



**MANUAL DE PROCEDIMIENTO PARA EL DISEÑO DE UN SISTEMA DE  
EXTRACCIÓN FOCALIZADA PARA LA CAPTACIÓN DE MATERIAL PARTICULADO**

**Rodrigo Araque Torres**

Universidad Antonio Nariño  
Facultad de Ingeniería Mecánica, Electrónica y Biomédica  
Ciudad, Colombia  
2020



**MANUAL DE PROCEDIMIENTO PARA EL DISEÑO DE UN SISTEMA DE  
EXTRACCIÓN FOCALIZADA PARA LA CAPTACIÓN DE MATERIAL PARTICULADO**

**Rodrigo Araque Torres**

Proyecto de grado presentado como requisito parcial para optar al título de:

**Ingeniero Electromecánico**

Director (a):

PhD. Yesid Muñoz Maldonado

Línea de Investigación:

Investigación Aplicada, apoyo educativo, Aplicación a la Industria; líneas de  
investigación: Ingeniería Materiales-Diseño Electromecánico-Automatización Industrial-  
Energía

Universidad Antonio Nariño

Facultad de Ingeniería Mecánica, Electrónica y Biomédica

Ciudad, Colombia

2020



*(Dedicatoria o lema)*

*A Dios por estar presente en cada paso, en cada triunfo y en cada meta alcanzada. También agradezco a mis padres por su esfuerzo y enseñanzas; a mi esposa por su abnegado apoyo brindado*

*La preocupación por el hombre y su destino siempre debe ser el interés primordial de todo esfuerzo técnico. Nunca olvides esto entre tus diagramas y ecuaciones.*

*Albert Einstein*



## Resumen

Se presentan los principios teóricos, relacionados con el material particulado, el cual se ha considerado como uno de los elementos que contaminan la atmósfera y que ha sido objeto de estudio por diferentes investigadores a nivel global, además ha sido definido como el conjunto de partículas en suspensión atmosférica que se originan a partir de diferentes fuentes naturales o antropogénicas en las que se ha detectado un espectro de propiedades fisicoquímicas y termodinámicas.

El fin del manual que se consolida finalmente, es presentar el empleo de nuevas tecnologías de control, que permitan implementar en los procesos productivos industriales, la introducción de los sistemas de extracción focalizado con el fin de minimizar en gran parte la generación de material particulado, ya que la presencia en la atmósfera de este contaminante ocasiona variedad de impactos a la vegetación, materiales y el hombre. Además, la presencia del material particulado está asociada con el incremento del riesgo de muerte por causas cardiopulmonares en muestras de adultos.

**Palabras clave:** Material particulado, calidad del aire, tecnologías de control, sistemas de extracción focalizado, sistemas tecnológicos de bajo y alto flujo de aire

## Abstract

It presents the theoretical principles, related to particulate material, which is one of the most studied atmospheric pollutants in the world, this is defined as the set of solid and / or liquid particles (except for pure water) present in suspension in the atmosphere, which originate from a wide variety of natural or anthropogenic sources and possess a wide range of morphological, physical, chemical and thermodynamic properties.

The purpose of the manual that is finally consolidated is to present the use of new control technologies that allow the introduction of focused extraction systems in industrial production processes in order to greatly minimize the generation of particulate material, since the presence in the atmosphere of this pollutant causes a variety of impacts on vegetation, materials and man. Furthermore, the presence of particulate matter is associated with an increased risk of death from cardiopulmonary causes in adult samples.

**Keywords:** Particulate matter, air quality, control technologies, focused extraction systems, low and high air flow technology systems



# Contenido

	Pág.
1. Material particulado: .....	5
1.1 Características del material particulado .....	5
1.2 Impactos en la salud humana .....	7
1.3 Problemática de la contaminación del aire .....	7
1.3.1 Contaminantes primarios: .....	8
1.3.2 Contaminantes secundarios:.....	8
1.4 Marco legal.....	10
2. Sistemas de extracción .....	15
2.1 Definición .....	15
2.1.1 Sistemas de extracción general .....	15
2.1.2 Sistema de extracción focalizado .....	16
3. Principio de diseño del sistema de extracción .....	33
3.1 Preliminares de diseño .....	33
3.2 Fases de diseño:.....	34
3.3 Métodos de diseño .....	35
3.3.1 Método de la Presión Dinámica .....	39
3.4 Distribución del caudal .....	41
3.4.1 Método equilibrado por diseño .....	41
3.4.2 Método equilibrado por compuertas.....	42
3.5 Evaluación de la presión ventilador .....	42
3.5.1 Presión total del ventilador .....	42
3.5.2 Presión estática del ventilador .....	42

4.	Campanas de extracción .....	45
4.1	Pasos para el diseño de campanas .....	45
4.1.1	Velocidad de contorno .....	46
4.1.2	Velocidad de Captura .....	49
4.2	Calculo de pérdidas en la entrada de las campanas: .....	54
5.	Ductos .....	58
5.1	Parámetro de diseño ductos. ....	58
5.1.1	Velocidad mínima en los ductos: .....	61
5.1.2	Pérdida de carga en puntos singulares: .....	62
5.1.3	Método de la longitud equivalente .....	65
6	Equipo con medio filtrante .....	68
6.1	Selección del equipo captador de polvo:.....	68
6.1.1	Cámaras de sedimentación. ....	68
6.1.2	Ciclones .....	68
6.1.2.1	Principio de funcionamiento.....	68
6.1.2.2	Tipo de ciclones.....	69
6.1.2.3	Calculo de la eficiencia de colección .....	71
6.1.2.3.1	La eficiencia fraccional por tamaño de partículas .....	71
6.1.2.3.2	Tiempo de relajación $T$ .....	76
6.1.2.3.4	Numero de giros $N$ .....	77
6.1.2.3.5	Velocidad de saltación .....	77
6.1.2.4	Estimativa de la caída de presión .....	79
6.2	Parámetros de diseño y cálculo de lo equipo con medio filtrante .....	80
6.2.1	Procedimiento de diseño .....	81
6.2.2	Método de cálculo.....	82
6.2.2.1	Selección del ciclón .....	82
6.2.2.2	Cálculo del diámetro del ciclón .....	82
6.2.2.3	Cálculo de la eficiencia del ciclón: .....	83
6.2.2.4	Velocidad equivalente:.....	83
6.2.2.5	Velocidad de saltación .....	83

---

6.2.2.5 Relación entre velocidades .....	84
6.2.2.6 Volumen de ciclón:.....	84
6.2.2.7 Longitud natural del ciclón .....	84
6.2.2.8 Factor de dimensiones lineales .....	84
6.2.2.9: Volumen del ciclón evaluado sobre la longitud natura .....	84
6.2.2.9: Factor dimensional de las proporciones volumétricas del ciclón .....	85
6.2.2.10: Relación entre la altura de entrada y el diámetro del ciclón.....	85
6.2.2.12: Factor de configuración .....	85
6.2.2.13: Exponente de vórtice .....	85
6.2.2.14: Tiempo de relajación.....	85
6.2.2.16: Eficiencia total.....	86
6.2.2.17: Caída de presión del ciclón.....	86
6.2.2.18: Caída de presión.....	86
6.2.3: Parámetro de diseño del medio filtrante .....	86
6.2.3.1: Velocidad de filtración (Relación aire-tela).....	87
6.2.3.2: Criterio de selección para la tela de filtrado .....	88
6.2.3.3. Dimensionamiento de mangas .....	89
6.2.3.4: Venturis.....	90
6.2.3.7: Perdidas en el filtro de mangas. ....	91
7.1 Identificación y análisis de la problemática. ....	94
7.2 Etapas preliminares .....	95
7.3 Elaboración de la propuesta .....	97
7.4 Proceso de fabricación de equipos y accesorios .....	97
7.5 Instalación y puesta en marcha del proyecto .....	101
Conclusiones.....	103
Bibliografía .....	105

## Lista de figuras

	Pág.
Figura 1.1: Tamaño relativo de las partículas .....	6
Figura 1.2 Dinámica de la contaminación del aire y las transformaciones que se dan en la atmósfera. ....	10
Figura 2.3: Diagrama de control de emisiones.....	17
Figura 2.4 Diagrama del ciclón .....	20
Figura 2.5 Colectores de procesos húmedos.....	21
Figura 2.6 Precipitaderos electrostáticos .....	23
Figura 2.8 Filtro de mangas por sacudido.....	25
Figura 2.9 Filtro de mangas de aire reverso .....	26
Figura 2.10 Filtros de mangas tipo pulso jet .....	27
Figura 2.11: Ventiladores axiales.....	28
Figura 2.12 Ventilador centrífugo.....	30
Figura 2.13 Sentido de rotación de las aletas de una turbina .....	31
Figura 2.14 Distribución de componentes del sistema de extracción focalizado .....	32
Figura 3.15: Esquema isométrico de un sistema de extracción focalizado .....	35
Figura 3.16 Secuencia de cálculo de una instalación .....	37
Figura 3.17 Ilustración Moderna de un Sistema de Extracción Focalizado.....	43
Figura 4.18 Contornos de velocidad .....	46
Figura 4.19 Tipos de campanas exteriores .....	48
Figura 4.20 Velocidad de captura .....	50
Figura 4.21 Diferencias entre presión dinámica, presión estática y presión total en un ducto .....	53

---

Figura 4.22: Tipo de campanas .....	53
Figura 4.23: Diagrama de flujo de velocidades y caudales en las campanas ...	56
Figura 5.24: Sistema de ductos .....	59
Figura 5.25 Diagrama de puntos singulares .....	64
Figura 6.26: Trayectoria de las partículas dentro del ciclón .....	69
Figura 6.27: Trayectoria de las partículas .....	69
Figura 6.28 Dimensiones del ciclón .....	71
Figura 6.29 Eficiencia de colección del ciclón .....	74
Figura 6.30 Partes de medio filtrante pulse jet .....	89
Figura 6.31 Sistema de limpieza de filtros .....	91
Figura 7.36. Etapas del desarrollo del proyecto .....	94
Figura 7.38. Proceso de fabricación de campanas, soporte brazo, bifurcador, y válvula de sellamiento .....	97
Figura 7.33 Cabina de Sand-blasting a intervenir .....	100
Figura 7.34. Proceso de fabricación de bomba de vacío .....	101
Figura 7.35. Cabinas con adaptación de brazos extractores .....	102

## Lista de tablas

	Pág.
Tabla 1.1 Descripción general del Índice de Calidad del Aire -ICA .....	12
Tabla 1.2 Puntos de corte del Índice de Calidad del Aire -ICA.....	13
Tabla 3.3: Conversión presión dinámica a velocidad.....	39
Tabla 4.4: Valores de velocidades de captura o control, recomendado .....	51
Tabla 4.5: Factores de pérdidas de carga en las entradas .....	57
Tabla 5.6 Sección y parámetro de ductos circulares .....	60
Tabla 5.7 Valores recomendados para la velocidad de diseño de ductos ...	61
Tabla 5.8: Pérdida de carga en uniones .....	65
Tabla 5.9 Pérdidas de carga en codos .....	66
Tabla 5.10 Longitud equivalente de accesorios en metros .....	67
Tabla 6.11: Valores de eficiencia de remoción .....	70
Tabla 6.12 Características de los ciclones de alta eficiencia.....	72
Tabla 6.13: Características de los ciclones convencionales.....	73
Tabla 6.14 Características de los ciclones de alta capacidad .....	73
Tabla 6.15: Parámetros de diseño para los ciclones de entrada tangencial ..	81
Tabla 6.17 Resumen de filtros de tela y sus características .....	93







# Introducción

En este manual incorpora los lineamientos a tener en cuenta para llevar a cabo el diseño y operación de sistemas de extracción focalizada para una mejor calidad del aire en Colombia

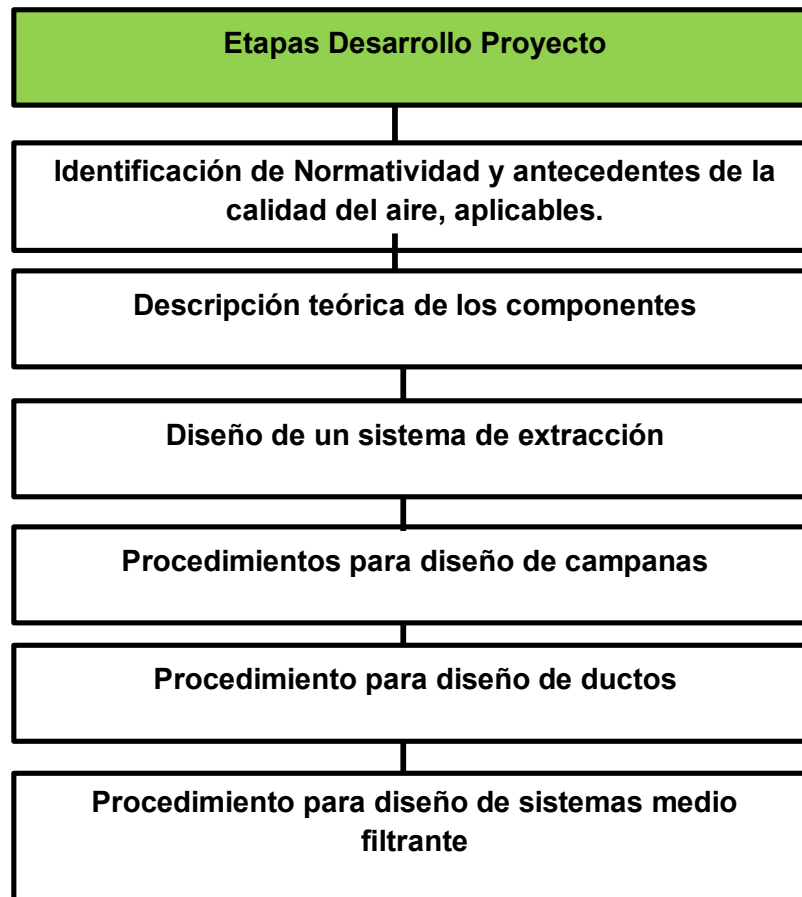
Este documento ha sido elaborado pensando en las necesidades y realidades de los países en vías de desarrollo, de modo tal que pueda convertirse en una guía que permita la gestión de la calidad del aire en un marco óptimo, desde el punto de vista técnico.

Los sistemas de extracción focalizados, son un conjunto de elementos que se disponen de manera conveniente con el propósito de captar en un mismo lugar las emisiones contaminantes de tipo químico que se presentan a partir de una actividad laboral o industrial, en donde dicha captación tiene como propósito limitar la incorporación del material particulado en el medio ambiente de trabajo, a la vez que con ellos, se protege la salud de los trabajadores y se generan controles en los focos de emisión.

Es uno de los primeros métodos a tener en cuenta cuando se trata de implantar un sistema para el control de agentes químicos, cuando estos no han podido sustituirse por otros de baja o nula nocividad o evitar su existencia.

El objetivo principal de este manual es describir los impactos asociados al material particulado presente en la atmósfera, y las tecnologías utilizadas para su control. Con este fin se han implementado las tecnologías más limpias y se han desarrollado los sistemas de extracción focalizados bajo los principios tecnológicos de bajo flujo de aire y alta presión para poder controlar las emisiones de material particulado

Este documento está organizado en seis-fases, que se determinaron necesarias para cumplir con los objetivos.



## Objetivos

### Objetivo General

Elaborar un manual de procedimientos para el diseño de un sistema de extracción focalizado por medios electromecánicos bajo los principios tecnológicos de “Bajo flujo de aire y alta presión” para los procesos industriales, que permita diseñar e implementar una tecnología más limpia para que pueda utilizarse en aplicaciones de espacios confinados.

## **Objetivo Especifico**

- Identificar los parámetros claves de diseño en sitio, según los requerimientos técnicos establecidos por el ministerio de medio ambiente y las entidades encargadas de controlar los índices de contaminación ambiental entre otros.
- Desarrollar el procedimiento para el diseño y selección de cada uno de los componentes fundamentales de un sistema de extracción focalizada a partir de los lineamientos aplicables.
- Implementar el manual de procedimientos, desarrollado en un caso específico para realizar el diseño de un sistema de extracción focalizada



# 1. Material particulado:

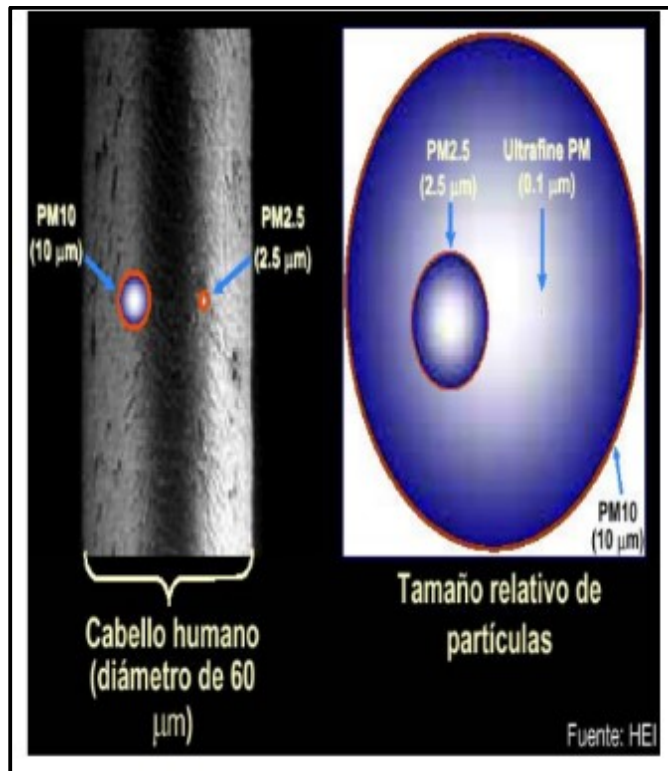
Con el fin de contextualizar en lo referente, se hace una recopilación de información de lo que es el material particulado MP, su reseña histórica, antecedente sobre las tendencias en la calidad del aire y emisiones de MP, impactos futuros proyectado de los programas de las normas de control, y fuentes principales de emisiones de MP10 y de MP2.5 en la actualidad.

## 1.1 Características del material particulado

Al hacer referencia a las propiedades de las partículas, el tamaño aerodinámico resulta ser uno de los más importantes, en atención a que su comportamiento va a derivar en la posibilidad de establecer una característica del equipo de control en relación a la atmósfera y tracto respiratorio, en donde las partículas en suspensión atmosférica van en un rango de tamaño de 0.001  $\mu\text{m}$  (micrómetro,  $10^{-6}$  m) hasta 1.000 micrómetros (1  $\mu\text{m}$  o superior). No obstante, el propósito de la presente investigación es la de monitorear las partículas de tamaños que oscilan entre 0.01 y 10  $\mu\text{m}$ , las cuales son más lesivas para la salud humana y tienen una alta captación por el tracto respiratorio (Comparativamente, un cabello humano tiene un diámetro de unos 60  $\mu\text{m}$ ).

