPTURA		
CONDICION DE LA DISPERSION DEL CONTAMINANTE	APLICACIÓN	VELOCIDAD DE CAPTURA (m/s)
Sueltas sin velocidad en el aire	Evaporación de tanques	0.25 a 0.5
Sueltas con velocidad baja del aire	Transportadores de baja velocidad	0.5 a 1.0
Generación activa dentro de la zona de generación	Chutes de carga/descarga de transportadores, trituradoras	1.0 a 2.5
Alta velocidad dentro de la zona	Molienda, sandblasting	2.5 a 10

Fuente: ARIAS. Juan A. Auditoría al sistema de desempolvado del Área de Trituración de caliza en la planta cerro blanco de Holcim Ecuador S.A.

- ❖ **Ductos Extractores:** Se realizará una descripción detallada de este tema en el Capítulo 4.

3.4.3. Módulo de Potencia.

❖ **Ventilador:** 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. Provee la energía necesaria para que el flujo logre vencer la resistencia (o caída de presión) a través de la ductería y colector. Los ventiladores proporcionan potencia motora para el movimiento del aire y pueden ser montados antes del filtro (filtros a presión) o después (filtros con succión).

Los ventiladores pueden clasificarse según la presión desarrollada y según la dirección del flujo de aire. Algunas características de los ventiladores centrífugos son:

- Caudales algo menores.
- Presiones más elevadas.
- Buen rendimiento.
- Silenciosos.
- Son más utilizados en sistemas de control de la contaminación.

❖ **Ventiladores Centrífugos:** Son aquellos en los cuales el flujo de aire cambia su dirección, en un ángulo de 90°, entre la entrada y la salida. Se suelen subclasificar, según la forma de las palas o álabes del rotor, de la siguiente manera:

Tabla 3. Ventiladores Centrífugos.

VENTILADORES CENTRÍFUGOS			
TIPO	DESCRIPCIÓN	APLICACIÓN	IMAGEN
ÁLABES CURVADOS HACIA ADELANTE	Rotor con palas curvadas hacia adelante, apto para caudales altos y bajas presiones. No es auto limitante de potencia. Para un mismo caudal y un mismo diámetro de rotor gira a menos vueltas con menor nivel sonoro.	Se utiliza en instalaciones de ventilación, calefacción y aire acondicionado de baja presión.	
ÁLABES RADIALES	Es el diseño más sencillo y de menor rendimiento. Es muy resistente mecánicamente, y el rodete puede ser reparado con facilidad. El diseño permite ser auto limpiante. La potencia aumenta de forma continua al aumentar el caudal.	Empleado básicamente para instalaciones industriales de manipulación de materiales. Se le pueden aplicar recubrimientos especiales anti desgaste. También se emplea en aplicaciones industriales de alta presión.	
ÁLABES INCLINADOS HACIA ATRÁS	Rotor de álabes planos o curvados inclinados hacia atrás. Es de alto rendimiento y auto limitador de potencia. Puede girar a velocidades altas.	se emplea para ventilación, calefacción y aire acondicionado. También puede ser usado en aplicaciones industriales, con ambientes corrosivos y/o bajos contenidos de polvo.	
AIRFOIL	Similar al anterior, pero con los álabes de perfil aerodinámico. Es el de mayor rendimiento dentro de los ventiladores centrífugos. Es auto limitante de potencia.	Es utilizado para aplicaciones en sistemas de HVAC y aplicaciones industriales de aire limpio. Con construcciones especiales puede ser utilizado en aplicaciones con aire sucio.	
RADIAL TIP	Rotores de palas curvadas hacia delante con salida radial. Son una variación de los ventiladores radiales, pero con mayor rendimiento. Aptos para trabajar con palas anti desgaste. Son auto limpiantes. La potencia aumenta de forma continua al aumento del caudal.	Como los radiales, estos ventiladores son aptos para trabajaren aplicaciones industriales con movimiento de materiales abrasivos, pero con un mayor rendimiento.	

Fuente: http://www.ventiladoresindustriales.com.mx/tiendavirtualpaginf.cfm?tema_id=7942

- ❖ **Potencia:** La potencia al freno del ventilador (P_v), es aquella energía por unidad de tiempo consumida por el ventilador operando bajo condiciones de caudal y presión específicas.

$$P_v = \frac{Q\Delta P_{Tot}}{4500\eta_v} \quad \text{Ecuación (7)}$$

Dónde:

P_v : [BHP]

$Q = \left[\frac{m^3}{min} \right]$

ΔP_{tot} = Diferencial de presión total, [mmH₂O]

η_v =Eficiencia del ventilador, según sea el tamaño, fabricación y el punto de trabajo del ventilador, varía entre el 70% - 80%.

La potencia del motor (P_m) debe ser mayor a la potencia de freno del ventilador, de manera que pueda vencer las pérdidas ocasionadas en la transmisión (por correas). Normalmente, se selecciona un motor con una potencia 15% mayor a la potencia de freno.

- ❖ **Leyes de los Ventiladores:** Si un ventilador debe funcionar en condiciones diferentes de las ensayadas, no es práctico ni económico efectuar nuevos ensayos para determinar sus prestaciones. Mediante el uso de un conjunto de ecuaciones designadas con el nombre de Leyes de los ventiladores es posible predecir, con una buena precisión, las nuevas prestaciones a partir de los ensayos efectuados en condiciones normalizadas.

$$Q_2 = Q_1 \left(\frac{D_{r2}}{D_{r1}} \right)^3 \left(\frac{N_2}{N_1} \right) \quad \text{Ecuación (8)}$$

$$p_2 = p_1 \left(\frac{D_{r2}}{D_{r1}} \right)^2 \left(\frac{N_2}{N_1} \right)^2 \left(\frac{\rho_2}{\rho_1} \right) \quad \text{Ecuación (9)}$$

$$P_{v2} = P_{v1} \left(\frac{D_{r2}}{D_{r1}} \right)^5 \left(\frac{N_2}{N_1} \right)^3 \left(\frac{\rho_2}{\rho_1} \right) \quad \text{Ecuación (10)}$$

Dónde:

P = Presión, puede tratarse de la Total o la Estática.

Dr = Diámetro del rodete.

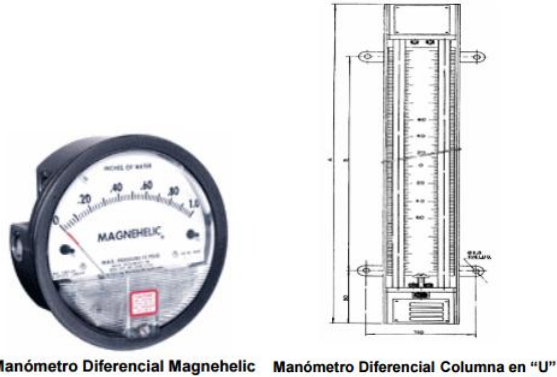
N = Revoluciones por minuto.

ρ = Densidad del aire.

3.4.4. Módulo de Control.

❖ **Manómetro diferencial:** Es una columna manométrica en forma de "U", o tipo del tipo de mostrador analógico, que permite la lectura de la diferencia de presión entre el cuerpo del filtro (área de filtración) y el plenum de aire limpio. Esto permite saber si es necesario o no limpiar las mangas, además de visualizar la presión del sistema.

Figura 15. Manómetros diferenciales.



Fuente: Ventec Ambiental. Filtro de Mangas.

❖ **Solenoides:** Son los elementos que sirven para transformar los pulsos eléctricos generados por el programador de control secuencial temporizado electrónico en impulsos neumáticos que van a actuar sobre las válvulas de diafragma.

❖ **Tablero de control PLC:** Garantizará el control de los pulsos de sistema y tiempo, los niveles de corriente del motor impulsor del ventilador, las vibraciones y el funcionamiento normal del sistema. Del tablero de control y sus conexiones se encarga el equipo técnico electrónico y eléctrico de la planta.

3.4.5. Módulo de Alimentación.

❖ **Acumulador de aire comprimido:** Se trata de un depósito para acumular aire comprimido utilizado para la limpieza de las mangas.

Este depósito tiene la capacidad suficiente de aire para que durante el tiempo de soplado para la limpieza el chorro de aire sea prácticamente constante.

❖ **Línea de aire comprimido:** La línea de aire comprimido está dada por válvulas de limpieza que producen pulsos que sacuden las mangas haciendo que el material adherido caiga. Estas válvulas son proporcionadas por la empresa fabricante D&F S.A.

Tabla 4. Especificaciones de las válvulas limpieza.

VÁLVULAS DE LIMPIEZA	
Cantidad	6
Material a captar	Cemento
Marca	Goyen
Tipo	Doble diafragma, solenoide integral
Referencia	CA-45-T2 1-1/2" NPT
Diámetro	1 ½" NPT
Sección rectangular	2853 x 1360 [mm]
Conexión	110 VDC, 60 Hz
Can velocity	209 [ft/min]
Consumo promedio de aire	6 CFM a 80 PSI en condiciones normales

4. PROCESO DE DISEÑO DEL SISTEMA DE COLECCIÓN DE POLVOS CON BASE A LAS CONDICIONES DE OPERACIÓN DE LA ZONA DE MOLIENDA.

En primer lugar, se debe tener claro el concepto de "sistema" para poder profundizar en la descripción y el diseño del sistema de despolvado que se va a implementar. Por lo tanto, de forma simple, un sistema es un conjunto de equipos y componentes interrelacionados que aportan en la buena funcionalidad de una operación, en el caso de interés, en mitigar las emisiones producidas debido al proceso de molienda para obtener cemento, por lo tanto, se debe tener en cuenta todos los factores de la operación que intervengan de forma directa o indirecta en el correcto funcionamiento del colector de polvos.

Como primera instancia se presentan algunas consideraciones correspondientes al fluido que se utilizará en el sistema, el aire.

Para llevar a cabo esto, se debe contar con las propiedades de los fluidos, en este caso en particular y teniendo como referencia la ubicación de la planta, la cual se encuentra a 959 m sobre el nivel del mar, se trabajará el aire a una temperatura de 23°C y una presión de 0,9 atm. Así, la densidad del aire (ρ) será 1.2 kg/m³. La viscosidad cinemática se llama a la resistencia al fluido a fluir, representada por ν , y tiene un valor de 1.84x10⁻⁵

Tabla 5. Tabla con las propiedades del aire circundante en la planta CEMEX, para una altura de 959 msnm a una presión de 0,9 Atm.

