

**REDISEÑO Y REPOTENCIACION DEL SISTEMA DE DESEMPOLVADO DEL
ÁREA DE EMPACADO DE LA EMPRESA CEMEX COLOMBIA S.A PLANTA
CEMENTO BUCARAMANGA**

**JOSE PABLO PADILLA ARRIA
JAVIER CAMILO RAMIREZ ALVAREZ**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICO-MECANICAS
ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA
BUCARAMANGA**

2016

**REDISEÑO Y REPOTENCIACION DEL SISTEMA DE DESEMPOLVADO DEL
ÁREA DE EMPACADO DE LA EMPRESA CEMEX COLOMBIA S.A PLANTA
CEMENTO BUCARAMANGA**

**JOSE PABLO PADILLA ARRIA
JAVIER CAMILO RAMIREZ ALVAREZ**

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

**Director
JAVIER RUGELES PEREZ
Ingeniero Mecánico**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICO-MECANICAS
ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA
BUCARAMANGA**

2016

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, a nuestros padres por su apoyo incondicional para lograr cumplir cada uno de los propósitos y por los valores que nos inculcaron para formarnos como personas.

A nuestros compañeros por su leal amistad, consejos y apoyo durante las dificultades que se presentaron.

A la Universidad Industrial de Santander y la Escuela de Ingeniería Mecánica por brindarnos las mejores bases para formarnos como profesionales.

Al ingeniero Yesid Álvarez por confiar y darnos la oportunidad de realizar nuestro proyecto en la planta de CEMEX S.A. Bucaramanga bajo su dirección.

Y al director por su experiencia y consejos durante el desarrollo de la tesis.

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN.....	20
1 DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO	15
1.1 IDENTIFICACIÓN DEL PROBLEMA	21
1.2 JUSTIFICACIÓN DEL PROBLEMA	23
1.3 JUSTIFICACIÓN DE LA SOLUCIÓN	23
1.4 OBJETIVOS	24
1.4.1 Objetivo general	24
1.4.2 Objetivos específicos	24
2 SISTEMA DE DESEMPOLVADO	26
2.1 EQUIPOS PARA DEPURACION DE AIRE.....	27
2.1.1 Filtros de mangas tipo Pulse Jet	28
2.1.2 Ciclones.....	31
2.1.3 Cámaras de separación gravitatoria	32
2.2 CAMPANAS DE EXTRACCIÓN.....	32
2.2.1 Tipos de campanas de extracción.....	33
2.3 VENTILADORES.....	34
2.3.1 Ventiladores Axiales.....	35
2.3.2 Ventiladores Centrífugos.....	35
2.4 SELECCIÓN DE VENTILADORES.....	36
2.5 MECANISMOS DE DESCARGA.....	37
2.6 TERMINOLOGIA USADA EN EL CONTROL DE CONTAMINACIÓN AMBIENTAL	37
2.6.1 CFM 38	
2.6.2 Pleno	38
2.6.3 Presión Estática	38
2.6.4 Presión Dinámica	38

2.6.5 Presión Diferencial	38
2.6.6 Relación Aire-Tela	38
2.6.7 Capa de polvo	39
2.6.8 Colectores de presión positiva y negativa	39
3 PARAMETROS PRINCIPALES DE DISEÑO Y METODO DE SELECCIÓN DE LOS EQUIPOS PARA LA COLECCIÓN DE POLVOS	40
3.1 DUCTOS	40
3.2 FILTROS	41
3.3 VENTILADORES	45
3.3.1 Criterios de funcionamiento de Ventiladores Centrífugos	46
4 EVALUACIÓN DE LAS CONDICIONES DE FUNCIONAMIENTO EN EL SISTEMA DE DESEMPOLVADO ACTUAL	47
4.1 CÁLCULOS A PARTIR DE MEDIDAS DE PRESIÓN	50
4.2 CÁLCULOS A PARTIR DE MEDIDAS DE VELOCIDAD	57
4.3 CÁLCULOS A PARTIR DE LA ECUACIÓN DE CONTINUIDAD	60
5 SIMULACIÓN DE LAS CONDICIONES ACTUALES DEL SISTEMA MEDIANTE EL SOFTWARE CASALS	64
5.1 DESCRIPCIÓN DEL SOFTWARE CASALS VENTILACIÓN	64
5.2 USO DE ACCESORIOS GENÉRICOS EN SISTEMAS EQUIVALENTES	65
5.3 MODELAMIENTO DEL SISTEMA DE DESEMPOLVADO ACTUAL	75
5.3.1 Primera sección del sistema de desempolvado	75
5.3.2 Segunda sección del sistema de desempolvado	77
5.3.3 Filtro y ventilador del sistema de desempolvado	79
6 ANÁLISIS DE LAS EMISIONES DE CONTAMINANTES DEL AREA DE EMPACADO	84
6.1 COMPARACIÓN DE LAS EMISIONES DE EMPAQUE CON LO ESTIPULADO CON LA NORMA.....	85

6.2 ESTUDIO DEL TAMAÑO DE PARTICULAS, CONCENTRACIÓN Y EFICACIA DE DEPURACIÓN DEL AIRE CONTAMINADO	91
7 PROPUESTA DE REDISEÑO DEL SISTEMA DE DESEMPOLVADO A PARTIR DE LOS REQUERIMIENTOS REGISTRADOS EN LA EVALUACIÓN DEL AREA... ..	97
7.1 REDISEÑO DE DUCTOS A PARTIR DE CAUDALES Y VELOCIDADES	97
7.1.1 Punto de medida 1	99
7.1.2 Punto de medida 2	102
7.1.3 Punto de medida 4	102
7.1.4 Punto de medida 6*	103
Con el área calculada, se usa la expresión 24 para hallar el nuevo diámetro.	103
7.1.5 Punto de medida 7	103
7.1.6 Punto de medida 8	104
7.2 REDISEÑO DEL FILTRO DE MANGAS	104
7.2.1 Diseño de difusor en la entrada del filtro	106
7.2.2 Implementación de deflectores a la entrada del filtro	108
7.2.3 Relación Aire-Tela	111
7.3 SELECCIÓN DEL VENTILADOR A PARTIR DE LOS NUEVOS REQUERIMIENTOS EN EL SISTEMA DE DESEMPOLVADO	112
8. CONCLUSIONES.....	116
9. RECOMENDACIONES	112
BIBLIOGRAFÍA	119

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Área de empackado CEMEX S.A planta cemento Bucaramanga.	22
Figura 2. Sistema de desempolvado con filtro de mangas.	27
Figura 3. Componentes de filtros de mangas.	30
Figura 4. Separador Ciclónico.	31
Figura 5. Separador gravitacional.	32
Figura 6. Esquema campana tipo cabina.	33
Figura 7. Esquema campana tipo exterior simple.	34
Figura 8. Ventilador centrifugo industrial de presión media.	35
Figura 9. Esquema manga filtrante.	42
Figura 10. Esquema distribución ideal entre mangas.	43
Figura 11. Esquema Flauta-Mangas.	45
Figura 12. Fotografía del filtro de magas junto al ventilador centrifugo.	47
Figura 13. Fotografía del filtro de mangas empaque cemento.	48
Figura 14. Fotografía del ventilador del filtro de mangas empaque.	49
Figura 15. Plano del sistema de desempolvado actual en el área de empackado. .	50
Figura 16. Instrumentos de medición de presión manómetro y tubo pitot.	51
Figura 17. Interpolación del factor de corrección por densidad.	54
Figura 18. Campana tipo cabina (punto de medida 2).	57
Figura 19. Instrumento de medición de velocidad anemómetro.	58
Figura 20. Circuito puntos de medida 6* y 7.	66
Figura 21. Cálculo del ventilador para puntos de medida 6* y 7.	66
Figura 22. Informe del ventilador para puntos de medida 6* y 7.	67
Figura 23. Accesorio genérico de CASALS.	68
Figura 24. Circuito con accesorio genérico.	69
Figura 25. Cálculo del ventilador con accesorio genérico.	69
Figura 26. Informe del ventilador con accesorio genérico.	70

Figura 27. Circuito de puntos de medida 6* y 7 para Q= 0,2 [m ³ /s].	71
Figura 28. Circuito con accesorio genérico para Q= 0,2 [m ³ /s].	71
Figura 29. Circuito de puntos de medida 6* y 7 para Q= 0,4 [m ³ /s].	72
Figura 30. Circuito con accesorio genérico para Q= 0,4 [m ³ /s].	72
Figura 31. Circuito de puntos de medida 6* y 7 para Q= 0,6 [m ³ /s].	73
Figura 32. Circuito con accesorio genérico para Q= 0,6 [m ³ /s].	73
Figura 33. Grafica de Caudal vs Presión total.	74
Figura 34. Circuito para puntos de medida 1, 2 y 4.	76
Figura 35. Informe del ventilador de la primera sección.	76
Figura 36. Circuito para puntos de medida 5, 6, 6*, 7, 8 y 9	78
Figura 37. Informe del ventilador de la segunda sección.	78
Figura 38. Circuito del filtro de mangas y ventilador.	80
Figura 39. Informe del ventilador del filtro de mangas empaque.	81
Figura 40. Entrada de datos para la selección del ventilador.	82
Figura 41. Opción seleccionada de la lista de ventiladores.	82
Figura 42. Características del ventilador seleccionado.	83
Figura 43. Actividades industriales y contaminantes a monitorear por actividad industrial.	85
Figura 44. Comparación de las emisiones de empaque con la tabla 19.	90
Figura 45. Grafica de tamaño de partícula, concentración y eficacia de depuración.	92
Figura 46. Eficacia del filtro según el tamaño de partícula.	93
Figura 47. Procedimiento para hallar tamaño de grano en el efluente.	95
Figura 48. Guillotina y placa orificio.	100
Figura 49. Tubos de llenado de la maquina empacadora 1.	101
Figura 50. Punto de colección 8 en banda transportadora.	104
Figura 51. Entrada del filtro de mangas.	106
Figura 52. Modelado de filtro de mangas actual.	107
Figura 53. Modelado de la modificación propuesta al filtro de mangas.	108
Figura 54. Filtro de mangas con plancha deflectora.	109

Figura 55. Filtro de mangas con deflectores.	110
Figura 56. Parámetros de instalación de deflectores.	111
Figura 57. Informe del nuevo ventilador requerido.....	114
Figura 58. Características del nuevo ventilador.	115

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Tipos de ventiladores: características y aplicaciones.	36
Tabla 2. Clasificación de calibres para ductos circulares.....	40
Tabla 3. Filtro de mangas empaque cemento.	48
Tabla 4. Ventilador del filtro de mangas empaque.....	49
Tabla 5. Instrumentos de medición de presión.	51
Tabla 6. Datos de presión dinámica y estática para el punto de medida 6.....	52
Tabla 7. Valores obtenidos para los puntos de medida.	56
Tabla 8. Instrumento de medición de velocidad.....	58
Tabla 9. Medidas de velocidad para el punto de colección 2.....	59
Tabla 10. Valores obtenidos para el punto de medida 2.....	60
Tabla 11. Valores obtenidos para el punto de medida 4.....	63
Tabla 12. Caudal y presión para circuito de puntos de medida 6* y 7.....	74
Tabla 13. Caudal y presión para circuito con accesorio genérico.....	74
Tabla 14. Valores para el accesorio genérico 1.....	77
Tabla 15. Valores para el accesorio genérico 2.....	79
Tabla 16. Valores para el accesorio genérico del filtro de mangas.....	80
Tabla 17. Resumen de resultados del estudio.....	86
Tabla 18. Emisiones registradas para el área de empaque.....	89
Tabla 19. Estándares de emisión admisibles según Artículo 28.....	90
Tabla 20. Velocidad y caudal en los puntos de medida.....	98
Tabla 21. Puntos de medida con nuevos valores para rediseño.....	112
Tabla 22. Nuevos valores para accesorio genérico 1.....	113
Tabla 23. Nuevos valores para accesorio genérico 2.....	113
Tabla 24. Nuevos valores para accesorio genérico del filtro.....	113

LISTA DE ANEXOS¹

Anexo A. Criterios y recomendaciones de Cemex.

Anexo B. Planos de entrada del filtro.

Anexo C. Informe de ventiladores generados por la herramienta Casals.

Anexo D. Características de instrumentos de medición.

¹ Ver anexos en carpeta adjunta en CD.

RESUMEN

TÍTULO: REDISEÑO Y REPOTENCIACIÓN DEL SISTEMA DE DESEMPOLVADO DEL ÁREA DE EMPACADO DE LA EMPRESA CEMEX COLOMBIA S.A PLANTA CEMENTO BUCARAMANGA*

AUTORES: JOSE PABLO PADILLA ARRIA**
JAVIER CAMILO RAMIREZ ALVAREZ**

PALABRAS CLAVE: REDISEÑO, REPOTENCIACIÓN, FILTRO DE MANGAS, VENTILACIÓN INDUSTRIAL, POLUCIÓN, MEDIO AMBIENTE.

DESCRIPCIÓN

La industria del cemento es de vital importancia para el desarrollo infraestructural del país ya que es un elemento esencial en la construcción de edificaciones. La reconocida empresa CEMEX COLOMBIA S.A hace presencia en la ciudad de Bucaramanga con una planta en donde se realizan todos los procesos que se llevan en la producción del cemento.

Por el crecimiento y la exigente producción que aborda esta industria, la empresa tiene entre su filosofía optimizar constantemente sus procesos. Es por esto que se va a desarrollar el siguiente proyecto, presentando un rediseño del sistema de

* Tesis de grado.

** Facultad de Ingenierías Físico-mecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica. Director: Ing. Javier Rúgeles Pérez.

desempolvado o de colección de polvo en el área de empaçado de la empresa CEMEX COLOMBIA S.A planta cemento Bucaramanga.

El empaque del cemento es el último proceso que se realiza antes de proceder a su distribución, y este se lleva a cabo en el área en la que se va desarrollar el presente proyecto. El transporte del cemento a cada uno de los elementos que intervienen en el empaçado de este, difunden al ambiente material particulado inherente al proceso. Para mitigar esto se utiliza un sistema de desempolvado compuesto por campanas de extracción, ductos, filtro de mangas y ventilador. Al proponer el rediseño de dicho sistema, se busca mejorar el funcionamiento de este y corroborar que se cumpla con la normativa ambiental de emisión de contaminantes, contribuyendo con la misión de la Universidad Industrial de Santander de formar ingenieros con calidad humana y preocupados por las condiciones del medio ambiente y la integridad de la población.

ABSTRACT

TITLE: REDESIGN AND REPOWERING OF THE DUST SYSTEM ON THE CEMEX S.A PACKING AREA PLANT BUCARAMANGA*

AUTHORS: JOSE PABLO PADILLA ARRIA**
JAVIER CAMILO RAMIREZ ALVAREZ**

KEYWORDS: REDESIGN, REPOWERING, BAGHOUSE, INDUSTRIAL VENTILATION, POLLUTION, ENVIRONMENT.

Cement industry is vitally important to the development of the country's infrastructure, since this material is an essential element in the construction field. The well-known company CEMEX COLOMBIA S.A makes presence in Bucaramanga city with one cement production plant where all the processes are taking place.

Due to the process and exigent production that this industry includes, a part of company's philosophy is to constantly optimize its processes. This is the reason for developing this project, which presenting a redesign of the dedusting system in the packing area of the cement plant from the company CEMEX COLOMBIA S.A in Bucaramanga.

* Undergraduate thesis.

** Physical-mechanical Engineering Faculty. Mechanical Engineering School. Director: Ing. Javier Rúgeles Pérez.

The packing of the cement is the last process that is done before this to be distributed, and this is taking place in the area where the project is going to develop. The transportation of the cement to each one of the elements that take part in the packing of it, diffuses a lot material from the process to the environment. In order to reduce this, a dedusting system; formed by extraction bells, ducts, sleeve filter and fan, is used. when redesign of this system was proposed, it was looked for the improvement of functioning and to check that all the environmental regulation about contaminant emission is being followed, contributing this way with the mission of the Universidad Industrial de Santander which is to form engineers with human quality and that cares about environment conditions and the integrity of the population.

INTRODUCCIÓN

La industria cementera genera un gran impacto ambiental debido a los procesos de producción que se llevan a cabo en esta, principalmente la contaminación atmosférica causada por las partículas suspendidas en el aire al fabricar el cemento. Esto ha llevado a que el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo territorial (MADV) desarrolle imposiciones legales que regulen la emisión de contaminantes al ambiente para este tipo de empresas.

El empaque es una de las etapas finales que compone el proceso de producción del cemento, el transporte y empaclado de este produce una acumulación de polvo en varios puntos del área. Como consecuencia de esto es necesario removerlo usando un sistema de desempolvado que evite la emisión de partículas sólidas a la atmósfera que resultan nocivas para la salud de los operarios, generan molestias en las poblaciones aledañas y perjudican la agricultura que se desarrolla a los alrededores de la planta ya que las plantaciones pueden cubrirse de una fina capa de polvo.

En el proyecto que se presentará a continuación, se van a evaluar las condiciones actuales del sistema de desempolvado del área de empaclado de la empresa CEMEX COLOMBIA S.A planta cemento Bucaramanga y como respuesta a las exigencias medioambientales que obligan a mejorar y modificar dichos sistemas, se propondrá un rediseño con base en los requerimientos registrados en la evaluación que optimice el funcionamiento de la colección de polvos en el área y que cumpla con las normativas impuestas por el MADV.

1 DESCRIPCION DEL PROYECTO

1.1 IDENTIFICACIÓN DEL PROBLEMA

En el país la demanda en la industria del cemento ha aumentado considerablemente en los últimos años por el rápido crecimiento de infraestructura en todo el territorio nacional. Por esto, las empresas cementeras han tenido que implementar acciones que mejoren su producción y puedan suplir la alta demanda para seguir compitiendo en el mercado.

CEMEX es una compañía que fue fundada en México en 1906 y desde entonces, con un crecimiento continuo, ha logrado ser una de las empresas globales líderes en la industria cementera. Actualmente continúa su trayectoria en la constante búsqueda de soluciones innovadoras para la industria, mejoras en eficiencia y promoviendo un futuro sustentable.

Luego de adquirir grandes cementeras en Venezuela, Estados Unidos y Panamá entre otras, CEMEX hace presencia en Colombia por primera vez en 1996 al adquirir Cementos Diamante y Samper, convirtiéndose en la tercera compañía cementera más grande del mundo. Hoy en día CEMEX ofrece directamente productos de alta calidad y servicios confiables a clientes y comunidades en más de 50 países, y en forma indirecta mantiene relaciones comerciales en aproximadamente 108 naciones.

Las empresas cementeras presentan un gran problema y es la cantidad de polvo que dejan en el ambiente debido a los materiales trabajados, y CEMEX no está exenta de esto. El área de empacado del cemento en la planta de Bucaramanga presenta altos niveles de polución que llevan a inferir que el filtro de mangas del sistema de desempolvado construido para esta sección, no da abasto.

Inicialmente el sistema de desempolvado fue diseñado solo para tres equipos de empaclado; con el paso del tiempo y el crecimiento de la empresa se han instalado más equipos, y hoy en día ya son nueve los que están conectados al mismo filtro instalado desde un principio generando una sobrecarga en este. Además los diseños de los ductos para los nuevos equipos fueron hechos de manera empírica por ingenieros de la empresa, basados en su experiencia y criterio debido a la necesidad de trazar las líneas y comenzar a producir rápidamente.

Figura 1. Área de empaclado CEMEX S.A planta cemento Bucaramanga.



La polución es un problema de gran magnitud en la empresa, ya que pone en riesgo la salud del personal de trabajo, impacta en los alrededores de la planta y con el tiempo puede ir deteriorando los equipos que se encuentran en el área.

El presente proyecto se plantea con el fin de aportar soluciones ingenieriles al problema de la polución en el área de empaclado en CEMEX COLOMBIA S.A.

planta cemento Bucaramanga, aportando de esta forma al desarrollo industrial del país.

1.2 JUSTIFICACIÓN DEL PROBLEMA

El ingeniero mecánico UIS, debe estar capacitado y dispuesto a enfrentarse a nuevos retos cada día, basado en su conocimiento dentro de la academia para ponerlos en práctica en su vida profesional, aportando soluciones a la industria regional, nacional e internacional. El presente tema de proyecto de grado aplicado a la industria de la región, busca fortalecer los lazos entre industria y universidad, dando solución a la necesidad que se presenta en el área de empaçado de la empresa CEMEX COLOMBIA S.A planta cemento Bucaramanga.

Con el rediseño y repotenciando del sistema de desempolvado del área de empaçado, la planta CEMEX de Bucaramanga contará en esta sección con un proceso productivo eficiente y de menor índice de contaminación ambiental, que cumpla la norma de filtrado de la polución y extracción del aire.

Con miras a brindarle a la empresa una solución ingenieril basada en un análisis de diseño y montaje, las alternativas de rediseño se seleccionaran mediante la evaluación del funcionamiento del sistema actual.

1.3 JUSTIFICACIÓN DE LA SOLUCIÓN

Se va a proponer un rediseño que optimice el sistema de desempolvado actual, para que así, la empresa cuente con un proceso de filtración de aire contaminado más eficiente y con el que los índices de polución de material particulado en el área estén por debajo de los límites exigidos por la normativa ambiental. Para la empresa CEMEX S.A es fundamental tener un correcto filtrado del aire contaminado ya que implica principalmente dos cosas; recuperación de producto final (cemento) que es reinsertado al proceso del empaque, lo que representa un

ahorro para la empresa. Y también disminución de contaminantes en el aire expulsado al ambiente.

Cabe resaltar que se tiene que desarrollar una propuesta ingenieril que cumpla con todos los parámetros de los manuales y criterios de la empresa para que sea viable su futura implementación.

1.4 OBJETIVOS

1.4.1 Objetivo general

Proponer un rediseño del sistema de desempolvado del área de empaqueo de la empresa CEMEX COLOMBIA S.A planta cemento Bucaramanga, con el fin de mejorar la eficiencia del sistema de filtrado en esta área y contribuir con la misión de la Universidad Industrial de Santander de formar ingenieros con calidad humana y preocupados por las condiciones del medio ambiente y la integridad de la población.

1.4.2 Objetivos específicos

- Evaluar las condiciones de funcionamiento del equipo de purificación actual a partir de mediciones y procesamiento de datos tales como:
 - Velocidad en ductos.
 - Velocidad de captura.
 - Detección de fugas.
 - Pérdidas de presiones.
 - Flujo de masa transportado.
 - Porcentaje de volumen de desempolve.
 - Capacidad del ventilador.

- Identificar los requerimientos actuales de filtrado y transporte de aire del sistema de desempolvado del área de empaçado, a partir de estimaciones de las emisiones actuales contrastadas con las disposiciones ambientales definidas en el artículo 28 de la Resolución 909 del 5 de junio del 2008.