La dimensión de la partícula se enuncia por lo general en función de su diámetro aerodinámico dada su diferencia con su homónimo físico, tal y como se muestra en la figura 1.1. Es de advertir que, la velocidad de sedimentación terminal de la partícula es la misma cuando el diámetro de la esfera es de densidad uno (1.0).

La contaminación del aire por el material particulado contaminante suspendido en la atmósfera proviene principalmente de compuestos de tipo nitrato, sulfatos, carbono orgánico, carbono elemental, aromáticos derivados de hidrocarburos policíclicos y de varios tipos de metales como son el zinc, hierro, plomo, silicio y calcio, entre otros.

**Figura 1.1:** Tamaño relativo de las partículas

**Fuente:** Ministerio del Medio Ambiente. (minambiente., 2017)

De acuerdo con EPA (2009) las partículas se clasifican en:

- Partículas Suspensas Totales (PST): Se le denominan así a aquellas partículas que se encuentran suspendidas en la atmósfera independientemente de su tamaño.
- PM10: Se le han llamado PM10 a toda partícula suspendida en la atmósfera con diámetro aerodinámico menor o igual a 10 µm.
- PM2.5: Se le han llamado PM2.5 a toda partícula suspendida en la atmósfera con diámetro aerodinámico menor o igual a 2.5 µm.
- Partículas Ultra Finas (PUF): Se le han llamado PUF a toda partícula suspendida en la atmósfera con diámetro aerodinámico menor o igual a 0.1 µm.

Sea referenciado por EPA (2009), que cada una de las partículas tipificadas en la clasificación anterior por tamaño, se pueden originar desde diferentes fuentes fijas o móviles de emisión, entre las cuales se cuentan los centros de procesamiento industrial y agrícola, así como aquellas que vinculan a zonas de alta erosión y emisiones de hidro-combustión o carbo-combustión.

## **1.2 Impactos en la salud humana**

La evidencia científica sobre la afectación que tiene el material particulado (MP) sobre la salud humana ha sido referenciada por González (2009), Hernández (2011) y Fernández (2013), quienes a través de diferentes estudios han concertado en decir que el MP tiene una alta peligrosidad para la salud cardio-respiratoria y cardiovascular de los seres humanos y algunas especies animales, sobre todo, cuando existe una relación de MP con sustancias tóxicas o alergénicas, a través de las cuales se pueden desencadenar procesos inmunológicos o de tipo oncológico en el ser humano. Se ha estimado por estos autores, que a menor tamaño de la partícula, ésta puede alcanzar espacios del sistema respiratorio asociados al nivel alveolar y bronquial, afectando con ello tanto el proceso respiratorio inferior como el proceso respiratorio superior.

## **1.3 Problemática de la contaminación del aire**

La calidad del aire es uno de los aspectos más elementales dentro de las variables exógenas que inciden directamente en la salud humana, por tanto, la contaminación del mismo representa una problemática que amenaza subsecuentemente el estado de salud cardiovascular y pulmonar de todos los individuos en diferentes regiones del mundo.

Así pues, desde este punto de vista ambiental, la contaminación atmosférica puede ser definida como la acumulación progresiva y constante del aire en donde la concentración de diferentes tipos de contaminantes que se derivan de estados sólido, líquido o gaseoso de la materia, causan efectos adversos en los recursos renovables del ambiente que inciden directamente en el bienestar humano. En este sentido, los contaminantes del aire pueden clasificarse en:

### **1.3.1 Contaminantes primarios:**

Según Fernández (2013): “Son aquellos que son emitidos directamente a la atmósfera por una fuente de emisión. Ej. Partículas, SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> y CO entre otros”.

### **1.3.2 Contaminantes secundarios:**

Según Fernández (2013): “Son el resultado de reacciones en la atmósfera a partir de contaminantes primarios y otras especies químicas presentes en el aire”. La figura 1-2 permite según Minambiente (2017): “entender la dinámica de la contaminación del aire y las transformaciones que se dan en la atmósfera, procesos que influyen en el estado de la calidad del aire”.

Se han determinado dos fuentes de emisión principales a las cuales se les han denominado: antropogénicas y biogénicas, las cuales derivan en contaminación primaria que se emite al campo atmosférico cercano y desde donde se suceden dos fenómenos asociados a la corrupción del aire que se conocen como: transporte y transformación. Dichos aspectos fenomenológicos, producen efectos ecosistémico en un mismo sector geográfico, ejemplo de ello, es la localidad de puente Aranda en la ciudad de Bogotá que ha sido tipificada por las altas emisiones que provoca el ejercicio industrial de dicha zona, y que tienen impacto en toda la ciudad.

No obstante, la experiencia contaminante que sufre este sector de la ciudad de Bogotá se extiende hacia diferentes latitudes de esta misma zona, trayendo como consecuencia una expansión del transporte activo del particulado contaminante, gracias a las curvas, canales y corrientes de aire a nivel atmosférico y sub-atmosférico.

Ahora bien, junto al fenómeno de transporte acompaña al elemento contaminante de particulado un proceso de transformación en donde el MP se diluye en el aire atmosférico para reaccionar a su vez con otro tipo de sustancias en suspensión, por lo que se agrega el denominado nivel de inmisión, es decir, un sucedáneo al transporte y transformación desde el cual se permite al MP su aumento en concentración atmosférica, haciendo así más denso el referente particulado en el ambiente.

De esta forma, la dilución que se promueve a nivel del aire fruto de esa transformación química del MP contaminante, influye directamente en las variables de tipo meteorológico

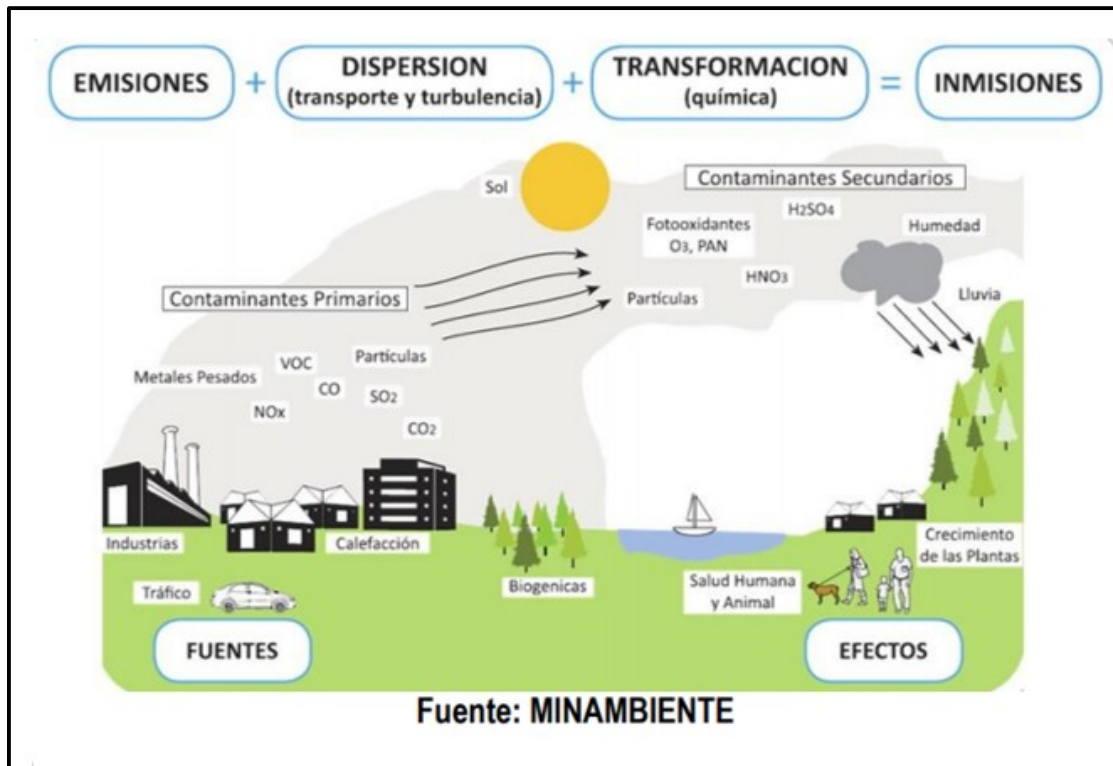


afectando de esta manera los pronósticos de clima de la región en donde se produce altas concentraciones de contaminación y asimismo, provocando mayor tendencia, prevalencia e incidencia de enfermedades cardiorrespiratorias en pobladores de comunidades aledañas a los sectores de mayor contaminación ambiental.

Según Fernández (2013): “Para Colombia estos contaminantes corresponden a material particulado, ozono troposférico, monóxido de carbono, óxidos de azufre y óxidos de nitrógeno. Estos contaminantes pueden perjudicar su salud y el medio ambiente y/o causar daños a las infraestructuras”.

El IDEAM como centro de reporte meteorológico y calidad del ambiente más importante del país ha reportado que en los conglomerados de ciudades más grandes como Bogotá, Cali, Medellín, Barranquilla, Cartagena y Bucaramanga, se generan gracias a la contaminación ambiental grandes costos económicos, sociales y ambientales. El Ministerio de Salud por su lado, ha reportado una prevalencia de enfermedades cardiorrespiratorias asociadas a material particulado de 1 por cada 10.000 habitantes/año. La Cámara de Comercio de Bucaramanga en consecuencia, en un informe del año 2017 mencionó que los costos económicos a nivel nacional alcanzan los 16 billones de pesos y comprometen cerca del 2% del PIB nacional, en relación a la cobertura de la morbimortalidad y otros impactos que genera la emisión de partículas y gases a la atmósfera, lo cual es una fundamentación importante del problema que invita a seguir trazando rutas metodológicas y estrategias de acción a corto, mediano y largo plazo, que permitan la reducción ostensible de la emisión de material particulado a la atmósfera.

**Figura 1.2** Dinámica de la contaminación del aire y las transformaciones que se dan en la atmósfera.



(minambiente., 2017)

## 1.4 Marco legal

En Colombia desde el año 1967 se han realizado esfuerzos para controlar la contaminación del aire. En ese año se instalaron las primeras redes de monitoreo de calidad del aire. Sólo hasta 1973, se expidió la Ley 23, cuyo objetivo era Prevenir y controlar la contaminación del medio ambiente y buscar el mejoramiento, conservación y restauración de los recursos naturales renovables, para defender la salud y el bienestar de todos los habitantes del territorio nacional.

En 1979 se expide la Ley 09 del mismo año, por la cual se dictan medidas sanitarias para la protección del medio ambiente. Aquí se le otorgan facultades al Ministro de Salud para proferir normas para el control de la contaminación atmosférica, por lo cual, en el año 1982, este ministerio expidió el decreto 02 donde se reglamentaba parcialmente el Título I de la

Ley 09 de 1979 y también el Decreto – Ley 2811 de 1974, en cuanto a emisiones atmosféricas.

En el año de 1995 el Ministerio del Medio Ambiente (creado mediante la Ley 99 de 1993) expidió el Decreto 948, el cual derogó en algunos artículos al Decreto 02 de 1982. El Decreto 948 de 1995 PROTOCOLO I 14 contiene el Reglamento de Protección y Control de la Calidad del Aire.

Según Minambiente (2017):

“En la reglamentación ambiental aprobada durante la década de los años ochenta, Colombia estableció las primeras disposiciones legales en materia de contaminación atmosférica. En ella se precisaron las normas mínimas necesarias para prevenir y controlar la contaminación atmosférica, definiéndose las normas de calidad del aire para regular los siguientes contaminantes: Partículas Totales en Suspensión (PST), Monóxido de Carbono (CO), Dióxido de Azufre (SO<sub>2</sub>), Dióxido de Nitrógeno (NO<sub>2</sub>) y oxidantes fotoquímicos expresados como Ozono (O<sub>3</sub>)”.

Esta norma estableció otros lineamientos, tales como criterios de emisión específicos para fuentes fijas, entre los que se cuenta las normas de control para calidad del aire y ruido ambiental:

- Resolución 610 de 2010.
- Resolución 627 de 2006.

Otras normas sobre el control de emisiones atmosféricas que están en vigencia y que permiten controlar fuentes de emisiones fijas y móviles son:

- Resolución 910 de 2008 para fuentes móviles.
- Resolución 909 de 2008 para fuentes fijas.

Igualmente, Minambiente (2017) ha referido que:

“(…) desde el año 2010 el Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo sostenible adoptó la Política de Prevención y Control de la Contaminación del Aire -PPCCA la cual tiene como objetivo impulsar la gestión de la calidad del aire en el corto, mediano y largo plazo con el fin de alcanzar los niveles

de calidad del aire adecuados para proteger la salud y el bienestar humano, en el marco del desarrollo sostenible. Su principal objetivo está en regular los contaminantes de la atmosfera que pueden afectar la salud humana y el bienestar de la población, fijando niveles adecuados”.

Minambiente (2019) sobre el particular normativo establece desde su perspectiva que:

“(…) En el año 2018 el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, de acuerdo con la Organización Mundial de la Salud, que considera que “el aire limpio es un requisito básico de la salud y el bienestar humano, sin embargo, su contaminación sigue representando una amenaza importante para la salud en todo el mundo. Por lo que El ministerio resolvió, fijar unos niveles máximos de Índices de Calidad del Aire – ICA permisible de contaminación para el territorio nacional, por lo que a partir del 1 de Enero del año 2018, mediante el decreto 2254 del 1 de Noviembre del año 2017 para lo cual adopto en función del rango permitido, un código de colores tabla 1-1, los cuales están asociados a unos efectos generales que deben ser tenidos en cuenta para reducir la exposición a altas concentraciones por parte de la población”.

Este nos servirá como índice para calcular el pronóstico de la calidad del aire -ICA, como lo muestra la tabla 1.2. (minambiente., 2017)

**Tabla 1.1** Descripción general del Índice de Calidad del Aire -ICA

Rango	Color	Estado de la calidad del aire	Efectos
0-50	Verde	Buena	La contaminación atmosférica supone un riesgo bajo para la salud
51-100	Amarillo	Aceptable	Posibles síntomas respiratorios en grupos poblacionales sensibles
101-150	Naranja	Dañina a la salud de grupos sensibles	1) Ozono Troposférico 2) Material Particulado

151-200	Rojo	Dañina para la salud	Todos los individuos pueden comenzar a experimentar efectos sobre la salud.
201-300	Púrpura	Muy dañina para la salud	Efectos graves para la salud.
301-500	Marrón	Peligroso	Toda la población puede presentar efectos adversos graves en la salud.

**Fuente:** Ministerio del medio ambiente. (minambiente., 2017)

**Tabla 1.2** Puntos de corte del Índice de Calidad del Aire -ICA

Índice de Calidad del Aire			Puntos de corte del ICA						
ICA	Color	Categoría	<i>PM</i> <sub>10</sub>	<i>PM</i> <sub>2,5</sub>	CO	<i>SO</i> <sub>2</sub>	<i>NO</i> <sub>2</sub>	<i>O</i> <sub>3</sub>	<i>O</i> <sub>3</sub>
			$\mu\text{g}/\text{m}^3$ 24horas	$\mu\text{g}/\text{m}^3$ 24horas	$\mu\text{g}/\text{m}^3$ 8horas	$\mu\text{g}/\text{m}^3$ 1 hora	$\mu\text{g}/\text{m}^3$ 1 hora	$\mu\text{g}/\text{m}^3$ 8horas	$\mu\text{g}/\text{m}^3$ 1hora <sup>(1)</sup>
0-50	Verde	Buena	0-54	0-12	0-5094	0-93	0-100	0-106	.....
51-100	Amarillo	Aceptable	55-154	13-37	5095-10819	94-197	101-189	107-138	.....
101-150	Naranja	Dañina a la salud de Grupos Sensibles	155-254	38-55	10820-14254	198-486	190-677	139-167	245-323
151-200	Rojo	Dañina a la salud	255-354	56-150	14255-17688	487-797	678-1221	168-207	324-401
201-300	Púrpura	Muy dañina a la salud	355-424	151-250	17689-34862	798-1583	1222-2349	208-393	402-794
301-500	Marrón	Peligrosa	425-604	251-500	34863-57703	1584-2629	2350-3853	394 <sup>(2)</sup>	795-1185

**Fuente:** Ministerio del medio ambiente. (minambiente., 2017)

Para realizar el cálculo del índice de calidad del aire -ICA, se realiza utilizando la siguiente ecuación: (EPA, 2009)

$$ICA_p = \frac{I_{\text{Alto}} - I_{\text{bajo}}}{PC_{\text{Alto}} - PC_{\text{bajo}}} \times (c_p - PC_{\text{bajo}}) + I_{\text{bajo}} \tag{1-1}$$

En donde:

*ICA<sub>p</sub>* = Índice de Calidad del Aire para el contaminante *p*.

$C_p$  = Concentración medida para el contaminante  $p$ .

$PC_{alto}$  = Punto de corte mayor o igual a  $C_p$

$PC_{bajo}$  = Punto de corte menor o igual a  $C_p$

$I_{alto}$  = Valor del ICA correspondiente al  $PC_{alto}$

$I_{bajo}$  = Valor del ICA correspondiente al  $PC_{bajo}$

## **2. Sistemas de extracción**

Los Sistema de Extracción focalizado han sido desarrollados en Países Industrializados para el mejoramiento Ambiental de los procesos productivos de sectores industriales donde la transformación de materias primas produce elementos nocivos o contaminantes en forma de residuos y materiales particulados que son emitidos al Medio Ambiente.

### **2.1 Definición**

Los sistemas de extracción se clasifican en:

- Sistemas de extracción GENERAL
- Sistemas de extracción FOCALIZADO

#### **2.1.1 Sistemas de extracción general**

Cuando se hace referencia a los sistemas extractivos, se debe entender que genéricamente este supuesto responde a la intencionalidad de poder separar uno o más elementos de otro que los contiene, por tanto, para el caso del control ambiental los sistemas de eliminación térmicos mediante la técnica de barrido de concentraciones volumétricas altas de aire es uno de los que más refiere la literatura.

En este sentido, el control térmico se emplea mediante un proceso de calefacción y recirculación del aire para el control de contaminantes bajo sistemas de dilución, a través de los cuales, la mezcla de un volumen de aire permite la extracción de ciertos tipos de particulados. Una vez realizado el proceso extractivo, se puede descargar a la atmósfera el aire recirculado mediante un sistema de impulsión que funciona como proceso complementario al sistema de extracción general.

Por su parte, García, Pencue & Gaona (2009) sobre los sistemas de extracción general expresan:

“(…) pueden emplearse para el control del ambiente térmico y/o para la eliminación de los contaminantes generados en un área mediante el barrido de un espacio dado con grandes cantidades de aire. Cuando se emplea para el control térmico, el aire debe ser templado y recirculado. Cuando se emplea para el control de los contaminantes (sistema de dilución), estos deben mezclarse con una cantidad de aire suficiente para que la concentración se reduzca hasta niveles seguros. Normalmente el aire contaminado se descarga a la atmosfera. A la hora de reemplazar el aire extraído suele emplearse un sistema de impulsión, que funciona asociado al de extracción”.

Es de mencionar, que este último proceso de dilución mencionado es utilizado cuando los procesos extractivos focalizados no permiten la recirculación de grandes volúmenes de aire calentado, por tanto el proceso extractivo puede acarrear elevados costos económicos.