1.15	T [C]	ρ [Kg/m ³]	μ [Kg/m-s]
Run 1	5	1,142	0,00001754
Run 2	7	1,135	0,00001763
Run 3	9	1,127	0,00001773
Run 4	11	1,12	0,00001782
Run 5	13	1,112	0,00001792
Run 6	15	1,105	0,00001801
Run 7	17	1,097	0,00001811
Run 8	19	1,09	0,0000182
Run 9	21	1,083	0,00001829
Run 10	23	1,075	0,00001839
Run 11	25	1,068	0,00001848
Run 12	27	1,06	0,00001858
Run 13	29	1,053	0,00001867
Run 14	31	1,045	0,00001877
Run 15	33	1,038	0,00001886

Para el fluido es necesario realizar las siguientes determinaciones:

- *Se desprecian los efectos de intercambio térmico:* Si la temperatura dentro de los ductos es significativamente diferente a la del aire de los alrededores del ducto, se produciría intercambio de calor en consecuencia se tendría un cambio de temperatura del aire y por tanto se modificaría el caudal.
- *Se considera que el aire es incompresible:* Si la pérdida global de presión en el sistema es superior a 500 [mmH₂O] la densidad del aire cambiará aproximadamente el 5% y el caudal también se modificará. Todos los fluidos son compresibles en cierto grado, pero un análisis incompresible es satisfactorio para gases y vapores con velocidades alrededor de los 20 [m/s.]

- *Se supone que el aire es seco:* La presencia del vapor de agua reduce la densidad del aire. Por lo que debe efectuarse una corrección para tener en cuenta este efecto, se debe hacer un análisis psicrométrico.
- *Se desprecia el peso y el volumen del contaminante presente en la corriente de aire:* Si existen altas concentraciones de sólidos o cantidades significativas de gases distintos al aire, deben efectuarse las correcciones para tener en cuenta su efecto. (GOBERNA, 1992)

4.1. DESCRIPCIÓN Y BASE DE DISEÑO PARA LOS EQUIPOS QUE INTEGRAN EL SISTEMA DE DESEMPOLVADO.

Para llevar a cabo el proceso de diseño, se debe tener en cuenta el término de la *caída de presión* o de *carga en el sistema*. En el diseño de un sistema de extracción, se debe considerar múltiples factores, uno de ellos es la resistencia a la presión a través del proceso. Teniendo en cuenta esto, personas interesadas en el diseño de filtros de mangas y la implementación de los mismos, han llegado a concluir, gracias a los estudios y la experiencia ingenieril, que la resistencia del flujo de aire a través de estos, debe encontrarse en valores entre 200 mm a 400 mm (8 – 16 pulgadas) de columna de agua del lado limpio (plenum) al lado sucio del equipo. Como fin último, el sistema de desempolvado debe de captar el material que ocasiona las emisiones y transportarlo hacia el filtro de mangas en donde se captarán la mayor cantidad de partículas que a su vez serán devueltas al proceso de elaboración de cemento. En presencia de esto, se deben considerar otros factores como: el volumen del polvo y el aire que se genera durante la operación y en donde se ubicarán los puntos de entrada del colector, la distancia que el flujo de aire debe de recorrer hasta el final del filtro, si van a existir sistemas de acondicionamiento, la temperatura del flujo de gas desde el punto de entrada al de salida, la composición química del flujo de gas.

Como requerimiento y para asegurarse de que el sistema de desempolvado está cumpliendo con lo exigido, se recomienda realizar un análisis de los elementos estructurales localizados antes y después del filtro de mangas, esto porque a lo largo del proceso puede ocurrir cambios en la emisión de material particulado, puede aumentar o puede disminuir, además, puede cambiar la estructura del material recolectado y el volumen, etc., por lo tanto serán factores que pueden alterar el buen funcionamiento del filtro de mangas.

4.2. CÁLCULO DEL TAMAÑO DEL FILTRO.

El dimensionamiento de un filtro de mangas se realiza a partir del criterio de diseño de la *velocidad de filtración* o lo que es lo mismo, de la relación aire/tela. La velocidad de filtración tiene un valor de compromiso, ya que si es bajo aumenta la superficie filtrante, y si es demasiado alto, aumenta la frecuencia de limpieza, acortando la vida del filtro y provocando una compactación excesiva de la capa de polvo depositada. La velocidad de filtración utilizada para obtener la caída de presión total se la conoce como la relación gas–tela y se la define como la razón entre el volumen de gas filtrado y el área del medio filtrante, según la siguiente ecuación.

$$V_f = \frac{Q_{gas}}{A_{neta}} \quad \text{Ecuación (11)}$$

Donde;

V_f : Velocidad de filtración (Relación Gas / Tela) [m/s]

Q_{gas} : Caudal del gas con concentración de partículas [m³/s]

A_{neta} : Área neta de tela de filtración [m²]

4.3. RELACIÓN AIRE – TELA

Se busca determinar la relación aire-tela, que sea la más eficiente entre la caída de presión y el tamaño del filtro. La proporción aire-tela es difícil de estimar de forma a priori; sin embargo, los fabricantes ofrecen junto con los equipos, ecuaciones y nomogramas que permiten obtener ésta relación para filtros de mangas pulse jet, donde se relacionan la temperatura de operación, tamaño de la partícula, carga de polvo y la indicación de aplicabilidad según el material a filtrar. La siguiente ecuación es la más utilizada para determinar esta relación;

$$\frac{A}{T} = V_f = \frac{Q \left[\frac{m^3}{min} \right]}{A_T [m^2]} \quad \text{Ecuación (12)}$$

De donde Q es el caudal de diseño del colector y del sistema y AT es el área total filtrante, que viene dada por:

$$A_T = \pi \cdot C_m \cdot D_m \cdot L_m \quad \text{Ecuación (13)}$$

Siendo Cm la cantidad de mangas en el filtro, Dm el diámetro de las mangas y Lm la longitud de las mangas.

Tabla 6. Relación aire – tela.

TIPO	TÍPICO
Sacudido	2,5 - 3,0 a 1
Aire Reverso	2,0 – 2,5 a 1
Pulse-Jet	5 – 6 a 1
Plenum Pulse	3,5 – 4 a 1

4.4. CAÍDA DE PRESIÓN.

Los filtros de mangas estándares pueden operar por presión o al vacío, pero únicamente dentro de un rango de alrededor de $\pm 6,2$ kPa (630 mmCa aprox). Debido a que el cuerpo del filtro se construye en una lámina metálica, no es recomendable que trabaje en áreas severas, para estas condiciones se deben construir cajas para presiones altas.

La caída de presión total a través de un filtro de mangas, ΔP , durante la operación de filtrado está dada por la suma de las caídas de presión a través de la tela limpia, ΔP_f , de la capa de polvo formado en las mangas, ΔP_p , y de la estructura, ΔP_s . Puede expresarse como lo indica la siguiente ecuación.

$$\Delta P = \Delta P_f + \Delta P_p + \Delta P_s \quad \text{Ecuación (14)}$$

La caída de presión a través de la estructura puede despreciarse una vez que el filtro está en funcionamiento. Para reducir la caída de presión total a un valor razonable, es necesario limpiar periódicamente el filtro. La relación entre la caída de presión y la velocidad superficial de filtración se conoce como el *arrastre a través del filtro* y puede caracterizarse a través del *factor de resistencia*.

4.5. DISEÑO DE DUCTOS

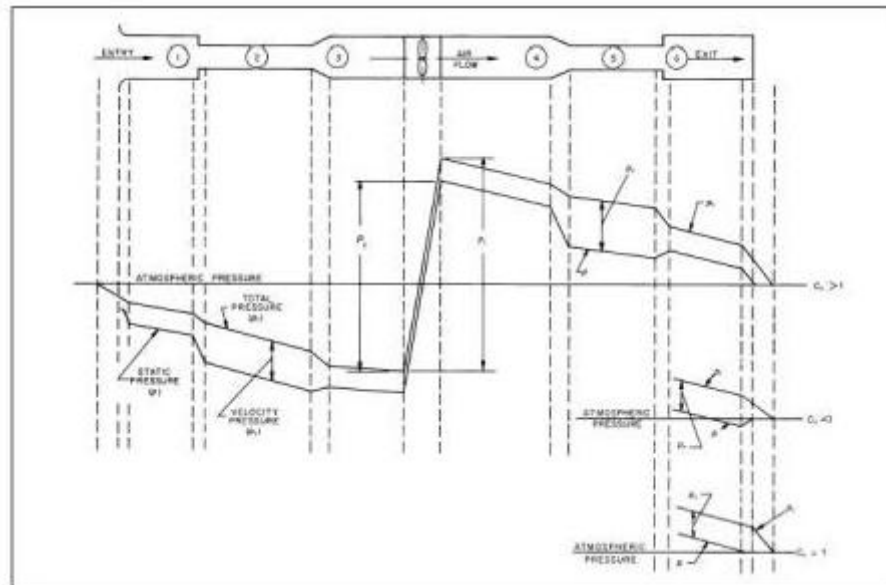
Para complementar el sistema de desempolvado, se deben de diseñar ductos, para tal fin, se fundamentará en mecánica de fluidos y sus principios, al igual, que se aplicará conocimientos de Sistemas de Transporte y Aprovechamiento de Fluidos para lograr un óptimo ensamblaje y de esta forma disminuir las pérdidas de presión a través de los codos y bifurcaciones que llevará el sistema de ductería.

Los ductos generalmente se construyen en tubo de acero soldado, unido mediante bridas y juntas, o de chapa de acero galvanizado, a menos que la presencia de gases corrosivos, vapores, nieblas u otras circunstancias hagan poco práctico el empleo de dichos materiales.

4.5.1. Cambios de presión en el sistema:

Para secciones de ductos de área constante, la pérdida de presión total y la pérdida de presión estática se mantienen constantes. En los puntos de transición en donde aumenta o disminuye la sección transversal, la pérdida de presión de velocidad disminuye de igual manera que la pérdida de presión total, pero la pérdida de presión estática puede disminuir o aumentar, dependiendo de la disminución o aumento de la sección transversal siguiente.

Figura 16. Cambios de presión en el sistema.



Fuente: ARIAS. Juan A. Auditoría al sistema de desempolvado del Área de Trituración de caliza en la planta cerro blanco de Holcim Ecuador S.A.

Una vez que el volumen de aire en cada punto es determinado y conocido, los ductos deben ser diseñados correctamente. Los ductos redondos son la mejor alternativa ya que ofrecen mayor uniformidad a la velocidad de transporte evitando cambios en el comportamiento de las partículas en el aire o gas y porque pueden soportar presiones estáticas más altas que los ductos cuadrados. Una adecuada velocidad del gas dentro del ducto permitirá que el polvo sea transportado junto con él.

Básicamente, en cualquier punto del ducto, la velocidad debe estar entre 18 [m/s] y 20 [m/s], puesto que, si tenemos que la velocidad es menor, entonces encontraríamos material segregado a lo largo de la ductería; por el contrario, una velocidad muy alta, daría como resultado abrasión en el ducto, principalmente en los cambios de dirección o de sección, en donde el perfil de velocidad del flujo tiene mayor importancia. Las velocidades de diseño pueden ser ligeramente mayores que los valores mínimos, pero nunca deben ser significativamente menores.