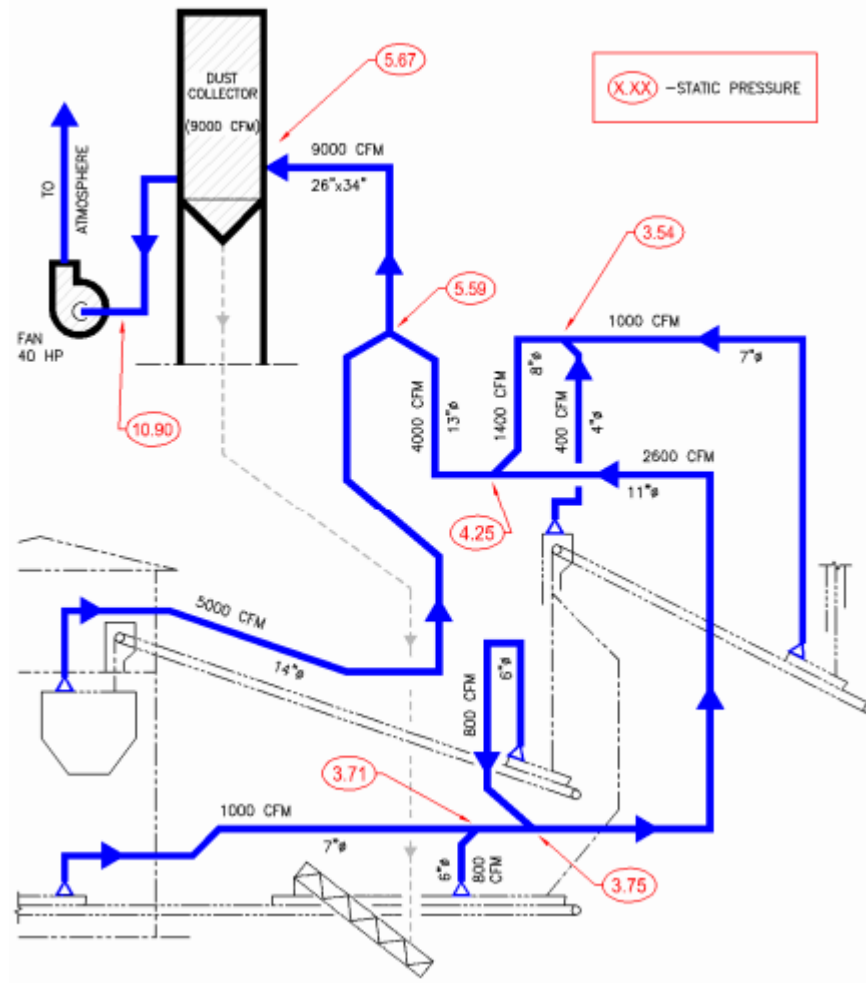
- Presentar un rediseño del sistema de desempolvado a partir de los requerimientos registrados, teniendo en cuenta criterios estipulados en manuales de la empresa y realizando una simulación con ayuda de programas informáticos y en el cual se especifique:
 - Numero de campanas.
 - Trazado de nuevos ductos.
 - Diámetros y longitudes de nuevos ductos.
 - Capacidad del ventilador.
 - efectividad del filtro según sus características. (áreas, dimensiones, número de mangas, ...)

2 SISTEMA DE DESEMPOLVADO

La función principal del sistema de desempolvado es evitar que partículas en suspensión sean liberadas directamente a la atmosfera y reducir la contaminación ambiental generada en los diversos procesos productivos, como: moliendas, fundición, generación de energía, minería, acerías, cementos, procesos de fabricación de plásticos, caucho, alimentos, entre otros. El objetivo es trabajar en pro de un medio ambiente más limpio, con aire sin partículas de polvo en suspensión, y en concordancia con las normatividad ambiental de las emisiones.

En el caso de la industria del cemento, debido a que tanto el producto final como los intermedios son pulverulentos, es inevitable la producción de polvo durante los procesos de trituración y manipulación, por ello la instalación completa de los sistemas de desempolvado adecuados a esta industria como el de la Figura 2, que garanticen la no emisión de partículas de polvo al exterior con los gases desalojados al final de proceso, están conformados por campanas de extracción, ductos de transporte, equipos para depuración de aire, sistema de ventilación, entre otros.

Figura 2. Sistema de desempolvado con filtro de mangas.



Fuente: LOZANO, Ernesto. Auditoria al sistema de desempolvado del área de trituración de caliza en la planta Cerro Blanco de Holcim Ecuador S.A. Guayaquil, 2006.

2.1 EQUIPOS PARA DEPURACION DE AIRE

Los depuradores de aire son equipos que eliminan los contaminantes de una corriente de aire o gas. Existe una amplia gama de diseños capaces de cumplir los más variados requisitos de depuración del aire. El grado de eficacia necesario, la cantidad y características de los contaminantes que deben ser eliminados de la corriente gaseosa y las condiciones de esta influyen en la selección del equipo para una aplicación concreta.

Existen equipos de captación de polvo diseñados de acuerdo con principios de funcionamiento muy diferentes y que ofrecen un amplio abanico de posibilidades en lo que se refiere a eficacia, coste de instalación, coste de operación y mantenimiento, necesidades de espacio y materiales de construcción.

Los principales tipos de captadores de polvo son: filtro de mangas, ciclones de desempolvadura, cámaras de separación gravitatoria y finalmente filtros electrostáticos.

2.1.1 Filtros de mangas tipo Pulse Jet. El filtro de mangas es usado para limpiar el aire del polvo (ver Figura 3), su función consiste en retener y recoger las partículas sólidas que arrastra una corriente de aire inducida por un ventilador, desde los diferentes puntos de captación de la instalación, haciendo pasar dicha corriente a través del tejido de una serie de bolsas (o mangas), el cual se constituye en el medio poroso donde se retienen las partículas sólidas. De esa forma el aire es filtrado antes de ser expulsado a la atmósfera.

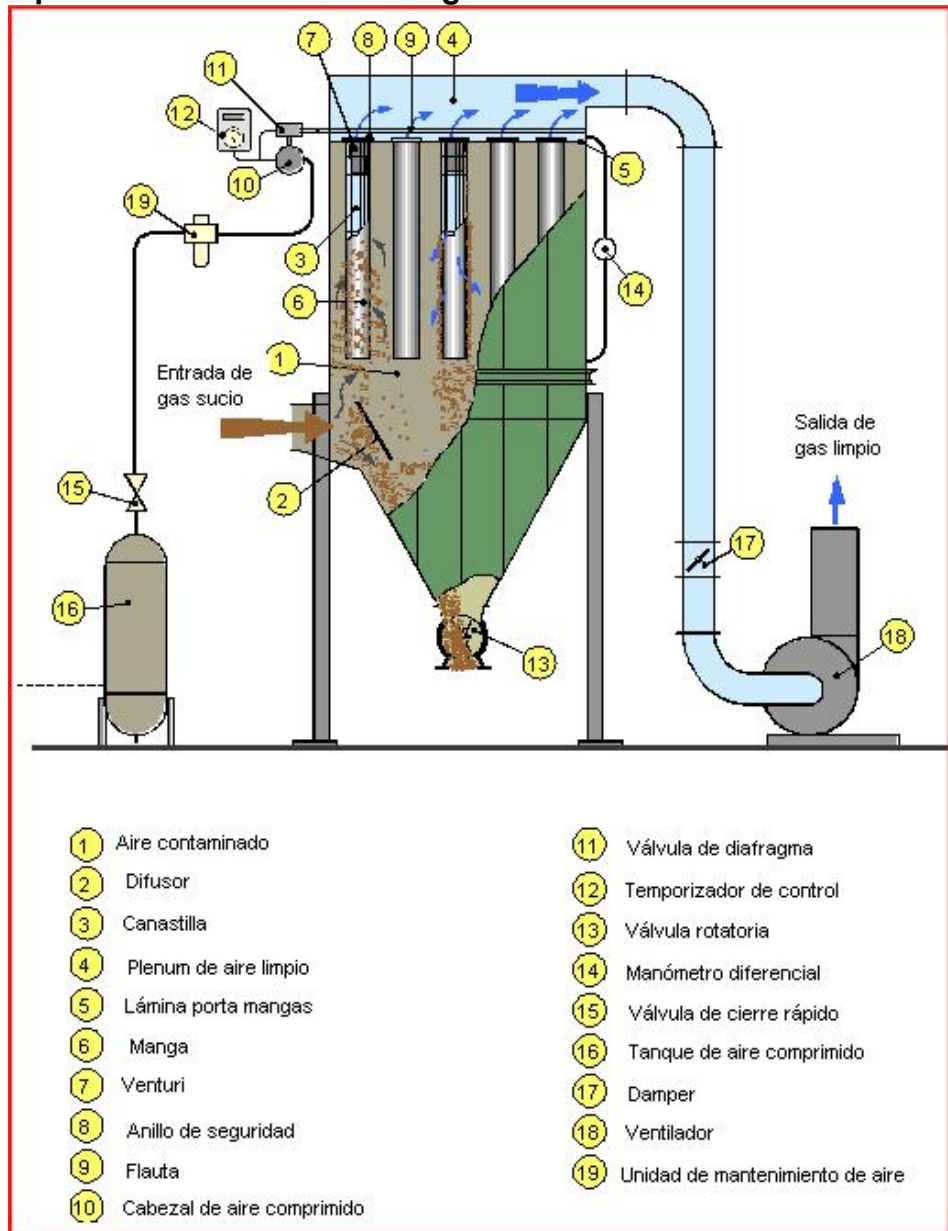
El filtro consta de dos cámaras, la de aire sucio y la de aire limpio, separadas por el medio poroso que retiene el polvo y permite el paso del flujo de aire. Este medio poroso lo forman una serie de mangas soportadas por jaulas metálicas, sostenidas en la parte superior por medio de abrazaderas o bandas a una placa perforada que separa ambas cámaras. Las bolsas se disponen verticalmente dentro de la unidad y tienen un fondo cerrado al flujo del aire.

La masa de polvo adherida a las mangas se va acumulando con lo que aumenta la pérdida de carga del sistema. Para evitar disminuciones en el

caudal es necesario realizar una limpieza periódica de las mangas. La limpieza de las mangas se lleva a cabo mediante la inyección de aire comprimido; introduciendo, en contracorriente y durante un breve periodo de tiempo un chorro de aire a alta presión mediante una tobera conectada a una red de aire comprimido, de esta forma es posible tratar altas concentraciones de polvo con elevadas eficacias.

Mediante este tipo de filtro se pueden tratar mezclas de difícil separación en una unidad compacta y económica, con mayor eficacia que los otros tipos de filtros. Durante el ciclo de limpieza el polvo cae por gravedad en la tolva situada bajo la cámara de aire sucio y es devuelta al circuito, esta recuperación implica una reducción de los costos directos y un máximo aprovechamiento de los recursos evitando también la generación de residuos. El aire limpio fluye por el espacio exterior de las mangas y se lleva por una serie de conductos hacia el ventilador y la chimenea de escape.

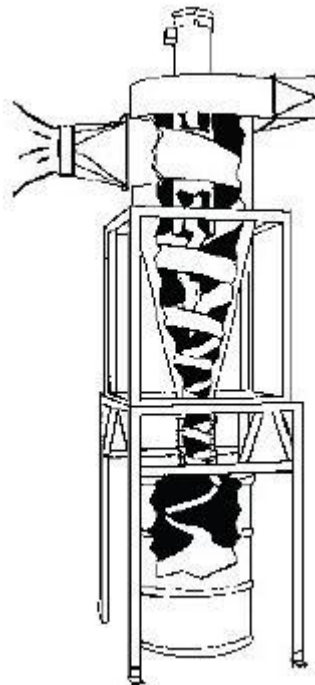
Figura 3. Componentes de filtros de mangas.



Fuente: Consideraciones para el diseño de sistemas colectores de mangas. Holcim Design Criteria.

2.1.2 Ciclonos. Están compuestos de dos partes principales, un cilindro y un cono en la parte inferior. Los gases polvorientos entran tangencialmente en la cabeza moviéndose en forma espiral guiados por la pared cilíndrica y luego la cónica del ciclón hacia abajo. La fuerza centrífuga separa las partículas de los gases porque son más densas que el gas, empujándolas contra las paredes donde la gravedad y el torbellino exterior descenden los impulsa hacia la salida en el fondo del ciclón. La eficiencia de un ciclón es inversamente proporcional a su diámetro, pero proporcional a la velocidad de los gases.

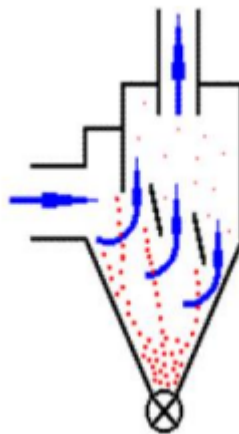
Figura 4. Separador Ciclónico.



Fuente: Modelamiento y simulación del funcionamiento de un separador ciclónico.

2.1.3 Cámaras de separación gravitatoria. Son grandes espacios cerrados que funcionan bajando la velocidad de flujo de los gases polvorientos a limpiar. Las partículas pierden flotabilidad y desciende para ser coleccionadas. A veces están equipadas con deflectores que acortan el camino de separación. No son muy eficaces y por lo general se emplean como instalación previa a colectores más eficientes. Si se busca más eficiencia, la longitud de la cámara de separación gravitacional será muy larga y excederá los 35 metros. No contiene partes móviles y por lo tanto son baratas y fáciles de mantener. Lo único que debe atender es el desgaste interior causado por fricción con las partículas si las mismas son abrasivas.

Figura 5. Separador gravitacional.



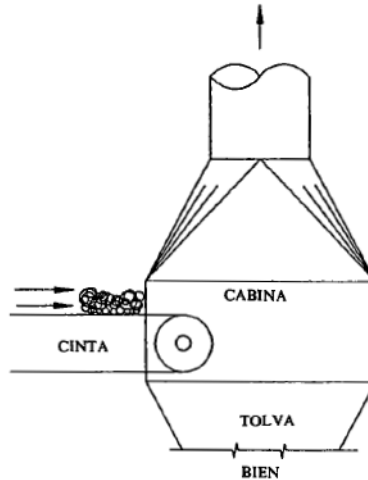
2.2 CAMPANAS DE EXTRACCIÓN

Los sistemas de extracción localizada se diseñan para captar y eliminar los contaminantes antes de que se difundan al ambiente general del local de trabajo. La campana es el punto de entrada al sistema de desempolvado. La función esencial de la campana es facilitar la evacuación del flujo de aire que capture eficazmente el contaminante hacia los ductos que comunican la campana con el dispositivo de depuración.

2.2.1 Tipos de campanas de extracción:

- Tipo cabina: Las cabinas son campanas que encierran total o parcialmente el proceso o punto de generación del contaminante. Una cabina completa es donde no existe aberturas.

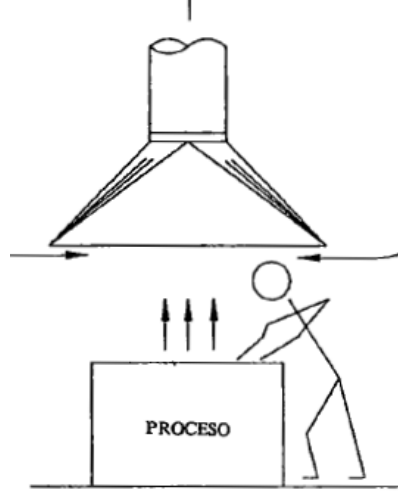
Figura 6. Esquema campana tipo cabina.



Fuente: Manual de Ventilación Industrial.

- Campanas exteriores: Se denomina campana exterior a las que se encuentran situadas adyacentemente al foco de contaminante pero sin encerrarlo, cuando el contaminante es un gas, vapor o polvo fino y no es emitido a una velocidad significativa, la orientación de la campana no es crítica.

Figura 7. Esquema campana tipo exterior simple.



Fuente: Manual de Ventilación Industrial.

2.3 VENTILADORES

Son máquinas destinadas a producir movimiento de aire. Las características principales para su selección son:

- Caudal volumétrico.
- Incremento de la presión estática.
- Potencia disponible.
- Rendimiento del ventilador.
- Ruido, dimensiones y modo de arrastre.

Los ventiladores se clasifican en dos grupos generales:

2.3.1 Ventiladores Axiales. Son aquellos en que la corriente de aire se establece axialmente a través del rodete. A su vez este tipo de ventiladores se clasifican en ventiladores de hélice, tubo axial y con aletas directrices.

2.3.2 Ventiladores Centrifugos. Son aquellas en que parte de la energía que se usa para producir la presión se genera por acción centrifuga. El aire penetra al ventilador paralelamente al eje y se mueve a través de los alabes. Su descarga se hace tangencialmente y a la carcasa envolvente.

Los ventiladores centrífugos se clasifican por la forma de los alabes o aletas, pudiendo ser estas curvadas hacia adelante, curvadas hacia atrás y radiales. La curvatura de la aleta es de vital importancia ya que de esta depende la forma de las curvas características de potencia y presión estática.

Figura 8. Ventilador centrifugo industrial de presión media.



Fuente: Catálogo de ventiladores industriales XINXIANG SIMO BLOWER LIMITED COMPANY.

2.4 SELECCIÓN DE VENTILADORES

El ventilador funciona en un régimen de giro contante, impulsando diferentes valores de caudal, según sea la pérdida de carga que debe vencer. La curva característica de un ventilador se obtiene dibujando en un eje de coordenadas distintos valores caudal-presión, obtenidos mediante ensayos de laboratorio.

En la siguiente tabla se ilustran criterios de selección de un ventilador.

Tabla 1. Tipos de ventiladores: características y aplicaciones.

CURVAS CARACTERÍSTICAS *	CARACTERÍSTICAS	APLICACIONES
	<p>El máximo rendimiento se produce a un caudal entre el 50 y 65 % del de descarga libre. En esta zona la característica de presión también es buena; la curva de potencia tiene un máximo en la misma zona que el máximo de rendimiento y disminuye a medida que el caudal se aproxima al de descarga libre, de forma que la potencia está autolimitada.</p>	<p>Sistemas de ventilación general, calefacción y aire acondicionado. También en aplicaciones industriales con aire limpio y de gran tamaño en las que el ahorro de energía es significativo.</p>
	<p>Las características de este tipo son similares a las del ventilador con palas de ala portante citadas arriba. El rendimiento máximo de este ventilador es ligeramente inferior al anterior. Generalmente es inestable a la izquierda del máximo de presión.</p>	<p>Las mismas aplicaciones en ventilación general, calefacción y aire acondicionado que el tipo anterior. También se usa en algunas aplicaciones industriales que no permiten el uso de palas de ala portante debido a un ambiente corrosivo y/o abrasivo.</p>
	<p>La característica de presión es más alta que la de los dos tipos mencionados arriba. La potencia aumenta de forma continua al aumentar el caudal.</p>	<p>Empleado básicamente en instalaciones industriales de manipulación de materiales. El rodetes puede ser de construcción muy robusta y es de fácil reparación a pie de instalación. En ocasiones se le aplican revestimientos especiales. Este diseño también se emplea en aplicaciones industriales de alta presión. Generalmente no se utiliza para instalaciones de ventilación, calefacción o aire acondicionado.</p>
	<p>La curva de presión tiene menos pendiente que la de un ventilador con las palas curvadas hacia atrás. Presenta un valle a la izquierda del pico de presión y el máximo rendimiento se produce a la derecha de este punto, a un caudal entre el 40 y 60 % del de descarga libre. El ventilador debe elegirse de forma que opere en la zona a la derecha del pico de presión. Al elegir el motor hay que tener presente que la curva de potencia crece de forma continua a medida que aumenta el caudal.</p>	<p>Utilizado básicamente en instalaciones de ventilación, calefacción y aire acondicionado de baja presión tales como hornos domésticos y unidades compactas de acondicionamiento de aire como acondicionadores de ventana o consolas.</p>

Fuente: Manual de Ventilación Industrial.

2.5 MECANISMOS DE DESCARGA

Las tolvas son usadas para guardar temporalmente el polvo recolectado antes de ser desechado o reusado en el proceso de producción. El polvo debe ser retirado continuamente para prevenir atascamientos. Para evitar esto se pueden instalar placas de golpeo, vibradores o cornetas acústicas. Para vaciar la tolva se puede utilizar mecanismos de descarga manuales o automáticos.

Dentro de los equipos de descarga manual encontramos:

- Compuerta corrediza: compuesta por una placa sostenida por un armazón y sellada con empaques
- Puertas articuladas

Estos mecanismos son usados en colectores que operan periódicamente.

Los dispositivos de carga automática son instalados en colectores de operación continua; estos son:

- Válvulas de escurrimiento
- Válvulas de esclusas o rotativas
- Transportadores de tornillos sinfín
- Transportadores neumáticos

2.6 TERMINOLOGIA USADA EN EL CONTROL DE CONTAMINACIÓN AMBIENTAL

Es de vital importancia describir algunos términos que diariamente se usan en la planta y en algunos casos no se tiene muy claro su significado.

2.6.1 CFM. Son los pies cúbicos de aire que se mueven a través del sistema en un minuto.

2.6.2 Pleno. Cualquier unidad cerrada es un pleno. El pleno limpio se encuentra en el lado del colector donde sale el aire limpio y el pleno sucio que esta donde entra el aire sucio.

2.6.3 Presión Estática. Es la presión compresiva existente en el seno del fluido y sirve para vencer los rozamientos y otras resistencias ofrecidas al paso del aire o gas.

2.6.4 Presión Dinámica. Se utiliza para crear y mantener la velocidad del aire o gas.

2.6.5 Presión Diferencial. Es una variable que indica la resistencia que confronta el flujo de aire al pasar por el colector. Es determinada por medio de encontrar la diferencia en presión total de dos puntos o entre la entrada y la salida del equipo.

2.6.6 Relación Aire-Tela. Es la relación matemática de la cantidad de tela disponible para filtrar un dado volumen de aire a cierta velocidad de flujo. En otras palabras es la cantidad de aire por pies cuadrados de tela.

La relación Aire-Tela para los diferentes sistemas es la siguiente:

- Sacudido mecánico ($1,5 \text{ CFM}/\text{Ft}^2 \text{ tela}$)
- Aire reverso ($2,0 \text{ CFM}/\text{Ft}^2 \text{ tela}$)
- Plenum pulse ($4,0 \text{ CFM}/\text{Ft}^2 \text{ tela}$)
- Jet pulse ($4,0 - 6,0 \text{ CFM}/\text{Ft}^2 \text{ tela}$)

2.6.7 Capa de polvo. Es la capa de polvo que debe permanecer en la tela de la bolsa para que pueda filtrar eficientemente. Esta capa separa el material muy fino y el más pesado de flujo del aire.

2.6.8 Colectores de presión positiva y negativa. El colector de bolsas de presión positiva es el que utiliza el ventilador en el lado del aire sucio (es decir antes del colector), para empujar el aire cargado de polvo a través del sistema.

El colector de bolsas de presión negativa utiliza el ventilador en el lado limpio del colector (después del colector), halando el aire a través del sistema.

3 PARAMETROS PRINCIPALES DE DISEÑO Y METODO DE SELECCIÓN DE LOS EQUIPOS PARA LA COLECCIÓN DE POLVOS

3.1 DUCTOS

Los tipos de ductos más utilizados son los de sección cuadrada, rectangular y circular. Es recomendable utilizar tubos de sección redonda o circular debido a que la velocidad es mucho más uniforme, evitando la sedimentación del material y por la capacidad de soportar una presión estática alta.

Los calibres recomendados para la construcción de ductos son los siguientes:

Tabla 2. Clasificación de calibres para ductos circulares.

DIAMETRO TUBERIA (PULGADAS)	CLASIFICACION SEGÚN LA INDUSTRIA			
	CLASE I	CLASE II	CLASE III	CLASE IV
< 8	24	22	20	16
8 A 18	20	20	18	16
18 A 30	20	18	16	14
> 30	18	16	14	12

Fuente: DUARTE, Jairo. Informe seminario BHA sobre mantenimiento de equipo de control de polución ambiental. Ibagué, Febrero 1994. 62 p.

La planta de empackado de CEMEX S.A. se encuentra clasificada dentro de la *CLASE IV* la cual incluye aplicaciones de materiales pesados y con altas tasas de producción de contaminantes con dos o tres jornadas de trabajo, como en plantas de cemento, de acero y de fundiciones.