### **2.1.2 Sistema de extracción focalizado**

Los sistemas de extracción focalizada, capta el material contaminante en su sitio de salida antes de que pueda pasar al medio ambiente de trabajo. La ventaja de este sistema en relación con el método general de ventilación; es su menor requerimiento de aire y la generación de alto vacío que impide el proceso de difusión de contaminantes.

De acuerdo con Carpio & Sánchez (2014) existen dos problemas básicos a resolver en cualquier sistema de control de emisiones:

“(…) 1) Se necesita extraer los contaminantes generados en un lugar específico (fuente), y 2) Hay que separar los contaminantes del flujo de aire para evacuar este último al medioambiente con el mínimo de impurezas o dentro de los parámetros permitidos por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible”.



Es preciso aclarar, que no hay un sistema que pueda generar un nivel de eficiencia del 100%, por lo que se van a generar contaminantes en lugares de trabajo de tipo industrial o semi-industrial al medio ambiente, a pesar de los esfuerzos que se hagan por filtrar el material particulado.

En el siguiente diagrama de la figura 2-4 podemos ver de forma muy simple la problemática del control de emisiones

**Figura 2.3:** Diagrama de control de emisiones



- Emisión

Según Carpio & Sánchez (2014) la emisión es:

“Corresponde al proceso industrial que produce una generación de polvo debido básicamente a la arquitectura del proceso en particular. Las emisiones son generadas en una fuente, la cual puede ser un punto de trabajo, una chimenea que arroja gases combustionados a la atmosfera, procesos de molienda, carga y descarga de materiales granulados o en polvo, procesos de soldadura, emisiones gaseosas en equipos de plantas depuradoras, procesos de fundición y en general cualquier proceso que permita a los contaminantes en reposo romper su inercia para ser proyectado a un estado de suspensión”.

- **Recolección**

Para García, Pencue & Gaona (2009) se puede definir como:

“(…) la solución de ingeniería para encapsular las fuentes, controlar las emisiones y extraer de forma controlada éstas un lugar específico. Predominantemente en este punto, es muy importante el diseño del equipo con medio filtrante o ciclón más adecuados y geometría de campanas o boquillas de succión; para lograr una buena eficiencia y eficacia se hace necesario trabajar con velocidades de captura adecuadas y ángulos de

arrastre dentro de las campanas que eviten al máximo las pérdidas de presión dinámica en la boca de éstas”.

- **Conducción**

Como su nombre lo indica, un sistema de conducción es aquel que permite orientar un material a través de un ducto a partir de una fuente y hasta un sitio final, teniendo como servomecanismo un punto de control al cual se le denomina sistema de filtración. En relación a la conducción, se han determinado sistemas de alta y baja velocidad, los cuales entran en función del material a filtrar, de acuerdo a las expectativas trazadas en el proceso enrutado por el equipo técnico y de ingeniería.

- **Alta velocidad**

En relación a los sistemas de filtrado de alta velocidad, el transporte activo a través de conductos de diferente calibre estandarizado y rejillas de filtrado, tienen aceleraciones que oscilan entre los 14 a 27 m por segundo de acuerdo al material a transportar y en consideración de los datos de granulometría, abrasividad, peso específico, humedad densidad, propiedades físicas, propiedades químicas y de tipo higroscópico, así como nivel de pH existente y gases que pueda generar el proceso, por lo que cada uno de estos parámetros va a permitir la estandarización de los procesos y el control de emisiones de MP.

- **Baja velocidad**

Por su parte, los sistemas de baja velocidad se caracterizan por un transporte activo que tiene velocidades entre los 9 a 2 m por segundo, en donde el sistema extractivo se basa en el arrastre de partículas de mayor masa o densidad que implican una decantación por pérdida de energía cinética, en el que al igual que en los sistemas de alta velocidad, se requiere de una estandarización y diseño para su eficiencia y control, pero además es de señalar que, la angulación de los ductos en semiverticalidad, permiten que se suceda el efecto de decantación con mayor facilidad provocando un menor desgaste de transiciones y codos, aunque con la desventaja del requerimiento de amplios espacios para su utilización.

- **Filtración**

Para Morales (2003) la filtración es la segunda dificultad que se debe solucionar, al referirse que:

---

“(…) es cómo evacuar la masa de aire al medioambiente sin contaminantes, y es aquí donde entra en juego el equipo encargado del filtrado (entiéndase por filtrado, la separación mecánica o química de los contaminantes del flujo de aire) para convertirlo en aire limpio. Si bien es cierto existen muchos equipos que permiten la captación de contaminantes dentro de un flujo de gases”.

Se pueden mencionar los más utilizados y más eficientes dependiendo de la aplicación:

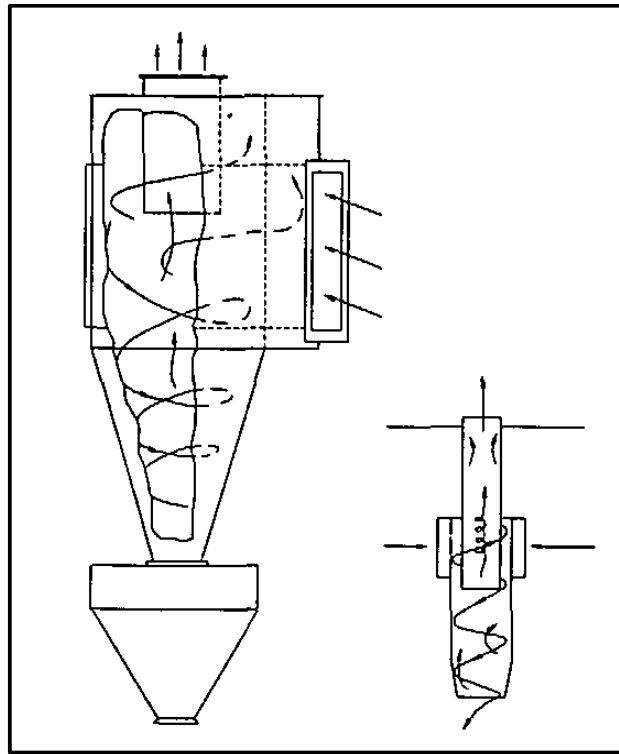
- **Material particulado**

- **Ciclones**

Rojano y otros (2016) mencionan que los ciclones se caracterizan por:

“Ser colectores centrífugos donde la entrada de partículas es tangencial al cuerpo del cono, forzando el material hacia la parte externa lo que disminuye la velocidad del aire y propicia el desprendimiento de partículas. El aire limpio sale por la parte superior del ciclón como se observa en la figura 2-4. Muchas veces los ciclones se instalan en zonas donde se mueven o descargan grandes cantidades de partículas, para reducir la cantidad de material que va al filtro de mangas”.

Aquí se puede especificar técnicamente, que el ciclón es aproximadamente 65% eficiente al filtrar partículas de 40 micras con una pérdida de carga de 20 a 40 mmca, junto al desgaste de algunos elementos móviles, el requerimiento de mantenimientos a bajo costo, así como un sistema de operación y colección eficiente para la disposición en seco.

**Figura 2.4** Diagrama del ciclón

**Fuente:** American conference of governmental industrial hygienists. (CASAL, 1989).

○ **Colectores de procesos húmedos:**

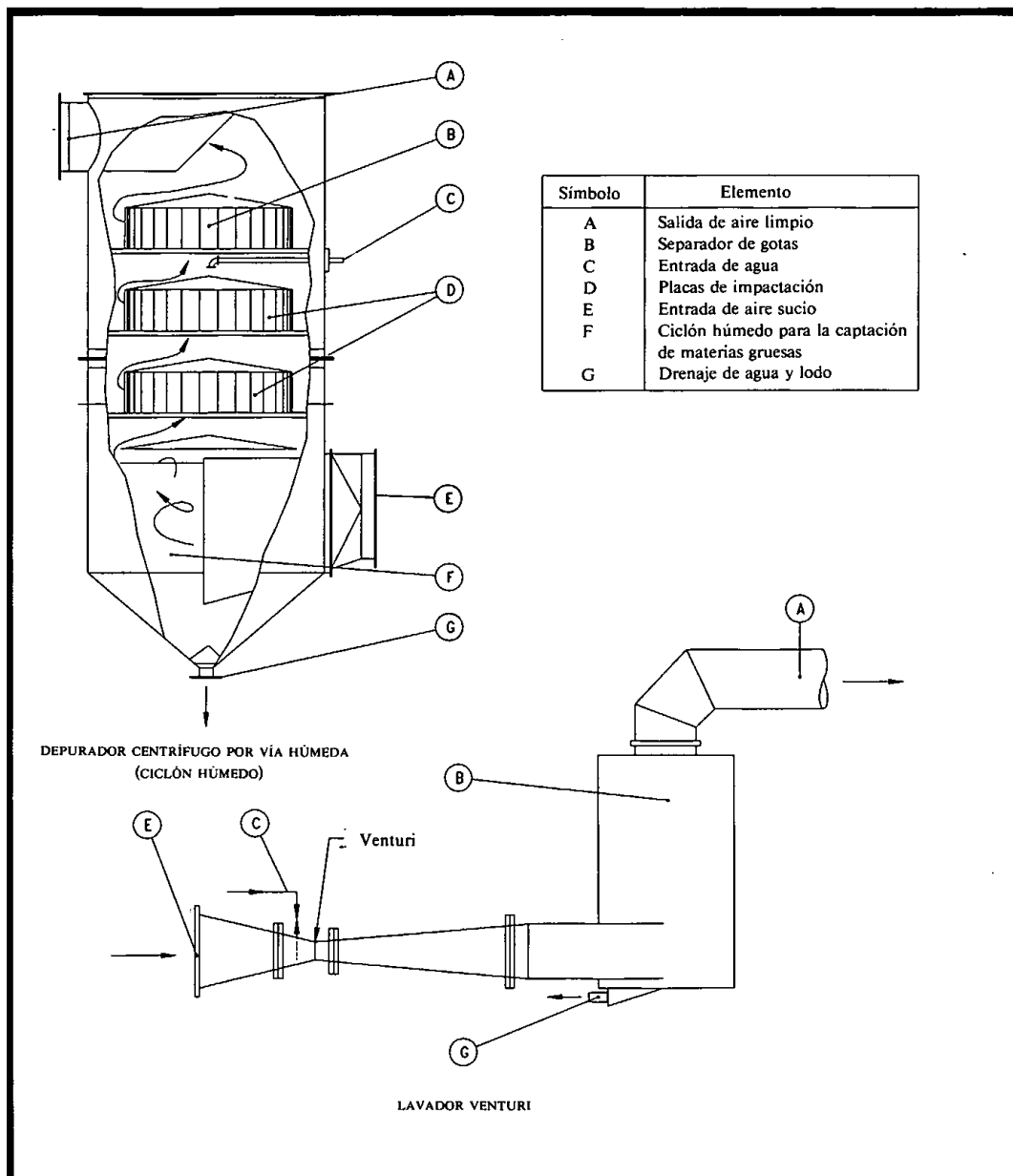
Esta clase de colectores se utilizan agua para poder saturar el material particulado y de esta manera procederá la separación en la actualidad se encuentran dos tipos de colectores de tipo húmedo, en donde el sistema de filtración que satura las partículas la lleva a un sistema decantador. El otro sistema es un precipitador que utiliza un campo hidroeléctrico para saturar las partículas a través de cargas eléctricas, las cuales se pasan a través de placas metálicas con cargas opuestas para poderlas coleccionar. Se ha podido determinar que este tipo de colectores húmedos tienen poca eficacia y generan demasiados lodos lo que sumaría un problema de contaminación secundaria, como se puede apreciar en la figura 2-5.

Las ventajas de estos colectores según Casal (1989) es:

“(…) se pueden recolectar partículas y gases al mismo tiempo; disuelven las partículas solubles; tienen el doble de enfriadores y equipos de control de la contaminación; evitan los riesgos de explosión por la presencia de polvos y

gases combustibles; son equipos compactos; de tamaño generalmente pequeño y costo inicial bajo”.

**Figura 2.5** Colectores de procesos húmedos



Fuente: Ventilación industrial página 84. (higienists, 1992)

- **Precipitadores electrostáticos:**

Los precipitadores electrostáticos se caracterizan por un proceso físico, mediante el cual las partículas suspendidas en un flujo gaseoso se cargan eléctricamente y son separados de dicho flujo.

En este sentido, la carga otorgada debe ser de tipo negativo a las partículas que están en el ducto, produciendo con ello una adherencia a las láminas del recolector las cuales tienen una carga positiva. Por tanto, la asociación de la carga hace una diferencia de voltaje entre el electrodo y la placa que va de los 60-70 mv en la mayoría de diseños de este tipo de precipitación, en donde los colectores son eficientes en diferentes tipos de industria generando una limpieza hasta el 99% en particulado igual o menor a 5  $\mu\text{m}$ .

Los precipitadores electrostáticos que se presentan en la figura 2-6 tienen como finalidad establecer una eficiente recolección de material particulado en altas concentraciones tanto de tamaños finos como gruesos con un bajo gasto de energía. Esto se debe a su diseño de operación continua y recolección en seco con mínimos requerimientos de mantenimiento y costos de repuestos por debajo de los precios de referencia de mercado, tiene una capacidad para operar tanto a presiones altas como al vacío y en rangos de temperatura entre los 370 a 540 grados Celsius, a diferentes velocidades de flujo de gas relativamente altas.

- **Filtros de mangas**

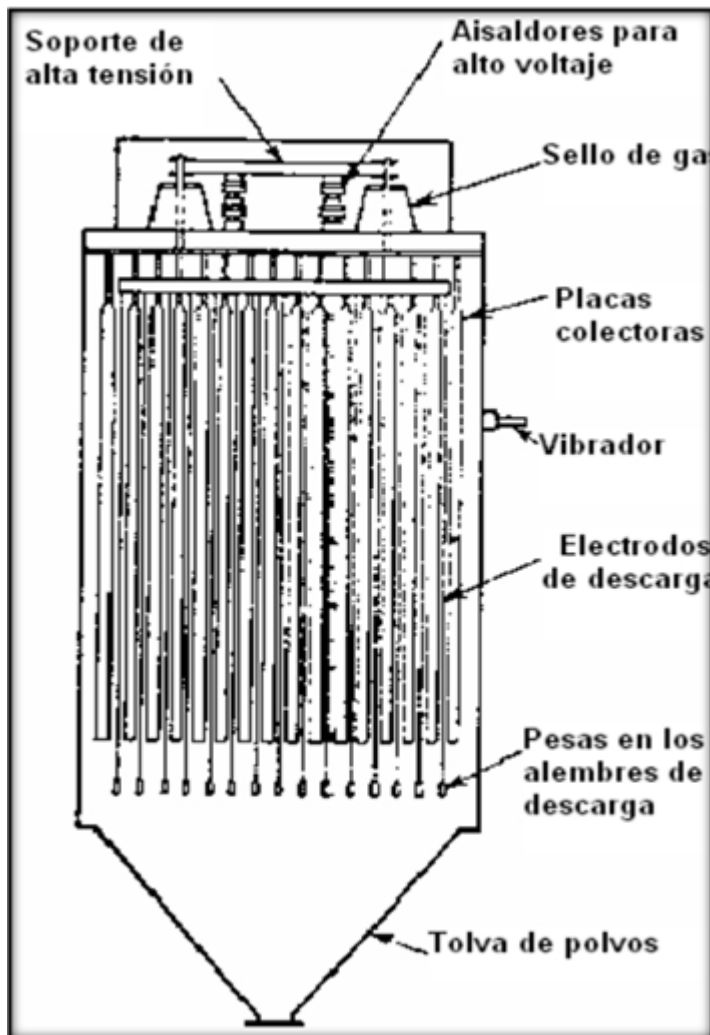
Se le llama también filtros en seco con los cuales se hace control de la contaminación atmosférica de manera eficaz, ya que éstos cumplen con las normativas para los niveles de emisión de partículas sólidas gracias a su diseño y a que no compromete la cantidad ni la calidad de la producción en el proceso de mantenimiento.

Como su nombre lo indica la manga suele ser una estructura flexible en forma de saco que actúa como elemento filtrante la cual es colocada en la estructura diseñada para tal fin que por lo general tiene una disposición vertical para la filtración del particulado en el sistema de malla para un flujo de partículas sólidas que combinan aire y gas tal y como se muestra en la figura 2-7.

Este tipo de filtración tiene como ventaja su alta eficiencia en la recolección de partículas gruesas y finas, en donde la salida de aire permite la recirculación del mismo en la planta, y a su vez, el material recolectado se recupera en seco para su posterior procesamiento lo

cual se convierte en un sistema amigable y de fácil uso, que además cuenta con un proceso de limpieza por volteo muy cómodo para el operario, de acuerdo a las indicaciones del fabricante.

**Figura 2.6** Precipitadores electrostáticos



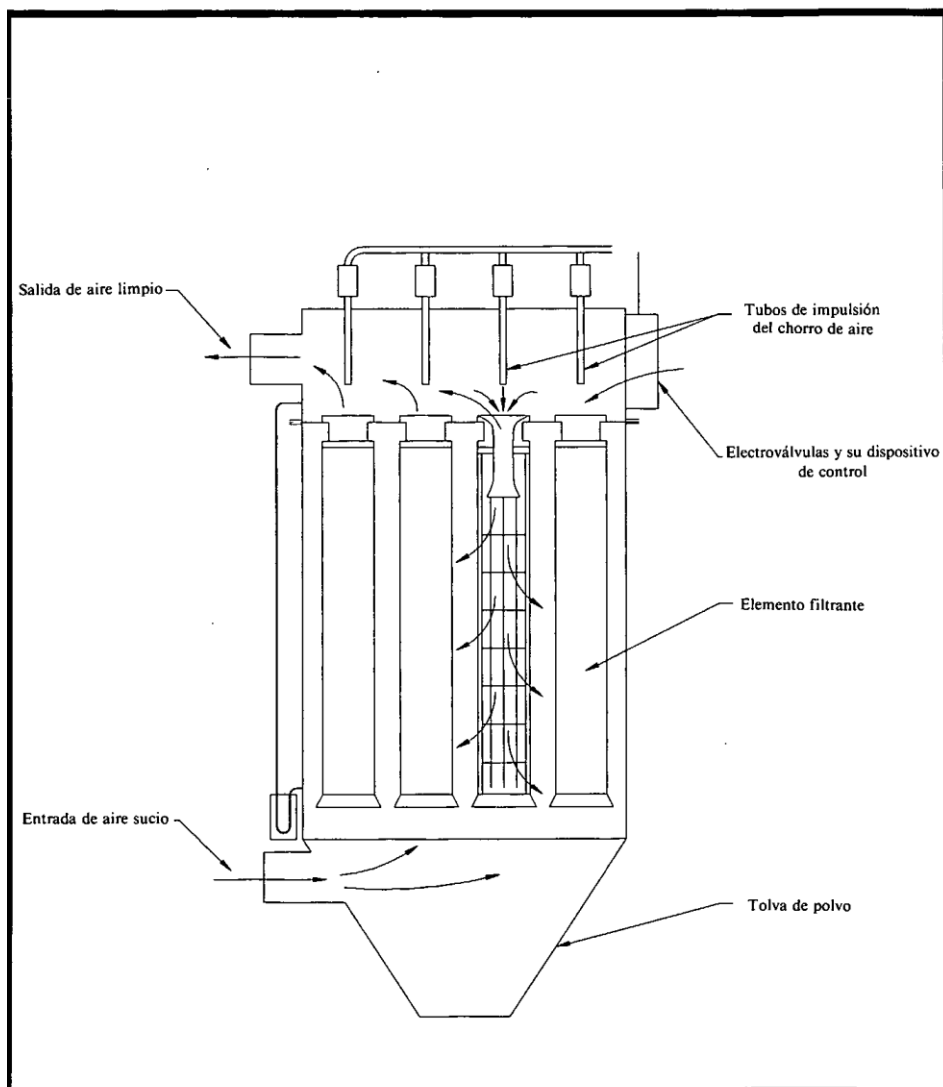
**Fuente:** BHA, Guía de Referencias y Soluciones de Problemas, 1998, p. 69

La corrosión y oxidación de las partes del sistema no deben constituir un problema siempre y cuando se realizan los procesos de mantenimiento y reparación, los cuales son muy sencillos y están relacionados con el cambio de diversos filtros para las dimensiones y adecuaciones requeridas en la instalación, además la operación es relativamente simple.