4.5.2. Determinación del tamaño del ducto:

El tamaño del ducto redondo puede ser determinado a través de la siguiente ecuación.

$$Q = A \times V \quad \text{Ecuación (15)}$$

Donde;

Q: Caudal necesario para el sistema [m³/s]

V : Velocidad de transporte entre 17,5 y 21 [m/s]

A : Área de la sección transversal del ducto [m²]

4.5.3. Pérdidas en ductos:

Con esto se aplica la *ley de la continuidad*:

$$\int \rho V \partial A = cte \rightarrow m = \rho VA \rightarrow Q \left[\frac{m^3}{s} \right] = V \left[\frac{m}{s} \right] A [m^2] \quad \text{Ecuación (16)}$$

Y con el principio de la conservación de la energía podemos aplicar la *ecuación de Bernoulli* que establece que:

$$\frac{P [Pa]}{\rho \left[\frac{Kg}{m^3} \right]} + \frac{V^2 \left[\frac{m^2}{s^2} \right]}{2} + g \left[\frac{m}{s^2} \right] z [m] = cte \quad \text{Ecuación (17)}$$

El *número de Reynolds* viene dado por:

$$Re = \frac{V \left[\frac{m}{s} \right] L [m]}{v \left[\frac{m^2}{s} \right]} = \frac{\rho \left[\frac{Kg}{m^3} \right] D_h [m] V \left[\frac{m}{s} \right]}{\mu \left[\frac{Kg}{m.s} \right]} \quad \text{Ecuación (18)}$$

Si $Re < 2300$, el flujo es considerado laminar y el factor de fricción será:

$$f = \frac{64}{Re} \quad \text{Ecuación (19)}$$

Para $2300 < Re < 10000$, en la etapa de transición, el factor de fricción viene dado por:

$$f = \frac{0,3161}{Re^{0,25}} \quad \text{Ecuación (20)}$$

O también por la ecuación de Churchill, la cual da un pequeño porcentaje de error en toda la gama de flujos laminares, críticos y turbulentos.

$$f = 8 \left[\left(\frac{8}{Re} \right)^{12} + (A + B)^{-\frac{3}{2}} \right]^{\frac{1}{12}} \quad \text{Ecuación (21)}$$

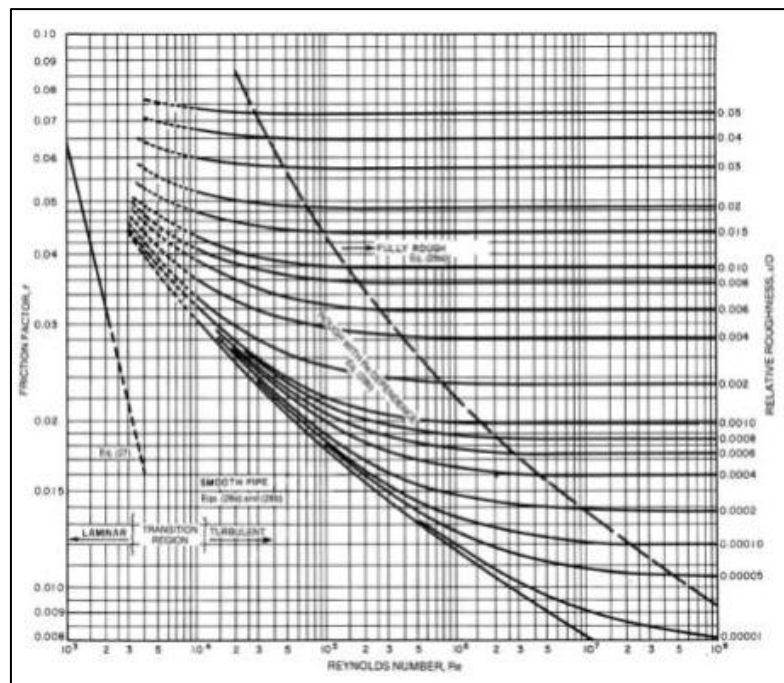
Donde:

$$A = \left\{ -2,457 * \ln \left[\left(\frac{7}{Re} \right)^{0,9} + \left(\frac{\varepsilon}{3,7 * D} \right) \right]^{16} \right\}$$

$$B = \left(\frac{37530}{Re} \right)^{16}$$

Otra alternativa para encontrar el factor de fricción, es el *Diagrama de Moody*, con el número de Reynolds y la rugosidad absoluta podemos encontrar el valor del factor de fricción.

Figura 17. Diagrama de Moody



Fuente: ARIAS. Juan A. Auditoría al sistema de desempolvado del Área de Trituración de caliza en la planta cerro blanco de Holcim Ecuador S.A.

Cuando se trata del diseño de ductos, es necesario encontrar las pérdidas debido a las resistencias friccional y dinámica del sistema. Para las pérdidas por fricción tenemos la *ecuación de Darcy*, a continuación:

$$\Delta P_f = \frac{1000 f L [m] \rho \left[\frac{kg}{m^3} \right] V^2 \left[\frac{m^2}{s^2} \right]}{2 D_h [mm]} \quad \text{Ecuación (22)}$$

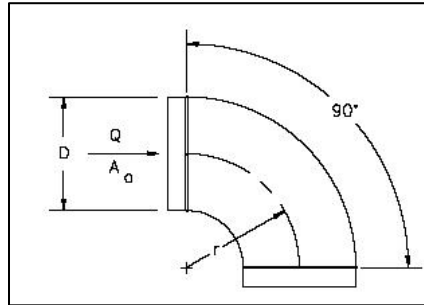
Y para las pérdidas dinámicas causadas por los accesorios en las tuberías, tenemos:

$$\Delta P_v = K \rho \left[\frac{Kg}{m^3} \right] \frac{V^2 \left[\frac{m^2}{s^2} \right]}{2} \quad \text{Ecuación (23)}$$

Siendo K el factor de fricción por pérdidas dinámicas, de acuerdo a la geometría del accesorio utilizado y sus dimensiones.

Para sistemas de desempolvado, es efectivo tener codos con la relación $r/D > 1.5$; si la relación es menor a este valor, la abrasión puede reducir el tiempo de vida ocasionando desgastes y pérdidas de presión en el sistema. Frecuentemente se encuentran diseños de ductos con problemas en los codos y variaciones de secciones, causando que el desgaste en las paredes del ducto se acelere y por lo tanto disminuya la vida útil del ducto.

Figura 18. Relación r/D de codos en ductos.



Fuente: ARIAS. Juan A. Auditoría al sistema de desempolvado del Área de Trituración de caliza en la planta cerro blanco de Holcim Ecuador S.A.

A mayor número de puntos de succión en el sistema, mayor dificultad a la hora de realizar el balance de presiones para que sea un sistema efectivo. Es por esto, que se recomienda un máximo de 8 puntos por sistema de desempolvado. Se deben de evitar los ductos horizontales, puesto que en estos se presentan mayores niveles de segregación de material ocasionado por los altos efectos de la abrasión, además, el material, con el tiempo queda acumulado en el trayecto del ducto, ocasionando también, atasques de material. Para evitar este inconveniente, se recomienda que la pendiente en los ductos, para el caso de la caliza y cemento sea 30° , y para el Clinker y yeso sea 45° , con respecto a la horizontal, esto se deduce de las densidades de los materiales ya triturados.

Figura 19. Pendiente para los ductos del transporte de caliza y cemento.

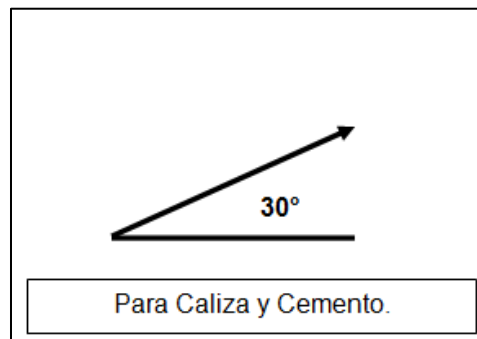
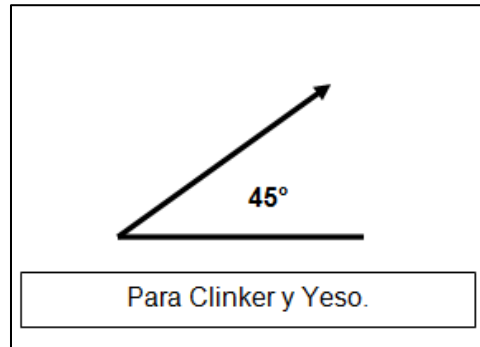


Figura 20. Pendiente para los ductos del transporte de Clinker y yeso.

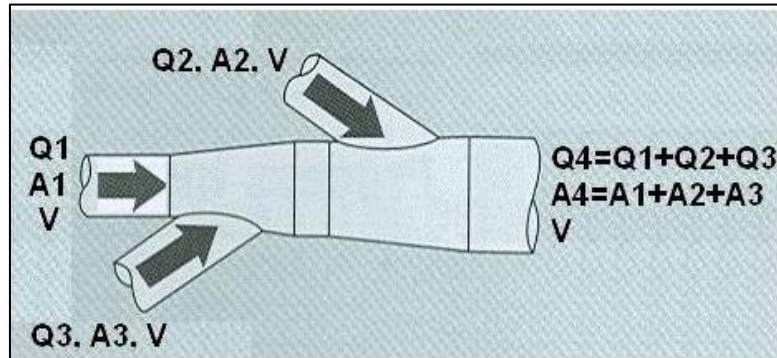


Sabiendo que es importante mantener la misma velocidad a lo largo de los ductos por las consideraciones antes mencionadas, en cada punto de succión se manejará un caudal establecido y con una velocidad requerida igual para todo el sistema, entonces queda por determinar el área de la sección transversal del ducto. Cada diseño de arreglos (codos, uniones, etc.) tiene su coeficiente de pérdidas, que deberá ser considerado en el diseño de la ductería junto a la presión interna con la que va a trabajar el filtro.

A medida que los diferentes ramales pertenecientes a los diferentes puntos de captura se unen para llegar al filtro como uno solo, el caudal aumenta, y si consideramos que la velocidad del flujo debe ser la misma, entonces el área deberá aumentar, lo que implica que el balance neto del flujo volumétrico debe ser igual a cero.

Se recomienda, para llevar a cabo lo anterior expuesto utilizar las figuras 19 y 20.

Figura 21. Velocidad constante en ductos.



Fuente: ARIAS. Juan A. Auditoría al sistema de desempolvado del Área de Trituración de caliza en la planta cerro blanco de Holcim Ecuador S.A.

Además, se debe de tener en cuenta el ángulo de inclinación para cada material, para determinar el resto de dimensiones de la ductería. [3]

5. PROCEDIMIENTO DE DISEÑO

Todos los sistemas de extracción localizada, tienen en común el uso de campanas de captación y un conjunto de ductos y accesorios hasta llegar al ventilador. Para iniciar con el procedimiento de diseño se tendrán en cuenta algunas recomendaciones dadas por el manual de ventilación industrial²

1. Determinar el caudal de diseño mediante el cual se seleccionan o diseñan las campanas de extracción teniendo en cuenta cada operación a controlar.
2. Determinar la velocidad mínima en los ductos.
3. Determinar la sección transversal de los ductos, se debe elegir el ducto comercial aproximando a la sección menor con el fin de asegurar que la velocidad real sea superior a la mínima necesaria.
4. Determinar una longitud aproximada de cada tramo de ductos, así como el número y tipo de uniones y codos necesarios.
5. Calcular la pérdida de presión o carga en el sistema.