El punto donde se inicia el proceso de recolección se llama punto de ventilación. Generalmente hay una campana o toma que maneja un caudal definido por tablas. El punto de ventilación se conecta al colector de polvos por medio de ductos.

Cuando los sistemas han estado en funcionamiento por algún tiempo generalmente se alteran al añadirse más puntos de ventilación y estos pueden causar un desbalance ya sea atenuando o sobrecargando el sistema de ventilación.

La velocidad se puede calcular a partir de la siguiente formula:

$$V = 4005 \sqrt{VP} \quad (1)$$

Siendo VP la presión dinámica en pulgadas de agua.

El caudal total es:

$$Q_T = V * A \quad (2)$$

Donde A es el área del ducto.

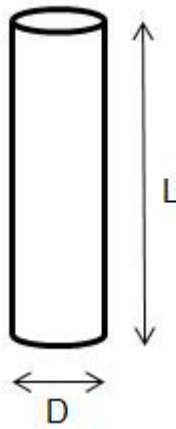
3.2 FILTROS

El número de mangas que debe tener un filtro se calcula de la siguiente manera:

Se halla el área de la manga a partir de:

$$A_M = \pi * D * L \quad (3)$$

Figura 9. Esquema manga filtrante.



Dónde: D= diámetro de la manga

L= largo de la manga

Luego se calcula el caudal que filtra cada manga.

$$Q_{manga} = A_M * V \quad (4)$$

Donde V es la velocidad del aire a través de la manga y su valor recomendado es de 300 FPM aproximadamente.

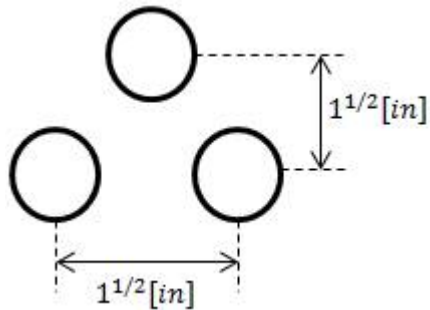
El número de mangas necesario se da por la siguiente expresión:

$$N^{\circ} MANGAS = \frac{CAUDAL\ TOTAL\ A\ FILTRAR}{CAUDAL\ QUE\ FILTRA\ CADA\ MANGA} \quad (5)$$

La separación práctica entre manga y manga es de 1^{1/2} pulgadas.

Figura 10. Esquema distribución ideal entre mangas.

Figura 10. Esquema distribución ideal entre mangas.



Para la selección del filtro en si se debe tener en cuenta:

- Condiciones de espacio.
- Tipo de servicio.
- Superficie de filtrado.
- Capacidad de filtrado.
- Temperatura máxima de operación.
- Consumos de aire.

Los factores más importantes que se deben considerar cuando se va a seleccionar la tela son:

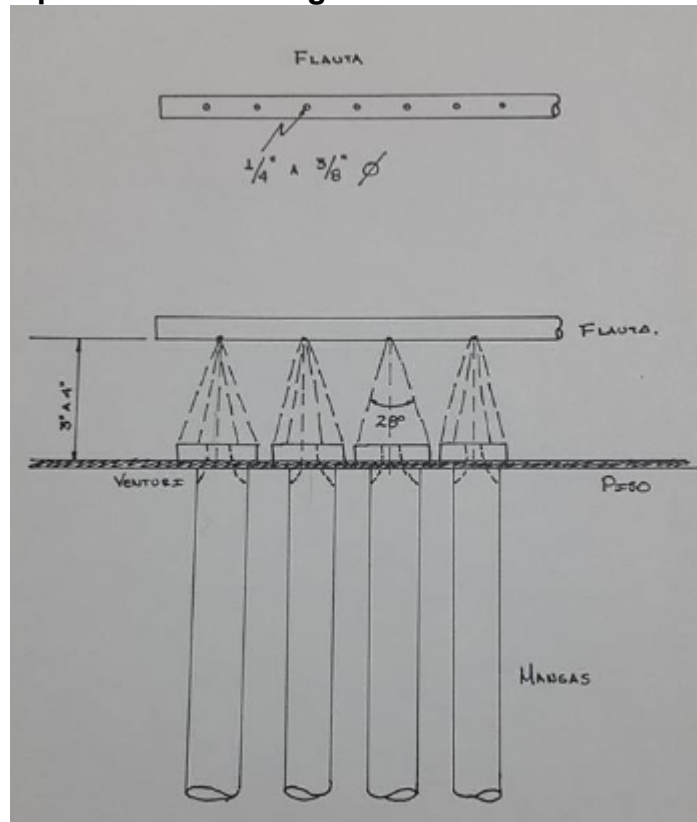
- Temperatura de operación del colector.
- Resistencia a la abrasión necesaria para la aplicación.
- Composición química del flujo de aire.
- Capacidad de absorción de energía.
- Relación de Aire-Tela.
- Método de limpieza.

3.2.1 Criterios de funcionamiento de un filtro de mangas tipo Jet Pulse. Para un correcto funcionamiento de este equipo se deberá tener en cuenta:

- Las caídas de presión estén entre 3 y 6 pulgadas de agua [inWC].

- Los pulsos de limpieza deben ser cortos y concisos para un sacudido eficaz, con una duración entre 0,1 a 0,15 segundos usando una presión entre 60 psi como mínimo y 100 psi como máximo.
- La frecuencia de limpieza podrá variar de 1 a 30 segundos o más, pero deberá adaptarse para que la presión diferencial se mantenga entre 3 y 6 [inWC].
- Los orificios de la flauta deberán estar entre $\frac{1}{4}$ de pulgadas de diámetro como mínimo y $\frac{3}{8}$ de pulgadas como máximo, y la altura de separación de la flauta y cono Venturi estará entre 3 a 4 pulgadas como máximo con el fin de lograr un chorro uniforme de aire formando un ángulo de 28° . (Ver Figura 7)
- La relación canastilla-bolsa que comúnmente es conocida como pellizco el cual se refiere al exceso de tela que se puede pellizcar y medir una vez instalada la bolsa sobre la canastilla deberá ser de $\frac{1}{4}$ a $\frac{1}{2}$ de pulgada como máximo.
- Las mangas deben permanecer con una capa de polvo para que pueda filtrar eficientemente, y evitar que estas se cieguen permanentemente.
- La velocidad ascendente debe estar por el orden de los 300 FPM.
- En cualquier sistema el primero en arrancar debe ser el colector y el último en parar, sin utilizar el equipo de golpeo.
- El ajuste entre el marco o piso porta-mangas y las mangas debe estar en $\pm 0,01$ pulgadas de diámetro aproximadamente $\pm 0,25$ mm.

Figura 11. Esquema Flauta-Mangas.



Fuente: Informe seminario BHA sobre mantenimiento de equipo de control de
polución ambiental. Ibagué, Febrero 1994. 62 p.

3.3 VENTILADORES

Los factores que intervienen en la selección del ventilador son:

- El caudal del aire.
- La presión estática.
- La densidad del aire cuando es diferente de la normal.
- El nivel de ruido.
- Espacio disponible.
- Naturaleza de la carga.

3.3.1 Criterios de funcionamiento de Ventiladores Centrifugos. Para un correcto funcionamiento del ventilador se debe tener en cuenta:

- El ventilador debe estar en los rangos de presión y volumen requerido para el proceso. Si un ventilador ha sido mal seleccionado se tendrán problemas en el sistema.
- El ventilador debe garantizar velocidades de 3500 a 4000 FPM, para el rango de caudales y áreas de ductos normalmente usados.
- El rodete del ventilador debe girar en el sentido de la descarga de la voluta.
- El rotor debe permanecer limpio ya que una pequeña capa de grasa y polvo pueden reducir la eficiencia, sobre todo en ventiladores grandes.
- Cuando se arranque el sistema el ventilador debe estar con el DAMPER cerrado con el fin de no sobrecargar el mismo.
- La transmisión del ventilador debe tener un adecuado alineamiento y una tensión correcta ya que bandas de transmisión sueltas o fuera de alineamiento pueden resultar en una reducción de la velocidad de hasta un 20% afectando el sistema.

4 EVALUACIÓN DE LAS CONDICIONES DE FUNCIONAMIENTO EN EL SISTEMA DE DESEMPOLVADO ACTUAL

La sección de empaque está compuesta por dos máquinas empacadoras y sus respectivos elementos encargados de transportar el cemento hasta estas, como lo son tornillos sinfín y elevadores de cangilones. El sistema de desempolvado actual cuenta con nueve puntos de colección de polvo distribuidos a lo largo del área, el sistema de tuberías que transportan el aire contaminado hasta el filtro, succionado por el ventilador.

Figura 12. Fotografía del filtro de magas junto al ventilador centrifugo.



Las características del filtro y el ventilador que se encuentran en la sección de empaque, se describen en las siguientes tablas:

Tabla 3. Filtro de mangas empaque cemento.

DESCRIPCION	DATOS
MARCA	METALICAS JM
CAPACIDAD	21000 CFM
NUMERO DE CAMARAS	1
NUMERO DE MANGAS	200
SISTEMA DE LIMPIEZA	JET PULSE
AREA FILTRANTE	278,15 M2
TAMAÑO	4620 x 2160 x 4700 mm

Fuente: Base de datos CEMEX COLOMBIA S.A planta cemento Bucaramanga.

Figura 13. Fotografía del filtro de mangas empaque cemento.



Tabla 4. Ventilador del filtro de mangas empaque.

MARCA	COIN
TIPO	CENTRIFUGO
MODELO	10 B
SERIE	93-204
CAUDAL	20944 CFM
VELOCIDAD (RPM)	1468
PROVEEDOR	COIN
TIPO DE ACOPLAMIENTO	CORREAS
TEMPERATURA DE OPERACIÓN	60° C
DENSIDAD DE ENTRADA	0,061 LB/FT3
EFICIENCIA	77%

Fuente: Base de datos CEMEX COLOMBIA S.A planta cemento Bucaramanga.

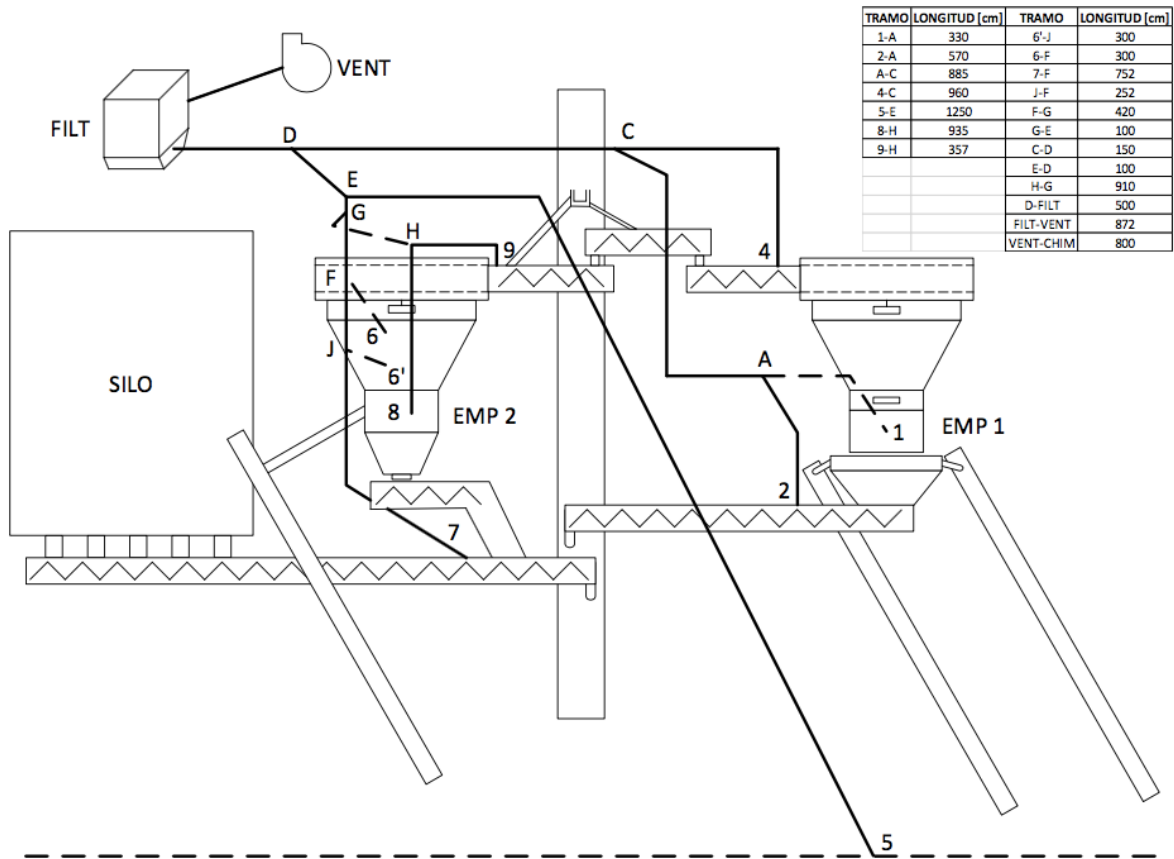
Figura 14. Fotografía del ventilador del filtro de mangas empaque.



Para llevar a cabo la evaluación de las condiciones de funcionamiento del sistema se realizó una serie de visitas al área en diferentes ocasiones y en cada una se registraron datos, con el fin de tener una aproximación real del funcionamiento del sistema de desempolvado trabajando a diferentes cargas dependiendo de la exigencia de la producción. Se logró consignar datos como longitudes, diámetros, presiones estáticas y dinámicas (velocidades en algunos casos), de los cuales se

parte para realizar los cálculos necesarios teniendo en cuenta algunas ecuaciones obtenidas del manual de ventilación.

Figura 15. Plano del sistema de desempolvado actual en el área de empacado.



4.1 CALCULOS A PARTIR DE MEDIDAS DE PRESIÓN

A continuación, se mostrará el procedimiento que se llevó a cabo para evaluar las condiciones del punto de medida 6, ubicado en la parte posterior de la empacadora 2 con sus respectivos cálculos.

Los instrumentos de medición utilizados para la recolección de datos de presión fueron los siguientes:

- Tubo Pitot marca Dwyer 160 s
- Manómetro digital marca Dwyer serie 477 B

Tabla 5. Instrumentos de medición de presión.

Manómetro Dwyer serie 477 B		Tubo Pitot Dwyer ref. 160s	
Exactitud	0.1%	Material	Acero inoxidable 304
Precisión	0.1%	Coficiente	1
Confiabilidad	0.1 %	Diámetro tubo	7.9 [mm]

Figura 16. Instrumentos de medición de presión manómetro y tubo pitot.



En cualquier punto de un sistema de extracción existen tres tipos de presiones de aire que pueden compararse con la presión atmosférica existente en la vecindad inmediata del mismo. Usualmente estas presiones se miden en milímetros de columna de agua (mmcda) y están relacionadas entre sí por la expresión:

$$PT = PE + PD \quad (6)$$

Donde: $PT =$ Presion total, mmcda

$PE =$ Presion estatica, mmcda

$PD =$ Presion dinamica, mmcda

La presión estática es el valor de la fuerza que ejerce el aire sobre las paredes de las tuberías, en sentido perpendicular a ellas. La presión dinámica es la fuerza por unidad de superficie provocada por el movimiento del aire y se manifiesta en el mismo sentido que la dirección de este. Dicha presión es siempre positiva. La presión total es la suma de la presión estática y la dinámica, y puede ser positiva o negativa.

Las presiones fueron medidas con el tubo pitot, la dinámica colocando los orificios del extremo de este en sentido paralelo al flujo del aire a través del ducto; y la estática colocando los orificios del extremos del tubo en forma perpendicular a la dirección del flujo del aire a través del ducto.

Tabla 6. Datos de presión dinámica y estática para el punto de medida 6.

PRESIÓN (Pa)	
DINAMICA	ESTATICA
128	644
124	610
123	661
126	643
139	697
164	661
149	604

De la tabla anterior se calcularon valores promedio de la presión estática y dinámica.

$$P_{Dprom6} = 141,5 [Pa]$$

$$P_{Sprom6} = 645,7 [Pa]$$

La presión dinámica puede emplearse para calcular la velocidad del aire, si se conoce la densidad del mismo. Utilizando la siguiente ecuación:

$$V = 4,43 \sqrt{\frac{PD}{d}} \quad (7)$$

Donde: $V = \text{Velocidad, m/s}$

$PD = \text{Presion dinamica, mmcda}$

$d = \text{densidad, kg/m}^3$

Cuando el aire se encuentra en condiciones estándar la densidad del aire es de $1,2 \text{ kg/m}^3$ y la ecuación anterior se reduce a:

$$V = 4,043\sqrt{PD} \quad (8)$$

Si la temperatura del aire se desvía más de 15°C de las condiciones estándar (20°C y 1 atm) o la altitud del lugar es superior a 300 m por encima o por debajo del nivel del mar, y la humedad absoluta del aire es igual o superior a $0,02 \text{ kg}$ de vapor por kg de aire seco, el valor de densidad del aire debe corregirse.

Bucaramanga se encuentra a una altitud de 959 metros con respecto al nivel del mar y la temperatura del aire es mayor a 20°C . Teniendo en cuenta que las condiciones de la ciudad se encuentran por encima de las estándar se debe llevar a cabo una corrección de la densidad del aire.

Interpolando de la tabla 5.7 del manual de ventilación capítulo 5, página 141. Se obtiene el factor de corrección para una temperatura de 35° C.

Figura 17. Interpolación del factor de corrección por densidad.

	-250	0	250	500	750	1000	1250
Temp. E Hg	782	760	738	717	697	677	657
C. E H₂O	10649	10345	10048	3761	3482	9211	8947
0	1,11	1,08	1,05	1,02	0,99	0,96	0,93
21	1,03	1,00	0,97	0,95	0,92	0,89	0,87
50	0,94	0,91	0,89	0,86	0,84	0,81	0,79
75	0,87	0,85	0,82	0,80	0,78	0,75	0,73

Fuente: Manual de Ventilación Industrial.

$$F_c = 0,8563$$

Se corrige la presión dinámica para condiciones distintas de la estándar, mediante la siguiente expresión:

$$PD_c = \frac{PD_m}{F_c} \quad (9)$$

Donde: PD_c = Presión dinámica corregida, mmcda

PD_m = Presión dinámica medida, mmcda

F_c = Factor de corrección

Por cuestiones de cálculo la presión dinámica y estática se deben trabajar en milímetros de columna de agua (mmcda), ya que las ecuaciones del manual de ventilación sugieren utilizar estas unidades.

$$P_{D_{prom6}} = 141,5 [Pa] = 14,44 [mmcda]$$

$$P_{S_{prom6}} = 645,7 [Pa] = 65,89 [mmcda]$$

Reemplazando en la expresión (9) se obtiene:

$$PD_{C6} = \frac{14,44}{0,8563}$$
$$PD_{C6} = 16,86 \text{ [mmcda]}$$

Obteniendo la presión dinámica corregida se procede a calcular la velocidad a partir de la expresión (8).

$$V_6 = 4,043\sqrt{16,86}$$
$$V_6 = 16,6 \text{ [m/s]}$$

Es necesario también conocer las dimensiones del área del ducto para poder hallar el caudal.

DIAMETRO DEL DUCTO

$$D_6 = 0,34 \text{ [m]}$$

AREA DEL DUCTO

$$A = \frac{\pi * D^2}{4} \tag{10}$$

$$A_6 = \frac{\pi * 0,34^2}{4}$$

$$A_6 = 0,0908 \text{ [m}^2\text{]}$$

En general la medición más importante en la comprobación de un sistema de ventilación es la del caudal, que es la masa de aire que este desplaza en una unidad de tiempo. Para calcularlo se utiliza la siguiente expresión:

$$Q = V * A \quad (11)$$

Dónde: $Q = \text{Caudal}, m^3/s$

$V = \text{Velocidad}, m/s$

$A = \text{Area de seccion del conducto o campana en el punto medido}, m^2$

A partir de los valores hallados anteriormente de velocidad y área, se calcula el caudal usando la expresión (11):

$$Q_6 = 16,6 * 0,0908$$

$$Q_6 = 1,508 [m^3/s]$$

Los cálculos de los puntos de medida 1, 5, 6*, 7, 8, 9, punto de entrada del filtro donde se unen todos estos (como se muestra en la figura 15) y salida de este, se realizaron a partir de medidas de presión de la misma manera que para el punto de medida 6. En la siguiente tabla se registran los valores obtenidos para cada uno de estos.

Tabla 7. Valores obtenidos para los puntos de medida.

MEDICIÓN	PUNTOS DE MEDIDA							
	1	5	6	6* y 7	8	9	ENTRADA FILTRO	SALIDA FILTRO
PRESIÓN DINÁMICA [mmcda]	5,879	62,85	16,86	39,25	31,45	23,53	13,08	11,51
VELOCIDAD [m/s]	9,803	32,05	16,6	25,33	22,67	19,61	14,62	13,71
ÁREA [m ²]	0,1075	0,0661	0,0908	0,0314	0,0284	0,007854	0,478	0,5153
CAUDAL [m ³ /s]	1,054	2,119	1,508	0,7953	0,6439	0,154	6,989	7,067

4.2 CÁLCULOS A PARTIR DE MEDIDAS DE VELOCIDAD

Este tipo de cálculos solo se realizó para el punto de medida 2, ubicado en el tornillo sinfín de la parte inferior de la empacadora 1. La recolección de datos para este punto se realizó de manera diferente a la del numeral anterior, ya que el tramo de tubería en donde se encontraba el hand hole o tapón para introducir el Tubo Pitot y medir presión estaba en un punto muy elevado y de difícil alcance. Pero se observó que la campana de este punto era de tipo cabina y tenía una compuerta a la cual había fácil acceso como se observa en la Figura 18, entonces se procedió a medir el dato de velocidad en este punto y a partir de este realizar los cálculos necesarios para evaluar las condiciones en este tramo del sistema.

Figura 18. Campana tipo cabina (punto de medida 2).



El instrumento de medición utilizado para la recolección de datos de velocidad fue el siguiente:

- Anemómetro de aleta digital marca Dwyer modelo 8904.

Tabla 8. Instrumento de medición de velocidad.

DATOS TECNICOS DEL ANEMÓMETRO DWYER MODELO 8904	
Rango	0.4 a 30 [m/s] (80 a 5900 pie/min)
Exactitud	$\pm 2\%$ de la lectura ± 0.2 [m/s]
Resolución	0.00 [m/s] (1 pie/min)
Tiempo de respuesta	1 segundo

Figura 19. Instrumento de medición de velocidad anemómetro.



Los datos tomados con el anemómetro en el punto de medida 2 fueron los siguientes:

Tabla 9. Medidas de velocidad para el punto de colección 2.

VELOCIDAD (m/s)	
TOMA	VALOR
1	16,05
2	16,94
3	16,52
4	15,96
PROM	16,37

Con el valor promedio de velocidad calculado en la tabla anterior se pueden realizar los cálculos de la presión dinámica y el caudal en este punto.

Para el cálculo de la presión dinámica se utiliza la expresión (8), haciendo el despeje de esta y reemplazando el valor de la velocidad de la siguiente forma:

$$PD_2 = \frac{V_2^2}{4.043^2} \quad (12)$$

$$PD_2 = \frac{16,37^2}{16,346}$$

$$PD_2 = 16,39 \text{ [mmcda]}$$

Para el hallar el caudal del punto de medida 2 son necesarias las dimensiones del ducto.