Los filtros de mangas se clasifican por su sistema de filtración en:

- Filtración exterior (Figura 2-7)
- Filtración interior
- Filtros de mangas de sacudido (Figura 2-8)
- Filtros de mangas de aire reverso (Figura 2-9)

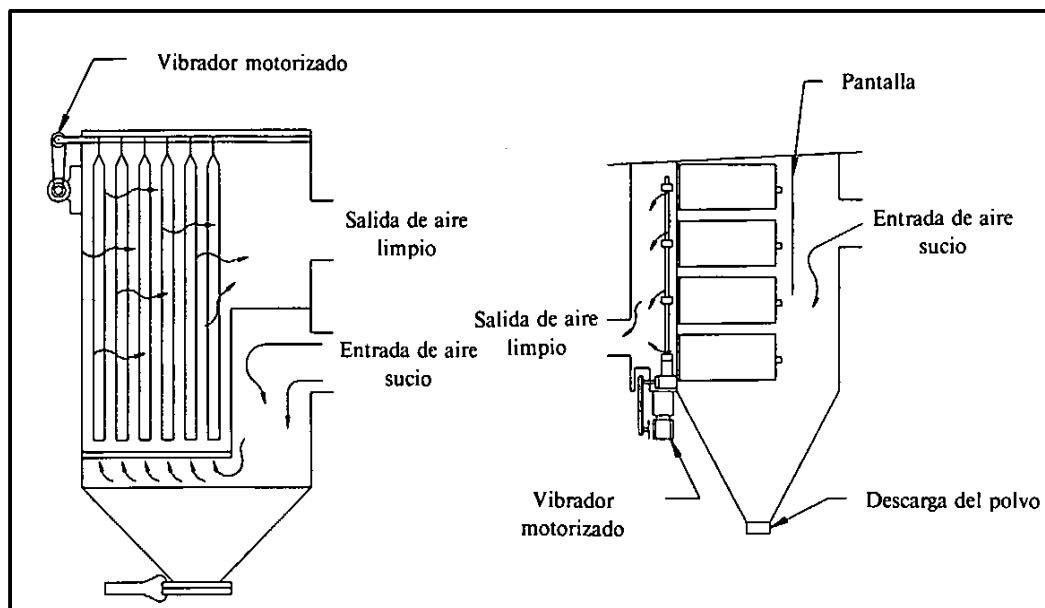
**Figura 2.7** Filtro de mangas



**Fuente:** American conference of governmental industrial higienists, ventilación industrial (higienists, 1992)



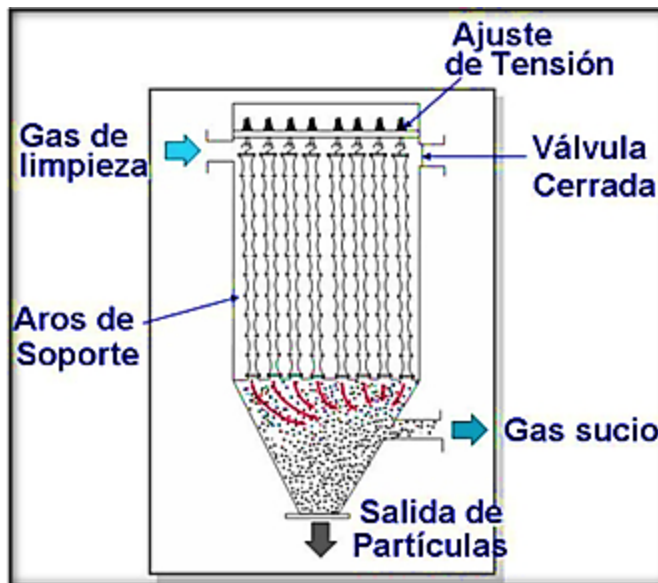
**Figura 2.8** Filtro de mangas por sacudido



**Fuente:** American conference of governmental industrial higienists, ventilación industrial (higienists, 1992)

Para este tipo de filtrado de mangas de sacudido, el proceso de filtración se ve acompañado de un ingreso de aire contaminado al interior del colector, que a través de un sistema de manga que posee el ducto, acompaña el paso del aire con el proceso de limpieza a través de manga abierta, en donde la compuerta de entrada una vez cerrada, inicia una serie de mecanismos que permiten el sacudido progresivo de tipo sinusoidal desde la parte superior de la manga para crear un espiral de ondas a lo largo del trayecto de la misma, provocando con ello la separación del polvo, el cual es recolectado por una tolva dentro de un tiempo estimado de 5 a 10 segundos.

Este sistema de filtración industrial, requiere de un motor que induce la activación de la sinusoide encargada de transmitir el sacudido a través de un pilar de barra que se conecta en la estructura a los filtros de mangas, requiriéndose muy poca energía para producir el desprendimiento del particulado del interior de la manga y con dirección hacia la tolva.

**Figura 2.9** Filtro de mangas de aire reverso

**Fuente:** BHA, Guía de Referencias y Soluciones de Problemas, 1998, p. 69

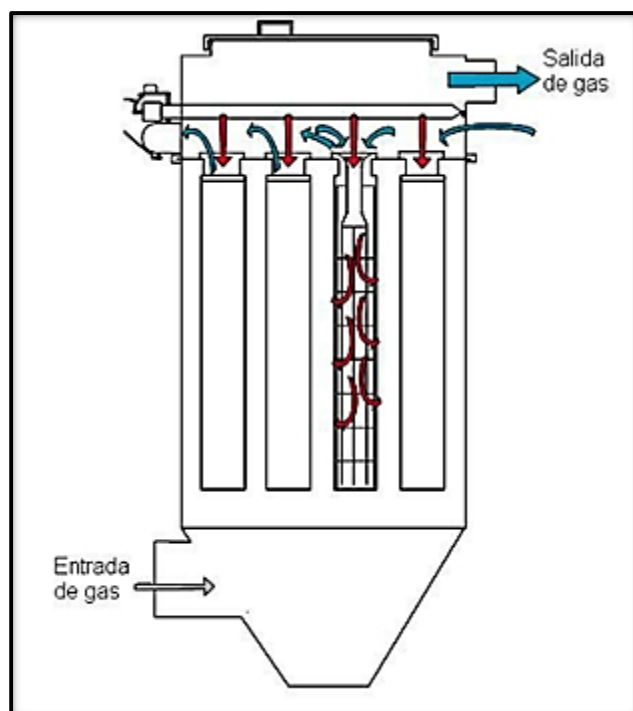
- **Filtros pulso jet:**

Los filtros tipo jet por su parte, tienen la particularidad estructural de permitir una mayor circulación volumétrica de aire hacia el colector, la cual se conecta también con la relación aire-tela dentro del sistema pulse-jet que funciona en relación de 1.2- 1.8m<sup>3</sup>/min. Lo anterior, permite concebir que el sistema de filtrado tiene desde el punto de vista estructural un tamaño que lo hace eficiente y económico en atención a que la colocación vertical de la unidad filtrante sujeto por abrazaderas a nivel superior, mientras que en la parte inferior, la manga está cerrada para poder generar un efecto de canastilla interna que se acompaña de un entramado de alambre.

De esta manera, el aire contaminado que ingresa al sistema se filtra por depósito, donde el polvo cae desde la cara externa de la manga y a través de ella durante todo el ciclo de limpieza, y posteriormente, se desaloja la impureza a través de un chorro de aire comprimido que es inyectado alrededor de las mangas filtrantes, tal y como se muestra en la figura 2-10. En cuanto al mecanismo de limpieza de las mangas, se puede señalar que la disposición de una serie de boquillas alimentadas por un ducto conectado a un Venturi permite el transporte a alta presión y de forma continua a través del tubo del aire para que impacte el filtro, creando una onda de desplazamiento al través de la manga para que está

surta un efecto de flexión, rompiendo así la capa de polvo e impurezas existentes en el colector, y de allí se desplazan hacia la tolva.

**Figura 2.10** Filtros de mangas tipo pulso jet



**Fuente:** BHA, Guía de Referencias y Soluciones de Problema (BHA, 1998)

El ciclo de limpieza para filtros pulse-jet debe tener una duración de 0,10 a 0,15 segundos usando presiones de pulsación entre 4 a 7 bars (60-100psi).

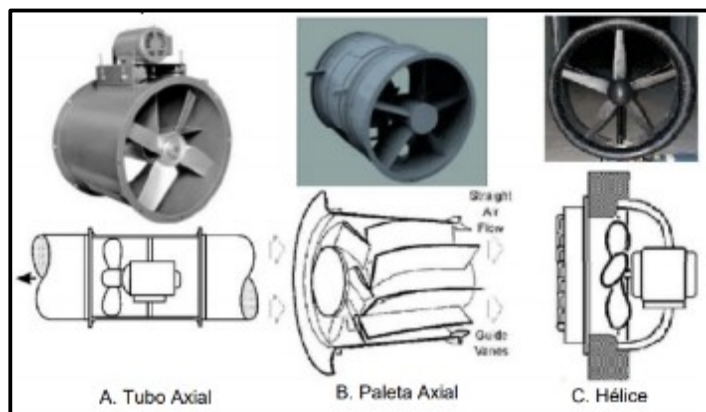
- **Equipo de vacío o ventilador**

En cuanto a la clasificación de los equipos de vacío o ventilación se reconocen aquellos que han sido desarrollados a partir del sistema de flujo de aire y otros basados en el sistema de presión. En cuanto a estos últimos, se reconocen tres tipos: los de baja, media y alta presión, los cuales pueden desarrollar flujos de presión desde los 100 milímetros de agua hasta 1000 milímetros de H<sub>2</sub>O en ventiladores propiamente dichos, soplantes o tubos axiales, respectivamente. Adicionalmente, se encuentran los sistemas de muy alta presión que pueden tener turbocompresores que generan presión superior a los 2.500 mm de agua. Ahora bien, en relación a la dirección del flujo, éste puede darse bajo tres sistemas: de flujo axial, semiaxial o radial, al cual también se le conoce como centrífugo.

✓ **Ventiladores axiales:**

En relación a los ventiladores de tipo axial, su estructura tiene como componente básico un rotor el cual a su vez contiene una serie dual o tripleta de paletas que van sujetadas a un eje de propulsión, el cual es activado por un mecanismo motorizado que permite el impulso del aire en una dirección rectilínea que tiene como salida un flujo helicoidal, tal y como se muestra en la figura 2-11, de la que existen tres tipos básicos conocidos como: helicoidal, tubular y turbo axial.

**Figura 2.11:** Ventiladores axiales



**Fuente:** Ventilación industrial (BATURIN.)

○ **Ventiladores helicoidales:**

De otro lado, se encuentra los ventiladores helicoidales que se caracterizan por un desplazamiento del aire en el sentido rotatorio de la hélice que compone el mecanismo de ventilación, el cual es guiado por una serie de paletas perfiladas que se disponen de manera angular llamado también sistema angular de ataque, a través del cual se genera la circulación del aire para la conducción de un caudal, donde la resistencia es baja en atención a un sistema de ducto corto que es del mismo diámetro de la hélice que lo compone y, desde allí, se moviliza la carga de ventilación para la extracción del aire sin mediación de ductos.

Es preciso señalar, que este sistema de ventilación lo componen una virola, una hélice y un sistema mecánico que lo acciona, el cual se construye de dos tipos de alabes: uno para el disco de ventilación sin conducto, y otro para vencer las resistencias inferiores a 25 mm de agua. Las estructuras tienen perfilaciones influenciadas por la resistencia de aire y la

presión que produce el caudal. Se reconocen del ventilador helicoidal las siguientes características: la posibilidad de albergar caudales de aire volumétrico alto (diámetro de 800mm puede dar hasta  $30 \text{ (m}^3/\text{h)}$ ), la reducción de la presión disponible, el alto rendimiento, la disposición y sistema de disminución de ruido y la existencia de una curva poco angulada.

- **Ventiladores tubulares y turbo axiales:**

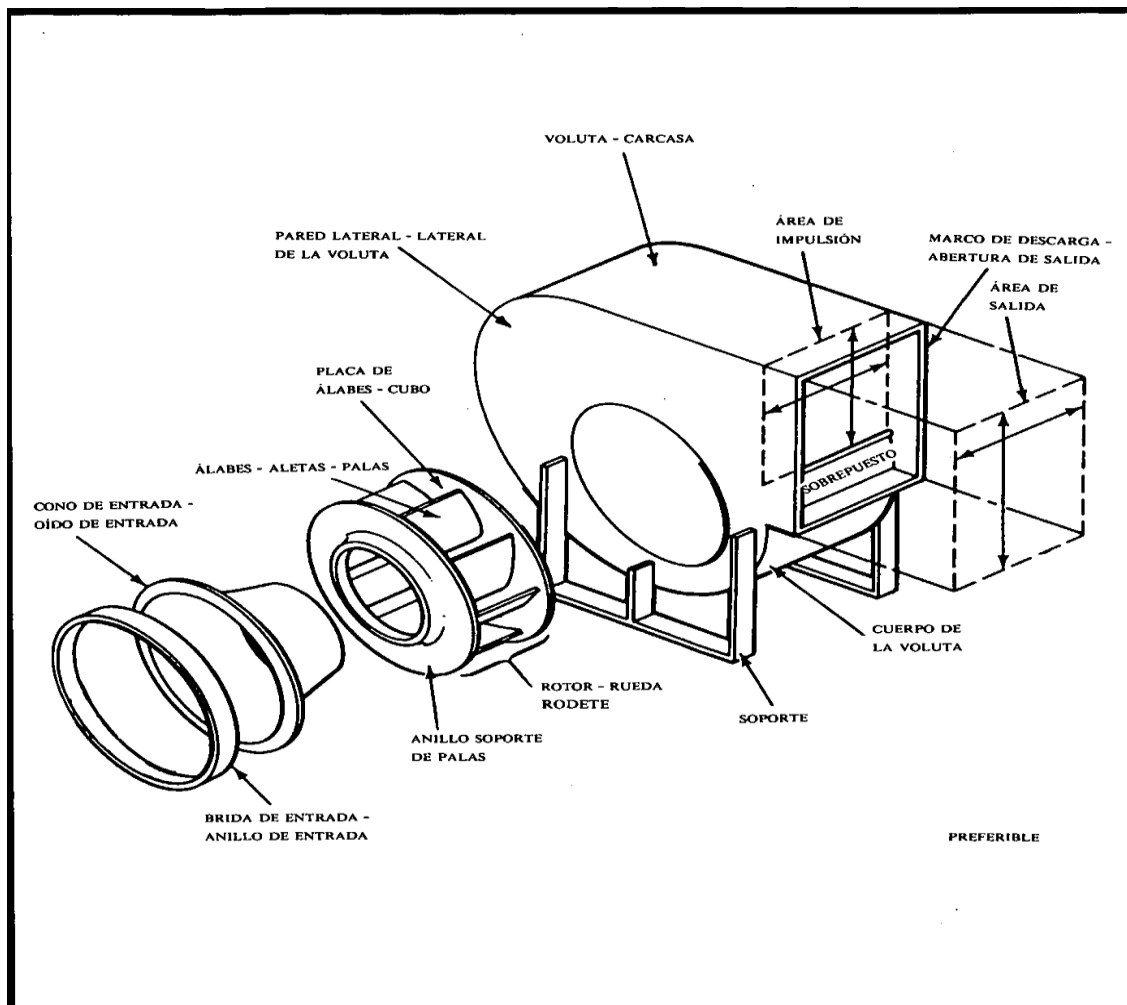
De otro lado, los denominados ventiladores turbo axiales tienen una estructura que posee una hélice de alabes con perfil aerodinámico, la cual va montada en una carcasa de tipo cilíndrico en la que se disponen una serie de aletas que permiten direccionar el flujo de aire en el lado de impulsión de la hélice, la cual comparada con otro tipo de ventilación axial, tiene un rendimiento más alto ya que desarrolla presiones por encima de los 600 mm de agua. Este sistema tiene la particularidad de disminuir el efecto rotatorio existente en el rodete de entrada de paso del aire con lo cual se mejora la eficiencia del equipo.

- ✓ **Ventiladores centrífugos:**

En cuanto a los ventiladores de tipo centrífugo, estos tienen como característica estructural una turbina con aletas montadas alrededor de un eje central o manzana que permite direccionar el gas alrededor de la turbina a 90 grados, con lo que genera una aceleración hacia las aletas y se logra una centrifugación que consiente altas presiones volumétricas de gas, haciendo más eficiente los procesos industriales. Además, lleva también a la obtención de un sistema de control del elemento contaminante, tal y como se muestra en la figura 2-13.

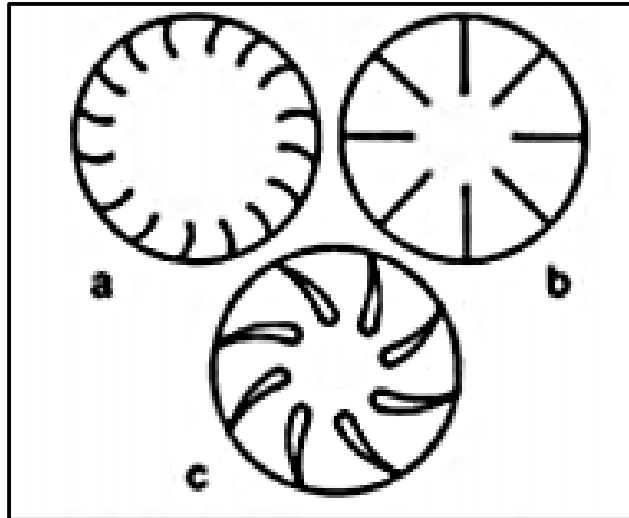
Existen tres tipos de turbinas con ventiladores centrífugos:

- Con curvas hacia adelante (figura 2.13).
- Con curvas hacia atrás (figura 2.12).