5.1. MÉTODO DE DISEÑO POR MEDIO DE LA PRESIÓN DINÁMICA

Este método se basa en el hecho de que todas las pérdidas de cargas, por fricción en ductos y resistencia de los accesorios, son función de la presión dinámica y se pueden calcular multiplicando la presión dinámica por un factor que corresponde a cada accesorio.

Las etapas que se indican a continuación permiten el cálculo de la pérdida de carga total de un tramo de ducto que empieza en una campana:

² GOBERNA, Ricardo. Ventilación industrial, primera edición. Madrid. Generalitat Valenciana, 1992. 408p.

1. Calcular la velocidad real del ducto utilizando el diámetro seleccionado.
2. Calcular la succión de la campana utilizando las ecuaciones propuestas por el manual de ventilación.
3. Multiplicar la longitud de diseño del ducto por el factor de pérdida correspondiente.
4. Determinar el número y tipo de accesorios. Para cada tipo de accesorio hay que determinar el factor de pérdidas.
5. Sumar todos los factores de pérdidas y multiplicarlos por la presión dinámica, esto dará como resultado la pérdida total en cada tramo.
6. Sumar las pérdidas ocasionadas por otros elementos, las pérdidas en campanas de succión y en tramos de ductos. El resultado final es el requerimiento total de energía, expresada en términos de presión estática, necesario para hacer circular el caudal de diseño a través del tramo.

5.2. DISTRIBUCIÓN DEL CAUDAL

Al diseñar un sistema de varias campanas y conductos secundarios, se aplican los principios y métodos ya presentados. Sin embargo, en un sistema múltiple es preciso prever, bien sea con un diseño equilibrado o con compuertas de regulación, la repartición correcta del caudal total entre los conductos secundarios. El aire siempre circula por el camino de menor resistencia, entonces, para conseguir que la repartición de caudales coincida con los valores de diseño, se debe procurar que para todos los ductos que confluyen en una unión, el valor calculado de la presión estática sea el mismo.

5.2.1. Método de equilibrado por diseño:

Este procedimiento prevé un sistema diseñado de tal forma que se consigue el reparto adecuado de los caudales logrando que el valor calculado de la presión estática sea el mismo en cada tramo de ducto que llega a una unión. La presión estática se equilibra eligiendo un nuevo diámetro del conducto, el radio de los codos, etc. del tramo que presenta la menor resistencia.

El manual de ventilación industrial recomienda rediseñar el conducto con la presión estática más baja cuando la relación entre la presión estática más baja y la más alta en la unión sea menor a 0,8. Cuando las presiones estáticas calculadas no son iguales el equilibrio puede lograrse aumentando el caudal para el ducto de menor resistencia. El nuevo caudal se calcula teniendo en cuenta que la pérdida de carga es proporcional a la presión dinámica y por lo tanto proporcional al cuadrado del caudal.

5.2.2. Método de equilibrado por compuertas:

Este procedimiento se basa en la instalación de compuertas de regulación, que serán ajustadas una vez que el sistema se ponga en funcionamiento para conseguir el caudal deseado en cada campana. En cada unión se suman los caudales de las corrientes confluyentes.

5.3. DISEÑO DEL SISTEMA DE DESEMPOLVADO POR FILTRO DE MANGAS TIPO PULSE JET PARA EL ÁREA DE MOLIENDA.

El diseño del sistema de consiste en un filtro de mangas tipo pulse jet, ductos y accesorios que conectan las diferentes campanas de extracción con el filtro, la tabla 5 muestra el valor de los caudales a extraer de los materiales procedentes de cada banda.

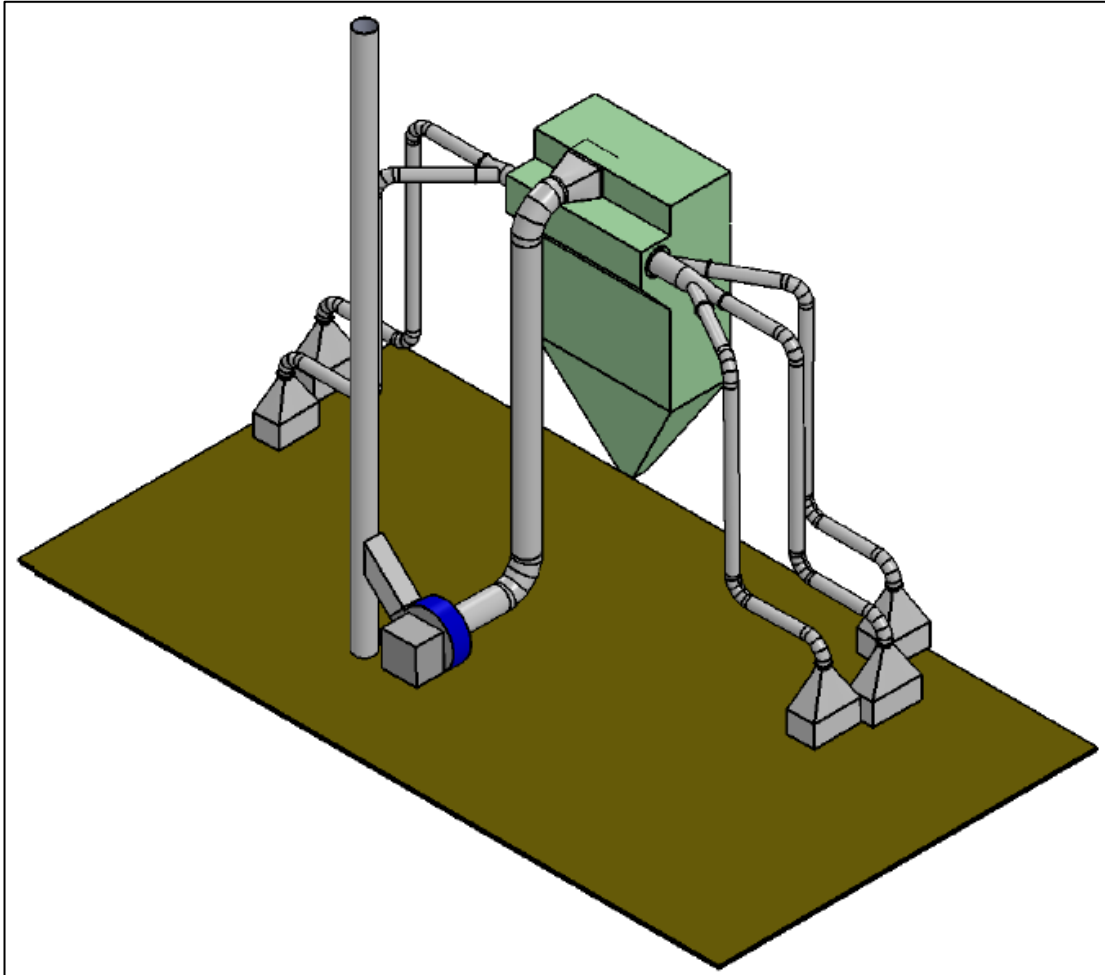
Actualmente, la empresa CEMEX S.A. planta Bucaramanga, tiene disponibilidad de un filtro de mangas, con una capacidad de 5886 [CFM], el cual se utilizará como parte del sistema de desempolvado. La tabla 7 muestra el caudal total de aire procedente de las campanas de extracción en comparación con la capacidad del filtro presente.

Tabla 7. Caudal total de aire y capacidad del filtro.

FOCO DE EMISIONES	CAUDAL [CFM]	CAUDAL [m3/s]
Campana de Caliza	1136	0,5363
Campana de Clinker	1073	0,5063
Campana de Banda Alimentadora	1144	0,540
Campana Yeso	926	0,437
Campana Molino2	1081	0,51
CAUDAL TOTAL	5360	2,529
CAPACIDAD DE FILTRO	5886	2,778

El esquema del diseño se muestra en la siguiente figura.

Figura 22. Esquema del diseño del sistema de desempolvado.



5.3.1. Diseño de ductos:

Una vez determinados los caudales de diseño, y teniendo en cuenta que la velocidad recomendada según el manual de ventilación en ductos debe estar comprendida entre 17,5 y 20 [m/s], se procede a calcular los diámetros internos de los ductos, así como seleccionar los accesorios que se utilizarán. La velocidad de ducto recomendada es 18 [m/s].

Utilizando la *Ecuación (24)* para un flujo de aire que recorre una sección transversal. Los diámetros internos para los ductos con su caudal son:

✓ Ducto 1: Caliza

$$0,5363 \left[\frac{m^3}{s} \right] = 18 \left[\frac{m}{s} \right] \times \frac{\pi \cdot D_{cal}^2}{4}$$

$$D_{cal} \cong 195 [mm]$$

✓ Ducto 2: Clinker

$$0,5063 \left[\frac{m^3}{s} \right] = 18 \left[\frac{m}{s} \right] \times \frac{\pi \cdot D_{cl}^2}{4}$$

$$D_{cl} \cong 190 [mm]$$

✓ Ducto 3: Banda Alimentadora

$$0,540 \left[\frac{m^3}{s} \right] = 18 \left[\frac{m}{s} \right] \times \frac{\pi \cdot D_{ba}^2}{4}$$

$$D_{ba} \cong 195 [mm]$$

✓ Ducto 4: Yeso

$$0,437 \left[\frac{m^3}{s} \right] = 18 \left[\frac{m}{s} \right] \times \frac{\pi \cdot D_{ye}^2}{4}$$

$$D_{ye} \cong 175 [mm]$$

✓ Ducto 5: Molino2

$$0,044 \left[\frac{m^3}{s} \right] = 18 \left[\frac{m}{s} \right] \times \frac{\pi \cdot D_{cem}^2}{4}$$

$$D_{cem} \cong 190 [mm]$$

Este primer cálculo arroja valores de diámetros internos que se deben estandarizar con los que se encuentran en el mercado, debido a que resulta más económico comprar los ductos que construirlos. De acuerdo a los valores obtenidos, se evidencia que la medida del diámetro de menor tamaño más cercano son 7 [pulg], aproximadamente 177,8 [mm]. Haciendo el recalcu, se obtienen los siguientes resultados.

Tabla 8. Recalculo de caudal de aire necesario con ductos estandarizados.