DIAMETRO DEL DUCTO

$$D_2 = 0,20 \text{ [m]}$$

AREA DEL DUCTO

$$A_2 = \frac{\pi * D^2}{4} = \frac{\pi * 0,20^2}{4}$$

$$A_2 = 0,0314 [m^2]$$

Finalmente se usa la expresión (11) para calcular el caudal.

$$Q_2 = 16,37 * 0,0314$$

$$Q_2 = 0,514 [m^3/s]$$

A continuación, se consignarán los valores obtenidos anteriormente para el punto de medida 2 en la siguiente tabla:

Tabla 10. Valores obtenidos para el punto de medida 2.

PUNTO DE MEDIDA 2		
MEDICIÓN	VALOR	UNIDADES
PRESIÓN DINÁMICA	16,39	mmcda
VELOCIDAD	16,37	m/s
ÁREA	0,0314	m ²
CAUDAL	0,514	m ³ /s

4.3 CÁLCULOS A PARTIR DE LA ECUACIÓN DE CONTINUIDAD

En el punto de medida 4, ubicado en el tromel de la parte superior de la empacadora 1 no se logró llevar a cabo ninguna medición usando los equipos, ya que la tubería no contaba con hand hole en ningún tramo para introducir el Tubo Pitot y poder medir presión. Además, a diferencia de la campana de extracción del ducto en el punto de medida 2, esta no tenía compuerta para poder ingresar a

tomar medidas al interior del punto de extracción, por lo tanto tampoco fue posible medir la velocidad usando el anemómetro.

Así que los cálculos de este punto de medida se realizaron usando la ecuación de continuidad, en la que el caudal total debe ser igual a la suma de los caudales de cada rama. La expresión que describe este caso es la siguiente:

$$Q_T = \sum_{i=1}^n Q_i = Q_1 + Q_2 + \dots + Q_n \quad (13)$$

Cabe resaltar que para usar la expresión (13) se debían conocer los caudales de los demás puntos de colección y el caudal total del sistema, por esto se dejó como último procedimiento y se debieron tomar medidas a la entrada del filtro en donde se unían todos los ramales de los ductos para poder calcular el caudal en este punto y posteriormente calcular el del punto de medida 4.

Retomando la expresión (13) para reemplazar el caudal a la entrada del filtro (Q_T) y los demás caudales de puntos de colección se llega a:

$$Q_T = Q_1 + Q_2 + Q_4 + Q_5 + Q_6 + Q_{6^*} + Q_7 + Q_8 + Q_9$$

Despejando para dejar la expresión en términos del caudal del punto de medida 4, el cual es el desconocido se obtiene la ecuación:

$$Q_4 = Q_T - (Q_1 + Q_2 + Q_5 + Q_6 + Q_{6^*} + Q_7 + Q_8 + Q_9) \quad (14)$$

Reemplazando en la ecuación (14), los caudales calculados a partir de la medida de presión y velocidad,

$$Q_4 = 6,989 - (1,054 + 0,514 + 2,119 + 1,508 + 0,307 + 0,371 + 0,644 + 0,154)$$

$$Q_4 = 0,202[m^3/s]$$

Con el valor del caudal usando la expresión (11) se puede hallar la velocidad del ducto si se conoce el diámetro y el área de este.

DIAMETRO DEL DUCTO

$$D_4 = 0,1 [m]$$

AREA DEL DUCTO

$$A_4 = \frac{\pi * D^2}{4} = \frac{\pi * 0,1^2}{4}$$

$$A_4 = 0,00785 [m^2]$$

A partir de estos valores se calcula la velocidad de la siguiente manera:

$$V_4 = \frac{Q_4}{A_4} \tag{65}$$

$$V_4 = \frac{0,202}{0,00785}$$

$$V_4 = 25,71[m/s]$$

Y por último usando la expresión (8) se puede despejar la presión dinámica y calcularla con la siguiente expresión:

$$PD_4 = \frac{V_4^2}{4.043^2} \tag{76}$$

$$PD_4 = \frac{25,71^2}{16,346}$$

$$PD_4 = 40,43[\text{mmcda}]$$

A continuación, se consignarán los valores obtenidos anteriormente para el punto de medida 4 en la siguiente tabla:

Tabla 11. Valores obtenidos para el punto de medida 4.

PUNTO DE MEDIDA 4		
MEDICIÓN	VALOR	UNIDADES
PRESIÓN DINÁMICA	40,43	mmcda
VELOCIDAD	25,71	m/s
ÁREA	0,007854	m ²
CAUDAL	0,202	m ³ /s

5 SIMULACIÓN DE LAS CONDICIONES ACTUALES DEL SISTEMA MEDIANTE EL SOFTWARE CASALS

Los programas informáticos se han convertido en una herramienta fundamental para que el ingeniero se desenvuelva en la industria, ya que permite agilizar cualquier tipo de análisis que deba realizar en su campo de acción. Esto genera reducción de costos, aumento en la productividad, incremento en la calidad y eficiencia en los procesos que se llevan a cabo, evaluando las condiciones de sus áreas de una manera fácil y rápida. También permite que los fabricantes, proveedores, distribuidores y clientes intercambien información en línea, favoreciendo con ellos la fabricación sobre demanda.

Dicho lo anterior para el desarrollo de este proyecto se va usar la herramienta informática CASALS VENTILACIÓN, la cual es una aplicación que permite sustituir los cálculos manuales de sistemas de ventilación, de manera sencilla y sin necesidad de otros programas de CAD, ofreciendo resultados rápidos con una buena aproximación.

5.1 DESCRIPCIÓN DEL SOFTWARE CASALS VENTILACIÓN

El programa de cálculo y selección de CASALS VENTILACIÓN es una herramienta que agiliza el trabajo del proyectista e instalador. Se ha desarrollado gracias a la colaboración entre los técnicos de CASALS quienes han aportado la experiencia en ventilación y el departamento de informática de la UNIVERSIDAD DE GERONA (España), que ha aportado los conocimientos de programación.

El programa está orientado a obtener información de una forma ágil. Las herramientas de cálculo de instalaciones, conductos, búsqueda y selección de ventiladores se han desarrollado teniendo en cuenta el trabajo diario de los técnicos comerciales de CASALS, evitando complicaciones innecesarias y

priorizando la obtención de resultados útiles que cubren la mayor parte de los casos.

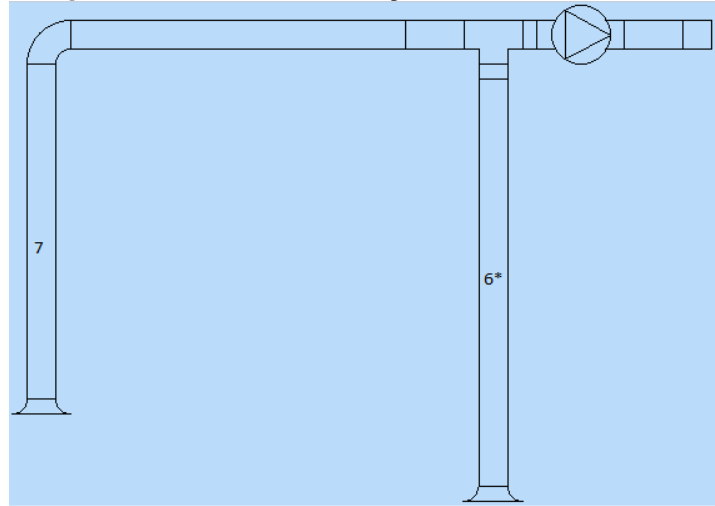
5.2 USO DE ACCESORIOS GENÉRICOS EN SISTEMAS EQUIVALENTES

Con el fin de simplificar el trazado del circuito de ventilación se usó una herramienta de CASALS llamada accesorio genérico, el cual puede reemplazar varios ramales del sistema generando las mismas pérdidas que estos por medio del cálculo de un factor que caracteriza dicho accesorio. Con esto se pueden simular sistemas complejos con sistemas equivalentes más sencillos de implementar y analizar.

Pero antes de llevar a cabo dicho procedimiento, se debe demostrar que efectivamente varios tramos de tubería en un punto pueden ser reemplazados por un accesorio genérico. Para esta demostración se tomaron los datos obtenidos anteriormente en los *puntos de medida 6* y 7*.

Inicialmente se debieron recolectar todos los datos necesarios de los puntos tales como longitudes de tuberías, diámetros de ductos y caudales para realizar la simulación en el programa. Teniendo todos estos datos se prosiguió a trazar el circuito:

Figura 20. Circuito puntos de medida 6* y 7.



En la Figura 20, se observan los dos puntos de medida junto con el ventilador que va realizar la succión a través de estos. Una vez reemplazados los datos conocidos de los ductos como diámetros, longitudes y caudales, CASALS calcula el ventilador necesario para este sistema específico y genera un informe con todos los datos de este.

Figura 21. Cálculo del ventilador para puntos de medida 6* y 7.

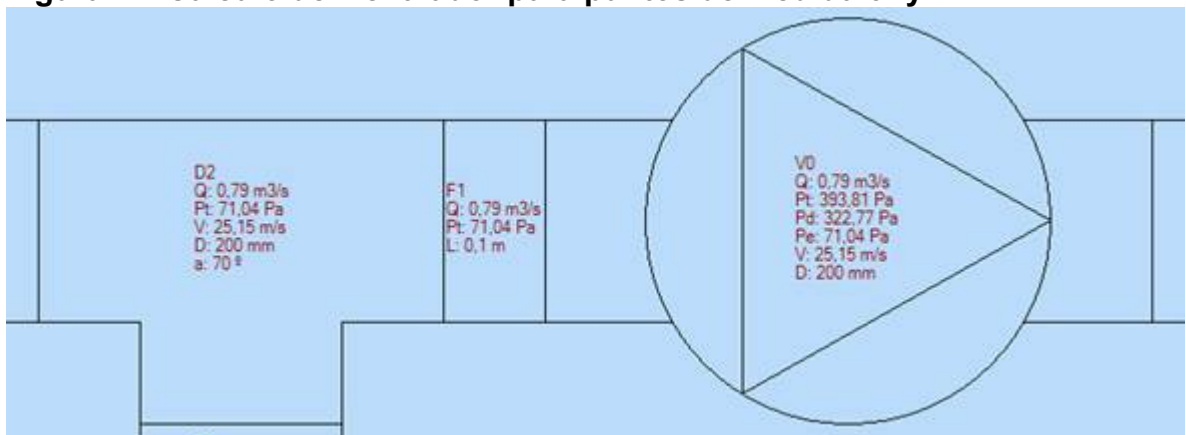
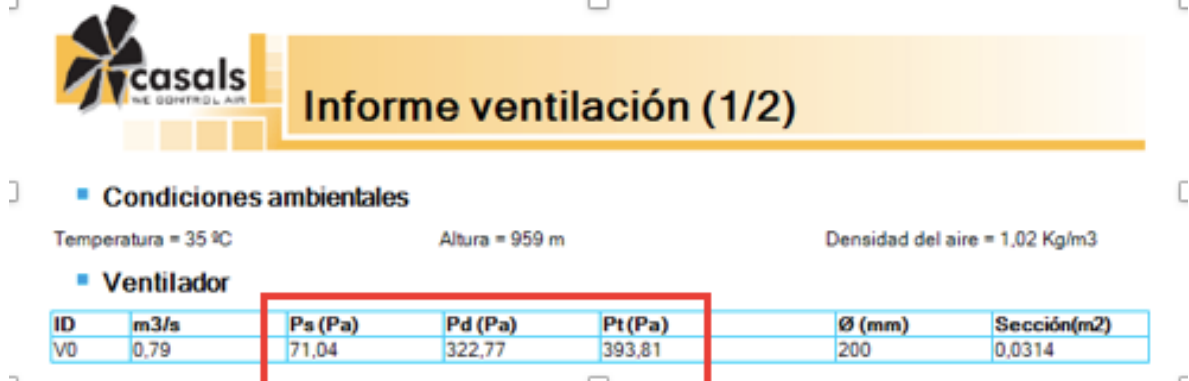


Figura 22. Informe del ventilador para puntos de medida 6* y 7.



Ahora, se va reemplazar el circuito real por uno en el que los dos ramales (*puntos de medida 6* y 7*) sean sustituidos por un accesorio genérico que cause las mismas pérdidas que si estuviesen los dos ductos. Para esto se calcula el factor de pérdidas que tendrá el accesorio usando la ecuación sugerida por CASALS obtenida mediante fórmulas extrapoladas de tablas de diferentes fuentes de reconocida validez, en su mayoría del Manual de Ventilación Industrial.

$$P_t = \frac{k * \rho * V^2}{2} \quad (17)$$

Dónde: k = factor de pérdidas

V = velocidad del aire que atraviesa el accesorio

ρ = densidad del aire

P_t = pérdida de carga

Realizando el despeje del factor de pérdidas de la ecuación 17. se obtiene la siguiente expresión:

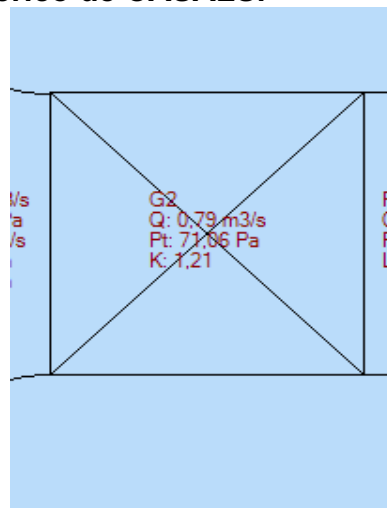
$$k = \frac{2 * P_t}{\rho * V^2} \quad (18)$$

Reemplazando los valores del ventilador arrojados por CASALS en la *expresión* 18. se obtiene:

$$k = \frac{2 * 393,81}{1,02756 * 25,15^2}$$

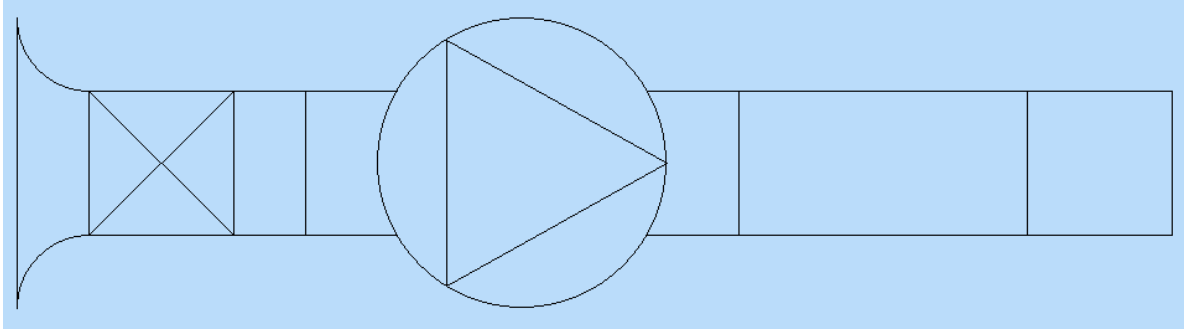
$$k = 1,212$$

Figura 23. Accesorio genérico de CASALS.



Después de haber calculado el factor de pérdidas, se traza un nuevo circuito en el cual los dos ramales de los puntos de medida son reemplazados por un accesorio genérico caracterizado con el factor de pérdidas obtenido como se ve en la Figura 23; el circuito realizado fue el siguiente:

Figura 24. Circuito con accesorio genérico.



CASALS va realizando los cálculos en todo el sistema a medida que se va trazando el circuito, y al final el ventilador obtenido con su respectivo informe es el que se muestra a continuación:

Figura 25. Cálculo del ventilador con accesorio genérico.

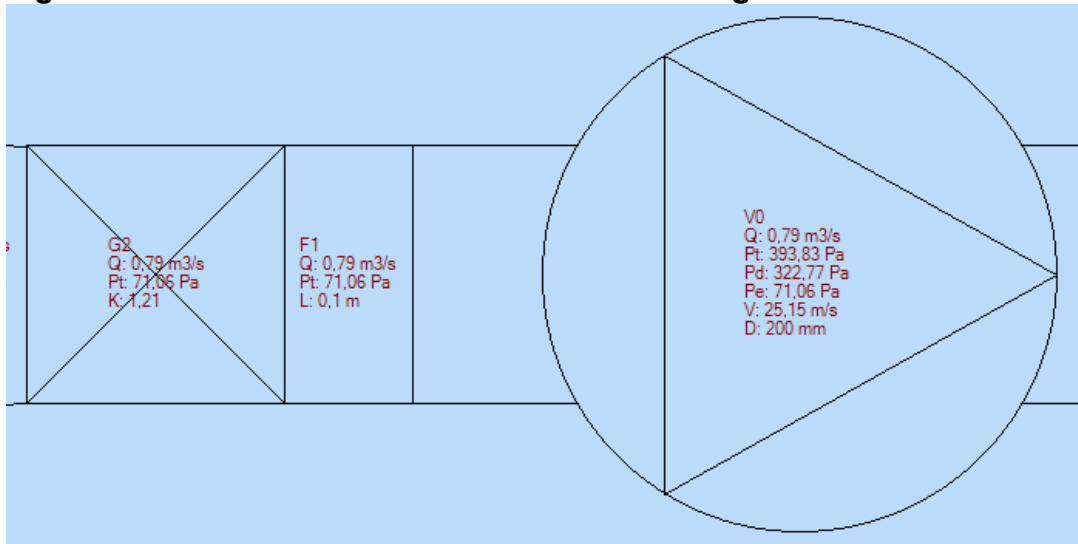
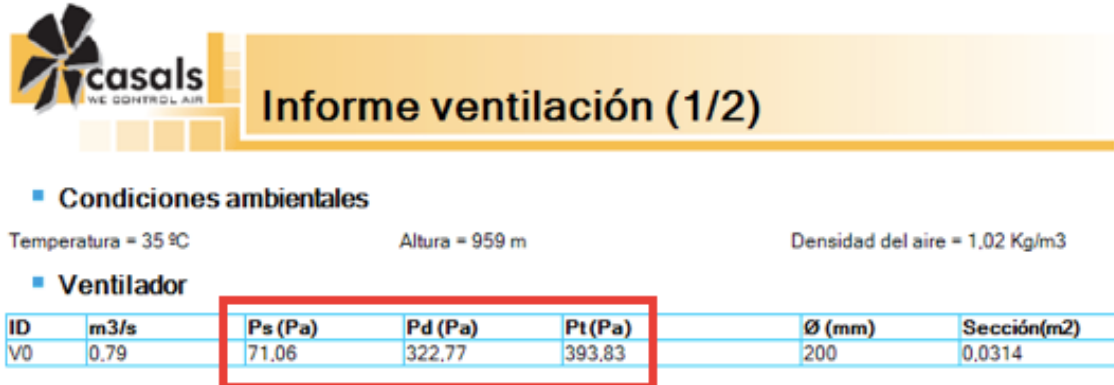


Figura 26. Informe del ventilador con accesorio genérico.



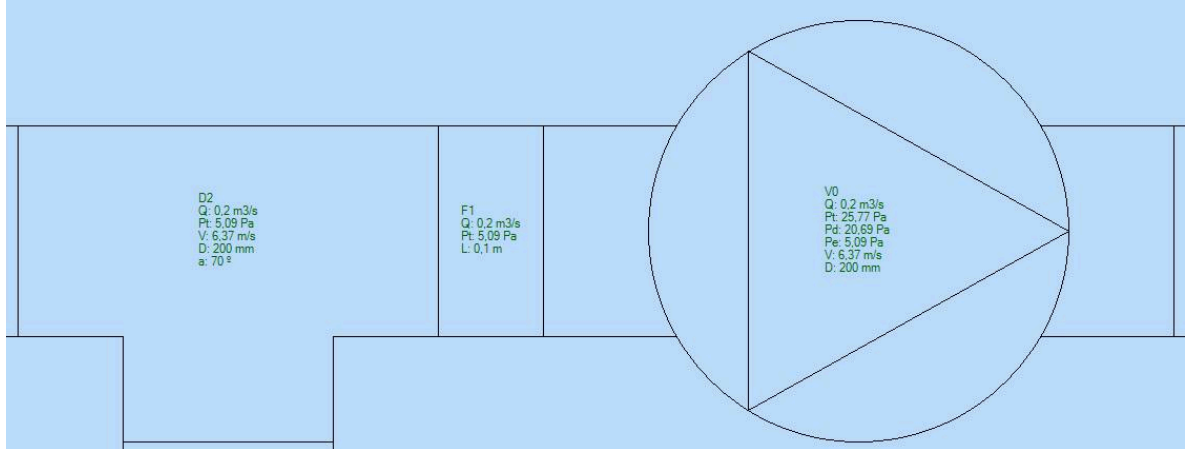
Comparando las Figuras 22 y 26, se puede observar que los valores del ventilador para el circuito con los dos ramales de los *puntos de medida 6* y 7* (reales) y el circuito con el accesorio genérico son aproximadamente iguales.

Ahora se va a realizar la última prueba para demostrar el uso de accesorios genéricos. Partiendo de los circuitos mostrados en las figuras 20 y 24, se van a variar los valores de caudal en el ventilador de cada uno, observando el comportamiento de la presión en el punto de bifurcación (donde fue reemplazado el accesorio) para el caso del sistema de la figura 20, y el comportamiento de la presión en el accesorio para el caso de la figura 24.

- Para $Q = 0,2 [m^3/s]$

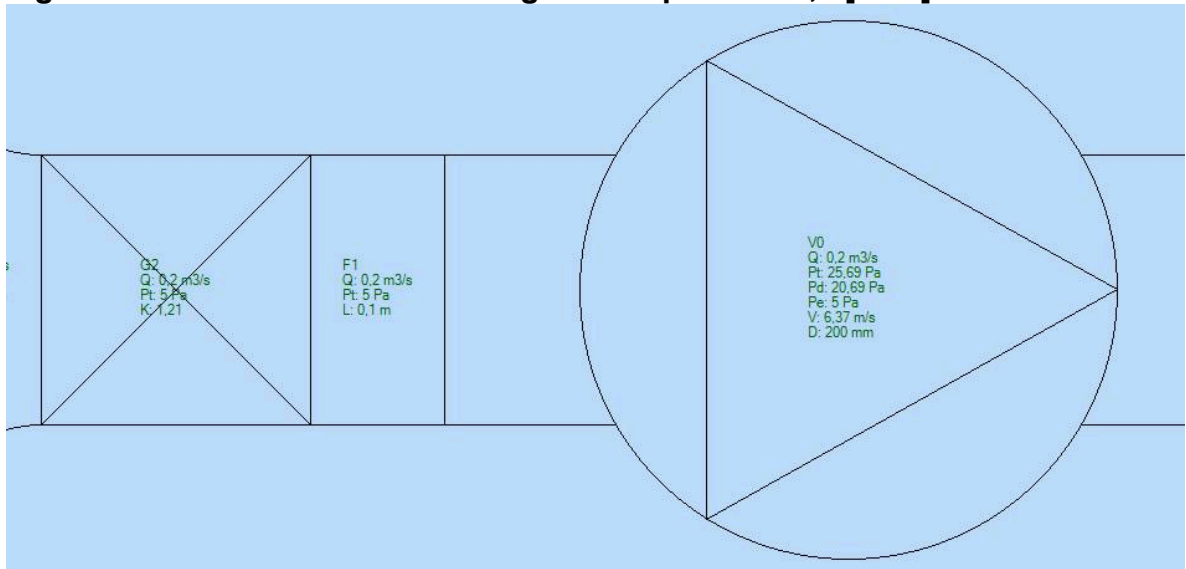
Inicialmente se cambia el caudal en el ventilador para el circuito de los puntos de medida 6* y 7.

Figura 27. Circuito de puntos de medida 6* y 7 para $Q=0,2$ [m^3/s].