**Figura 2.12** Ventilador centrífugo

**Fuente:** American conference of governmental industrial higienists, ventilación industria (higienists, 1992)

**Figura 2.13** Sentido de rotación de las aletas de una turbina

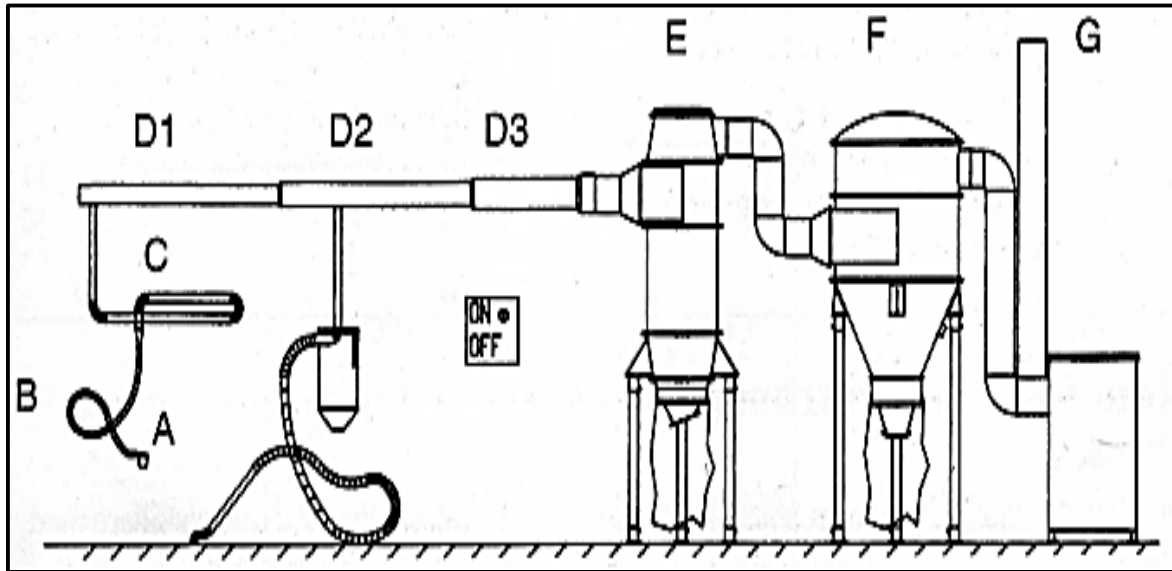


**Fuente:** Mecánica de fluidos: fundamentos y aplicaciones. Yunus A. Çengel, John M. Cimbala. Editorial McGraw Hill (Yunus A. Çengel, 2002) (Yunus A. Çengel, 2002)

Todos los sistemas de extracción focalizada constan de los siguientes dispositivos:

- A Campana Extractora
- B Manguera de conexión
- C Tubo de Alargue
- D1, D2, D3, Ductos principales de Conexión
- E Separador Primario
- F Equipo con Medio Filtrante
- E Equipo de Vacío

Estos elementos deben ser diseñados específicamente para cada aplicación como lo muestra la figura 2.14. Estos deben extraer el material particulado sin perturbar el proceso, por ejemplo, la velocidad de captación de los humos debe ser tal que no afecte la atmósfera creada por los gases de protección de la soldadura

**Figura 2.14** Distribución de componentes del sistema de extracción focalizado

**Fuente:** ANDBOK FOR PLANERING OCH DIMENCIONARING AV PUNKTUTSUGNING  
presión de vacío.



## **3. Principio de diseño del sistema de extracción**

Dentro de los principios para el diseño de un sistema de extracción se debe tener en cuenta todos aquellos procedimientos relacionados con el cálculo que se presentan a continuación y los cuales son esenciales para determinar el funcionamiento y componentes del sistema en asociación al tema de carga y extracción focalizado especialmente, donde los resultados van a evidenciarse en las eficiencias del caudal, tamaño, tipo de turbina, ventilador, velocidad, presión y potencia.

### **3.1 Preliminares de diseño**

El diseñador debe obtener la siguiente información:

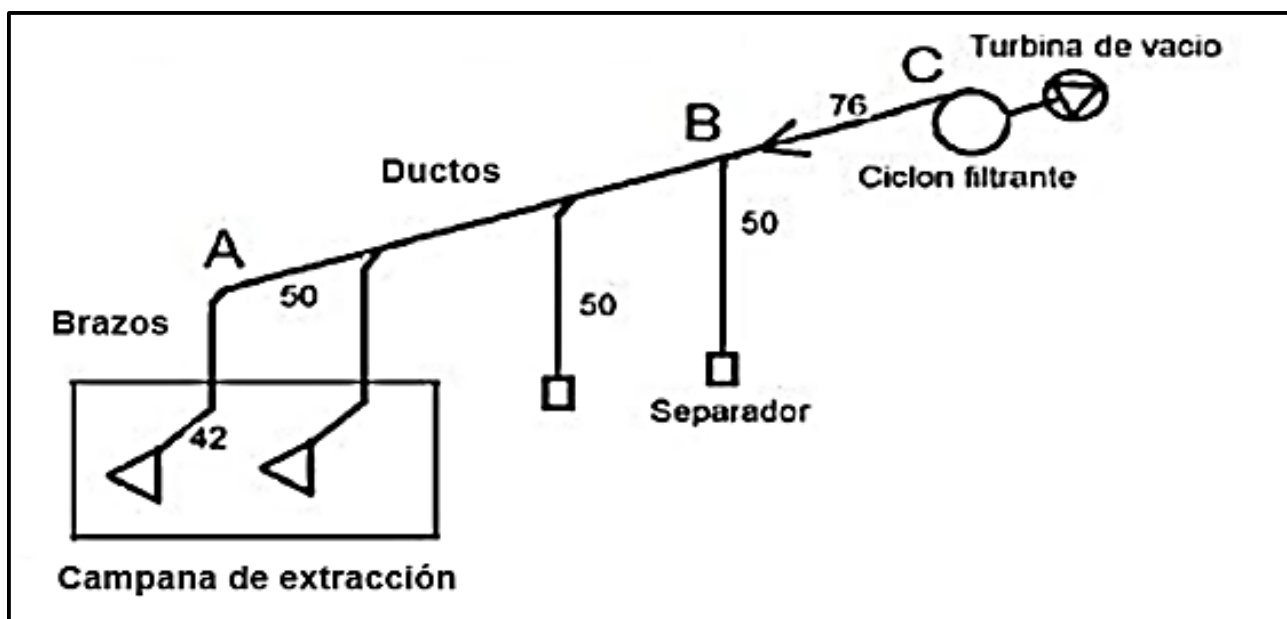
- Se debe conocer la distribución en la planta de las operaciones, los sitios de trabajo, edificio (si es necesario), etc.
- Se deben considerar las características de los contaminantes.
- Luego se elabora un esquema del sistema de ductos incluyendo las dimensiones en planta, el sitio de ubicación del ventilador o bomba de vacío, la del equipo con medio filtrante, etc. Es conveniente identificar cada tramo de los ductos primarios y secundarios con números, letras o cualquier otro método como lo muestra la figura
- Se debe conocer los detalles de operación, toxicidad, características físicas y químicas.

### **3.2 Fases de diseño:**

Los sistemas de extracción focalizado desde el más simple al más complejo, se caracterizan por tener campanas de captación, conjunto de ductos y accesorios hasta llegar al equipo de vacío. Los sistemas complejos de extracción focalizado no son más que un conjunto de sistemas simples unidos a un ducto común, por lo que cuando empezamos a diseñar el sistema de extracción focalizado, debemos comenzar por el diseño de la campana, teniendo en cuenta los siguientes pasos:

- 1º.- Obtener las dimensiones del foco.
- 2º.- Evaluar la posibilidad de corrientes de aire.
- 3º.- Detallar las necesidades y espacio del entorno.
- 4º.- Determinar el tipo de elemento de captación y las dimensiones del sistema de extracción.
- 5º.- Determinar la velocidad adecuada.
- 6º.- Determinar la geometría del elemento de captación.
- 7º.- Determinar la velocidad mínima del aire en los ductos.
- 8º.- Determinar los valores del caudal y la velocidad.
- 9º.- Determinar las pérdidas de carga.
- 10º.- Calcular la ecuación de funcionamiento del sistema.
- 11º.- Seleccionar un ventilador cuya curva de funcionamiento sea congruente con la ecuación de funcionamiento del sistema.

**Figura 3.15:** Esquema isométrico de un sistema de extracción focalizado



Fuente: Autor

### 3.3 Métodos de diseño

En cuanto los métodos de diseño del sistema extracción focalizado se han determinado varios elementos de captación que se unen a través de ductos en un sistema principal de tubería en el extremo del ventilador. Este diseño de extracción focalizada puede ser realizado de diversas formas, en función de las características y detalles técnicos obtenidos de la emisión del contaminante y del espacio físico que exista en la instalación del mismo, en donde de forma simultánea debe equilibrarse cada elemento de captación para que en la circulación del caudal se puede recolectar la mayor cantidad de material contaminante y, asimismo, poder disponer de los métodos de regulación y disposición final del material particulado colectado.

Para el método de diseño del sistema de extracción focalizado, se deben tener en cuenta los siguientes pasos:

- Se debe calcular las pérdidas de carga del sistema de extracción focalizado, las cuales son calculadas por el rozamiento y los accesorios, utilizando el método de la presión dinámica.
- Se debe evidenciar la ponderación de los puntos de unión de los ductos y ajustar el caudal y el radio del ducto o diseño de la campana, para lograr un equilibrio del sistema.
- Se selecciona el medio filtrante y el equipo de vacío.

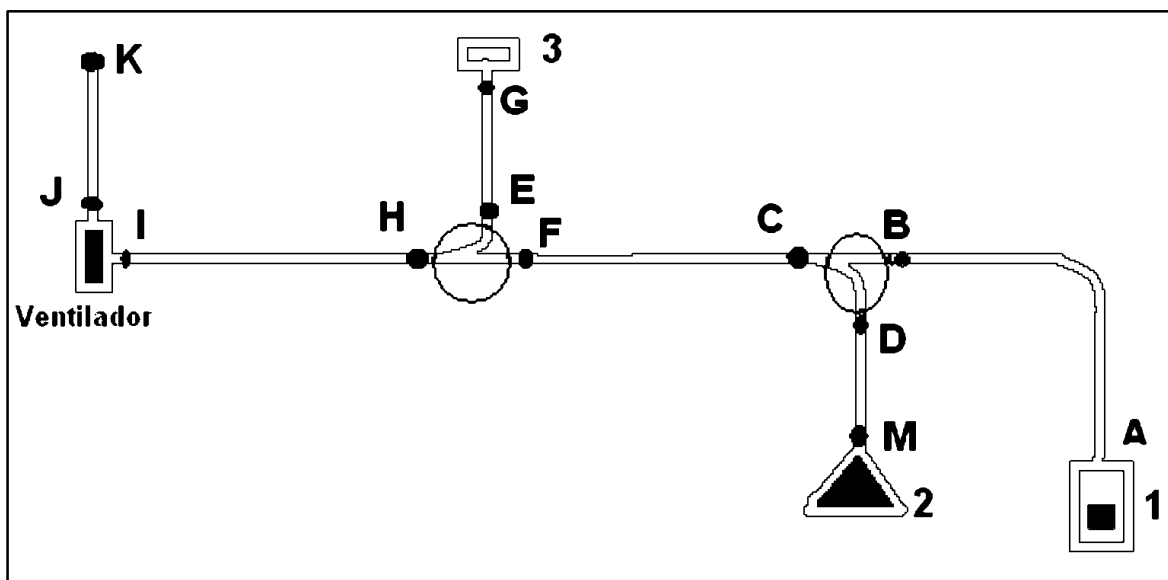
La figura 3.16 ayudará a comprender el procedimiento de cálculo de la instalación de un sistema de extracción focalizado, para ello sobre la base de un esquema adecuadamente rotulado describiremos la secuencia de cálculo.

1°- se determinan los caudales de aire necesarios para los elementos de captación 1 y 2:  $Q_1$  y  $Q_2$ . Como se recordará el caudal es una función de la forma y la geometría del elemento de captación, así como de su distancia a la fuente de emisión y la velocidad de captura.

2°- Se calcula la sección de la tubería A-B y M-D, de tal manera que se respeten las velocidades mínimas en ducto si las hay y las presiones estáticas resultantes en D y B sean iguales. Los puntos D y B se corresponden con los puntos 1 y 2 del modelo de entronque idealizado. El punto C se corresponde con el punto 3 del mismo modelo.

3°- Usando el método de la presión dinámica, determinar las presiones estáticas y dinámicas en C.

**Figura 3.16** Secuencia de cálculo de una instalación



**Fuente:** VENTILACION INDUSTRIAL Generalitat Valenciana. Conselleria de Treball i Afers Socials. Direcció General de Treball. Paseo de la Alameda, 16.46010 Valencia

4°- Se calculan las pérdidas de carga en el tramo C-F y calcular las presiones dinámica y estática en F.

5°- En relación de las necesidades de caudal en el elemento de captación 3, determinar la sección de la conducción G-E para que satisfaciendo la condición de velocidad mínima en el ducto si la hay, la presión estática en E sea igual a la presión estática en F.

6°- Usando el método de la presión dinámica, determinar las presiones estáticas y dinámicas en H

7°- Luego se calcula la pérdida de carga en tramo H-I y determinar las presiones estática y dinámica en I.

8°- Se plantean las ecuaciones para encontrar los valores del ventilado así (BATURIN.)

$$a) PE_I + PD_I + PD_v + PE_v = PE_J + PD_J \quad (3-2)$$

$$b) PE_J + PD_J = PE_K + PD_K + h_{J-K} \quad (3-3)$$

Teniendo en cuenta que:

$PE_K = 0$  por estar a la presión atmosférica

$PD_V = PD_J$  es un criterio que establece que la presión dinámica del ventilador es igual a la presión dinámica a la salida

$PD_J = PD_K$  por mantenerse la sección en el tramo J-K

Queda:

$$a) PE_l + PD_l + PE_V = PE_J \quad (3-4)$$

$$b) PE_J = h_{J-K} \text{ pérdida de carga de J a K}$$

De donde despejamos  $PE_V$  que representa la presión estática del ventilador. Seleccionamos un ventilador que suministrando el caudal correspondiente al tramo H-I sea capaz de vencer la pérdida de carga calculada  $PE_V$ . Para un mejor cálculo de los elementos utilizados y una mayor estabilidad del sistema de extracción se recomienda utilizar los siguientes métodos.

### **3.3.1 Método de la Presión Dinámica**

El método de la presión dinámica se ilustra en la tabla 3-3.

**Tabla 3.3: Conversión presión dinámica a velocidad**

$V = 4,043 \sqrt{PD}$ DENSIDAD DEL AIRE = 1,2 Kg/m <sup>3</sup> PD = PRESIÓN DINÁMICA EN mmca      V = VELOCIDAD EN m/s											
PD	V	PD	V	PD	V	PD	V	PD	V	PD	V
0,1	1,28	5,1	9,13	11,0	13,41	61,0	31,58	111,0	42,59	161,0	51,30
0,2	1,81	5,2	9,22	12,0	14,00	62,0	31,83	112,0	42,79	162,0	51,46
0,3	2,21	5,3	9,31	13,0	14,58	63,0	32,09	113,0	42,98	163,0	51,62
0,4	2,56	5,4	9,39	14,0	15,13	64,0	32,34	114,0	43,17	164,0	51,77
0,5	2,86	5,5	9,48	15,0	15,66	65,0	32,59	115,0	43,35	165,0	51,93
0,6	3,13	5,6	9,57	16,0	16,17	66,0	32,84	116,0	43,54	166,0	52,09
0,7	3,38	5,7	9,65	17,0	16,67	67,0	33,09	117,0	43,73	167,0	52,24
0,8	3,62	5,8	9,74	18,0	17,15	68,0	33,34	118,0	43,92	168,0	52,40
0,9	3,84	5,9	9,82	19,0	17,62	69,0	33,58	119,0	44,10	169,0	52,56
1,0	4,04	6,0	9,90	20,0	18,08	70,0	33,82	120,0	44,29	170,0	52,71
1,1	4,24	6,1	9,99	21,0	18,53	71,0	34,07	121,0	44,47	171,0	52,87
1,2	4,43	6,2	10,07	22,0	18,96	72,0	34,30	122,0	44,65	172,0	53,02
1,3	4,61	6,3	10,15	23,0	19,39	73,0	34,54	123,0	44,84	173,0	53,18
1,4	4,78	6,4	10,23	24,0	19,81	74,0	34,78	124,0	45,02	174,0	53,33
1,5	4,95	6,5	10,31	25,0	20,21	75,0	35,01	125,0	45,20	175,0	53,48
1,6	5,11	6,6	10,39	26,0	20,61	76,0	35,24	126,0	45,38	176,0	53,63
1,7	5,27	6,7	10,46	27,0	21,01	77,0	35,48	127,0	45,56	177,0	53,79
1,8	5,42	6,8	10,54	28,0	21,39	78,0	35,71	128,0	45,74	178,0	53,94
1,9	5,57	6,9	10,62	29,0	21,77	79,0	35,93	129,0	45,92	179,0	54,09
2,0	5,72	7,0	10,70	30,0	22,14	80,0	36,16	130,0	46,10	180,0	54,24
2,1	5,86	7,1	10,77	31,0	22,51	81,0	36,39	131,0	46,27	181,0	54,39
2,2	6,00	7,2	10,85	32,0	22,87	82,0	36,61	132,0	46,45	182,0	54,54
2,3	6,13	7,3	10,92	33,0	23,22	83,0	36,83	133,0	46,62	183,0	54,69
2,4	6,26	7,4	11,00	34,0	23,57	84,0	37,05	134,0	46,80	184,0	54,84
2,5	6,39	7,5	11,07	35,0	23,92	85,0	37,27	135,0	46,97	185,0	54,99
2,6	6,52	7,6	11,15	36,0	24,26	86,0	37,49	136,0	47,15	186,0	55,14
2,7	6,64	7,7	11,22	37,0	24,59	87,0	37,71	137,0	47,32	187,0	55,28
2,8	6,76	7,8	11,29	38,0	24,92	88,0	37,93	138,0	47,49	188,0	55,43
2,9	6,88	7,9	11,36	39,0	25,25	89,0	38,14	139,0	47,66	189,0	55,58
3,0	7,00	8,0	11,43	40,0	25,57	90,0	38,35	140,0	47,84	190,0	55,73
3,1	7,12	8,1	11,51	41,0	25,89	91,0	38,57	141,0	48,01	200,0	57,17
3,2	7,23	8,2	11,58	42,0	26,20	92,0	38,78	142,0	48,18	210,0	58,59
3,3	7,34	8,3	11,65	43,0	26,51	93,0	38,99	143,0	48,35	220,0	59,96
3,4	7,45	8,4	11,72	44,0	26,82	94,0	39,20	144,0	48,51	230,0	61,31
3,5	7,56	8,5	11,79	45,0	27,12	95,0	39,40	145,0	48,68	240,0	62,63
3,6	7,67	8,6	11,86	46,0	27,42	96,0	39,61	146,0	48,85	250,0	63,92
3,7	7,78	8,7	11,92	47,0	27,72	97,0	39,82	147,0	49,02	260,0	65,19
3,8	7,88	8,8	11,99	48,0	28,01	98,0	40,02	148,0	49,18	270,0	66,43
3,9	7,98	8,9	12,06	49,0	28,30	99,0	40,23	149,0	49,35	280,0	67,65
4,0	8,09	9,0	12,13	50,0	28,59	100,0	40,43	150,0	49,51	290,0	68,85
4,1	8,19	9,1	12,20	51,0	28,87	101,0	40,63	151,0	49,68	300,0	70,02
4,2	8,29	9,2	12,26	52,0	29,15	102,0	40,83	152,0	49,84	310,0	71,18
4,3	8,38	9,3	12,33	53,0	29,43	103,0	41,03	153,0	50,01	320,0	72,32
4,4	8,48	9,4	12,40	54,0	29,71	104,0	41,23	154,0	50,17	330,0	73,44
4,5	8,58	9,5	12,46	55,0	29,98	105,0	41,43	155,0	50,33	340,0	74,55
4,6	8,67	9,6	12,53	56,0	30,25	106,0	41,62	156,0	50,49	350,0	75,63
4,7	8,76	9,7	12,59	57,0	30,52	107,0	41,82	157,0	50,66	360,0	76,71
4,8	8,86	9,8	12,66	58,0	30,79	108,0	42,01	158,0	50,82	370,0	77,77
4,9	8,95	9,9	12,72	59,0	31,05	109,0	42,21	159,0	50,98	380,0	78,81
5,0	9,04	10,0	12,78	60,0	31,32	110,0	42,40	160,0	51,14	390,0	79,84

Fuente: Ventilación industria (higienists, 1992)



---

Para realizar el cálculo de las pérdidas total de carga en un tramo del ducto que empieza en la campana, debemos seguir los siguientes pasos.