FOCO DE EMISIÓN	DIÁMETRO [pulg]	CAUDAL [CFM]	CAUDAL [m3/s]
Campana Caliza	7	947	0,447
Campana Clinker	7	947	0,447
Campana Banda Alimentadora	7	947	0,447
Campana Yeso	7	947	0,447
Campana Molino2	7	947	0,447
TOTAL		4735	2,235
CAPACIDAD FILTRO		5886	2,778

5.3.2. Longitud y accesorios de los ductos:

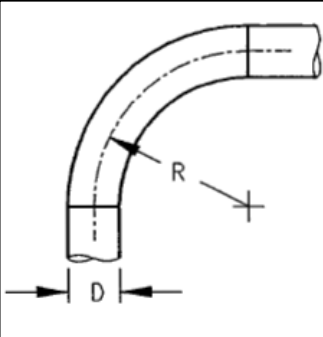
El área de molienda cuenta con espacio disponible para la instalación del sistema de desempolvado, el cual se puede ubicar de forma organizada logrando una disminución en el número de elementos a utilizar ahorrando espacio y dinero. En la siguiente tabla se especifican las longitudes propuestas, así como los accesorios que se utilizan en cada tramo de los conductos.

Tabla 9. Longitud y accesorios para los conductos.

CONDUCTO	LONGITUD [m]	ACCESORIOS	
		CODOS	UNIONES
Ducto Caliza	5	3 a 90°	1 a 30° ductos laterales
Ducto Clinker	5	3 a 90°	
Ducto Banda Alimentadora	5	3 a 90°	
Ducto Yeso	5	3 a 90°	1 a 45° ductos laterales
Ducto Molino2	5	3 a 90°	
Ventilador-Filtro	6	2 a 90°	-

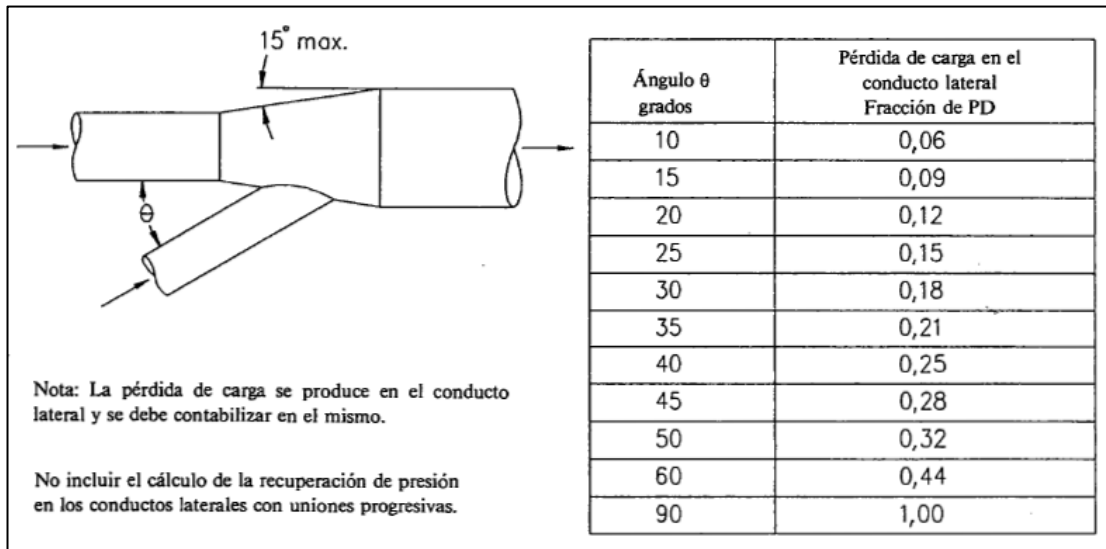
En las tablas 8 y 9 se presentan los factores de pérdidas en los accesorios, ésta información será tenida en cuenta en el momento que se calculen las pérdidas de carga en el sistema. En las uniones se deben calcular las presiones estáticas en cada conducto secundario.

Tabla 10. Pérdidas de cargas en codos de sección circular.

	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	

Fuente: GOBERNA, Ricardo. Manual de ventilación industrial.

Tabla 11. Pérdidas de carga en las uniones.

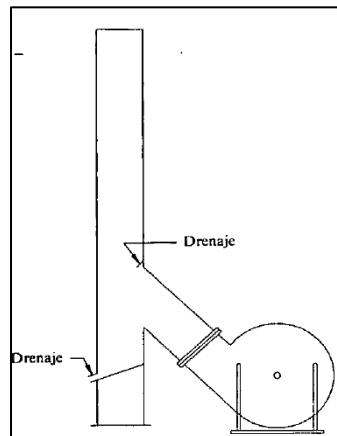


Fuente: GOBERNA, Ricardo. *Manual de ventilación industrial.*

5.3.3. Diseño de la chimenea:

El tipo y situación de las chimeneas es importante en orden a conseguir una buena dispersión del aire contaminado que se transporta en los sistemas de extracción localizada. Unas condiciones de descarga incorrectas conducen a unos niveles de contaminación que pueden quedarse en la zona a causa de los efectos del viento.

Figura 23. Chimenea.



Fuente: GOBERNA, Ricardo. *Manual de ventilación industrial.*

Según la Resolución 909 de 2008, cuando se trate de chimeneas, las emisiones sobre todo el territorio colombiano no deben ser mayores a 10250 [ppm] a un caudal de 2000 [m³/h].

Según estos datos se diseña la chimenea, se selecciona una altura de 15 [m]. Las velocidades de flujo permitidas son.

Tabla 12. Velocidades de salida de aire.

Altura, h [m]	Velocidad [m/s]
Hasta 20	6
20 - 45	9
Mayor de 45	12

Según los valores proporcionados, se calcula el diámetro que tendrá la chimenea.

$$0,555 \left[\frac{m^3}{s} \right] = 6 \left[\frac{m}{s} \right] \times \frac{\pi \cdot D_{chim}^2}{4}$$

$$D_{chim} \cong 350 [mm]$$

Normalizando el diámetro según lo que se encuentre en el mercado se tiene:

$$D_{chim_{norm}} = 14 [in] \text{ o } 355,6 [mm]$$

OBSERVACIÓN: Se puede incluir en el diseño protección contra la lluvia, la cual es función directa de la altura de la chimenea, no obstante, una altura excesiva puede provocar que el aire salga de la chimenea a través de los orificios de drenaje.

5.3.4. Pérdida de carga en el sistema

❖ **Pérdida de carga en tramos rectos:** En tramos rectos la pérdida de carga es función de la velocidad del aire, diámetro, densidad y viscosidad del aire, además de la rugosidad superficial del conducto. La elección del material del ducto es de suma importancia, ya que permite conocer la rugosidad relativa que presenta y la fricción que produciría.

Tabla 13. Rugosidad superficial absoluta.

Material	Rugosidad absoluta (ϵ), cm
Chapa galvanizada	0,015
Acero	0,005
Aluminio	0,005
Acero inoxidable	0,005
Conducto flexible (alma descubierta)	0,3
Conducto flexible (alma recubierta)	0,09

Fuente: GOBERNA, Ricardo. Manual de ventilación industrial.

La chapa galvanizada, con $\epsilon = 0,015$ contiene zinc, el cual le brinda al material una alta resistencia contra la corrosión que lo protege del movimiento destructivo de una corriente de aire contaminado con material particulado.

Retomando las ecuaciones (18) a (23) para el cálculo del número de Reynolds y factor de fricción del conducto de caliza se tiene:

$$Re = \frac{1,075 * 0,1778 * 18}{1,84 * 10^{-5}} = 1,86 * 10^5$$

$$A = \left\{ -2,457 * \ln \left[\left(\frac{7}{1,86 * 10^5} \right)^{0,9} + \left(\frac{0,015}{3,7 * 17,78} \right)^{16} \right] \right\} = 5,071 * 10^{20}$$

$$B = \left(\frac{37530}{1,86 * 10^5} \right)^{16} = 7,138 * 10^{-12}$$

$$f = 8 \left[\left(\frac{8}{1,86 * 10^5} \right)^{12} + (5,071 * 10^{20} + 7,138 * 10^{-12})^{-\frac{3}{2}} \right]^{\frac{1}{12}} = 0,02065$$

Para determinar la pérdida global en el tramo se calcula la presión dinámica.

$$PD = \left(\frac{V}{4,043}\right)^2 = \left(\frac{18}{4,043}\right)^2 = 19,82 \text{ [mmca]}$$

Este valor de presión dinámica es válido para todos los conductos debido a que presentan el mismo diámetro y velocidad. A continuación, se calcula la pérdida en tramos rectos con la longitud proporcionada, de igual manera este valor se cumple para los demás conductos.

$$h[\text{mmca}] = f * \frac{L[\text{m}]}{D[\text{m}]} * PD[\text{mmca}] = 0,02065 * \frac{5}{0,1778} * 19,82$$

$$h = 11,51 \text{ [mmca]}$$

❖ **Pérdida de carga en accesorios:**

Cálculo de pérdidas en la entrada y salida de ductos con brida:

$$\text{Factor de } K = 0,46$$

Se calculan las pérdidas en la entrada del conducto, justo después de la campana de extracción y en la salida, justo antes del filtro.

$$\Delta P_{eys} = 2 * 0,46 * 19,82 = 19,43 \text{ [mmca]}$$

Cálculo de pérdidas en codos:

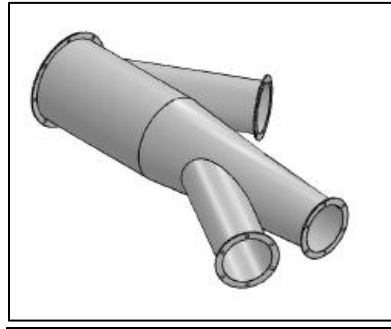
$$\frac{R}{D} = 2,25 \text{ el cual tiene un factor de } K = 0,26$$

Cada tramo de ducto tiene tres (3) codos desde la salida de la campana de extracción hasta la entrada del filtro, luego:

$$\Delta P_{codos_cal} = 3 * 0,26 * 19,82 = 15,46 \text{ [mmca]}$$

Cálculo de pérdidas en uniones con ducto lateral a 30°:

Figura 24. Unión con ductos laterales a 30°



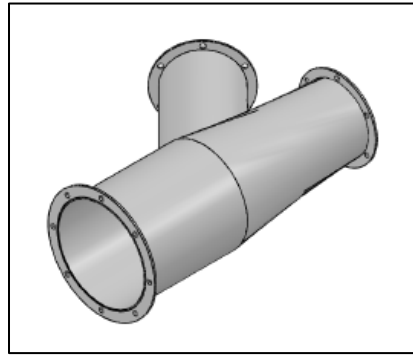
Para esta unión se tiene un factor de $K = 0,18$

En esta unión confluyen tres (3) ductos, Caliza, Clinker y Banda alimentadora. Se calculan las pérdidas solo para los conductos laterales.

$$\Delta P_{union_cal} = 0,18 * 19,82 = 3,568 \text{ [mmca]}$$

Cálculo de pérdidas en uniones con ducto lateral a 45°:

Figura 25. Unión con ducto lateral a 45°



Para esta unión se tiene un factor de $K = 0,28$

En esta unión confluyen tres (2) ductos, Yeso y Molino2. Se calculan las pérdidas solo para los conductos laterales.

$$\Delta P_{cal} = 0,28 * 19,82 = 5,55 \text{ [mmca]}$$

❖ **Pérdida de carga en campanas de extracción:** La siguiente tabla muestra las dimensiones aproximadas de las campanas según el caudal requerido por cada una.