Después se realiza el mismo cambio de caudal en el ventilador para el circuito con el accesorio genérico.

Figura 28. Circuito con accesorio genérico para $Q=0,2$ [m^3/s].



Se realizó el mismo procedimiento para las demás variaciones de caudales, los circuitos obtenidos se mostraran en las siguientes figuras:

- Para $Q = 0,4$ [m^3/s].

Figura 29. Circuito de puntos de medida 6* y 7 para $Q= 0,4 [m^3/s]$.

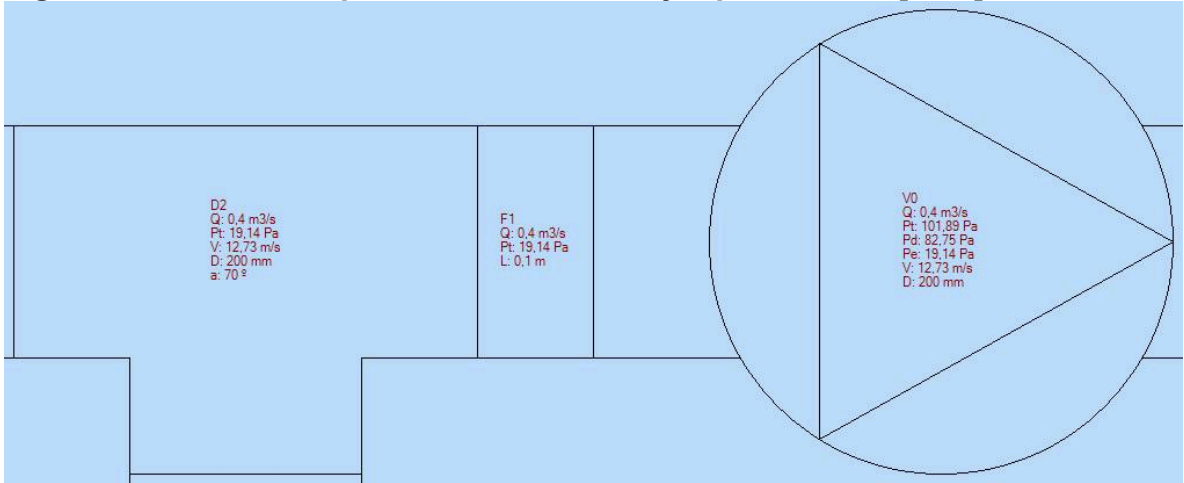
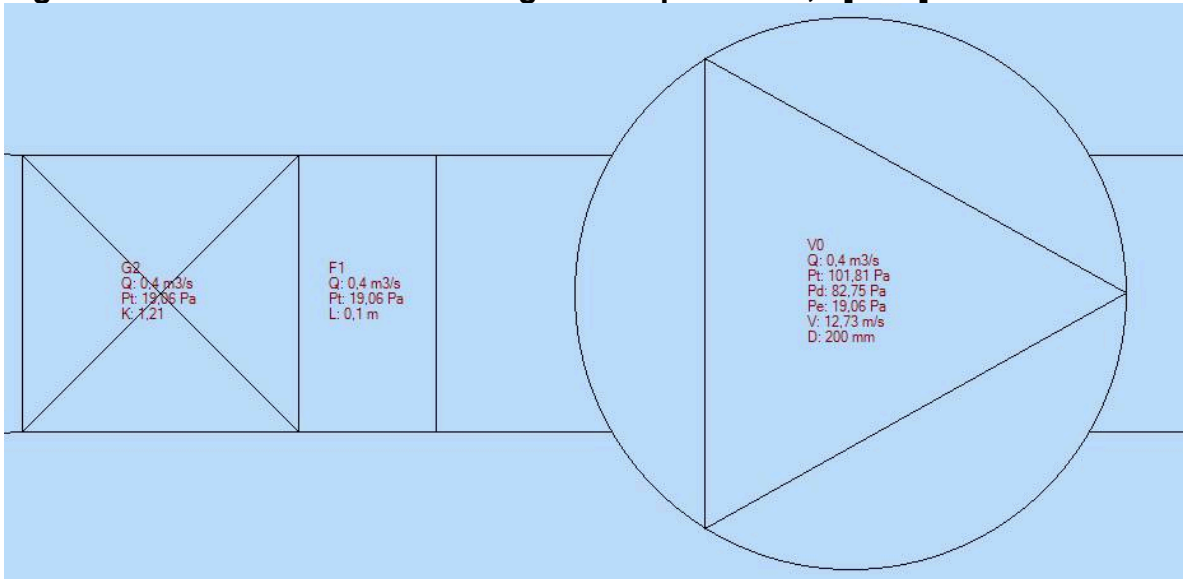


Figura 30. Circuito con accesorio genérico para $Q= 0,4 [m^3/s]$.



- Para $Q = 0,6 [m^3/s]$.

Figura 31. Circuito de puntos de medida 6* y 7 para Q= 0,6 [m³/s].

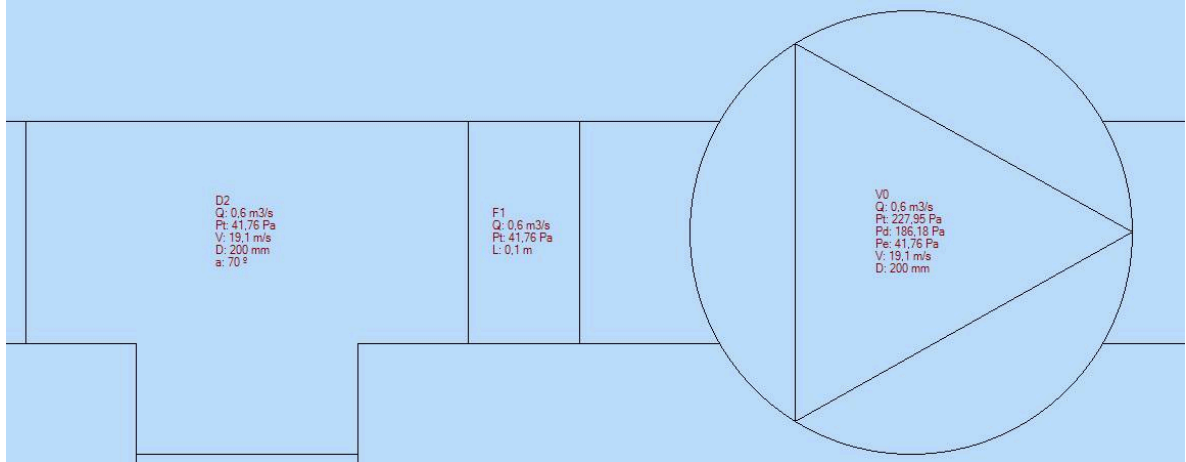
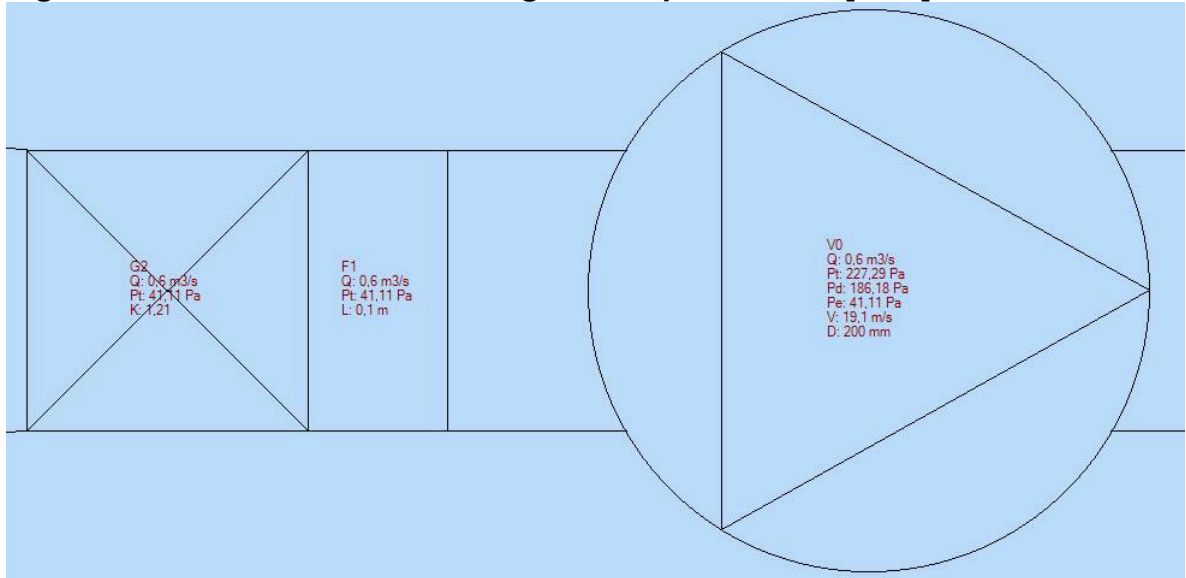


Figura 32. Circuito con accesorio genérico para Q= 0,6 [m³/s].



Todos los resultados obtenidos en las pruebas anteriores se consignaron en la siguiente tabla para observar el comportamiento de la presión con la variación del caudal de una manera más sencilla.

Tabla 12. Caudal y presión para circuito de puntos de medida 6* y 7.

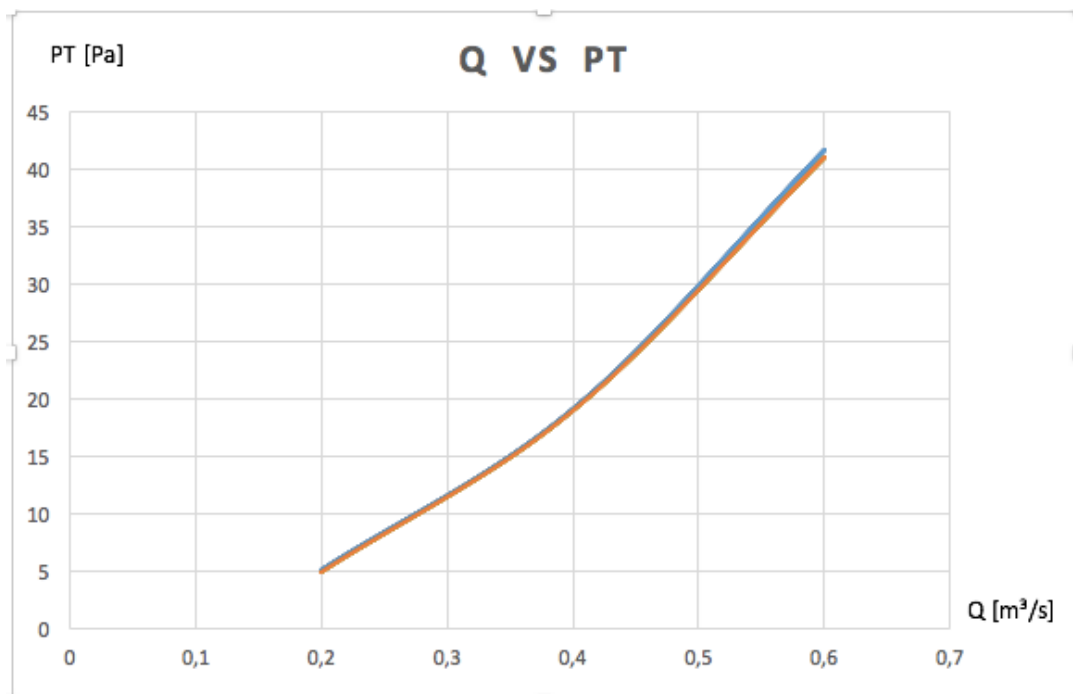
Q [m³/s]	PT [Pa]
0,2	5,09
0,4	19,14
0,6	41,76

Tabla 13. Caudal y presión para circuito con accesorio genérico.

Q [m³/s]	PT [Pa]
0,2	5
0,4	19,06
0,6	41,11

A continuación, se mostrará la gráfica obtenida con los valores de las tablas 12 y 13.

Figura 33. Grafica de Caudal vs Presión total.



La curva de color azul describe el comportamiento del circuito de los puntos de medida 6* y 7, y la curva de color naranja el comportamiento del circuito con reemplazo de accesorio genérico. En la gráfica se evidencia que ambos circuitos reaccionan de manera proporcional al cuadrado del caudal cuando este se varía, ya que las pérdidas de carga obtenidas en ambos casos son aproximadamente iguales, además la representación gráfica obtenida es una parábola como la de cualquier curva característica de un sistema de ventilación. Por lo tanto, se demuestra que es posible realizar el reemplazo de ductos por un accesorio genérico que simplifique el trazado de tuberías del sistema.

5.3 MODELAMIENTO DEL SISTEMA DE DESEMPOLVADO ACTUAL

El sistema de desempolvado del área de empacado tiene cierta complejidad para su modelado ya que cuenta con gran cantidad de ramales, accesorios y bifurcaciones que al momento de dibujarlo en CASALS puede tornarse incomodo de manejar y trazar. Fue por esto que se demostró la herramienta de los accesorios genéricos en el numeral anterior, para dividir el sistema en dos secciones y al final cada una ser reemplazada por un sistema más simple usando los accesorios a la entrada del filtro.

5.3.1 Primera sección del sistema de desempolvado. La primera sección del sistema consta de los *puntos de medida 1, 2 y 4* los cuales van dirigidos hacia la parte de la empacadora 1 como se muestra en la Figura 15. Teniendo el dimensionamiento de las tuberías (longitudes y diámetros) y todos los accesorios que componen cada tramo, se procedió al trazado de esta sección obteniendo el siguiente circuito:

Figura 34. Circuito para puntos de medida 1, 2 y 4.

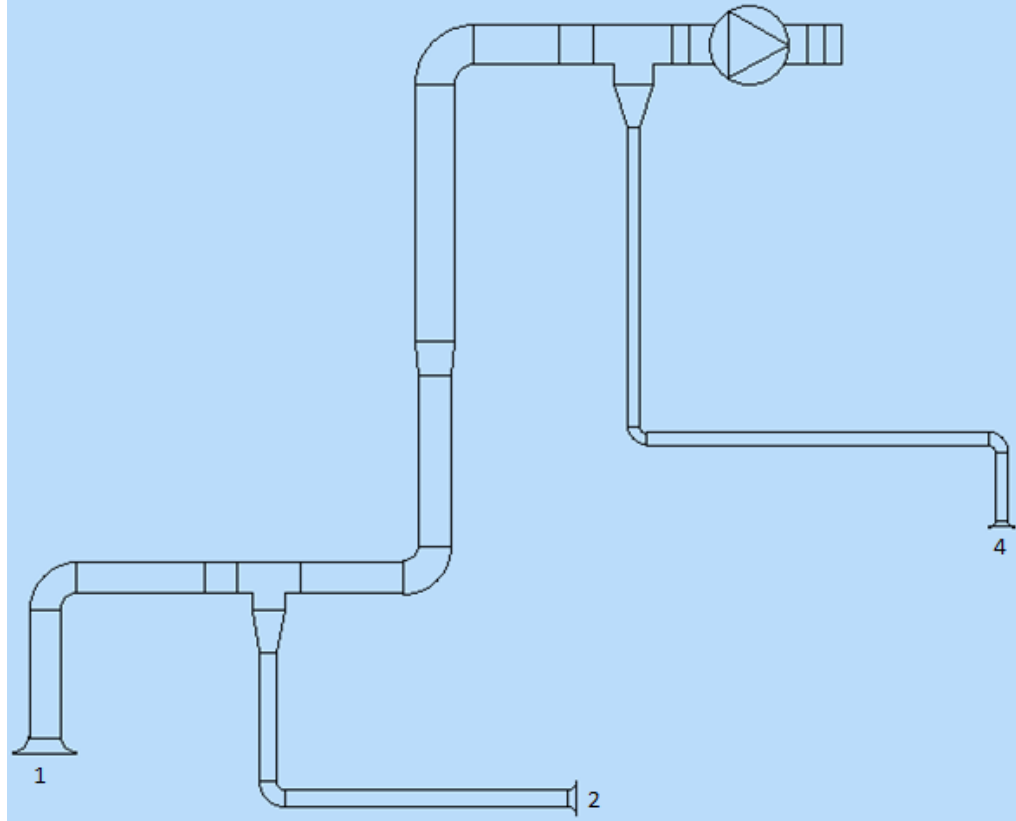



Figura 35. Informe del ventilador de la primera sección.

 Informe ventilación (1/3)

■ Condiciones ambientales
 Temperatura = 35 °C Altura = 959 m Densidad del aire = 1,02 Kg/m³

■ Ventilador

ID	m ³ /s	Ps (Pa)	Pd (Pa)	Pt (Pa)	Ø (mm)	Sección(m ²)
V0	1,77	119,45	57,9	177,35	460	0,1662

Después de haber trazado el circuito completo, CASALS realiza el cálculo del ventilador requerido para esta sección del sistema. A partir de los valores arrojados por el informe del programa (Figura 35), se calcula el factor de pérdidas del accesorio usando la *expresión 18* mencionada en el *numeral 5.2*.

Los resultados fueron consignados en la siguiente tabla:

Tabla 14. Valores para el accesorio genérico 1.

MEDICIÓN	ACCESORIO GENERIC 1	UNIDADES
Q	1,77	m ³ /s
PS	119,45	Pa
PD	57,9	Pa
PT	177,35	Pa
Vel	10,65	m/s
Densidad	1,02756	kg/m ³
K	3,043	-

5.3.2 Segunda sección del sistema de desempolvado. La segunda sección del sistema es un poco más grande que la primera, ya que consta de los puntos de medida 6, 6*, 7, 8 y 9 los cuales van dirigidos a la empacadora 2 y el punto de medida 5 que va dirigido al sótano como se observa en la Figura 15. El modelado se realizó de la misma forma que para la primera sección y se obtuvo el siguiente circuito:

Figura 36. Circuito para puntos de medida 5, 6, 6*, 7, 8 y 9

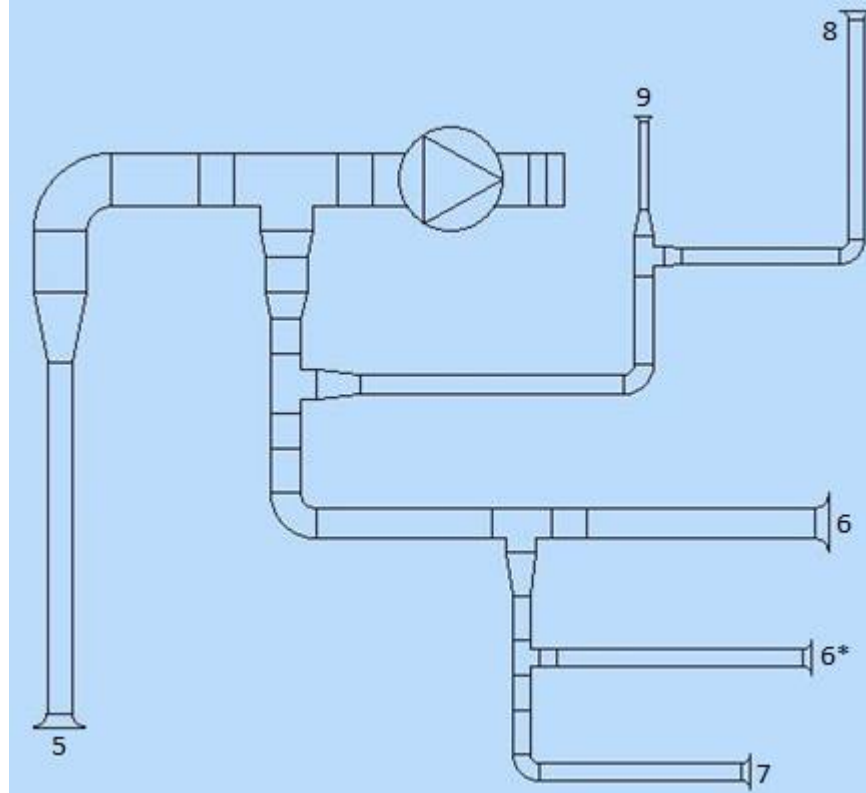
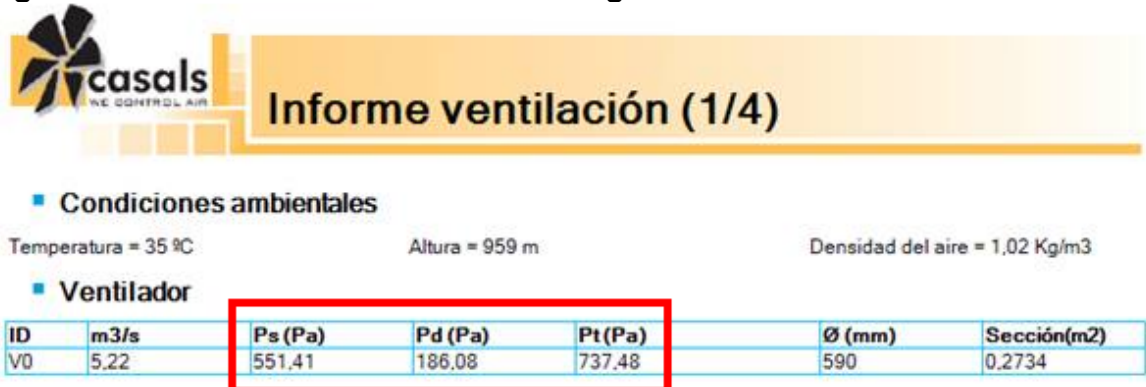


Figura 37. Informe del ventilador de la segunda sección.



De la misma manera que en la primera sección, se realiza el cálculo del factor de pérdidas que caracterizara el segundo accesorio genérico a partir de los datos obtenidos en el informe de la Figura 37.

Tabla 15. Valores para el accesorio genérico 2.

MEDICIÓN	ACCESORIO GENERIC0 2	UNIDADES
Q	5,22	m ³ /s
PS	551,41	Pa
PD	186,08	Pa
PT	737,48	Pa
Vel	19,09	m/s
Densidad	1,02756	kg/m ³
K	3,94	-

5.3.3 Filtro y ventilador del sistema de desempolvado. Después de haber calculado ambos factores de pérdidas, se realiza el trazado de la tercera y última sección del sistema de desempolvado la cual cuenta con el filtro y el ventilador. Para esta se van a reemplazar las dos primeras secciones por su respectivo accesorio genérico en el momento en que se encuentran a la llegada del filtro.