1°- Calculamos la velocidad real, dividiendo el caudal por la sección del ducto y luego se calcula la presión dinámica a partir de la ecuación o la tabla 3-5.

2°- Se calcula la succión en la campana  $PEc$  con las ecuaciones utilizadas en el diseño de campanas de extracción (ALDEN J.L, 1982)

$$PEc = PDc + hec \quad (3-5)$$

$PEc$ : Presión estática de la campana (mmcda)

$hec$ : pérdida de carga en la entrada del ducto, mmcda.  $hec = FPD_2$

$PDc$ : presión dinámica en el ducto, mmcda.

### 3.4 Distribución del caudal

Los sistemas de extracción focalizado no son más, que un conjunto de sistemas simples unidos a un ducto principal. Al diseñar un sistema con varias campanas y ductos secundarios es preciso prever la distribución correcta del caudal total entre los ductos secundarios.

Para lograr este objetivo se dispone de dos métodos:

- Equilibrado por diseño
- Equilibrado por compuertas

#### 3.4.1 Método equilibrado por diseño

El método equilibrado tiene un sistema diseñado para conseguir una distribución adecuada de los caudales sin el uso de compuertas de regulación para lograr una presión estática. En este sentido, el diseño permite avanzar los jugos a través de un ducto principal y otro secundario en cada sección hasta alcanzar el equipo de vacío. Posteriormente, cada unión logra la presión estática necesaria para alcanzar el caudal con una presión de aire en el interior y de esta forma cursar por el ducto de diámetro que más se adecue en atención al

radio de los codos. El cuadrado del caudal se calcula con la ecuación 3-6 (higyenists, 1992).

$$Q_{\text{corregido}} = Q_{\text{diseño}} \sqrt{\frac{\text{PE en la union}}{\text{PE calculada en el tramo}}} \quad (3-6)$$

Cuando las relaciones entre las presiones estáticas oscilan entre 0,95 y 1, la corrección de caudal es menor de 2.5%.

### 3.4.2 Método equilibrado por compuertas

Este método se basa en la instalación de compuertas para regular el funcionamiento del caudal dentro de la campana, en donde en cada punto de unión se suman los caudales de las corrientes afluentes.

## 3.5 Evaluación de la presión ventilador

La evaluación de la presión del ventilador es importante para lograr una presión estática del mismo y es preciso adicionar cálculos para determinar dicha presión comodato de selección de este sistema.

### 3.5.1 Presión total del ventilador

La presión total del ventilador se calcula con la ecuación: (higyenists, 1992)

$$PTV = PT_{\text{salida}} - PT_{\text{entrada}} \quad (3-7)$$

La presión total del ventilador se calcula con la ecuación:

$$PTV = (PE_{\text{salida}} + PD_{\text{entrada}}) - (PE_{\text{entrada}} + PD_{\text{entrada}}) \quad (3-8)$$

### 3.5.2 Presión estática del ventilador

La presión estática de un ventilador se define con la ecuación: (higyenists, 1992)

$$PEV = PTV - PD_{\text{salida}} \quad (3-9)$$

O también se puede describir así  $PEV = PT_{salida} - PT_{entrada} - PD_{salida}$ , puesto que:

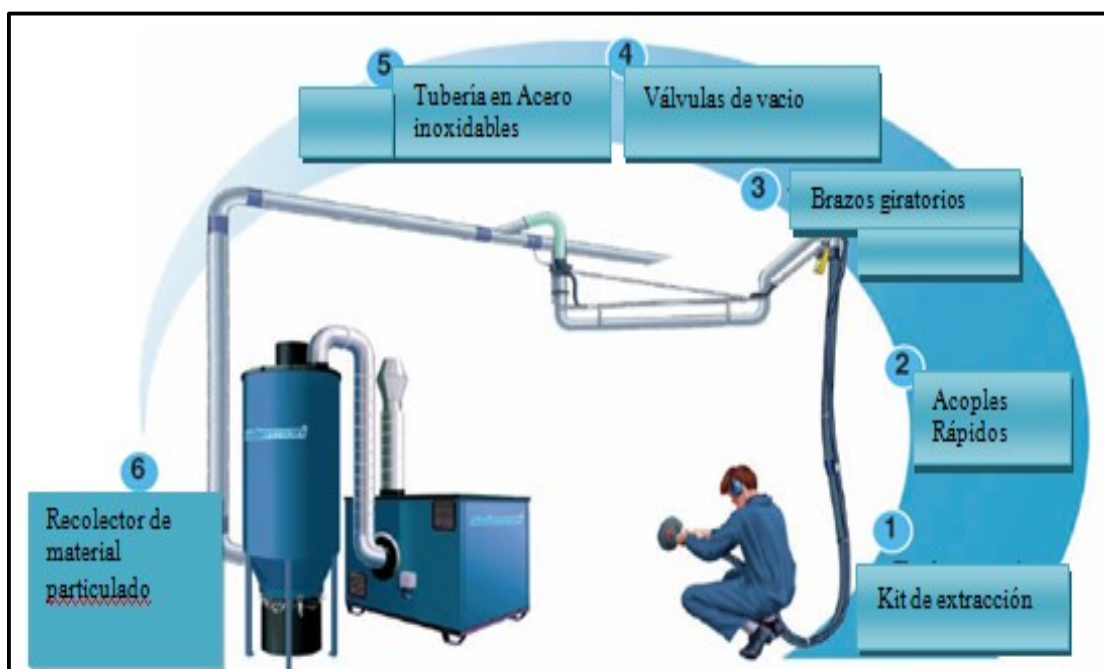
$PT = PE + PD$ , la ecuación se describiría así:

$PEV = (PE_{salida} + PD_{salida}) - (PE_{entrada} + PD_{entrada}) - PD_{salida}$  donde llegamos a la expresión:

$$PEV = PE_{salida} - PE_{entrada} - PD_{entrada} \quad (3-10)$$

La figura 3-17 muestra una ilustración de un sistema de extracción focalizado después de haber seguido todas las etapas anteriormente mencionadas en el diseño del sistema

**Figura 3.17** Ilustración Moderna de un Sistema de Extracción Focalizado



**Fuente:** HANDBOK FOR PLANERING OCH DIMENCIONARING AV PUNKTUTSUGNING  
presión de vacío, pagina 99 Dustcontrol AB 1986



## 4. Campanas de extracción

Las campanas de extracción se caracterizan por dirigir un tipo de flujo de aire en cuál es capturado por un sistema de campanas como su nombre lo indica para atrapar el material contaminante dirigiéndolo hacia el interior de la misma, siendo uno de los sistemas básicos de mayor eficiencia por la capacidad de captura de contaminante desde el foco de emisión a velocidades constantes y resulta de importancia en el aspirado mediante el uso de ventilador o de una bomba de vacío.

### 4.1 Pasos para el diseño de campanas

Los pasos para el diseño de una campana son:

- 1°- Determinar el caudal volumétrico o de aspiración.
- 2°- Definir la ubicación respecto al proceso
- 3°- Diseñar su forma y tamaño

#### 4.1.1: Calculo del caudal de aspiración

Para calcular el caudal de aire a aspirar por la campana se utiliza la ecuación 4-11

$$Q = v \cdot A \left( m^3/s \right) \quad (4-11)$$

Dónde:

v (m / s): velocidad del aire

A (m<sup>2</sup>): área de la sección de pasaje del aire a la velocidad v

### 4.1.1 Velocidad de contorno

La velocidad de contorno como se muestra en la Figura 4-18, donde el caudal a aspirar se obtiene aplicando la ecuación (higyenists, 1992)

$$Q = V_1 \times A_{c1}(m^3/s) \quad (4-12)$$

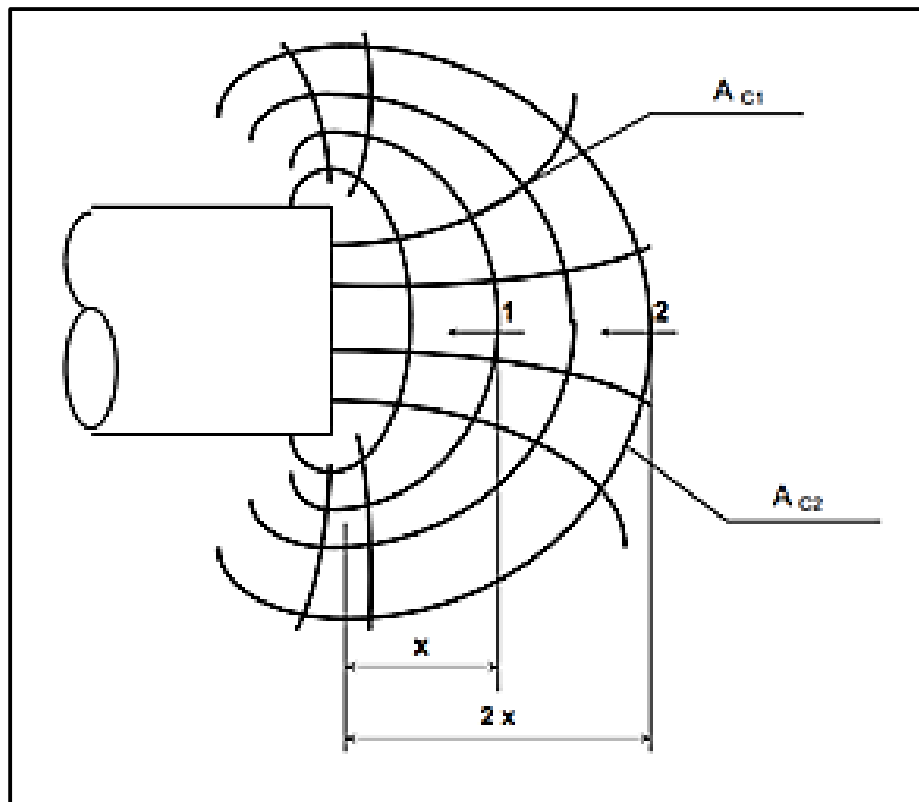
Donde:

$Q (m^3/s)$ : Caudal a aspirar

$V(m/s)$ : Velocidad de contorno

$A(m^2)$

**Figura 4.18** Contornos de velocidad



**Fuente:** Ventilación industrial (higyenists, 1992)

$$Q = V_1 \times A_{c1} = V_2 \times A_{c2} \left( m^3/s \right) \quad (4-13)$$

Donde:

$Q (m^3/s)$ : Caudal a aspirar

$V_1 (m/s)$ : velocidad a la distancia X

$V_2 (m/s)$ : velocidad a la distancia 2X

$A_{c2} (m^2)$ : área del contorno de la campana

A cierta distancia de la boca de la campana hacia la derecha, se puede suponer que los contornos tienden a esferas; luego el área de cada contorno es:

$A_c = \pi \cdot X^2 (m^2)$  remplazamos en la ecuación 4-13

$Q = V_1 \cdot \pi \cdot X_1^2 = V_2 \cdot \pi \cdot X_2^2 (m^3/s)$  resultando la ecuación 4-14

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{X_2^2}{X_1^2} \quad (4-14)$$

Cuando se dificulta la aplicación de la ecuación 4-12, se asume ecuaciones de cálculo para campanas laterales de boca circular, cuadrada o rectangular con una relación ancho a largo (W / L) igual o mayor que 2, ver figura 4-19, donde el caudal de aspiración viene dado por la ecuación:

$$Q = (10X^2 + A) (m^3 / s) \quad (4-15)$$

Donde:

$Q (m^3 / s)$ : Caudal de aire a aspirar por la campana,

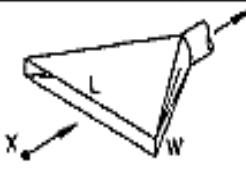
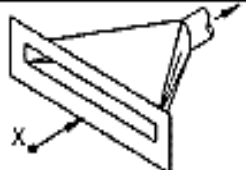
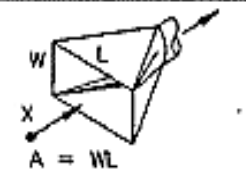

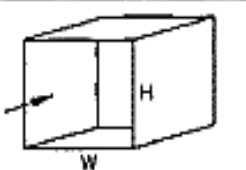
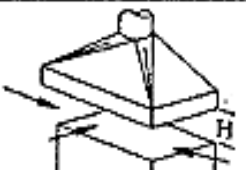
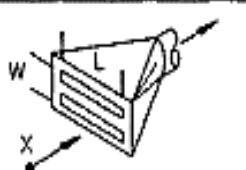
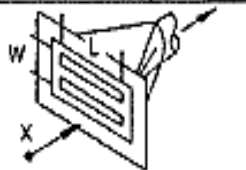
$V (m/s)$ : Velocidad de control en el eje de la campana a una distancia x de la boca.

$X (m)$ : Distancia a la boca de la campana.

$A (m^2)$ : Área del frente o boca de la campana.

De la ecuación 4-15, se deduce que el caudal varía con el cuadrado de la distancia a la campana.

Figura 4.19 Tipos de campanas exteriores

TIPO DE CAMPANA	DESCRIPCIÓN	FACTOR DE FORMA W/L	CAUDAL
	RENDIA	0,2 ó MENOS	$Q = 3,7 LVX$
	RENDIA CON PESTAÑA	0,2 ó MENOS	$Q = 2,6 LVX$
	CAMPANA SIMPLE	0,20 ó SUPERIOR Y CIRCULAR	$Q = V(10X^2 + A)$
	CAMPANA SIMPLE CON PESTAÑA	0,2 ó SUPERIOR Y CIRCULAR	$Q = 0,75V(10X^2 + A)$
	CABINA	ADAPTADA A LA OPERACIÓN	$Q = VA = VWH$
	CAMPANA ELEVADA	ADAPTADA A LA OPERACIÓN	$Q = 1,4 PVH$ VER VS-903 P = PERÍMETRO H = ALTURA SOBRE LA OPERACIÓN
	RENDIA MÚLTIPLE. 2 Ó MÁS RENDIJAS	0,2 ó SUPERIOR	$Q = V(10X^2 + A)$
	RENDIA MÚLTIPLE CON PESTAÑA. 2 Ó MÁS RENDIJAS	0,2 ó SUPERIOR	$Q = 0,75V(10X^2 + A)$

Fuente: NEDERMAN SVERIGE Diseño de Campanas de Extracción, pagina 34, 2002



### 4.1.2 Velocidad de Captura

Se define como velocidad de control a mínima velocidad del aire para capturar y dirigir el contaminante hacia ella en función del caudal de aspirado como lo muestra la figura 4-18

A una distancia  $X_1$ , con velocidad de control  $V_c$ , un caudal  $Q_1$ , a aspirar por la campana, según la ecuación 4-16 (ALDEN J.L, 1982).

$$Q_1 = V_c \cdot A_{c1} = V_c \cdot K_1 \cdot X_1^2 (m^3 / s) \quad (4-16)$$

Donde:

$K_1$ : Coeficiente de proporcionalidad y que es función de la forma del contorno de velocidad.

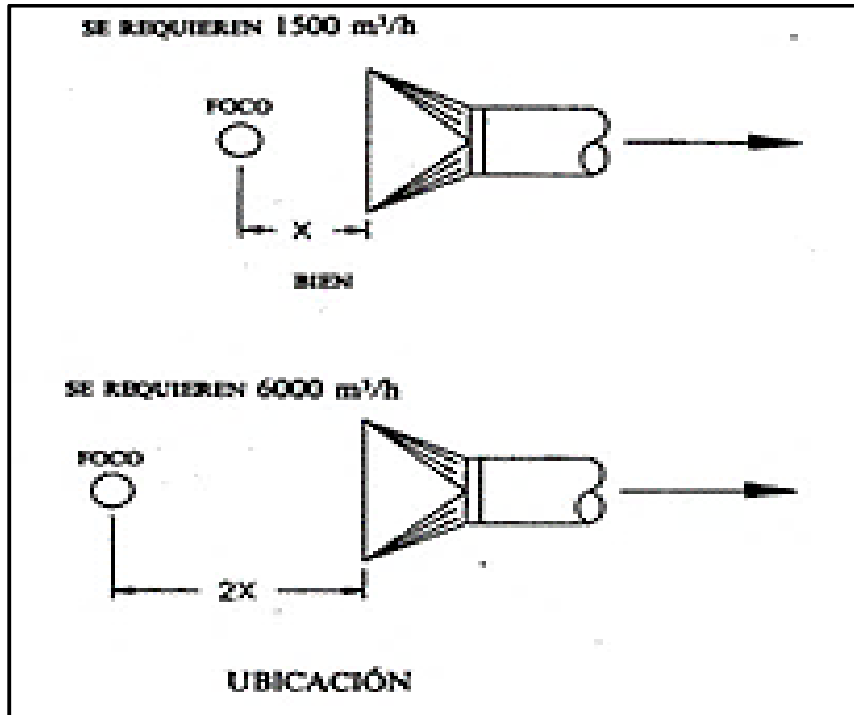
Ahora bien, a una distancia  $X_2$ , figura 4-20, que es el doble de la distancia anterior  $x_1$  y se requiere inducir la misma velocidad de control  $V_c$  y un nuevo caudal  $Q_2$ , según la ecuación 4-17, es:

$$Q_2 = V_{c2} \times A_{c2} = V_{c2} \times K_2 \times X_2^2 (m^3/s) \quad (4-17)$$

donde el coeficiente  $k_2$  es el mismo que en el caso anterior.