Tabla 14. Dimensiones de las campanas.

CAMPANA	Lado A [mm]	Lado B [mm]	Ángulo
Caliza	780	550	45°
Clinker	900	450	45°
Banda Al	860	500	45°
Yeso	760	460	45°
Molino2	850	480	45°

Las pérdidas en las campanas de extracción se calculan por medio de la ecuación (6), para campanas simples a 45° el factor de pérdida es 0,16.

$$P_{st} = (1 + K)P_v$$

$$P_{camp} = (1 + 0,16) * 19,82 = 23 [mmca]$$

Como las campanas presentan el mismo ángulo y los ductos son del mismo diámetro, las pérdidas en las campanas serán las mismas en todos los casos.

❖ **Pérdidas en conducto que comunica filtro y ventilador:** Estas pérdidas también deben tenerse en cuenta para hallar la pérdida total del sistema, retomando las ecuaciones anteriormente mencionadas y con las mismas condiciones de material y velocidad en conducto, se procede de la siguiente manera:

$$\text{Características del ducto: } D = 390 [mm], L = 6 [m]$$

$$\text{Pérdidas en tramo recto: } h = 5,253 [mmca]$$

Pérdidas en codos: $K_{codos} = 0,55$

$$\Delta P_{cod} = 2 * 0,55 * 19,82 = 21,8 [mmca]$$

Pérdidas por entrada y salida de ducto: $K_{eys} = 0,93$

$$\Delta P_{eys} = 2 * 0,93 * 19,82 = 36,87 [mmca]$$

$$\Delta P_{ducto} = 5,253 + 21,8 + 36,87 = 63,92 [mmca]$$

❖ **Pérdidas totales en el sistema:** Para hallar este valor se suman todos los valores de pérdidas obtenidos en tramos rectos, accesorios y campanas.

$$\Delta P_{tot} = h + \Delta P_{eys} + \Delta P_{codos} + \Delta P_{union} + P_{camp}$$

$$\Delta P_{tot_{cal}} = 11,51 + 19,43 + 15,46 + 3,568 + 23 = 72,97 [mmca]$$

$$\Delta P_{tot_{yes}} = 11,51 + 19,43 + 15,46 + 5,55 + 23 = 74,95 [mmca]$$

Tabla 15. Pérdida total de carga en el sistema.

CONDUCTO	PÉRDIDA TOTAL DE CARGA [mmH2O]
Caliza	72,97
Clinker	72,97
Banda transportadora	72,97
Yeso	74,95
Molino2	74,95
Ventilador-Filtro	63,92
TOTAL	432,73

5.4. SELECCIÓN DEL VENTILADOR

En el proceso de selección del ventilador se tienen en cuenta los datos obtenidos con anterioridad, el ventilador debe tener la capacidad para cumplir con los requerimientos de caudal y presión del sistema. La tabla 16 presenta los datos necesarios para iniciar con el proceso de selección.

Tabla 16. Requerimientos del sistema para selección del ventilador.

REQUERIMIENTO	VALOR
Caudal total	4735 [CFM]
Presión total	432,73 [mmH ₂ O]
Temperatura de trabajo	23 [°C]
Altitud de la zona de trabajo	959 [m]
Densidad del aire	1,060 [Kg/m ³]

El proceso de selección se realizará usando la herramienta virtual *Fanware Lite* proporcionada por *Casals*. El proceso se realiza secuencialmente.

- a. Inicialmente se realiza la configuración de unidades que se utilizarán.

Figura 26. Configuración de unidades

The screenshot shows a configuration window titled 'CONFIGURACIONES'. It contains six panels:

- Caudal:** 'Unidad por defecto utilizada en los cálculos de selección y gráficos.' with a dropdown menu set to 'CFM'.
- Presión:** 'Unidad por defecto de presión utilizada en los cálculos de selección y gráficos.' with a dropdown menu set to 'mmH2O'.
- Temperatura:** 'Unidad por defecto de la temperatura mostrada.' with a dropdown menu set to '°C'.
- Longitud:** 'Unidad de medida de la distancia a una fuente sonora o bien la altura sobre el nivel del mar' with a dropdown menu set to 'm'.
- Coeficiente seguridad:** 'Valor expresado en % para calcular la potencia de los ventiladores a transmisión aplicando dicho factor de seguridad.' with a text input field containing '15'.
- Frecuencia:** 'Frecuencia por defecto de los motores.' with two radio buttons: '50Hz' (unselected) and '60Hz' (selected).

Fuente: Fanware Lite - Casals

b. Se introducen los datos requeridos.

Figura 27. Introducción de los requerimientos previa selección.

The screenshot shows two panels for data entry:

- DATOS CAUDAL/PRESIÓN:**
 - Caudal: 4735 CFM
 - Presión: 432.73 mmH₂O
 - Número de ventiladores: 1 4735 CFM
- DATOS AMBIENTALES:**
 - Temperatura del aire: 23 °C
 - Altura sobre el nivel del mar: 959 m 1.06 Kg/m³
 - Temperatura máxima del aire: 30 °C

Fuente: Fanware Lite - Casals

c. Una vez arrojados los resultados, seleccionar el ventilador que se ajuste mejor a los requerimientos.

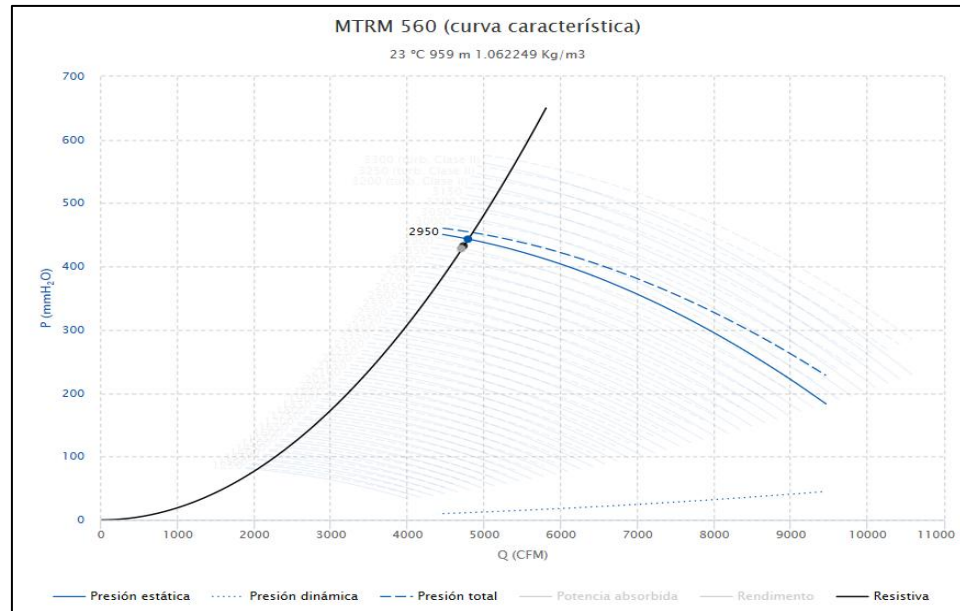
Figura 28. Selección del ventilador.

código	nombre	caudal (CFM)	presión (mmH ₂ O)	RPM	potencia	Rendimiento	tipo rendimiento
MTZM 560 P/R		4735.72	432.86	2900	30	57.28 %	Turbina
MTRU 500		4803.95	445.42	3450 (turb. Clase II)	22	85.77 %	Turbina
MTRU 560		4811.38	446.8	2950	30	84.8 %	Turbina
MTRU 630		4776.54	440.36	2600	37	75.39 %	Turbina
MTRM 560		4792.39	443.28	2950	18.5	68.42 %	Turbina
MBRU 562 T2 18,5kW		4777.34	440.5	2960	18.5		
MTGR 710		4794.25	443.63	2300	55	77.92 %	Turbina
MTGR 630		4803.83	445.4	2700	37	78.68 %	Turbina
MTGR 560		4755.9	436.56	3150	22	80.74 %	Turbina
AATVM 630		4735.27	432.78	3050	37	70.2 %	Turbina

Fuente: Fanware Lite - Casals

d. La curva característica del ventilador y los datos de operación son los siguientes.

Figura 29. Curva característica del ventilador.



Fuente: Fanware Lite – Casals

Figura 30. Datos del punto de operación.

PUNTO DE DISEÑO	
Q (CFM)	4735.00
Ps (mmH ₂ O)	432.73
Temperatura (°C)	23
Altura (m)	959
asignar	

PUNTO DE SERVICIO	
RPM	2950
Temp. max. (°C)	200.00
Q (CFM)	4792.39
Ps (mmH ₂ O)	443.29
Pd (mmH ₂ O)	13.02
Pt (mmH ₂ O)	456.31
Vel. aire (m/s)	15.51
Rendimiento (%)	68.42 (Turbi)
P _{abs} (kW) 20°C	16.7
P _{recom} (kW)	22

PUNTO DE SERVICIO ALTERNATIVO

Fuente: Fanware Lite – Casals

e. El ventilador seleccionado es:

Figura 31. Ventilador seleccionado.



modelo

MTRM 560

Fuente: Fanware Lite - Casals

Este ventilador presenta diversas aplicaciones, entre las que se pueden destacar:

- Procesos industriales, extracción o inyección localizada.
- Transporte de aire limpio o ligeramente polvoriento.
- Transporte de aire polvoriento o con ligera carga de materiales granulados exceptuando materiales filamentosos.
- Aspiración después de filtros, separadores y ciclones.

El motor que impulsará este ventilador será proporcionado por la empresa D&F (Diseño y Fabricación de maquinaria) S.A. a continuación se presenta una tabla con sus especificaciones.

Tabla 17. Especificaciones del motor impulsor.

MOTOR IMPULSOR	
Tipo.	Trifásico, 60Hz
Potencia.	20 [HP]
Velocidad de Giro.	1800
Corriente nominal en 220V.	52,6 [A]
Rendimiento al 100%	90,2
Factor de Servicio.	1,15
Momento de inercia.	0,09535
Peso aproximado.	120 [Kg]

Fuente. Catálogo D&F S.A.