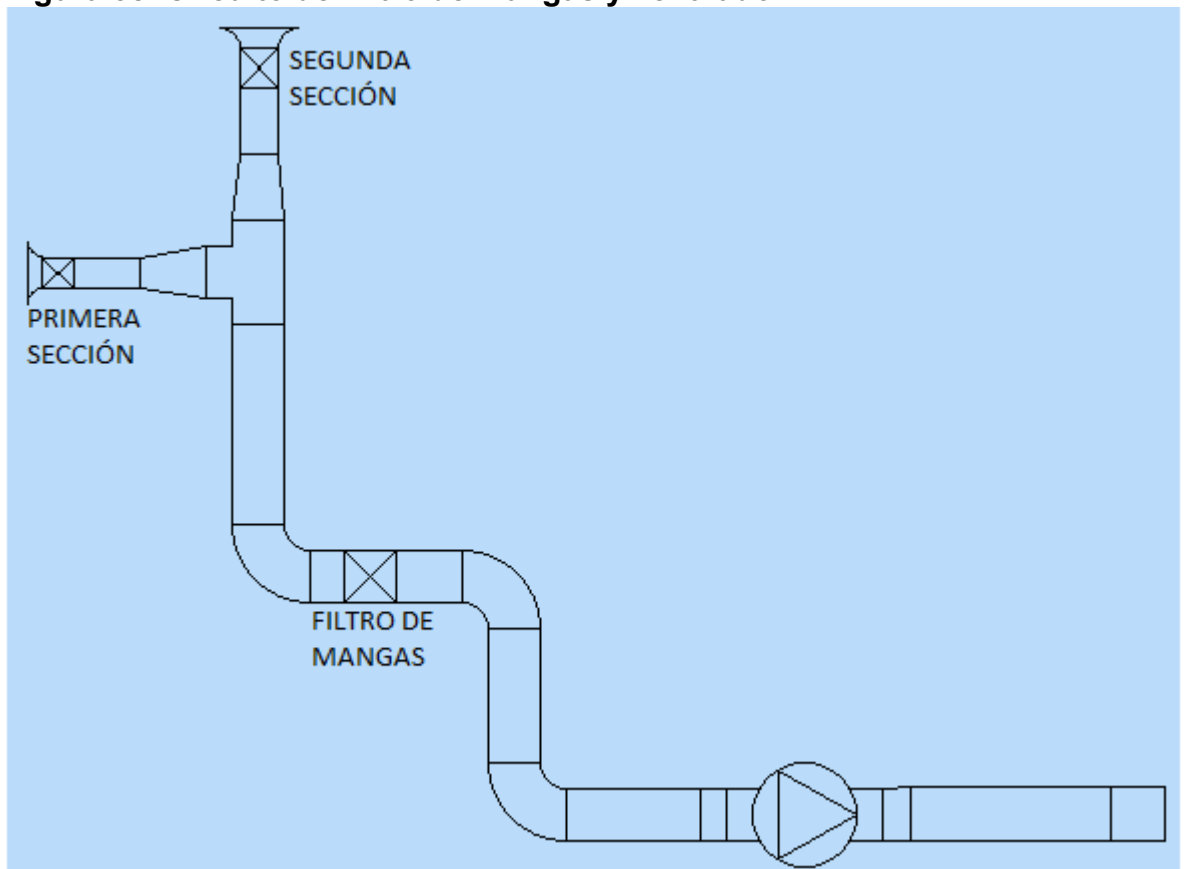
Dentro del manual de ayuda del programa CASALS se encontró un ejemplo en el que una manta filtrante se reemplazó por un accesorio genérico, ya que se conocían los datos de velocidad y pérdidas de carga en esta. Con base en este ejemplo se realizará el reemplazo del filtro de mangas del sistema por un accesorio genérico, y el factor de pérdidas se va calcular de la misma forma en que se hizo para las dos primeras secciones. Al conocer los datos a la entrada y salida del filtro (Tabla 7), no habrá problema en calcular el factor a partir de los valores de velocidad y pérdidas de carga en este. Los datos necesarios para el cálculo del factor de pérdidas fueron consignados en la siguiente tabla:

Tabla 16. Valores para el accesorio genérico del filtro de mangas.

MEDICIÓN	FILTRO DE MANGAS	UNIDADES
Q	7,07	m ³ /s
PT	2265,94	Pa
Vel	13,72	m/s
Densidad	1,02756	kg/m ³
K	23,45	-

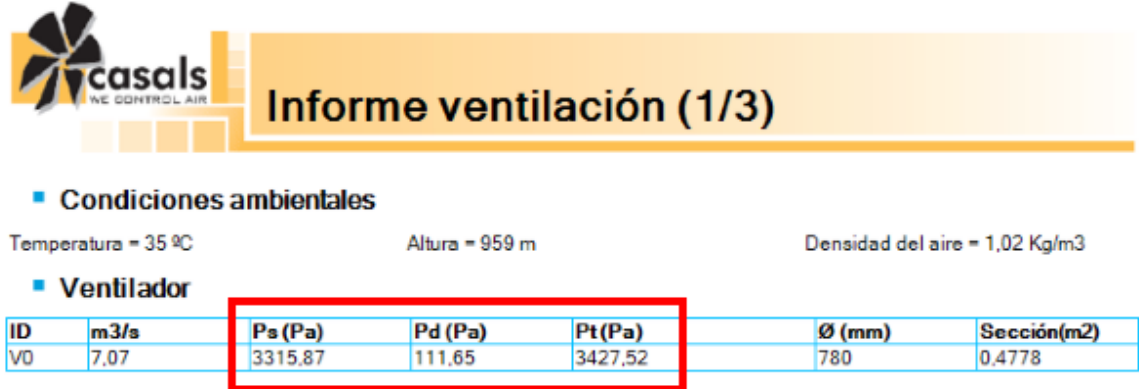
Ahora, teniendo caracterizados los tres accesorios genéricos que se van a usar con sus respectivos factores de pérdidas se puede trazar la tercera sección del sistema de desempolvado. El circuito obtenido es el siguiente:

Figura 38. Circuito del filtro de mangas y ventilador.



Por lo tanto, el ventilador del sistema de desempolvado actual es el que CASALS calcula en esta última sección a partir del circuito mostrado en la Figura 38. El informe con sus respectivos valores es el que se muestra a continuación:

Figura 39. Informe del ventilador del filtro de mangas empaque.



Los datos de presión y caudal mostrados en el informe de la figura 39, son los usados para la selección del ventilador. Para realizar este proceso se utiliza la herramienta de CASALS llamada FANWARE, la cual cuenta con un fuerte motor de búsqueda dentro de su inventario, mostrando ventiladores que mejor se adapten a los criterios de diseño.

- 1) Inicialmente la herramienta pide los datos de caudal y presión obtenidos a partir de CASALS, al igual que los datos de las condiciones ambientales en las que va a trabajar el ventilador.

Figura 40. Entrada de datos para la selección del ventilador.

▼ DATOS CAUDAL/PRESIÓN		▼ DATOS AMBIENTALES	
Caudal	<input type="text" value="7.07"/> m ³ /s	Temperatura del aire	<input type="text" value="35"/> °C
Presión	<input type="text" value="3315.7"/> Pa @ 35°C 959m 1.02 Kg/m ³	Altura sobre el nivel del mar	<input type="text" value="959"/> m 1.02 Kg/m ³
Número de ventiladores	<input type="text" value="1"/> 7.07 m ³ /s	Temperatura máxima del aire	<input type="text" value="35"/> °C

2) Después se busca la mejor opción dentro de la lista de ventiladores, teniendo en cuenta que la velocidad máxima permitida por la empresa es de 1800 RPM.

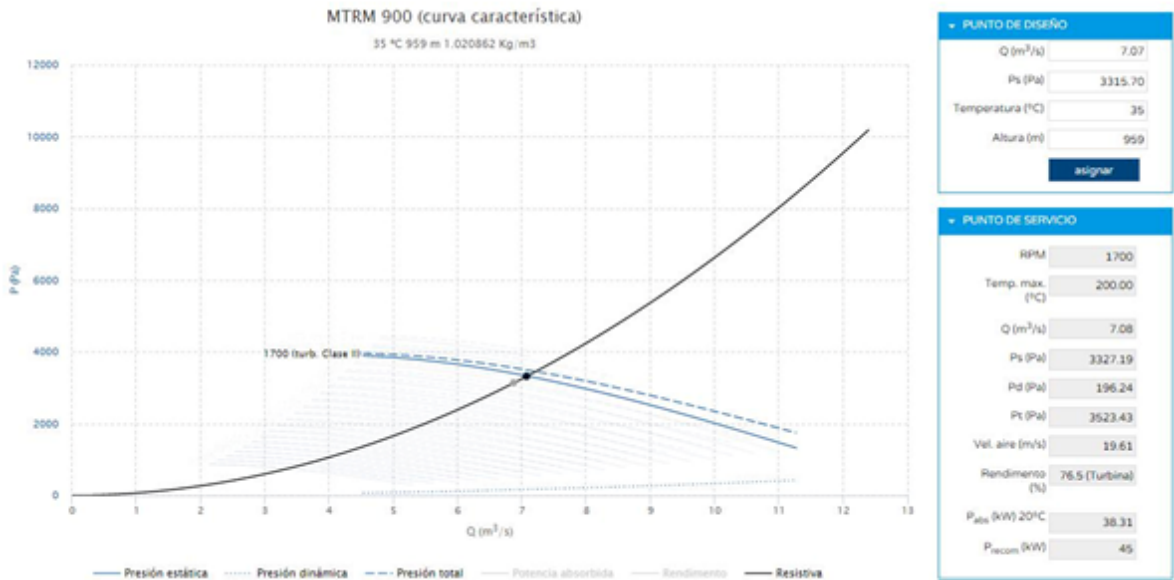
Figura 41. Opción seleccionada de la lista de ventiladores.

◇ código	◇ nombre	caudal ◇ (m ³ /s)	presión ◇ (Pa)	◇ RPM	potencia ◇	Rendimiento ◇	tipo rendimiento ◇	◇
501810062	MBRM 1002 T4 55kW	7.2	3439.89		55			
5044090__R__	MTRM 900	7.08	3326.74	1700 (turb. Clase II)	45	76.5 %	Turbina	
5044100__R__	MTRM 1000	7.08	3328.83	1450	55	77.08 %	Turbina	
5044112__R__	MTRM 1120	7.33	3568.84	1300 (turb. Clase II)	75	77.42 %	Turbina	
5045071__R__	MTRU 710	7.14	3385.25	2500	55	86.09 %	Turbina	
5045080__R__	MTRU 800	7.18	3424.12	2050	75	87.18 %	Turbina	

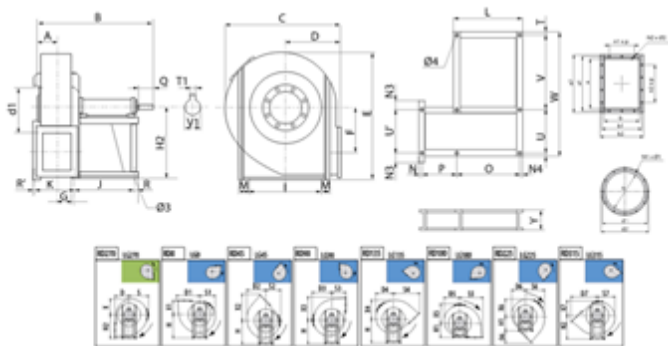
Se seleccionó un ventilador centrífugo de media presión MTRM 900 con capacidad de 7,08 m³/s y presión estática de 3326,74 Pa.

3) Finalmente, se analiza la curva característica del ventilador seleccionado.

Figura 42. Características del ventilador seleccionado.



A	B	C	D	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	E	F	G	H	H1	H2	I	J	K
275	1390	1900	630	2038	909	870	835	721	633	1180	1791	630	334	890	630	890	962	951	600
L	M	N	N1x01	N2x02	N3	N4	O	O6	P	Q	R	R'	S	S1	S2	S3	S4	S5	S6
629	91	39	12x24	16x14	91	39	551	990	600	110	39	47	870	721	633	630	1180	1038	909
S7	T	U	U'	V	V1	W	X	X'	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	Y	z	z1	z2
835	32	962	962	987	55	2013	721	91	630	1180	1038	909	870	835	633	180	715	775	823
s	s1	s2	d	d1	d2	n1ap	n2ap	Ø3	Ø4										
307	567	807	635	698	735	2x180	4x180	19	20										



6 ANÁLISIS DE LAS EMISIONES DE CONTAMINANTES DEL AREA DE EMPACADO

En la resolución número 909 el ministerio de ambiente, vivienda y desarrollo territorial establece ciertas normas y estándares de emisiones admisibles de contaminantes a la atmósfera por fuentes fijas, con el fin de conservar el medio ambiente y el derecho de las generaciones futuras a utilizarlo para la satisfacción de sus propias necesidades. Por esto, se determinaron las normas ambientales mínimas y las regulaciones de carácter general aplicables a todas las actividades que puedan producir de manera directa o indirecta daños ambientales.

La industria cementera por el tipo de procesos que lleva a cabo esta sometida a cumplir con estas normas y estándares, además debe preocuparse por mantener la atmósfera en condiciones que no causen molestias, daños o interfieran el desarrollo normal de la vida humana, animal o vegetal y de los recursos naturales renovables.

En la tabla 3 del artículo 6 se muestran las actividades industriales y contaminantes a monitorear por actividad industrial. La industria cementera hace parte del área de procesamiento de minerales y el contaminante que se debe monitorear es el material particulado (MP), como se muestra en la siguiente figura extraída de la tabla:

Figura 43. Actividades industriales y contaminantes a monitorear por actividad industrial.

Actividad industrial	Procesos e instalaciones	Contaminantes
Procesamiento de minerales	<p>Cualquier planta de procesamiento de mineral metálico, aplica a cada triturador y tamizador en minas abiertas; cada triturador, tamizador, elevador de cangilones, banda transportadora, secador térmico, estación de empaque de producto, sitio de almacenamiento, área de almacenamiento encerrada, estación de carga y descarga de camiones o vagones de ferrocarril en el molino o concentrador.</p> <p>Cualquier planta de procesamiento de mineral no metálico, aplica a cada triturador, molino de pulverización, operación de tamizaje, elevador de</p>	MP

Fuente: Ministerio de ambiente, vivienda y desarrollo territorial. Normas y estándares de emisión fuentes fijas. Resolución 909 del 5 de Junio del 2008.

Entonces, al realizar el estudio de emisiones en el área de empaqueo se debe analizar la concentración del material particulado expulsado por la chimenea del sistema de desempolvado y saber si este se encuentra debajo del índice estipulado por la norma.

6.1 COMPARACIÓN DE LAS EMISIONES DE EMPAQUE CON LO ESTIPULADO CON LA NORMA

En el último estudio de las emisiones de contaminantes en CEMEX S.A. planta cemento Bucaramanga se registraron concentraciones y flujos para cuatro áreas diferentes. Como se puede observar en la siguiente tabla, el área de empaque se encontraba dentro del estudio.

Tabla 17. Resumen de resultados del estudio.

CONTAMINANTE	FUENTE	EMISIÓN	FLUJO
		mg/m ³	kg/h
MP	Molino de cemento 1	5,70 ± 0,93	0,05
MP	Molino de cemento 2	4,20 ± 1,52	0,03
MP	Empaque	2,93 ± 2,57	0,07
MP	Separador de molienda	2,89 ± 0,51	0,04

Fuente: Base de datos CEMEX COLOMBIA S.A planta cemento Bucaramanga.

El primer valor de la emisión se refiere al calculado a condiciones de referencia, es decir, a una temperatura de 25° C y presión atmosférica de 760 mmHg. Entonces, como dice la resolución 909 en el capítulo XXI artículo 86 todos los resultados de las mediciones de los diferentes contaminantes deben ser corregidos a condiciones de referencia por medio de la siguiente ecuación:

$$C_{CR} = C_{CL} * \frac{T_{CL} * P_{CR}}{P_{CL} * T_{CR}} \quad (19)$$

Donde:

C_{CR} = Concentración del contaminante a condiciones de referencia en mg/m³.

C_{CL} = Concentración del contaminante a condiciones locales en mg/m³.

T_{CL} = Temperatura de los gases a la salida del ducto en ° K.

T_{CR} = Temperatura a condiciones de referencia en ° K.

P_{CL} = Presión de los gases a la salida del ducto en mmHg.

P_{CR} = Presión a condiciones de referencia en mmHg.

Reemplazando los valores de concentración, presión y temperatura de las condiciones de referencia y las condiciones de Bucaramanga en la ecuación 19 se obtiene:

$$C_{CR} = 2,57 * \frac{303 * 760}{680 * 298}$$

$$C_{CR} = 2,92$$

Ahora, según el artículo 87 el cálculo del flujo del contaminante se realiza usando la siguiente ecuación:

$$FC = \frac{C_{CR} * Q_{CR}}{1000000} \quad (20)$$

Donde:

FC = Flujo del contaminante en kg/h

C_{CR} = Concentración del contaminante a condiciones de referencia en mg/m³.

Q_{CR} = caudal del contaminante a condiciones de referencia (25° C, 760 mmHg) en m³/h.

Para realizar el cálculo del flujo del contaminante es necesario tener el caudal a condiciones de referencia, por esto se tiene que calcular un nuevo caudal a partir de los valores de presión dinámica medidos en la chimenea sin realizar la corrección de la densidad.

$$P_{Dinamica} = 9,945 \text{ mmca}$$

Reemplazando este valor en la expresión (8):

$$V = 4,043 \sqrt{9,945}$$

$$V = 12,75 \text{ m/s}$$

Conociendo el área de la chimenea se puede calcular el caudal a partir de la expresión (11):

DIAMETRO DEL DUCTO

$$D_{chimenea} = 0,81 [m]$$

AREA DEL DUCTO

$$A_{chimenea} = \frac{\pi * D^2}{4} = \frac{\pi * 0,81^2}{4}$$

$$A_{chimenea} = 0,5153 [m^2]$$

$$Q_{CR} = 12,75 * 0,5153$$

$$Q_{CR} = 6,57 \left[\frac{m^3}{s} \right] = 23652 \left[\frac{m^3}{h} \right]$$

Conociendo el caudal a condiciones de referencia se puede calcular el flujo del contaminante usando la ecuación (20):

$$FC = \frac{2,93 * 23652}{1000000}$$

$$FC = 0,07$$

El estudio que se llevó a cabo en el área de empaclado, se realizó para tres condiciones diferentes según el nivel de producción que tuviera el área. El recorrido o toma uno se hizo cuando se encontraba en funcionamiento solamente la empacadora 2 junto con todos los elementos que la componen, la concentración que se registró fue de 1,64 mg/m³. En el recorrido dos se obtuvo una concentración mucho más grande, ya que se realizó con las dos empacadoras trabajando, es decir, en el momento de mayor carga de producción para el área; el valor que se registró fue de 5,89 mg/m³. El tercer y último recorrido se realizó con la maquina empacadora 1 en funcionamiento, para el cual se registró una

concentración un poco menor que en el recorrido uno, obteniendo una concentración de 1,25 mg/m³.

Los valores de concentraciones y flujos del contaminante se consignaron en la siguiente tabla.

Tabla 18. Emisiones registradas para el área de empaque.

EMPAQUE			
Recorrido	Parámetro	Concentración referencia	Rata de Emisión MP
		mg/m³	kg/h
1	MP	1,64	0,03
2		5,89	0,09
3		1,25	0,02
Promedio		2,93	0,05

Fuente: Base de datos CEMEX COLOMBIA S.A planta cemento Bucaramanga.

Retomando la resolución 909, se encontró que el capítulo IX habla sobre los estándares de emisión admisibles de contaminantes al aire para las industrias de producción de cemento, concreto y agregados. Además, en el artículo 28 de este capítulo se establecen los estándares de emisión admisibles para dispositivos colectores de polvo empleados enfriadores de Clinker, sistemas de molienda en seco, silos de almacenamiento, bandas transportadoras o similares, sistemas de empaclado en sacos, sistemas de carga y descarga a granel y de dosificación de concreto existentes. Los valores de los estándares de emisión admisibles de contaminantes al aire en procesos existentes que no implican combustión en plantas cementeras y de producción de concreto son los siguientes.

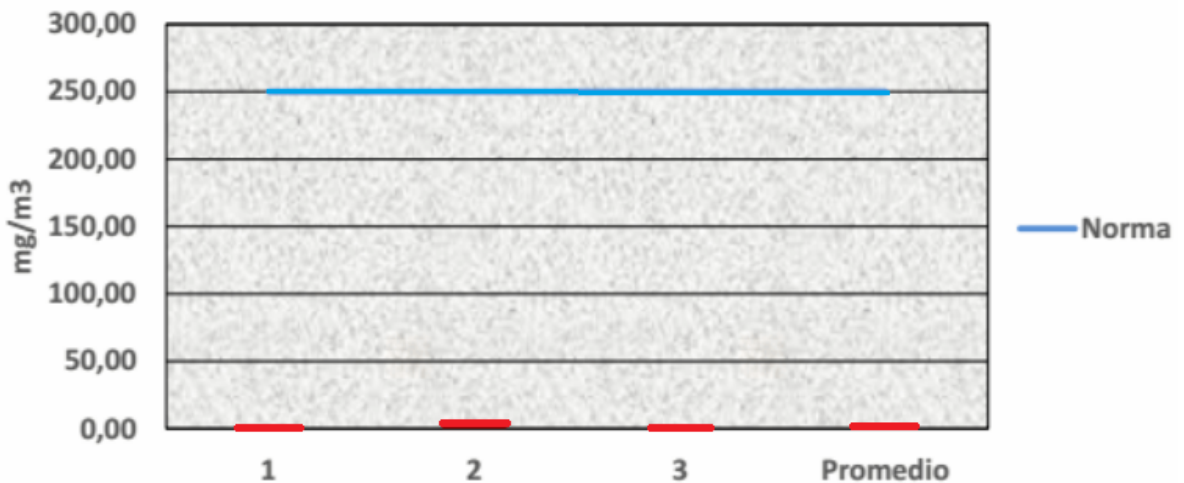
Tabla 19. Estándares de emisión admisibles según Artículo 28.

Contaminante	Flujo del contaminante (kg/h)	Estándares de emisión admisibles de contaminantes (mg/m ³)
Material	≤ 0,5	250
Particulado (MP)	> 0,5	150

Fuente: Ministerio de ambiente, vivienda y desarrollo territorial. Normas y estándares de emisión fuentes fijas. Resolución 909 del 5 de Junio del 2008.

Comparando los valores obtenidos en la tabla 18 del flujo y las concentraciones en el área de empaque con los estándares de emisión de la tabla 19, se observa que para un flujo promedio de 0,5 kg/h que fue el registrado en los estudios la concentración está muy por debajo de la admisible por la norma. En la siguiente grafica se evidencia la gran diferencia de valores entre las concentraciones de cada recorrido y el promedio de estos, con el valor admisible estipulado por la norma.

Figura 44. Comparación de las emisiones de empaque con la tabla 19.