Por tanto, dividiendo la ecuación 4-20/ 4-19 nos quedara la ecuación 4-18

$$\frac{Q_2}{Q_1} = \frac{X_2}{X_1} = \frac{(2X_1)^2}{X_1^2} = 4 \quad (4-18)$$

**Figura 4.20** Velocidad de captura

**Fuente:** Ventilación industrial (higyenists, 1992)

En la tabla 4-4, se muestran los diferentes condiciones o márgenes a tener en cuenta para las velocidades de control o captura

En cada una de las condiciones mostradas en la tabla 4-4, se indica un margen para los valores de velocidad de captura.

Otra forma de calcular el caudal Q volumétrico, se hace en función de l/s

- **Cantidad de aire (V):**

La cantidad de aire, puede considerarse como un fluido incompresible y así la cantidad de aire existente en un local coincide con el volumen del mismo. Su expresión se hace en metros cúbicos, m<sup>3</sup>.

- **Caudal de Aire (Q):**

El caudal de aire, es aire en movimiento y por tanto hay que relacionar la cantidad con el tiempo en qué circula. Se expresa en metros cúbicos por hora  $m^3/h$  y, a veces, en litros por segundo  $l/s$ . La fórmula de relación entre ambos es:

$$1 \left( \frac{m^3}{h} \right) = 3.6 \left( \frac{l}{s} \right) \quad (4-19)$$

**Tabla 4.4:** Valores de velocidades de captura o control, recomendado

Condiciones de dispersión del Contaminante	Ejemplos	Velocidad de control (m/s)
I - Liberado casi sin velocidad en aire tranquilo.	Evaporación desde depósitos; desengrase, etc.	0,25 - 0,5
II - Liberado a baja velocidad en aire moderadamente tranquilo.	Cabinas de pintura; llenado intermitente de recipientes; transferencias entre cintas transportadoras a baja velocidad; soldadura; recubrimientos superficiales; pasivado.	0,5 - 1,0
III - Generación activa en una zona de rápido movimiento.	Cabinas de pintura poco profundas; llenado de barriles; carga de cintas transportadoras.	1,0 - 2,5
IV - Liberado con alta velocidad inicial en una zona de movimiento muy rápido del aire.	Desmolde en fundiciones, chorros de aire abrasivos.	2,5 - 10

**Fuente:** American conference of governmental industrial higienists (ALDEN J.L, 1982), ventilación industria (higienists, 1992)

- **Velocidad del aire V:**

Es la velocidad del aire con que circula un determinado caudal Q, que atraviesa una sección S, de ducto u otro espacio, viene determinada por la fórmula 4-20: (ALDEN J.L, 1982)

$$V = \frac{Q(m^3/h)}{3600m^2} (m/s) \quad (4-20)$$

Esta velocidad determina una presión del aire en dirección a la circulación del mismo que se llama Presión Dinámica (Pd) cuya expresión es

- **Presión dinámica Pd:**

Se determina por la relación ente Pd y V dada por:

$$Pd = \sqrt{\frac{V}{4,003}} = \frac{V^2}{16,009} \quad (4-21)$$

Donde

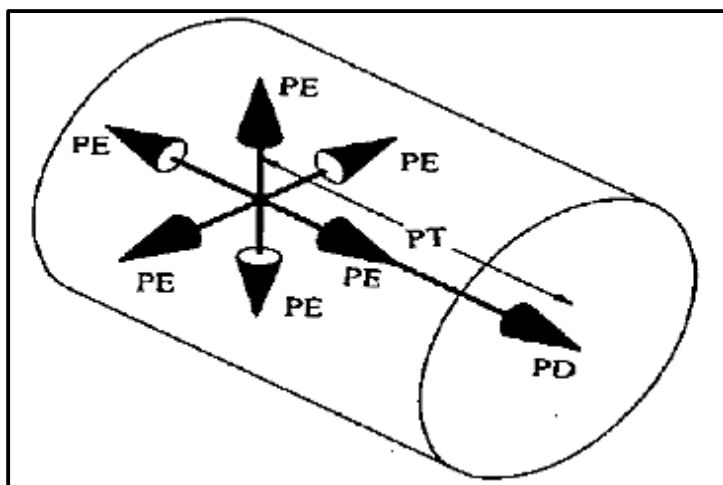
V: velocidad, m/s

Pd: presión dinámica, mm.c.d.a

- **Presión estática (PE):**

La presión estática se expresa en milímetros de columna de agua (mm.c.d.a) como se presenta en la figura 4-21. En este sentido, la presión que se ejerce en todas las direcciones del ducto en condiciones de apertura o sellado del cilindro. El sistema de medición estática o dinámica de la PE se efectúa mediante un manómetro de columna de H<sub>2</sub>O, la cual puede ser mayor o menor que la atmosférica.

**Figura 4.21** Diferencias entre presión dinámica, presión estática y presión total en un ducto



**Fuente:** ALDEN J.L, KANE J.M. Design of Industrial Ventilation Systems. *Industrial Press Inc. New York; 1982* (ALDEN J.L, 1982)

- **La Presión total (PT)**

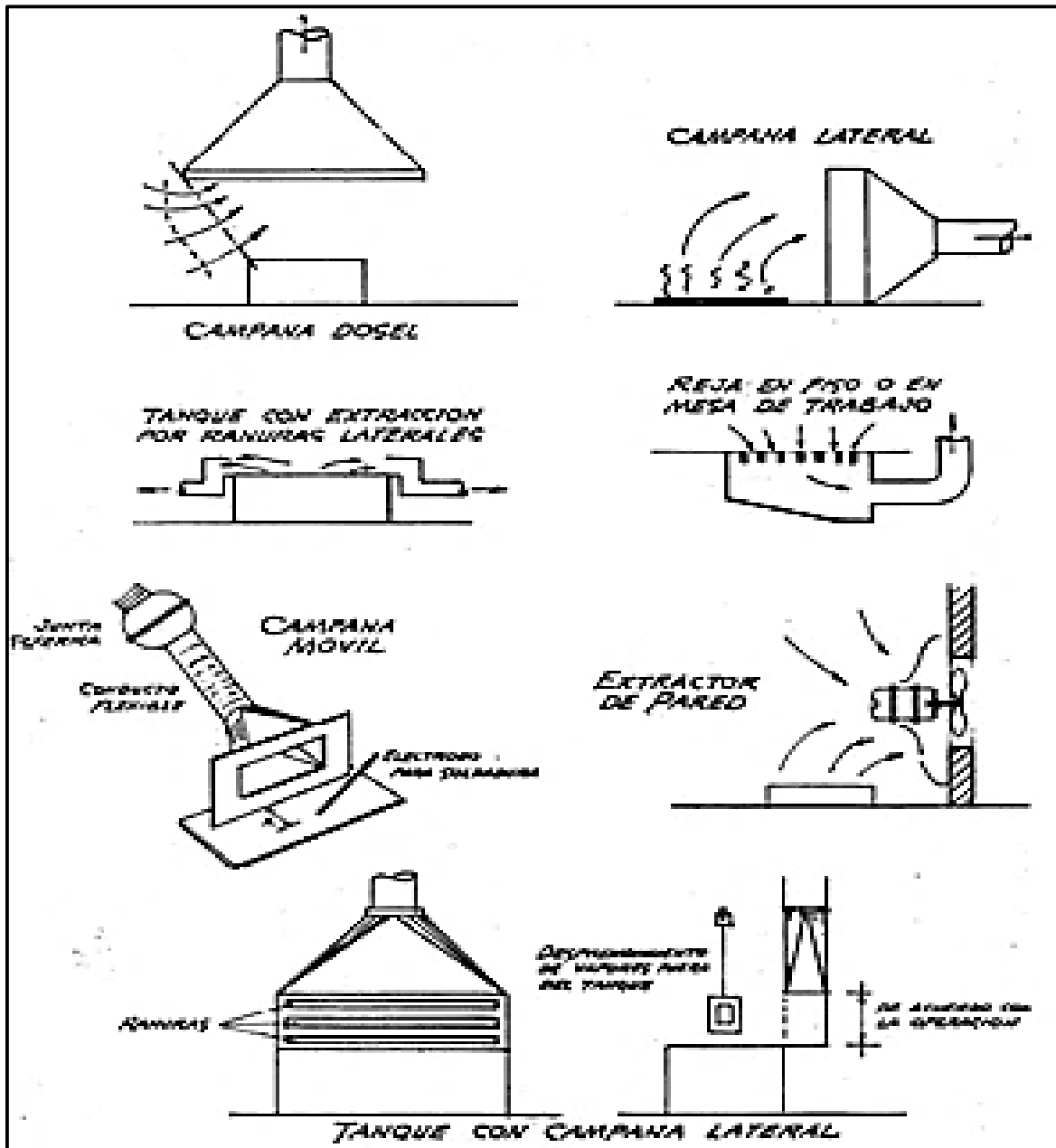
Esta presión ( $P_d$ ) sumada a la Presión Estática ( $P_e$ ) que el aire produce en todas direcciones dentro del ducto o recinto, dan la Presión Total ( $P_t$ ), lo que constituye la Ecuación de Bernoulli, ecuación 4-15; fundamental en el estudio de los fluidos (aire) en movimiento:

$$P_T = P_e + P_d \quad (4-22)$$

Para poder calcular el caudal que debe ser aspirado, las campanas se construyen en una amplia variedad de configuraciones, y es posible clasificarlas en cuatro grupos figura 4-22. (higyenists, 1992)

- Campanas exteriores
- Cabinas
- Campanas de procesos confinados.
- Campanas receptoras.

**Figura 4.22:** Tipo de campanas



Fuente: American conference of governmental industrial higienists, ventilación industria

## 4.2 Cálculo de pérdidas en la entrada de las campanas:

En los sistemas de extracción focalizado, cada uno de los elementos utilizados van a producir unas pérdidas, que son importantes en su diseño, las cuales se calculan por cada accesorio utilizado.

Esta velocidad corresponde a una presión dinámica en mm.c.d.a, suponiendo aire en condiciones standard así: (higyenists, 1992)

$$PD = \left( \frac{V}{4,043} \right)^2 \quad (4-23)$$

Por tanto, las pérdidas producidas en la entrada de la campana  $hc_c$ , se expresan mediante un factor de perdidas  $F_c$ , multiplicado por la presión dinámica en el ducto figura 4-23, así:

$$hc_c = F_c \cdot PD \quad (4-24)$$

Donde:

$hc_c$ : coeficiente de entrada de la campana

$F_c$ : Factor de pérdidas tabla 4-5

$PD$ : Presión dinámica

Por lo que el principio de conservación de la energía se expresa así

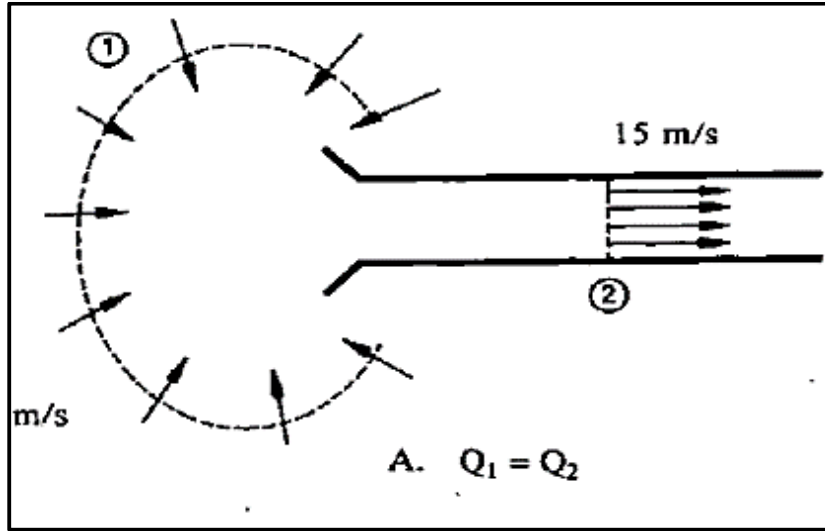
$$PE_2 = -(PD_2 + hc_c) \quad (4-25)$$

El valor absoluto de  $PE_2$ , se denomina succión estática de la campana  $PE_c$  por tanto:

$$PE_c = -PE_2 = PD_2 + hc_c \quad (4-26)$$

Otro método para calcular las pérdidas en la entrada a de la campana, es a partir del coeficiente  $C_c$ , así: (higyenists, 1992)

$$C_c = \sqrt{\frac{PD}{PE_c}} \quad (4-27)$$

**Figura 4.23:** Diagrama de flujo de velocidades y caudales en las campanas

**Fuente:** American conference of governmental industrial higienists, ventilación (higienists, 1992)

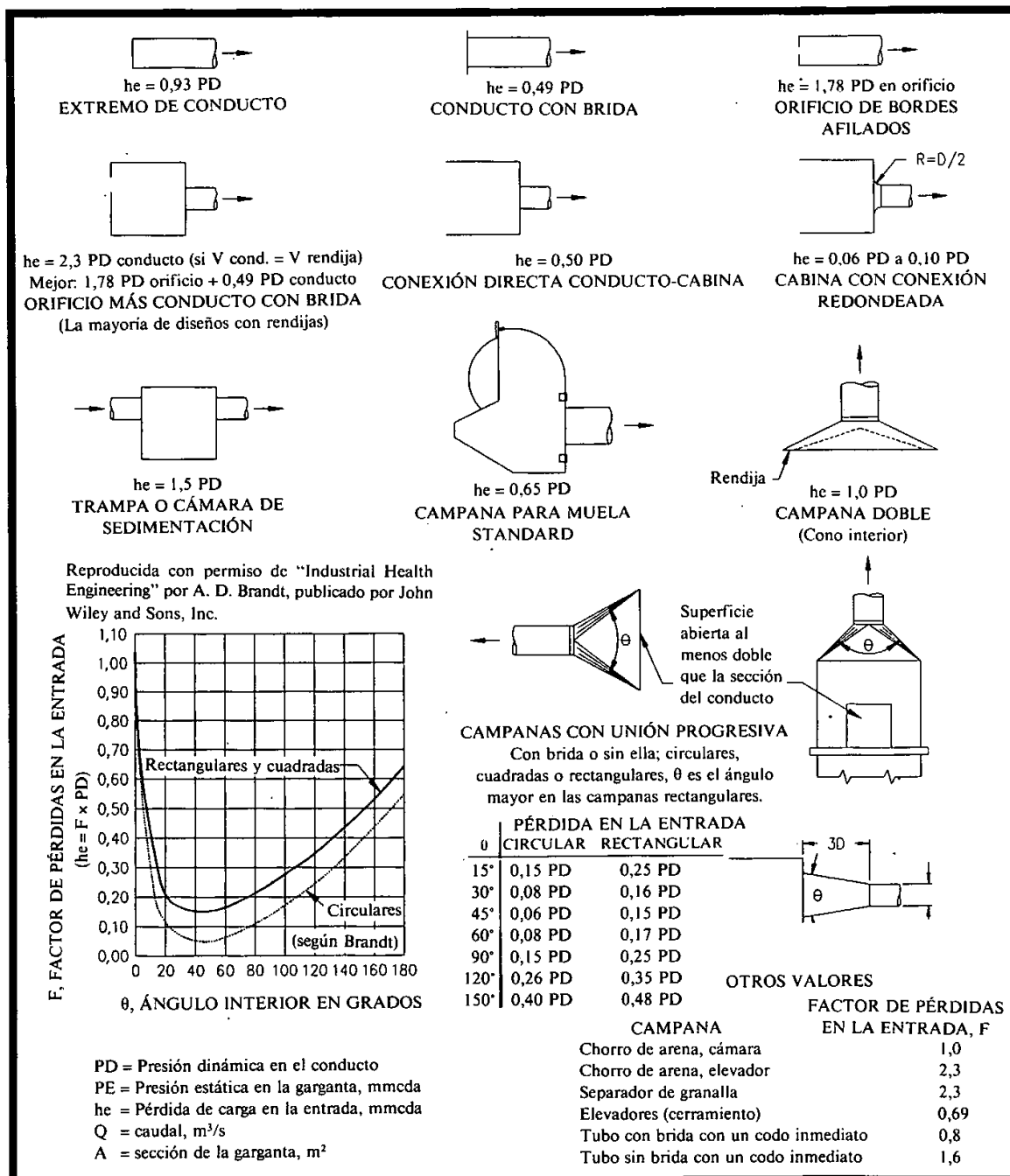
Ya que la campana siempre va a producir pérdidas,  $C_c$ , es siempre inferior a la unidad, Si no se produjeran pérdidas  $PE_c = PD$  y  $C_c = 1$

Puede usarse la siguiente ecuación para determinar el caudal, si se conoce la presión estática:

$$Q = AV = 4,43 \cdot A \sqrt{\frac{PD}{d}} = 4,43 \cdot AC_c \sqrt{\frac{PE_c}{d}} \quad (4-28)$$



**Tabla 4.5:** Factores de pérdidas de carga en las entradas



**Fuente:** American conference of governmental industrial higienists, ventilación

## 5. Ductos

Los ductos son dispositivos por el cual en su interior circula la mezcla de aire y polvo, los ductos o tuberías utilizadas en sistemas de extracción son de sección transversal circular, rectangular y a veces en forma de espiral.

Se fabrican generalmente en lámina galvanizada, lámina de hierro negro o en cold rolled; las uniones longitudinales para láminas de hierro son soldadas; las galvanizadas pueden ser costuras soldadas o remachadas, traslapadas en dirección del flujo, o rebordeadas las cuales son más recomendables, ubicadas en lugares específicos de tal manera que permitan un fácil desmontaje para el mantenimiento, limpieza, reemplazo de tramos desgastados, soldaduras, etc.

### 5.1 Parámetro de diseño ductos.

Todos los sistemas de extracción focalizado se caracterizan por el uso de un conjunto de ductos y accesorios unidos a un ducto principal como se muestra en la figura 5-24. Además, una velocidad de aire adecuada al interior del ducto va a permitir que el polvo sea transportado de manera eficiente de un punto a otro a una velocidad de 18 a 20 metros por segundo, ya que a velocidades menores el material se segregaría a lo largo del sistema de tubería y a una velocidad muy alta la abrasión sucedería al interior de las paredes del conducto, ocasionando además, cambios en la dirección del flujo en la sección. Por tanto, al diseñar un sistema de extracción focalizado se deben tener en cuenta los siguientes pasos para la mejor selección del ducto:

1°- Se debe calcular el caudal de diseño. Ecuación 4.16

$$Q = V \cdot A$$

2°- Se establece la velocidad mínima en los ductos teniendo en cuenta las velocidades de transporte.