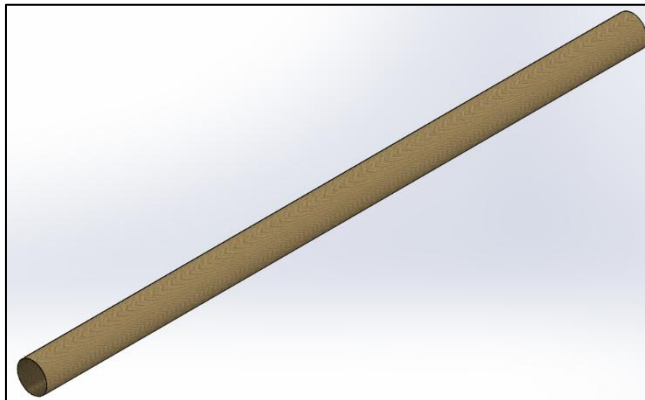
Para información más detallada de este ventilador, consultar en la carpeta *Anexos*.

5.5. SELECCIÓN DE LA TELA FILTRANTE DE LAS MANGAS.

La determinación del tipo de tela y su dimensión dependen de las características de operación y del sistema de limpieza que va a estar sometida y del proveedor o fabricante de quién se desee adquirir; se destacan a continuación las características que deben cumplir dichas telas:

- Temperatura de operación = Ambiente
- Punto de rocío = 26°C
- Característica del cemento = alcalino y abrasivo
- Tipo de limpieza = Pulse Jet.

Figura 32. Tela filtrante o Manga.



La tela debe ser del tipo fieltro debido al sistema de limpieza pulse – jet; y en la tabla 15 se aprecian que los tres tipos de tela escogidos. Son adecuados porque son de fibra sintética y cumplen las condiciones de operación requeridas, además de no ser muy costosas.

Tabla 18. Materiales usados para las mangas.

Material	Temperature limit, °F	Chemistry acid/base	Residual moisture	Service strength		Filtration efficiency	Permeability, (ft ³ /min)/ft ²	Drag, in WG/(ft/min)	Cost, \$/ft ²
				Flexibility	Cleaning				
Felts									
Polypropylene	190	E/E	P	E	G	E	30+	0.5	1.00
Polyester	275	G/F	F	F	E	E	30+	0.5	1.00
Acrylic	260	V/F	E	G	F	E	30+	0.5	1.00
Nomex	400	G/G	G	G	G	E	30+	0.5	3.00
Ryton	375	E/E	E	E	E	E	30+	0.5	3.20
P 84	460	E/P	E	E	E	E	30+	0.5	3.30
Teflon	475	E/E	E	F	P	E	30+	0.5	5.20

Fuente: DONOSO BAQUERIZO, Oscar A. Pruebas experimentales de un filtro de mangas Tipo Pulse Jet del Laboratorio de Calidad del Aire de la FIMCP.

Empresas fabricantes de telas de mangas recomiendan el uso del POLIÉSTER, ya que es de fibra sintética, cumple con las condiciones de operación requeridas, además de no ser muy costosa.

5.6. ELEMENTOS DEL SISTEMA DE DESEMPOLVADO PROPORCIONADOS POR LA PLANTA CEMEX S.A.

Como ya se ha mencionado anteriormente, un sistema de desempolvado está integrado por varios elementos, algunos de éstos ya se encuentran en las instalaciones de la planta, a continuación, se muestran sus especificaciones.

5.6.1. Sistema de descarga:

El sistema de descarga está dado por una válvula rotatoria, proporcionada por la empresa fabricante D&F S.A. Se puede ver más información al respecto en Anexos.

Tabla 19. Especificaciones de la válvula rotatoria.

VÁLVULA ROTATORIA	
Cantidad	1
Material a manejar	Cemento
Capacidad al 100%	5 [lt/rev]
Temperatura de operación	Ambiente
Velocidad de giro	21 [RPM]
Diámetro del rotor	205,5 [mm]

Fuente. Catálogo D&F S.A.

5.6.2. Sistema de filtrado:

El filtro de mangas con el que cuenta la planta fue proporcionado por la empresa fabricante D&F S.A., sus especificaciones se muestran en la siguiente tabla. Para ver el plano del filtro, ir a *Anexos*.

Tabla 20. Especificaciones del filtro de mangas.

FILTRO DE MANGAS		
Sistema de limpieza	Pulsos de aire comprimido	
Caudal de diseño	5886 [ACFM]	
Temperatura de operación min.	Ambiente	
Temperatura de operación máx.	120 [°C]	
Arreglo (#válvulas x #mangas)	6 x 12	
Mangas	Tipo	Snap band
	Diámetro	150 [mm]
	Longitud	3000 [mm]
	Diámetro agujero	160 [mm]
	Espesor placa	4,76 [mm] (3/16")

	Tela filtrante	Poliéster
	Cantidad	72
	Área total filtrante	1096 [ft2]
	Relación de filtración	5,37 [ft/min]

Fuente. Catálogo D&F S.A.

6. ANÁLISIS DE COSTOS DEL DISEÑO DE UN SISTEMA DE DESEMPOLVADO POR FILTRO DE MANGAS TIPO PULSE JET PARA EL ÁREA DE MOLIENDA DE LA EMPRESA CEMEX S.A. PLANTA CEMENTO BUCARAMANGA.

Se realiza un análisis de costos necesario para que indique el monto de dinero que se necesita para llevar a cabo el proyecto, además se obliga a pensar de una forma más detallada y rigurosa sobre las consecuencias de la buena planificación de actividades. Este análisis también ayuda a controlar los ingresos y los gastos que se van a tener.

El presupuesto, por lo general debe cubrir áreas como gastos de personal, materiales y entrenamiento o capacitaciones para llevar a cabo la implementación del proyecto. A continuación, se presenta un presupuesto aproximado que tendría que cubrir la empresa CEMEX S.A. para la puesta en marcha del proyecto, tomando como base las cotizaciones hechas por los proveedores y el criterio de costos basados en costos directos e indirectos.

6.1. COSTOS DIRECTOS

Son aquellos que provienen de los recursos directamente atribuibles al proyecto como tal, estos son: mano de obra, maquinaria, materias primas, entre otros.

En el caso de este proyecto, la gran parte de los ductos se estandarizó con las medidas comerciales para reducir costos de materiales y mano de obra externa. Los ductos que comprenden la chimenea y la salida del ventilador, serán fabricados por medio del proceso de roldado de lámina de acero A-36 de espesor 5 [mm].

Este material se cotizó con la empresa PROMOIN LTDA., el cual es un proveedor directo de la empresa.

Para el procedimiento de lámina a utilizar, se hizo mediante el área proyectada o desarrollo de los ductos por tramos como se plantea de la siguiente forma:

$$P_{duc} = 2\pi \left(\frac{D_{duc}}{2} \right) \quad \textbf{Ecuación (24)}$$

Dónde:

P_i = Perímetro del ducto.

D_t = Diámetro característico del ducto.

Conociendo P_{duct} se procede a multiplicar por la longitud del tramo (Li) Dándonos el valor del área a utilizar en la lámina (A_{Li})

$$A_{Li} = P_{duct} * Li \quad \textbf{Ecuación (25)}$$

Donde posteriormente procedemos a calcular el número de lámina de la siguiente forma:

$$N_{Láminas} = \frac{\sum A_{Li}}{A_{Lámina}} \quad \textbf{Ecuación (26)}$$

Ductería y accesorios

Tabla 21. Costo de los lotes de ductos y accesorios para fabricación y montaje.

DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	VALOR TOTAL
Fabricación y montaje de ductos, codos y bridas banda dosificadora Caliza y Banda Alimentadora	1	\$ 8'760.000
Fabricación y montaje de ductos, codos y bridas del Molino 2 y bandas dosificadoras de Clinker y yeso.	1	\$ 7'600.000
Fabricación y montaje de 5 campanas de succión en lámina 3/16" HR.	1	\$ 6'600.000
Fabricación y montaje de ducto y codos de succión y descarga del ventilador.	1	\$ 8'870.000
	COSTO TOTAL	\$ 31'830.000

Filtro, ventilador y válvula.

Tabla 22. Costo de los equipos del sistema de desempolvado.

DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	VALOR CON IVA INCLUIDO
Filtro de mangas marca D&F Capacidad 5886 [ACFM]	1	\$ 81' 200.000
Ventilador centrífugo marca D&F serie AH2019 Arr4 con motor de 20 [Hp].	1	\$ 25' 520.000
Válvula rotatoria del sistema de descarga con capacidad de 5 [lt/rev].	1	\$ 7' 192.000
	COSTO TOTAL	\$ 113' 912.000

Tabla 23. Costo de la tela filtrante.

DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	VALOR CON IVA INCLUIDO
Mangas de Poliéster	72	\$394.480,30
COSTO TOTAL		\$ 394.480,30

- ✓ **Costos de equipo y herramientas:** Corresponde al costo de horas de la maquinaria en función de su vida económica o el costo por herramientas manuales utilizadas en la ejecución del trabajo.

Para este caso, no se tendrán en cuenta los costos de horario que representa el alquiler de equipo pesado y otros equipos asociados con el montaje, sino que se basará en el costo mínimo correspondiente a herramienta menor. Estos equipos están presentes en la planta como activos, pero por razones académicas se presentarán estos costos como la firma encargada en el montaje e instalación del sistema.

Tabla 24. Costo de equipos y herramientas.

DESCRIPCIÓN	COSTO POR HORA	HORA - EQUIPO	COSTO TOTAL
Herramientas menores	\$ 40.000	48	\$ 1'920.000
Costo de cargador 950 CAT, para el transporte del filtro al interior de la planta.	\$ 230.000	3	\$ 690.000
Equipo de soldadura.	\$ 50.000	20	\$ 1'000.000
Grúa P&H con capacidad de 20 [Ton].	\$ 450.000	5	\$ 2'250.000
Andamio modular	\$ 30.000	36	\$ 1'080.000
	COSTO TOTAL		\$ 6'940.000

✓ **Costos de mano de obra:** La estimación de la mano de obra para la ejecución del proyecto representa un problema dinámico y sumamente complejo, ya que depende de parámetros como procedimientos constructivos de la instalación, herramientas, tecnología de montajes, entre otros. Esta complejidad varía también en la dificultad del montaje, la magnitud del proyecto, el riesgo o la seguridad en el proceso de implementación y puesta en marcha.

La empresa CEMEX planta cemento Bucaramanga cuenta con el equipo de mano de obra y talento humano capacitado para este tipo de montajes, permitiendo que la participación de terceros en el montaje sea mínima, sin embargo, para determinar el costo estimado de la mano de obra, se tomó como base el salario mínimo por ley de acuerdo a las categorías ocupacionales del actual año 2016, para proveer un valor estimado.

TIEMPO PRESUPUESTADO PARA EL MONTAJE:

5 A 7 DÍAS (cada día con 2 turnos de 8 horas).

Para programar el montaje del sistema de desempolvado se debe poseer el inventario suficiente de cemento en silo que garantice el ensacado del mismo como función de la demanda de este producto en el mercado. Suponiendo que se instalará el sistema en el tiempo promedio (6 días), serán 12 turnos, con lo que el costo será de:

Tabla 25. Costo de la mano de obra.

DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	SALARIO x TURNO DE 8h	IGUAL A	COSTO TOTAL
Ingeniero de montaje.	1	0,2 s.m.m.v.	\$138.000	\$1.656.000
Técnico electrónico.	1	0,046 s.m.m.v.	\$31.600	\$379.200
Técnico mecánico.	3	0,046 s.m.m.v.	\$31.600	\$1.137.600
Ayudantes mecánicos y soldadores.	5	0,034 s.m.m.v.	\$23.000	\$1.380.000
VALOR TOTAL				\$4.552.800

✓ **Costo del Transporte:** Estos costos están relacionados con el traslado del filtro de mangas seleccionado junto con el ventilador y su motor y la válvula rotatoria, desde la empresa D&F (Diseño y Fabricación de maquinaria) S.A, que se encarga de proveer estos equipos y está ubicada en el municipio de Envigado – Antioquia, hasta la planta CEMEX Bucaramanga. Por lo tanto, el costo del flete terrestre será:

Tabla 26. Costo del transporte.

DESCRIPCIÓN	COSTO DE TRANSPORTE	CANTIDAD	COSTO TOTAL
Filtro de mangas, ventilador centrífugo, válvulas rotatorias.	\$ 1'800.000	1	\$ 1'800.000

6.2. COSTOS INDIRECTOS

Son aquellos que comprenden el proyecto en general y no de una tarea específica, necesitan de una imputación. En estos encontramos, seguridad, administración, trámites legales y administrativos.

Tabla 27. Costos indirectos.

DESCRIPCIÓN	COSTO	PORCENTAJE
Dirección de montaje.	\$ 3'500.000	36.08%
Seguros de transporte.	\$ 400.000	4.12%
Política de prevención de accidentes.	\$ 1'250.000	12.89%
Costos financieros (procesos administrativos).	\$ 1'100.000	11.34%
Transporte de personal.	\$ 950.000	9.80%
Alimentación del talento humano de montaje.	\$500.000	5.15%
Costo e imprevistos (entre 8% y 10% de los costos indirectos)	\$ 2'000.000	20.62%
COSTO TOTAL	\$9'700.000	100%

6.3. COSTO TOTAL DEL PROYECTO.

El costo total que se estima para la implementación del nuevo colector de polvos para el área de molienda de la planta CEMEX S.A. Bucaramanga, se representa en la sumatoria de los costos directos e indirectos basados en los siguientes servicios:

- Instalación y montaje de filtro de mangas.
- Instalación de ductos y accesorios.
- Instalación y montaje del sistema de potencia motor – ventilador.

- Instalación y montaje de tablero con control PLC.
- Instalación y montaje de pasamanos y escalera.

COSTO TOTAL APROXIMADO DEL PROYECTO	\$ 169'129.280
--	-----------------------

7. ANÁLISIS DE RESULTADOS

La siguiente tabla muestra de manera resumida los resultados obtenidos.

Tabla 28. Análisis de los diseños de ductos y accesorios.

CONDUCTO	DIAM. [In]	LONG. [m] (tramo recto)	ACCESORIOS	
			CODOS	UNIONES
CALIZA	7	5	3 a 90°	1 a 30° Ductos laterales
CLINKER	7	5	3 a 90°	
BANDA A.	7	5	3 a 90°	
YESO	7	5	3 a 90°	1 a 45° Ductos laterales
MOLINO2	7	5	3 a 90°	
VENTILADOR	15	7	2 a 90°	-
CHIMENEA	14	15	-	-

OBSERVACIÓN: Se evidencia que el diámetro del ducto comunicador del ventilador y el filtro es ligeramente mayor que el diámetro de la chimenea. esto es debido a que el caudal de salida por la chimenea disminuye por causa de los drenajes presentes en la misma.

Tabla 29. Análisis y resumen de los módulos del sistema de desempolvado.

MÓDULO	COMPONENTES
M. DE LIMPIEZA	<ul style="list-style-type: none"> • Filtro de Mangas: 5886 [CFM] de capacidad. • Mangas filtrantes de Poliéster: Serán 72 mangas de 150 mm de diámetro y 3 m de longitud. • Válvula de diafragma. • Placa espejo con disposición de 6x12. • Venturi y flautas. • Canastillas donde se alojan las mangas. • Chimenea: Será de 14 [in] de diámetro y 15 [m] de alto.
M. DE TRANSPORTE	<ul style="list-style-type: none"> • Ductos transportadores de 7 [in] de diámetro y espesor de 3/16" Ver tabla 26. • Codos y ramificaciones. • Ducto ventilador-filtro: Será de 15 [in] de diámetro y 7 [m] de longitud, construido con lámina de 3/16". • Campanas Extractoras: Serán 5 en total, construidas con lámina de 3/16". Ver Tabla 13. • Válvula Rotatoria: De 5 [lt/rev] a 21 [RPM]
M. DE POTENCIA	<ul style="list-style-type: none"> • Motor trifásico de 60 Hz, 20 [HP] y 1800 [RPM]
M. DE CONTROL	<ul style="list-style-type: none"> • Contará con un tablero de control PLC que será programado con LOGO, en donde se garantiza el control de los pulsos de limpieza, los niveles de corriente del motor, entre otros. • Manómetro diferencial: Para la medición de la presión del sistema.
M DE ALIMENTACIÓN	<ul style="list-style-type: none"> • Línea de aire comprimido a 80 [PSI] constante. • Suministro de electricidad: Línea de 440V para arrancador de motor. • Línea de 120V para energizar la tarjeta de control del filtro.

8. CONCLUSIONES

- ✓ Se cuenta con un colector de 72 mangas de disposición 6x12, con una capacidad de 5886 CFM para la captura de material particulado de 5 focos de emisión. Las características físicas de los materiales a captar son:
 - Cemento: cuenta con un tamaño de 45 micras, el cual se mide a partir de la prueba de tamizado, el material retenido es del 8% por vía húmeda en el tamiz de 45 micras (No. 325).
 - Yeso, caliza y Clinker: tienen un tamaño de 75 micras y queda un porcentaje de retención entre el 10 - 15 % del material en el tamiz número 200.

Estás pruebas se hacen a partir de la Normativa Técnica Colombiana (NTC) 121. Especificaciones técnicas de desempeño para cemento hidráulico (anteriormente llamado Portland tipo I) y NTC 33 Ingeniería civil y arquitectura. Método para determinar la finura del cemento hidráulico por medio del aparato Blaine de permeabilidad al aire).

Por lo tanto, se decide escoger mangas filtrantes de poliéster las cuales cumplen con las condiciones requeridas para lograr un buen filtrado del material, además las válvulas solenoides usadas para la limpieza de la misma utilizarán una presión de 80 [PSI] para lograr una limpieza eficiente.

Para visualizar las pruebas de granulometría y revisar las características generales del cemento hidráulico para construcción general Tipo UG elaborado por Cemex Colombia, ir a *Anexos*.

- ✓ Para la compra de la tela filtrante de poliéster, la cual tiene un valor de 1 [dólar/ft³], se necesitan 134,6 [ft³] (3,6 [m³]). Luego el valor de las 72 mangas necesarias es de 134.6 dólares o \$394.480,30 COP.

- ✓ Para la implementación del proyecto se debe hacer compra de:
 - 25 [m] lineales de ductería de 7 [in] de diámetro y espesor de 3/16" para los ductos transportadores.
 - 15 [m] lineales de ductería de 14 [in] de diámetro y espesor de 3/16" para la chimenea.
 - 20,85 [m²] de lámina de espesor de 3/16" para la construcción de las campanas extractoras.
 - 18,82 [m²] de lámina espesor de 3/16" para la construcción del ducto que va del ventilador al filtro.

Lo cual tiene un valor aproximado de: \$31'830.000.

- ✓ El valor total para la fase de implementación, es decir, compra y montaje del sistema de desempolvado para el área de molienda es aproximadamente \$169'129.280 COP.
- ✓ El diseño del sistema fue realizado teniendo en cuenta las normas ambientales dictaminadas por el Ministerio de ambiente, vivienda y desarrollo territorial, así como las normas de diseño para sistemas de ventilación.
- ✓ Se realizó el manual de funcionamiento instructivo de operación y labores de mantenimiento del sistema de desempolvado, para que una vez implementado el proyecto se realice un seguimiento que permita mantener el sistema en buen estado mediante una óptima operación y un mantenimiento correcto. *Ver Anexos.*

- ✓ Se realizaron y entregaron los planos mediante la herramienta informática SolidWorks correspondientes al sistema de desempolvado, permitiendo que la compañía pueda enviarlos para construcción y/o compra de materiales y de esta manera, evitar inconvenientes futuros a la hora de su montaje. Ver *Anexos*.

9. RECOMENDACIONES

- ✓ Se sugiere a la compañía, que en el momento en que se pueda implementar este sistema de colección de polvos en el área de molienda sigan las recomendaciones al pie de la letra para evitar futuras ineficiencias del sistema, además se debe usar el manual de usuario y las sugerencias allí estipuladas para un mantenimiento adecuado del filtro que garantice la eficiencia de su funcionamiento y la vida útil de sus principales componentes, los cuales comprenden, mangas, canastillas, válvulas, ductos, accesorios.
- ✓ Se recomienda estar al margen de las normas ambientales interpuestas por el Sistema de Gestión Ambiental (SGA) de la planta Bucaramanga, el cual contempla unas emisiones permitidas de 250 PPM, además de realizar cada año el estudio de emisiones por parte de la autoridad ambiental. Esto con el fin de evitar sanciones ambientales.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] FERNÁNDEZ SANDOVAL, Edwin. Mejoras en la eficiencia de los colectores de polvo tipo jet pulse y precipitador electrostático. Tesis de Ingeniería Mecánica. Piura: Universidad de Piura, Facultad de Ingeniería, 2008. 189 p.

[2] VENTEC AMBIENTAL EQUIPAMENTOS E INSTALACIONES LTDA. Manual técnico de instalación, operación y mantenimiento, Filtro de Mangas. Brasil, 2011. 16 p.

[3] ARIAS LLORENTY, Juan Andrés. Auditoría al sistema de desempolvado del área de trituración de Caliza en la Planta Cerro Blanco de Holcim Ecuador S.A. Tesis de Ingeniería Mecánica. Guayaquil: Escuela Superior Politécnica del Litoral, Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la Producción, 2006. 213 p.

BIBLIOGRAFÍA

ESCODA, S. Manual Práctico de Ventilación. 2 ed. Barcelona: Salvador Escoda S.A., 2009. 137 p.

GOBERNA, Ricardo. Ventilación industrial, primera edición. Madrid. Generalitat Valenciana, 1992. 408p.

ROBERTS ALLEY, E & Associates Inc. Manual de Control de la Calidad del Aire. México: McGraw Hill, 2001.

SANJUÁN BARBUDO, Miguel Ángel y CHINCHÓN YEPES, Servando. Introducción a la fabricación y normalización del cemento portland. Primera edición. San Vicente del Raspeig: Universidad de Alicante, 2014. 181 p.

SOLER & PALAU. Manual Práctico de Ventilación. Brasil: Ventilation Group, 2012.