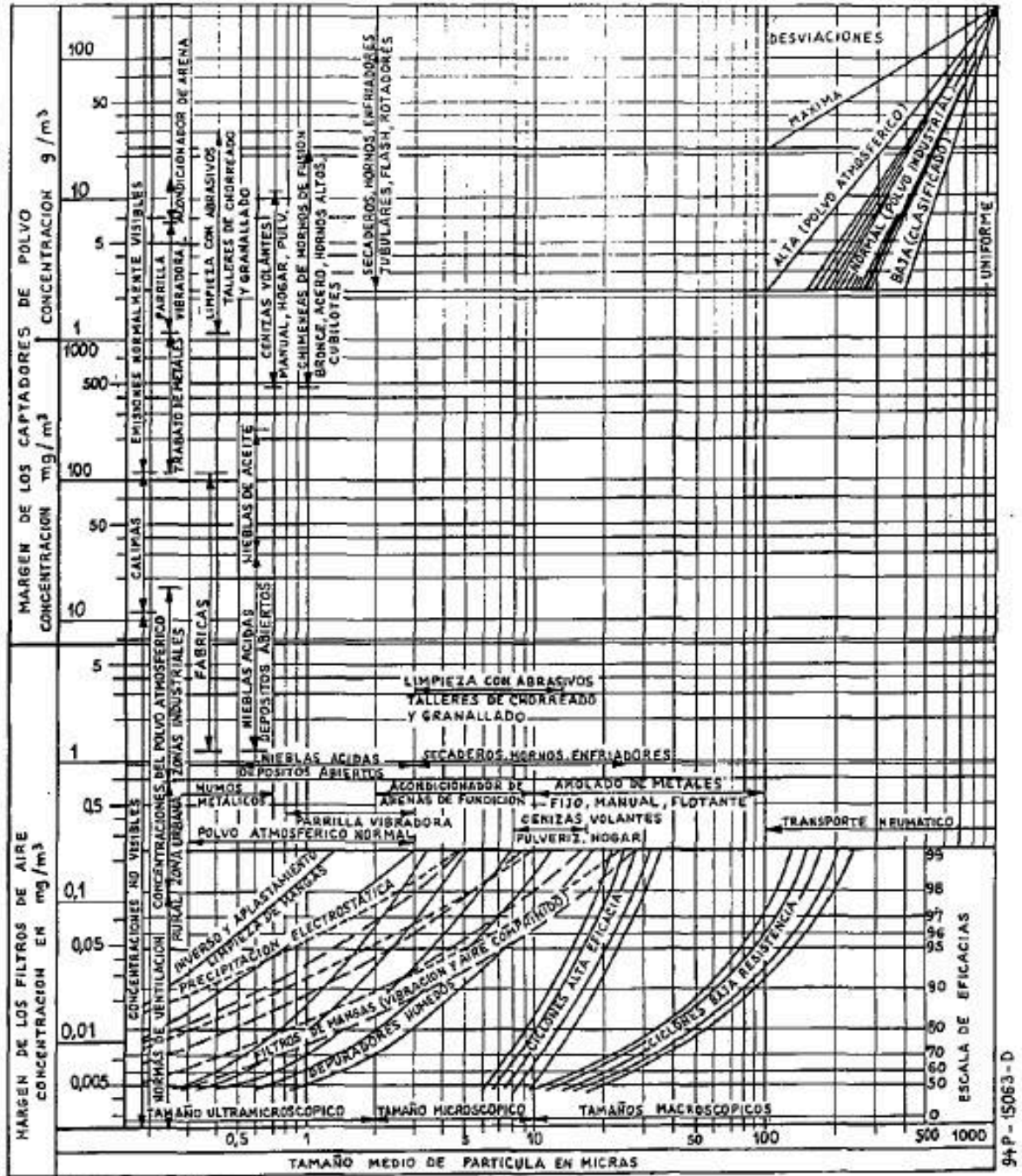
En el eje horizontal de la gráfica se ubicaron los tres recorridos realizados para las tomas de emisiones junto con el promedio de estos, y en el eje vertical se ubicaron los valores de concentración emitidos por la chimenea del área de empaque de la

planta CEMEX S.A. en mg/m^3 . Las líneas de color rojo indican el dato de concentración registrado para cada recorrido y su valor promedio. La línea de color azul muestra el estándar de emisión admisible referenciado en la Tabla 19.

6.2 ESTUDIO DEL TAMAÑO DE PARTICULAS, CONCENTRACIÓN Y EFICACIA DE DEPURACIÓN DEL AIRE CONTAMINADO

En la Figura 45, se representan gráficamente las eficacias de captación de algunos equipos de depuración de aire en función del tamaño de partícula. Las relaciones representadas son el resultado de ensayos de laboratorio y pruebas de campo, no estimaciones o resultados obtenidos con modelos matemáticos. Las líneas de cada equipo indican el rango previsto para depuradores que operen según el mismo principio. Otras variables tales como el tipo de polvo, velocidad del aire, caudal de agua, etc., también pueden tener influencia en el margen de eficacias observable en una aplicación concreta.

Figura 45. Grafica de tamaño de partícula, concentración y eficacia de depuración.

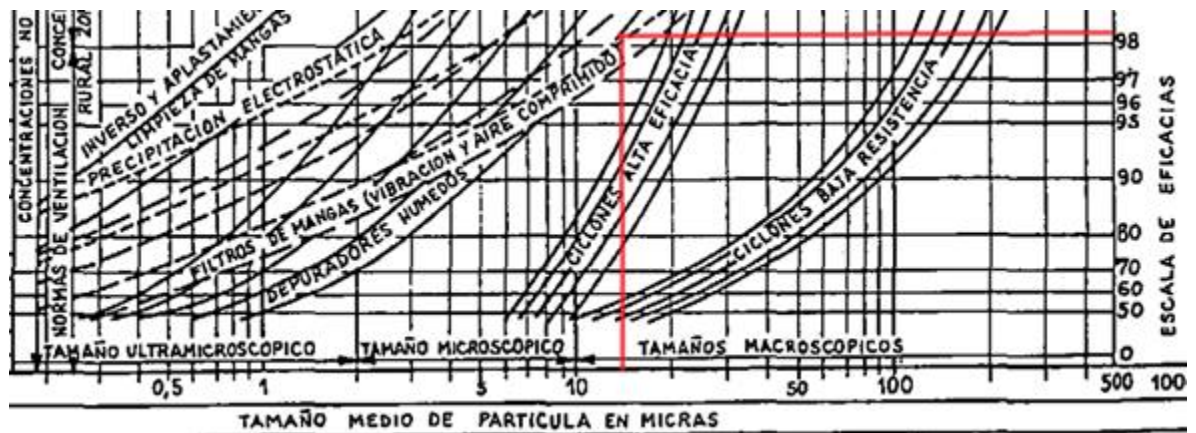


Fuente: Manual de Ventilacion Industrial.

Las líneas de desviación mostradas en el vértice superior derecha sirven para estimar el tamaño medio másico del efluente de un captador cuando se conoce el tamaño medio en la entrada.

Aproximadamente 95% de las partículas del cemento son menores que 45 micrómetros (μm), con un promedio de partículas de 15 micrómetros. Para el análisis de la gráfica se va a usar el valor promedio, como se observa en la Figura 46 para filtros de mangas la eficiencia es aproximadamente del 98,2%.

Figura 46. Eficacia del filtro según el tamaño de partícula.



Fuente: Manual de Ventilacion Industrial.

A partir del valor de la eficiencia del filtro de mangas y el dato de concentración emitido por la chimenea en el área de empaque, se puede calcular la concentración a la entrada del filtro usando la siguiente expresión:

$$\eta = \frac{\text{Concentración}_{\text{entrada}} - \text{Concentración}_{\text{salida}}}{\text{Concentración}_{\text{entrada}}} \quad (21)$$

Para conocer la concentración de entrada, es necesario realizar el siguiente despeje:

$$\text{Concentración}_{\text{entrada}} = \frac{\text{Concentración}_{\text{salida}}}{1 - \eta} \quad (22)$$

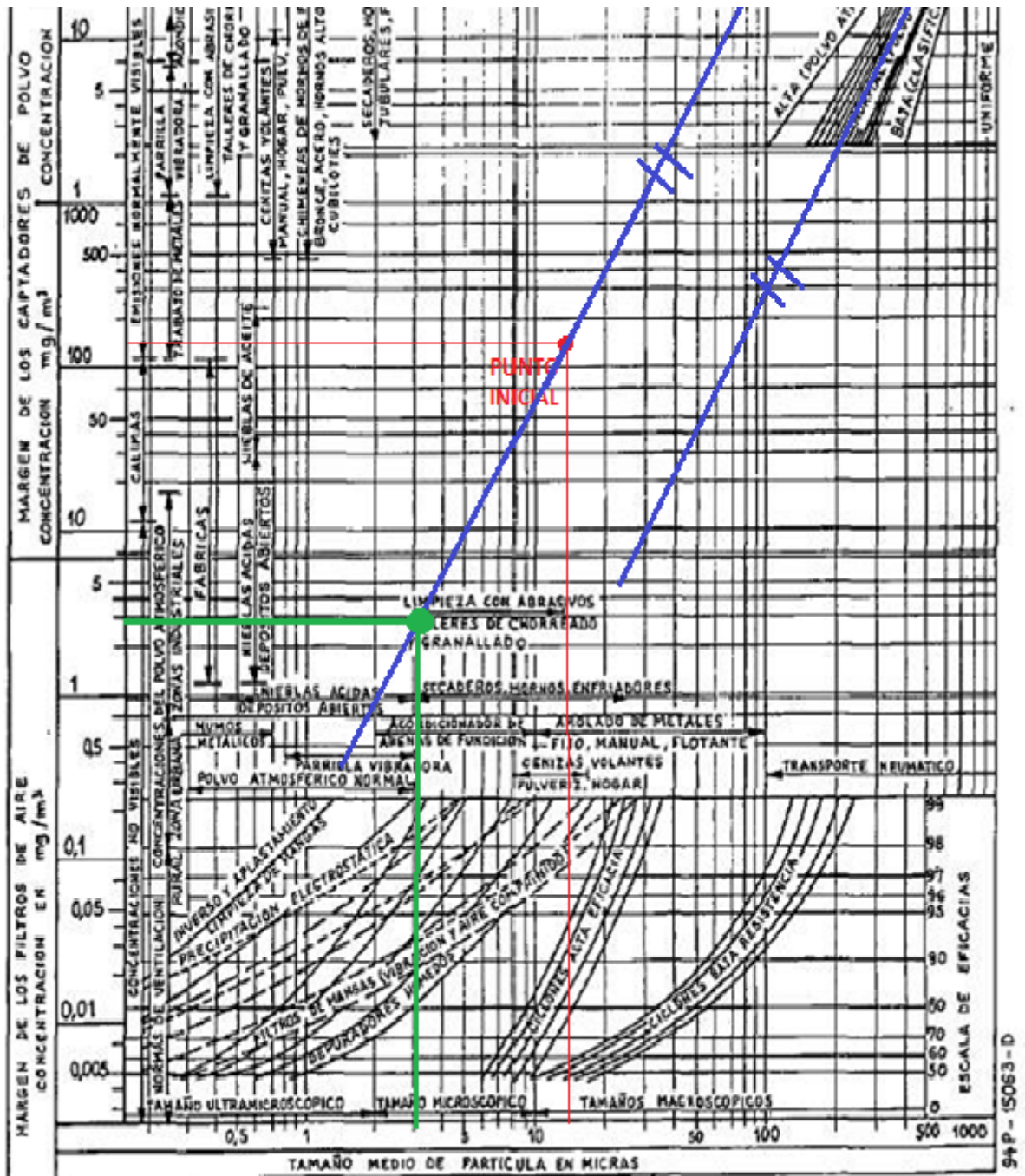
Reemplazando los valores de concentración a la salida y la eficiencia del filtro se obtiene:

$$\text{Concentración}_{\text{entrada}} = \frac{2,93 \left[\frac{\text{mg}}{\text{m}^3} \right]}{1 - 0,982}$$

$$\text{Concentración}_{\text{entrada}} = 162,77 \left[\frac{\text{mg}}{\text{m}^3} \right]$$

Conociendo la concentración y el tamaño medio de partícula a la entrada del filtro se marca un punto inicial, que va servir como referencia para encontrar el tamaño medio de las partículas a la salida del filtro. Se traza una línea por el punto inicial paralela a la línea de desviación señalada como polvo industrial, ya que el material que se está analizando es el cemento. Como la desviación real es desconocida, la media de este grupo de líneas es suficientemente precisa como estimación del tamaño medio de las partículas en el efluente del depurador. Por el punto de intersección de la línea horizontal que representa la concentración de 2,93 [mg/m³], y la línea de desviación trazada a partir del punto original, se traza una vertical que indica, en el eje de abscisas, que el tamaño medio de las partículas en la salida es de 3 μm. El procedimiento descrito anteriormente se muestra en la siguiente figura.

Figura 47. Procedimiento para hallar tamaño de grano en el efluente.



Fuente: Manual de Ventilación Industrial.

Al analizar lo obtenido por la gráfica 47, se reitera la validez sobre la comparación hecha anteriormente de las concentraciones registradas en el área de empaque con las emisiones admisibles por la norma, ya que confrontando el dato del tamaño medio de las partículas a la entrada del filtro ($15\mu\text{m}$) con el hallado a la salida de este ($3\mu\text{m}$), indica una muy buena colección de polvo dentro del mismo que determina por tanto un control adecuado de emisión de partículas hacia la atmósfera.

7 PROPUESTA DE REDISEÑO DEL SISTEMA DE DESEMPOLVADO A PARTIR DE LOS REQUERIMIENTOS REGISTRADOS EN LA EVALUACIÓN DEL AREA

Después de llevar a cabo la evaluación del área de empaque y realizar los respectivos cálculos de los nueve tramos que componen el circuito a partir de lo registrado en las mediciones (además de los ductos de entrada y salida del filtro), se van a mencionar los cambios que se deben hacer en los componentes del sistema de desempolvado pensando en la viabilidad de la futura implementación por parte de la empresa.

A pesar de que actualmente el sistema no cumpla con el requerimiento mencionado en uno de los criterios de la empresa de en lo posible usar un filtro para máximo 5 puntos de colección, se va a mantener el diseño del circuito ya que la capacidad del filtro de mangas está por encima de los requerimientos hallados. Además, separar el sistema requiere la adquisición de dos nuevos filtros para el área de empaque y sería difícil la implementación de esto para la empresa pensando en los costos que implicaría.

7.1 REDISEÑO DE DUCTOS A PARTIR DE CAUDALES Y VELOCIDADES

A partir de la evaluación realizada se van a observar en cada punto de medida, las velocidades comprobando que estén dentro del rango sugerido por los criterios de diseño de la empresa, y los caudales que se deben transportar a través de los ductos del sistema dependiendo del equipo que se va a desempolvar.

Para los criterios de diseño de velocidades, el ducto debe estar basado en una velocidad de 18 m/s. Básicamente en cualquier punto del ducto la velocidad debe estar entre 15 y 23 m/s, porque si se tiene que la velocidad es menor, entonces se

encontraría material segregado a lo largo de la tubería; en cambio, una velocidad muy alta resultaría en abrasión en el ducto, principalmente en los cambios de dirección o de sección. Las velocidades pueden ser ligeramente mayores que los valores mínimos, pero nunca deben ser significativamente menores.

Tabla 20. Velocidad y caudal en los puntos de medida.

PUNTO DE MEDIDA	VELOCIDAD [m/s]	CAUDAL [CFM]
1	9,803	2233,3
2	16,37	1089,1
4	25,71	428
5	32,05	4492
6	16,6	3199,5
6*	11,46	762,8
7	13,86	921,7
8	22,67	1364,6
9	19,61	326,3

Por medio del software CASALS se va a realizar la simulación del rediseño del sistema, ya que al cambiar los diámetros de las tuberías en los circuitos de las figuras 34 y 36 el programa calcula automáticamente los nuevos valores de velocidades y caudales para los puntos de medida señalados en color rojo y amarillo respectivamente en la tabla 20. Los demás puntos no requieren una modificación de su diseño ya que cumplen con los criterios especificados por la empresa.

7.1.1 Punto de medida 1. Como se observa en la tabla la velocidad a través de este ducto está por debajo del mínimo permitido por los criterios de diseño, entonces se va proceder a calcular un nuevo diámetro usando la velocidad de 18 m/s a partir de la expresión (11) despejando el área para obtener la siguiente ecuación.

$$A_1 = \frac{Q_1}{V_1} \quad (23)$$

$$A_1 = \frac{1,054}{18} = 0,059 [m^2]$$

A partir del valor del área se va calcular el nuevo diámetro que va tener el ducto, despejándolo de la expresión (10).

$$D_1 = \sqrt{\frac{4 * A}{\pi}} \quad (24)$$

$$D_1 = \sqrt{\frac{4 * 0,059}{\pi}}$$

$$D_1 = 0,27 [m]$$

Antes de implementar el cambio en el tramo de tubería, este nuevo diámetro calculado puede ser verificado experimentalmente mediante un procedimiento práctico que se lleva a cabo en algunas empresas cementeras. A través de la colocación de una placa orificio en determinada sección del ducto que lo necesite se puede realizar el balanceo de sistemas en funcionamiento. El objetivo es introducir una compuerta guillotina a través del ducto, una cierta distancia, de tal manera que al medir la velocidad en ese punto se obtenga el valor de diseño de

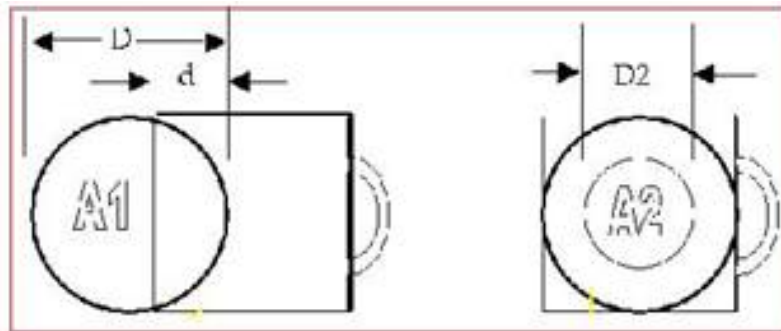
18 m/s. Con base en la distancia a la que fue introducida la compuerta guillotina se puede obtener la geometría de la placa orificio que va a ser colocada.

$$D_2 = \sqrt{D^2 - \frac{D^2}{2\pi} \left(\frac{\pi * \emptyset}{180} - \sin \emptyset \right)} \quad (25)$$

Donde:

$$\emptyset = 2 * \cos^{-1} \left(\frac{D - 2d}{D} \right) \quad (26)$$

Figura 48. Guillotina y placa orificio.



Fuente: Consideraciones para el diseño de sistemas colectores de mangas.

Holcim C.A. planta Cumarebo. Coro, Venezuela, 2011, 180p.

Para este caso el nuevo diámetro calculado fue de $D_2 = 0,27 [m]$ y el diámetro inicial es de $D_1 = 0,37 [m]$, reemplazando estos valores en la ecuación 25 se calculó un ángulo $\emptyset = 174,1$. Conociendo el valor del ángulo se reemplazó en la ecuación 26 y se halló la distancia $d = 0,176 [m]$, que debe ser introducida la compuerta guillotina como se muestra en la figura 48 para obtener la velocidad de 18 m/s.

Ahora, se va a verificar que el caudal que se está colectando de la maquina empacadora 1, sea el correspondiente con lo estipulado por los criterios de diseño de la empresa.

Según recomendación se debe ventilar un caudal de 500 CFM por cada tubo de llenado que tenga la máquina. Entonces, como se observa en la figura 48 la empacadora cuenta con 4 tubos de llenado, con esto se obtiene un caudal total de colección de 2000 CFM para el punto de medida 1.

Figura 49. Tubos de llenado de la maquina empacadora 1.



Comparando el valor de la tabla 20 de 2233,3 CFM, con el hallado según los requerimientos de la empresa de 2000 CFM, se observa que se está cumpliendo con el caudal de extracción recomendado.

7.1.2 Punto de medida 2. Después de haber realizado el cambio de diámetro para el punto de medida 1 en el circuito de la figura 34 se obtiene que la velocidad en el punto de medida 2 cambió a 15,12 m/s. Igualmente este nuevo valor se encuentra dentro del mínimo permitido por el criterio de la empresa.

En cuanto al caudal se recomienda un desempolvado de 200 CFM por cada pie de diámetro para transportadores de gusano o tornillo sinfín. El diámetro del sinfín de este punto es de 2,2 pies, por lo tanto el caudal que debe ser extraído es de 440 CFM. Comparando este con el nuevo valor obtenido en CASALS de 932,3 CFM, el caudal extraído a través de este punto se encuentra muy por encima de lo necesario recomendado por la empresa.

7.1.3 Punto de medida 4. La nueva velocidad en el punto de medida 4 es de 15,95 m/s, por el rediseño hecho en el punto 1 cumpliendo con los requerimientos de diseño de la empresa.

El diámetro del sinfín de este punto es de 2,6 pies, entonces el caudal que debe ser extraído es de 520 CFM. Comparando este valor con el de la tabla 20 de 428 CFM, se observa que este punto de medida está colectando menos caudal del recomendado por los criterios de la empresa. Pero al cambiar el diámetro del punto de medida 1 en el circuito de CASALS, el nuevo caudal que circula por el punto 4 es de 593,3 CFM cumpliendo con el caudal mínimo requerido.

7.1.4 Punto de medida 6*. Al igual que el punto de medida 1, la velocidad a través de este ducto está por debajo del mínimo permitido por los criterios de diseño, entonces se va proceder a calcular un nuevo diámetro usando la velocidad de 18 m/s a partir de la expresión (23).

$$A_{6*} = \frac{0,307}{18} = 0,0171 [m^2]$$

Con el área calculada, se usa la expresión 24 para hallar el nuevo diámetro.

$$D_{6*} = \sqrt{\frac{4 * 0,0171}{\pi}}$$
$$D_{6*} = 0,15 [m]$$

La verificación de que este diámetro calculado genere el cambio de velocidad de 11,46 a 18 [m/s] se puede realizar con el mismo procedimiento práctico de la colocación de una placa orificio como se explicó para el punto de medida 1.

7.1.5 Punto de medida 7. Como se observa en la tabla 20, la velocidad del punto de medida 7 es de 13,86 m/s, lo que quiere decir que también está por debajo del mínimo admisible. Pero al realizar el cambio de diámetro del punto de medida 6 en el circuito mostrado en la figura 36 de CASALS generó un aumento en la velocidad del punto 7 resultando un valor de 15,21 m/s, cumpliendo con los parámetros del criterio de la empresa.

Por otro lado el punto de medida 7 va dirigido a un tornillo sinfín de diámetro 2,2 pies, entonces se debe desempolvar según el criterio 440 CFM. El valor del caudal calculado por CASALS que se transporta en el ducto de este punto es de 974 CFM, así que continúa estando muy por encima del valor requerido.

7.1.6 Punto de medida 8. En este punto se desempolva el cabezal de descarga de la banda transportadora de la empacadora 2 como se muestra en la figura 50, la banda tiene una velocidad mayor a 200 FPM y según el criterio de la empresa se debe coleccionar un caudal de 500 CFM por cada pie de ancho de la banda. La banda es de 2 pies de ancho, por lo tanto se debe desempolvar 1000 CFM.

Figura 50. Punto de colección 8 en banda transportadora.



Comparando este valor con el de la tabla 20 de 1364,6 CFM, se observa que está por encima de lo recomendado por los criterios.

7.2 REDISEÑO DEL FILTRO DE MANGAS

Al realizar la evaluación de las condiciones del sistema se identificó que el filtro de mangas está procesando un caudal de 6,989 [m³/s] o 14809 [CFM], y comparando este valor con el otorgado en la tabla 3 la cual indica que la capacidad del filtro es

de 21000 [CFM] se obtiene que el filtro cumple con las necesidades de filtrado que le exige el área.

Pero al calcular la caída de presión en el filtro se obtuvo un valor alto, que excede el rango de valores de operación recomendados por el fabricante. Esto conlleva a la necesidad de un rediseño de este, a partir de los datos registrados en la tabla 7 de las mediciones a la entrada y salida de este.

A la entrada del filtro se obtuvo una presión total de 1026,96 [Pa] o 4,127 [inWC], y a la salida de este una presión total de 3292,9 [Pa] o 13,23 [inWC]. La caída de presión en este se calcula por medio de la diferencia de presión entre la cámara sucia y la cámara limpia, es decir, la diferencia entre la salida y la entrada.

$$\Delta P = P_{Salida} - P_{Entrada} \quad (27)$$

$$\Delta P = 13,23 - 4,127$$

$$\Delta P = 9,103 \text{ [inWC]}$$

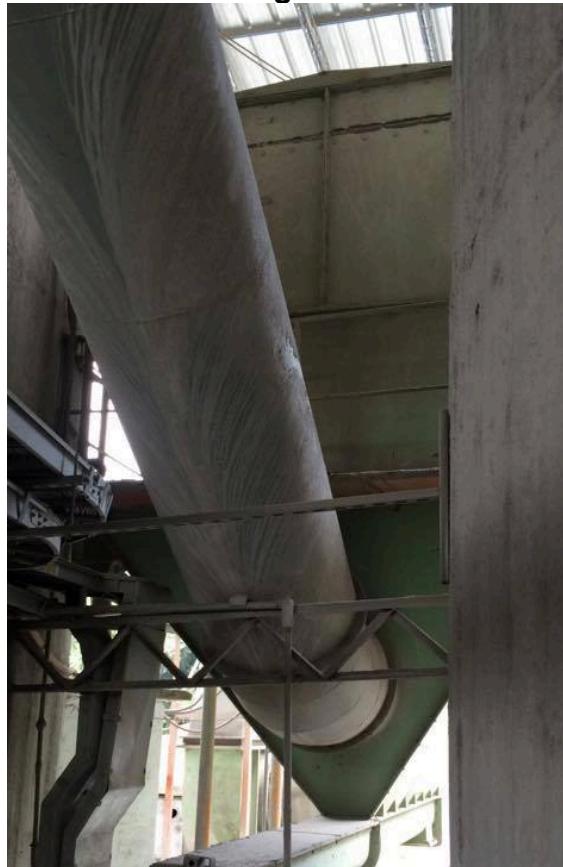
Este valor obtenido se encuentra por encima de la caída de presión máxima recomendada por la empresa de 6 [inWC].

Una alta caída de presión en los filtros ocurre cuando:

- Altas velocidades de filtración por un mal diseño de la entrada de aire al filtro.
- Aumento en el espesor de la capa de polvo en las mangas por una distribución no uniforme del aire alrededor de estas.
- Se presenta una alta relación Aire-Tela.

7.2.1 Diseño de difusor en la entrada del filtro. En el filtro del área de empaclado se encontró que a la entrada de este el ducto está situado en el punto medio de la tolva y no cuenta con un accesorio (ver figura 51) que reduzca la velocidad y entregue un caudal con mayor uniformidad reduciendo la turbulencia.

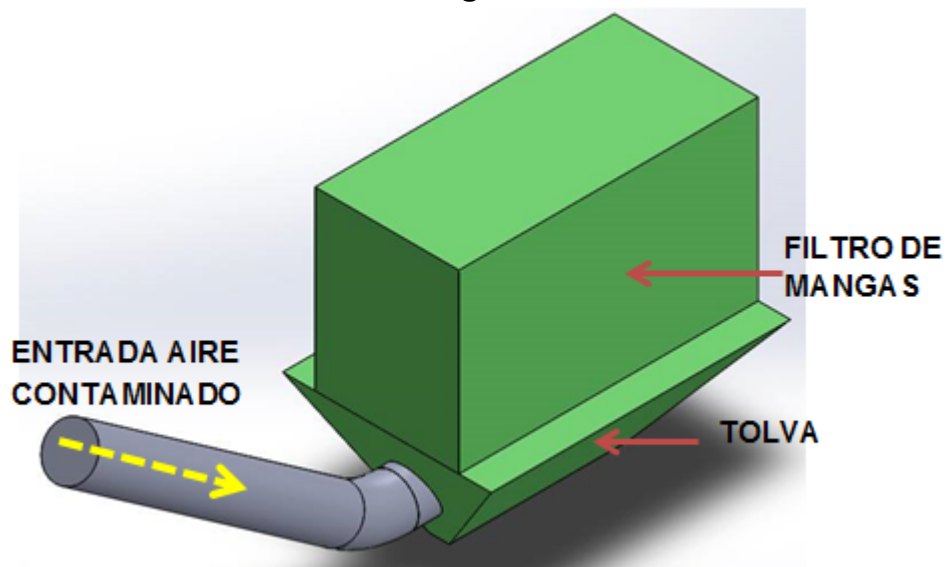
Figura 51. Entrada del filtro de mangas.



Para corregir las altas velocidades de filtración y la posible reintroducción del material colectado, se va a diseñar un difusor a la entrada del filtro que disminuya la velocidad y la caída de presión, además de situar el ducto un poco más arriba de la tolva.

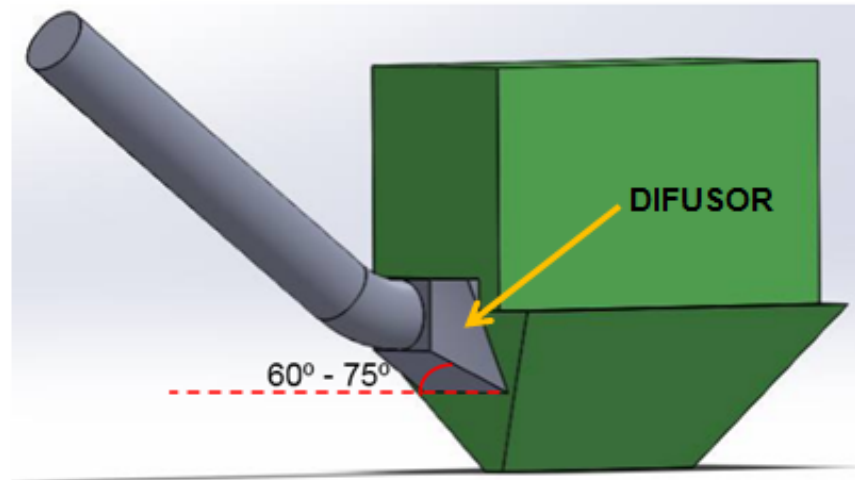
Se utilizó la herramienta CAD Solidworks para modelar la actual configuración de entrada al filtro y el rediseño que se propone. El modelo del filtro de mangas, como se encuentra actualmente, se observa en la figura 52.

Figura 52. Modelado de filtro de mangas actual.



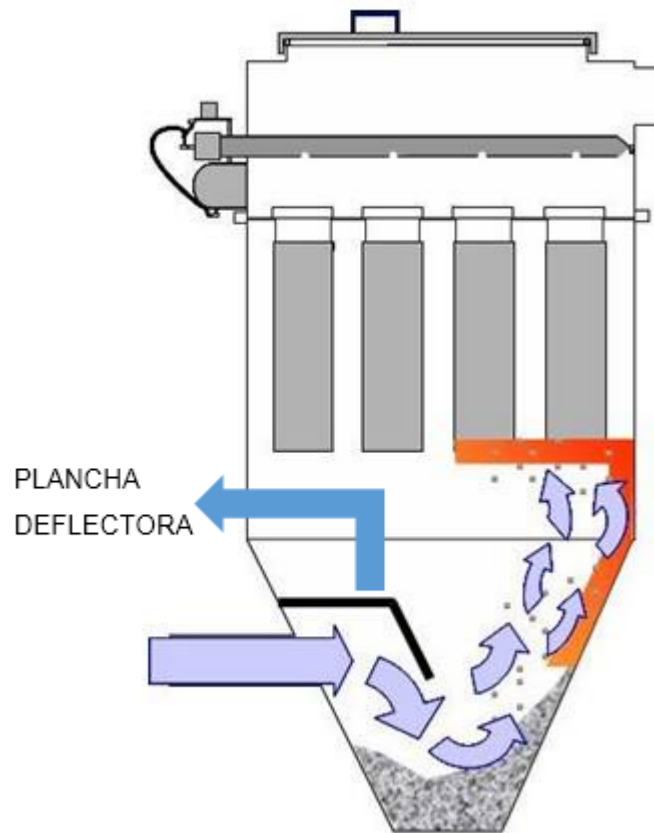
Para realizar las modificaciones a la entrada del filtro se tuvo en cuenta que el difusor propuesto debe estar entre 60° y 75° con respecto a la horizontal con el fin de evitar asentamientos como se observa en la figura 49.

Figura 53. Modelado de la modificación propuesta al filtro de mangas.



7.2.2 Implementación de deflectores a la entrada del filtro. Actualmente el filtro tiene una plancha deflectora a la entrada como se suele usar, con el fin de causar el impacto del polvo contra esta precipitando las partículas grandes al inferior de la tolva, pero debido al tiro producido por el ventilador el flujo de aire con partículas más finas sigue su camino hacia las mangas sin hacerlo de una forma equitativa como se muestra en la figura 54. Esto puede causar que algunas mangas se vayan sobreacumulando de material y que el disparo no pueda desprenderlo.

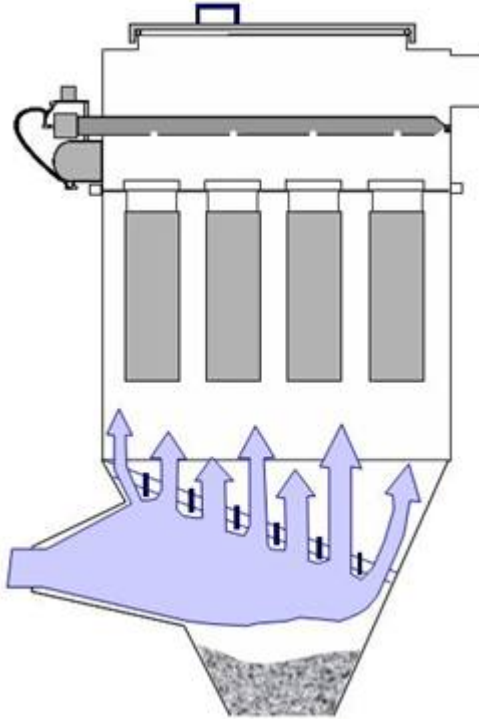
Figura 54. Filtro de mangas con plancha deflectora.



Fuente: Consideraciones para el diseño de sistemas colectores de mangas.
Holcim C.A. planta Cumarebo. Coro, Venezuela, 2011, 180p.

Para evitar que la corriente de aire con polvo circule bastante cerca de las paredes de la tolva y siempre en dirección de las mismas mangas causando un desgaste prematuro en ellas, se propone colocar deflectores de manera escalonada y uniforme como se muestra en la figura 55. Este diseño evita que la tolva y las mangas sufran desgaste por abrasión.

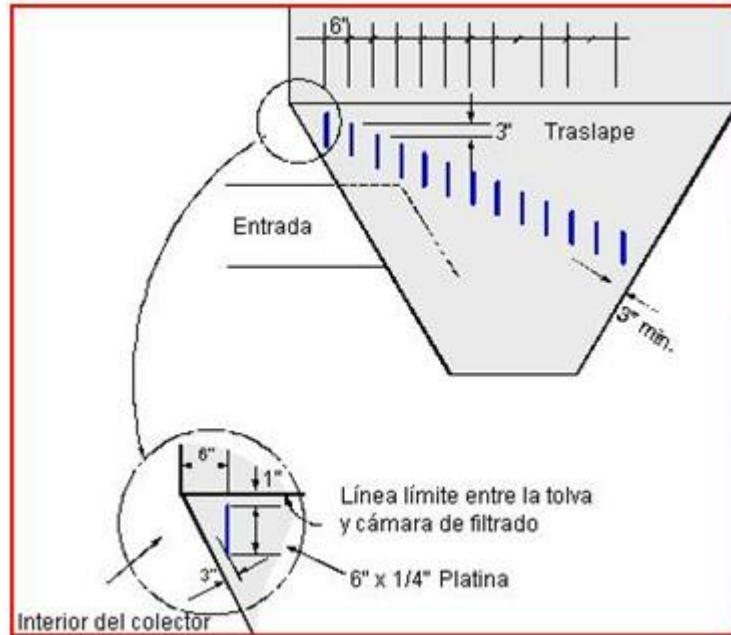
Figura 55. Filtro de mangas con deflectores.



Fuente: Consideraciones para el diseño de sistemas colectores de mangas.
Holcim C.A. planta Cumarebo. Coro, Venezuela, 2011, 180p.

La instalación de deflectores debe realizarse con los parámetros que se muestran en la figura 56, con el fin de crear una velocidad de flujo más uniforme y minimizar la posibilidad de reintroducción de polvo al sistema.

Figura 56. Parámetros de instalación de deflectores.



Fuente: Consideraciones para el diseño de sistemas colectores de mangas.
 Holcim C.A. planta Cumarebo. Coro, Venezuela, 2011, 180p.

7.2.3 Relación Aire-Tela. La relación Aire-Tela estándar para filtros de mangas tipo pulse jet debe estar entre 4–6 CFM/FT² de tela, en otras palabras, es la relación entre la capacidad del ventilador y el área filtrante. Para determinar si la alta caída de presión se está presentando por una inadecuada relación Aire-Tela, se va calcular la relación actual.

$$REL. \text{ AIRE} - \text{ TELA} = \frac{CAPACIDAD \text{ VENTILADOR [CFM]}}{AREA \text{ FILTRANTE [FT}^2\text{]}} \quad (28)$$

$$REL. \text{ AIRE} - \text{ TELA} = \frac{14981}{2994,1}$$

$$REL. \text{ AIRE} - \text{ TELA} = 5 \left[\frac{\text{CFM}}{\text{FT}^2} \right]$$

Se observa que el valor calculado se encuentra dentro del rango recomendado por la empresa, entonces la alta caída de presión no se debe a una relación Aire-Tela fuera de los valores estipulados por la empresa.

7.3 SELECCIÓN DEL VENTILADOR A PARTIR DE LOS NUEVOS REQUERIMIENTOS EN EL SISTEMA DE DESEMPOLVADO

La selección del ventilador se va a realizar tomando una caída de presión en el filtro de 6 [inWC] y con los valores obtenidos de las recomendaciones de desempolvo del criterio, para los elementos de cada punto de colección en el sistema. En la tabla 21 se registraron los datos obtenidos a partir de los parámetros mencionados anteriormente.

Tabla 21. Puntos de medida con nuevos valores para rediseño.

PUNTO DE MEDIDA	DIAMETRO [m]	VELOCIDAD [m/s]	CAUDAL [CFM]
1	0,27	18	2000
2	0,2	15,12	440
4	0,1	15,95	520
5	0,29	32,05	4492
6	0,34	16,6	3199,5
6*	0,15	11,46	762,8
7	0,2	15,21	440
8	0,19	22,67	1000
9	0,1	19,61	326,3

El comportamiento del sistema variando las dimensiones de los ductos y los caudales de desempolvo, fue simulado en CASALS para obtener el informe del nuevo ventilador requerido.

Para esto fue necesario recalcular el factor de pérdidas de los accesorios genéricos para el circuito de la figura 38, de la misma forma en que se calcularon anteriormente. Los nuevos valores fueron registrados en las siguientes tablas.

Tabla 22. Nuevos valores para accesorio genérico 1.

MEDICIÓN	ACCESORIO GENERIC 1	UNIDADES
Q	1,4	m ³ /s
PT	171,83	Pa
Vel	8,42	m/s
Densidad	1,02756	kg/m ³
K	4,72	-

Tabla 23. Nuevos valores para accesorio genérico 2.

MEDICIÓN	ACCESORIO GENERIC 2	UNIDADES
Q	4,82	m ³ /s
PT	632,32	Pa
Vel	17,64	m/s
Densidad	1,02756	kg/m ³
K	3,95	-

Tabla 24. Nuevos valores para accesorio genérico del filtro.

MEDICIÓN	FILTRO	UNIDADES
Q	6,22	m ³ /s
PT	1493,04	Pa
Vel	13,02	m/s
Densidad	1,02756	kg/m ³
K	17,14	-

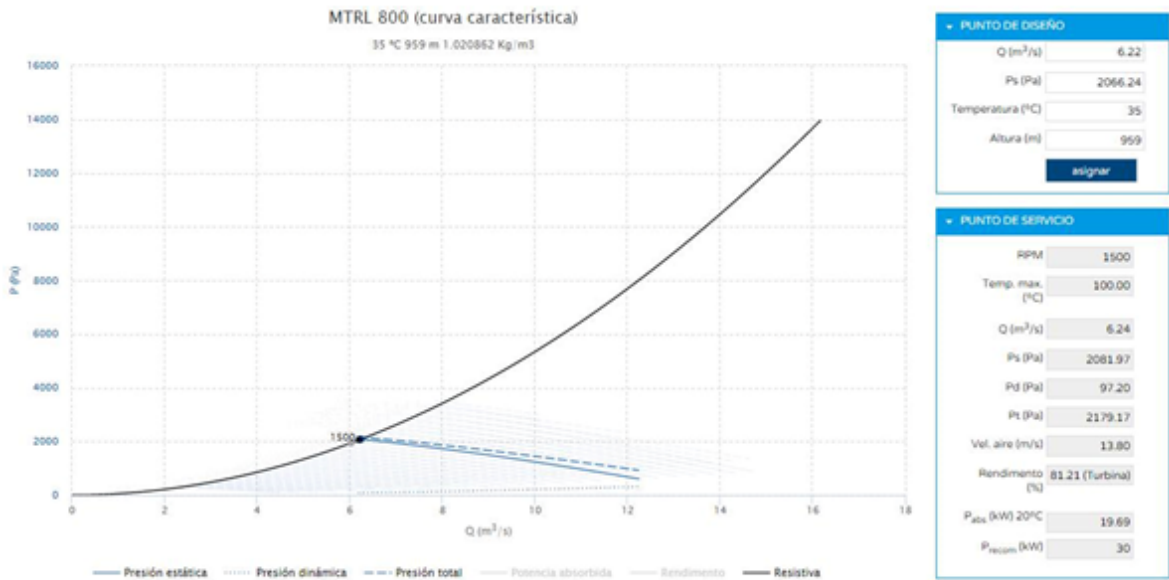
El informe final del nuevo ventilador requerido se muestra en la siguiente figura.

Figura 57. Informe del nuevo ventilador requerido.

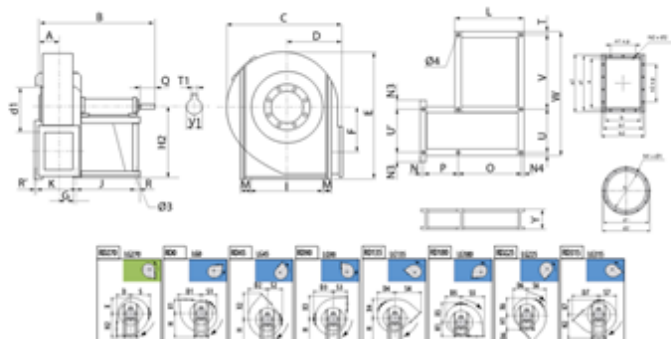


La selección del ventilador centrifugo MTRM 800 de media presión utilizando la herramienta FANWARE como se describió anteriormente. La curva característica y las especificaciones para el nuevo ventilador se muestran en la siguiente figura.

Figura 58. Características del nuevo ventilador.



A	B	C	D	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	E	F	G	H	H1	H2	I	J	K
287	1422	1342	580	939	811	782	749	652	562	1061	1802	478	345	990	630	755	862	551	662
L	M	N	N1	N1xØ1	N2xØ2	N3	N4	O	O6	P	Q	R	R'	S	S1	S2	S3	S4	S5
629	32	47	39	16x14	14x14	91	39	551	501	662	110	39	47	782	652	562	580	1061	939
56	57	T	T1	U	U'	V	V1	W	X	X	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	Y	Z
811	749	32	16	862	862	842	55	1768	662	91	580	1061	939	811	782	749	562	180	802
a1	a2	b	b1	b2	d	d1	d2	n1ap	n2ap	Ø3	Ø4								
871	921	569	639	689	805	861	905	2x200	2x200	19	20								



8 CONCLUSIONES

Se realizó la evaluación de las condiciones de funcionamiento del sistema de desempolvado en el área de empacado a partir de mediciones de presión y velocidad, calculando a partir de estos datos los valores de caudal que se transporta por cada punto de medida.

Se encontró que en ningún tramo de tubería para el punto de medida 4 cuenta con un orificio para realizar mediciones y evaluar las condiciones de este punto. Además, algunos ductos del sistema tienen el orificio o hand hole en un lugar de muy difícil acceso, que requiere de un operario certificado en alturas para realizar la medida. Por medio de balances de masa se determinaron los valores de caudal para estos tramos en los que no fue posible hacer la medida directa.

Se implementó en la herramienta informática CASALS el modelo del sistema, en el que se obtuvieron resultados que ajustaron con buena precisión los datos de medidas, y que permitió predecir las nuevas condiciones de operación que resultan de implementar las recomendaciones de rediseño del sistema.

Se corroboró que los programas informáticos son una herramienta útil para la resolución de problemas encontrados en la industria, ya que se pueden simular diferentes sistemas de gran complejidad de una manera más fácil y rápida sin necesidad de llevar a cabo engorrosos cálculos manuales.

Se observó con los datos recolectados que, en general, el sistema se encuentra en buenas condiciones de funcionamiento. Solo algunos ductos tienen velocidades y caudales por debajo de los valores mínimos recomendados, según los criterios de la empresa, lo cual se corrige redimensionando estos ductos.

Se identificó a partir de las estimaciones de emisiones actuales de contaminantes realizadas por la entidad de control ambiental, que el área de empacado de la empresa CEMEX S.A planta cemento Bucaramanga cumple con lo estipulado por la norma definida en el artículo 28 de la Resolución 909 del 5 de junio del 2008 por el Ministerio de Ambiente, Vivienda y desarrollo Territorial.

Se encontró que la capacidad del filtro de mangas y del ventilador están por encima de las necesidades requeridas por el sistema actual, es decir, se presenta un diseño sobredimensionado de estos.

Se halló en el filtro de mangas una caída de presión de 9 [inWC], esto quiere decir que esta 3 [inWC] por encima del valor máximo permisible por los criterios de la empresa, esto se debe a posibles sobrecargas de polvo en las mangas por una inadecuada distribución de flujo y altas velocidades de filtración.

Se realizó una propuesta de rediseño en la entrada del filtro y en la distribución del flujo en este, para brindar una solución al problema del alta caída de presión y evitar una disminución en la vida útil de los componentes como mangas, tolva y ducto de entrada del filtro.

9 RECOMENDACIONES

Realizar limpieza periodica de las cámaras del filtro con el fin de evitar abrasión en flautas y mangas.

Revisar el estado actual de las mangas, ya que por la acumulación de material particulado en estas les puede entrar humedad causándoles putrefacción.

Se recomienda instalar orificios para la toma de medidas en los ductos que no poseen uno, con el fin de agilizar y facilitar la toma de medidas para futuras inspecciones del sistema.

Revisar el sistema de aire comprimido encargado de la limpieza de las mangas, ya que un mal funcionamiento del compresor puede estar causando la alta caída de presión en el filtro de mangas.

BIBLIOGRAFÍA

AMERICAN CONFERENCE OF GOVERNMENTAL INDUSTRIAL HYGIENISTS, Industrial Ventilation, EE.UU. 1988.

DIAZ, Javier y ROJAS, Jaime. Propuesta de rediseño del sistema de desempolvado por filtros de mangas para el área de trituración de la planta CEMEX S.A Bucaramanga. Bucaramanga, 2015, 233 p. Tesis de grado. Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica.

DIEZ, Verónica. Proyecto de instalación de una planta de molienda de cemento. Madrid, 2008, 293p. Tesis de grado (Ingeniería Técnica Industrial, especialidad Mecánica) Universidad Carlos III de Madrid. Escuela Politécnica Superior.

DONOSO, Oscar. Pruebas Experimentales en un Filtro de Mangas Tipo Pulse Jet del Laboratorio de Calidad del Aire de la FIMCP. Guayaquil, Ecuador, 2010, 369p. Tesis de grado. Escuela Superior Politécnica del Litoral. Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la Producción.

HERNANDEZ, Jorge. Ingeniería de detalle para un sistema de desempolvado en las balanzas pesadoras de dosificación de Holcim (Venezuela) C.A. planta Cumarebo. Coro, Venezuela, 2011, 180p. Universidad Nacional Abierta. Área de Ingeniería Industrial.

PRADA, Jefferson. Optimización de la red de aire comprimido de la planta Caracolito de CEMEX Colombia. Ibagué, 2015, 37p. Tesis de grado. Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica.

AENXOS

NOTA: Los anexos se encuentran en la carpeta nombrada "ANEXOS" en el CD.