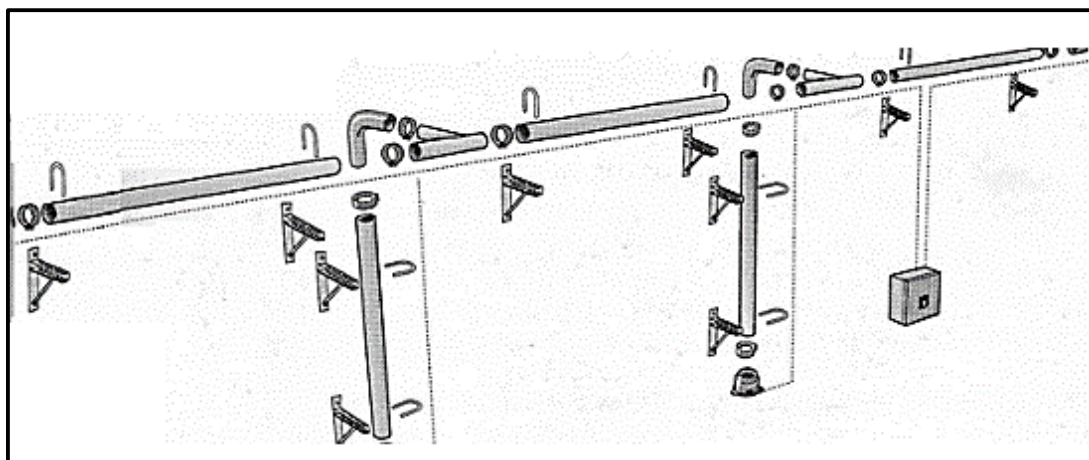
3°- Se calcula la sección del ducto (Ver ecuación 4-8 y tabla 5-6).

$$Q = V \cdot A \text{ donde } A = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \text{ Donde}$$

$$D = \sqrt{\frac{4A}{\pi}} \quad (5-29)$$

4°- Luego se determina, el esquema de trazado de la red como se ve en la figura 5.24.

**Figura 5.24:** Sistema de ductos



**Fuente:** HANDBOK FOR PLANERING OCH DIMENCIONARING  
AVPUNKTUTSUGNING presión de vacío.

**Tabla 5.6** Sección y parámetro de ductos circulares

Diám. cm	Área m <sup>2</sup>	Circ. cm	Diám. cm	Área m <sup>2</sup>	Circ. cm	Diám. cm	Área m <sup>2</sup>	Circ. cm
1	0,000079	3,142	42	0,1385	131,9	122	1,169	383,3
2	0,000314	6,283	44	0,1521	138,2	124	1,208	389,6
3	0,000707	9,425	46	0,1662	144,5	126	1,247	395,8
4	0,001257	12,57	48	0,1810	150,8	128	1,287	402,1
5	0,001963	15,71	50	0,1963	157,1	130	1,327	408,4
6	0,002827	18,85	52	0,2124	163,4	132	1,386	414,7
7	0,003848	21,99	54	0,2290	169,6	134	1,410	421,0
8	0,005027	25,13	56	0,2463	175,9	136	1,453	427,3
9	0,006362	28,27	58	0,2642	182,2	138	1,496	433,5
10	0,007854	31,42	60	0,2827	188,5	140	1,539	439,8
11	0,009503	34,56	62	0,3019	194,8	142	1,584	446,1
12	0,01131	37,70	64	0,3217	201,1	144	1,629	452,4
13	0,01327	40,84	66	0,3421	207,3	146	1,674	458,7
14	0,01539	43,98	68	0,3632	213,6	148	1,720	465,0
15	0,01767	47,12	70	0,3848	219,9	150	1,767	471,2
16	0,02011	50,27	72	0,4071	226,2	152	1,815	477,5
17	0,02270	53,41	74	0,4301	232,5	154	1,863	483,8
18	0,02545	56,55	76	0,4536	238,8	156	1,911	490,1
19	0,02835	59,69	78	0,4778	245,0	158	1,961	496,4
20	0,03142	62,83	80	0,5027	251,3	160	2,011	502,7
21	0,03464	65,97	82	0,5281	257,6	162	2,061	508,9
22	0,03801	69,11	84	0,5542	263,9	164	2,112	515,2
23	0,04155	72,26	86	0,5809	270,2	166	2,164	521,5
24	0,04524	75,40	88	0,6082	276,5	168	2,217	527,8
25	0,04909	78,54	90	0,6362	282,7	170	2,270	534,1
26	0,05309	81,68	92	0,6648	289,0	172	2,324	540,4
27	0,05726	84,82	94	0,6940	295,3	174	2,378	546,6
28	0,06158	87,96	96	0,7238	301,6	176	2,433	552,9
29	0,06605	91,11	98	0,7543	307,9	178	2,488	559,2
30	0,07069	94,25	100	0,7854	314,2	180	2,545	565,5
31	0,07548	97,39	102	0,8171	320,4	182	2,602	571,8
32	0,08042	100,5	104	0,8495	326,7	184	2,659	578,1
33	0,08553	103,7	106	0,8825	333,0	186	2,717	584,3
34	0,09079	106,8	108	0,9161	339,3	188	2,776	590,6
35	0,09621	110,0	110	0,9503	345,6	190	2,835	596,9
36	0,1018	113,1	112	0,9852	351,9	192	2,895	603,2
37	0,1075	116,2	114	1,021	358,1	194	2,956	609,5
38	0,1134	119,4	116	1,057	364,4	196	3,017	615,8
39	0,1195	122,5	118	1,094	370,7	198	3,079	622,0
40	0,1257	125,7	120	1,131	377,0	200	3,142	628,3

Los fabricantes de conductos de chapa metálica suelen establecer un salto de 10 mm para conductos entre 100 y 200 mm de diámetro, de 20 mm entre 200 y 500 mm de diámetro y de 50 mm para diámetros superiores a 500 mm.

**Fuente:** American conference of governmental industrial hygienists, ventilación (hygienists, 1992)

### 5.1.1 Velocidad mínima en los ductos:

Se debe tener en cuenta que la presión dinámica PD, en el ducto empleada para determinar la pérdida de carga en la campana. Las velocidades de diseño mínima recomendadas son superiores a los valores teóricos y experimentales a fin de tener en cuenta casualidades, tales como:

- Fenómenos obstructivos de los ductos.
- El desgaste de los ductos.
- Las fugas en los ductos.
- La corrosión o la erosión en el sistema.

El diseñador debe tener en cuenta valores típicos para velocidades en ductos, como se presenta en la tabla 5-7.

**Tabla 5.7** Valores recomendados para la velocidad de diseño de ductos

<b>Naturaleza del contaminante</b>	<b>Ejemplo</b>	<b>Velocidad de diseño</b>
<b>Vapores, gases, humos de combustión</b>	Todos los vapores, gases y humos	10m/s
<b>Humos de soldadura</b>	Soldadura	10 a 12.5 m/s
<b>Polvo muy fino y ligero</b>	Hilos de algodón, harina de madera, polvo de talco	12.5 a 15 m/s
<b>Polvo seco</b>	Polvo fino de caucho, baquelita, polvo de algodón, virutas (ligeras), polvo de detergente.	15 a 20 m/s
<b>Polvo ordinario</b>	Polvo de muela de pulir (secos), polvo de lana, granos de café, de cuero de granito, arena de sílice de caliza	20 a 30m/s
<b>Polvo pesado seco</b>	Polvo de aserrado, de fundiciones, de arena, de virutas, de fundición	30 a 40 m/s
<b>Polvo pesado húmedo</b>	Polvo de plomo y pequeños pedazos, cemento húmedo, polvo del corte de tubos	40 m/s

**Fuente:** American conference of governmental industrial higienists, ventilación (higienists, 1992).

Otros tipos de pérdidas que se pueden dar son:

- Pérdidas de carga en ductos
- Pérdida de carga en tramos rectos: la cual se calcula con:

$$Re = \frac{dVD}{\mu} \quad (5-30)$$

Donde:

$d(K_g / m^3)$ : densidad

$V(m/s)$ : Velocidad

$D(m)$ : Diámetro

$\mu(K_g / m \cdot s)$ : Viscosidad

- Pérdida de carga global en el tramo: Se calcula con:

$$h = f \frac{L}{D} P_d \quad (5-31)$$

Donde

$h$  (mmcda): pérdida de carga en el ducto

$f$ : factor de fricción del diagrama de Moody (adimensional), depende del número de Reynolds  $dVD/\mu$ , y de la rugosidad relativa del ducto  $\varepsilon/D$  (adimensional).

$L(m)$ : longitud del tramo

$D(m)$ : diámetro del ducto.

$P_D$ (mmcda): presión dinámica

### 5.1.2 Pérdida de carga en puntos singulares:

Antes de calcular las pérdidas de carga en los puntos singulares figura 5-28, debemos hallar, los cálculos de los caudales y las presiones en cada rama o unión, y lo hacemos de la siguiente forma

1°.- Se han de fijar los caudales en las ramas A y B en función de la velocidad de captura, la geometría y distancia al foco del elemento de captación.

2°.- Se han de dimensionar ambas ramas para que la presión estática en el punto 1 sea igual a la del punto 2.

3°.- Conocidos los caudales y las áreas en los puntos 1 y 2 se calcula un término auxiliar denominado  $PD_r$ . (higyenists, 1992)

Donde:

$$PD_r = \left[ \frac{Q_1 + Q_2}{4,043 (A_1 + A_2)} \right]^2 \quad (5-32)$$

4°.- Se calcula la presión dinámica en el punto 3, sabiendo que  $Q_3 = Q_1 + Q_2$  y que la sección en la tubería c,  $A = \pi \times r^2$  donde r3 es el radio de la tubería C.

$$PD_3 = \frac{(Q_3/A_3)^2}{2 \times g} \times 1,2 \quad (5-33)$$

5°.- Realizamos la siguiente comprobación y rectificación,

Si  $PD_3 < PD_r$  entonces  $PE_3 = PE_1 = PE_2$

Si  $PD_3 > PD_r$ , entonces  $PE_3 = PE_1 - (PD_3 - PD_r)$

Así hemos obtenido:

- La presión estática en el punto 3
- La presión dinámica en el punto 3
- El caudal en la rama C

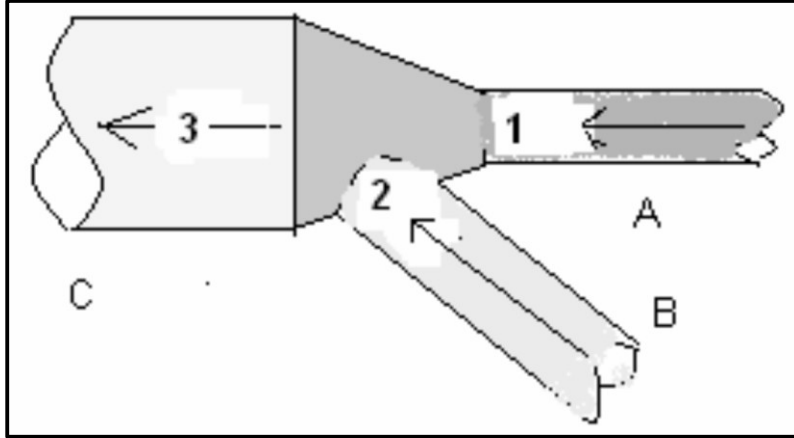
Los puntos singulares se aprecian en la figura 5-25 y tabla 5-9.

### 5.1.2.2.1: Método de la presión dinámica

En este método, se da un coeficiente de pérdida  $F$  multiplicado por la PD en el ducto. Así: (higyenists, 1992)

$$h_\rho = F \cdot PD \quad (5-34)$$

**Figura 5.25** Diagrama de puntos singulares



**Fuente:** Generalitat Valenciana. 1992.- Higiene Industrial. INSHT. 2ª Edición (higyenists, 1992)

El coeficiente de pérdidas se indica en las tablas 5-8 y 5-9.

A continuación se presenta el cálculo de la pérdida de carga total:

1º- Calcular la velocidad real (ecuación 4-16).

2º- Calcular la presión dinámica correspondiente a partir de la fórmula 5-35.

3º- Calcular la succión en la campana con la ecuación.

$$PE_c = PD_c + he_c \quad (5-35)$$

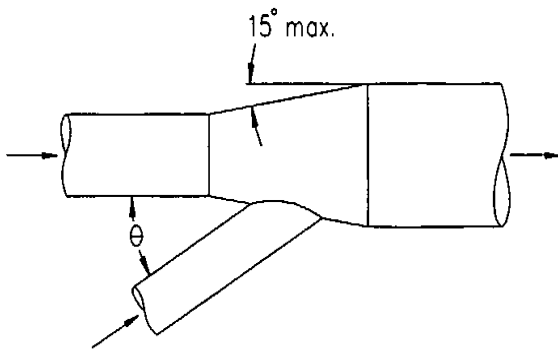
4º- Factor de pérdida  $hec$  (ecuación 5-34) y tabla 5-12.

$$he_c = F \cdot PD \cdot l \text{ ecuación (5-34)}$$

5º- Determinar accesorios en el tramo.

6º- Sumar los resultados de las etapas 3 y 4, y multiplicarlo por la presión dinámica en el conducto. El resultado es la pérdida de carga del tramo en mmca.



**Tabla 5.8:** Perdida de carga en uniones


15° max.

$\theta$

Nota: La pérdida de carga se produce en el conducto lateral y se debe contabilizar en el mismo.

No incluir el cálculo de la recuperación de presión en los conductos laterales con uniones progresivas.

Ángulo $\theta$ grados	Pérdida de carga en el conducto lateral Fracción de PD
10	0,06
15	0,09
20	0,12
25	0,15
30	0,18
35	0,21
40	0,25
45	0,28
50	0,32
60	0,44
90	1,00

PÉRDIDAS DE CARGA EN LAS UNIONES

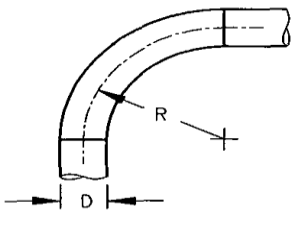
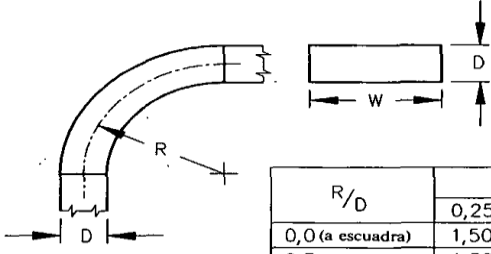
**Fuente:** American conference of governmental industrial higienists, ventilación

7°- Sumar el resultado de la etapa 5 a la succión de la campana (PEc): Dará el requerimiento total de energía en términos de presión estática.

### 5.1.3 Método de la longitud equivalente

Los valores están indicados en la tabla 5-10.

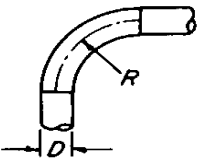
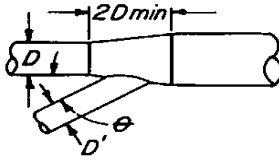
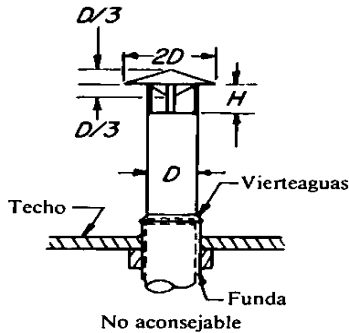
**Tabla 5.9** Pérdidas de carga en codos

	$R/D$	Pérdida de carga Fracción de PD					
	2,75	0,26					
	2,50	0,22					
	2,25	0,26					
	2,00	0,27					
	1,75	0,32					
	1,50	0,39					
	1,25	0,55					
CODOS DE SECCIÓN CIRCULAR							
	$R/D$	Relación de tamaños W/D					
		0,25	0,5	1,0	2,0	3,0	4,0
	0,0 (a escuadra)	1,50	1,32	1,15	1,04	0,92	0,86
	0,5	1,36	1,21	1,05	0,95	0,84	0,79
	1,0	0,45	0,28	0,21	0,21	0,20	0,19
	1,5	0,28	0,18	0,13	0,13	0,12	0,12
	2,0	0,24	0,15	0,11	0,11	0,10	0,10
	3,0	0,24	0,15	0,11	0,11	0,10	0,10
CODOS DE SECCIÓN CUADRADA Y RECTANGULAR							
PÉRDIDAS DE CARGA EN CODOS							

**Fuente:** American conference of governmental industrial higienists, ventilación

En la tabla 5-12, se relacionan las equivalencias en pérdidas de un tramo recto según su diámetro.

**Tabla 5.10** Longitud equivalente de accesorios en metros

LONGITUDES EQUIVALENTES DE ACCESORIOS EN METROS									
									
Diámetro en mm	Codo de 90° Radio de curvatura R			Ángulo de la unión		H. expresada en diámetros			
	1,5D	2,0D	2,5D	30°	45°	1,0 D	0,75 D	0,5 D	
75	1,4	0,9	0,7	0,5	0,9	0,3	0,5	2,0	
100	2,0	1,3	1,1	0,8	1,3	0,5	0,8	3,4	
125	2,6	1,7	1,4	1,1	1,7	0,6	1,1	4,4	
150	3,2	2,2	1,8	1,4	2,2	0,8	1,4	5,5	
175	3,9	2,6	2,2	1,7	2,6	0,9	1,7	6,6	
200	4,6	3,1	2,5	2,0	3,1	1,1	2,0	7,8	
250	6,0	4,0	3,3	2,6	4,0	1,4	2,6	10	
300	7,4	5,0	4,1	3,2	5,0	1,8	3,2	13	
350	8,9	6,0	5,0	3,8	6,0	2,1	3,8	15	
400	10	7,0	5,8	4,5	7,0	2,5	4,5	18	
450	12	8,1	6,7	5,2	8,1	2,8	5,2	21	
500	14	9,2	7,6	5,9	9,2	3,2	5,9	23	
600	17	11	9,5	7,3	11	4,0	7,3	29	
700	21	14	11	8,8	14	4,8	8,8	35	
800	24	16	13	10	16	5,7	10	41	
900	28	19	15						
1000	32	21	18						
1200	39	26	22						
1400	47	32	26						
1600	55	37	31						
1800	64	43	36						
2000	72	49	40						

**AMERICAN CONFERENCE OF  
GOVERNMENTAL INDUSTRIAL HYGIENISTS**

*DATOS PARA DISEÑO DE CONDUCTOS*

\* Para codos de 60° — x 0,67  
 Para codos de 45° — x 0,5

**Fuente:** American conference of governmental industrial higienists, ventilación

## 6 Equipo con medio filtrante

Los equipos con medio filtrante se dividen en dos grupos:

- Filtros de aire.
- Captadores de polvo

### 6.1 Selección del equipo captador de polvo:

Los equipos extractores de polvo se pueden clasificar en las siguientes formas, de acuerdo con el principio físico en que se basan.

- Cámaras de sedimentación
- Ciclones

#### 6.1.1 Cámaras de sedimentación.

Las cámaras de sedimentación, son los aparatos más sencillos entre los empleados para el proceso de separación de las partículas sólidas suspendidas en el aire, son de larga duración, fácil de construir y de manejar, se emplean principalmente para extraer polvo relativamente grueso o para efectuar una extracción previa que deba completarse posteriormente con otras separaciones de polvos

#### 6.1.2 Ciclones

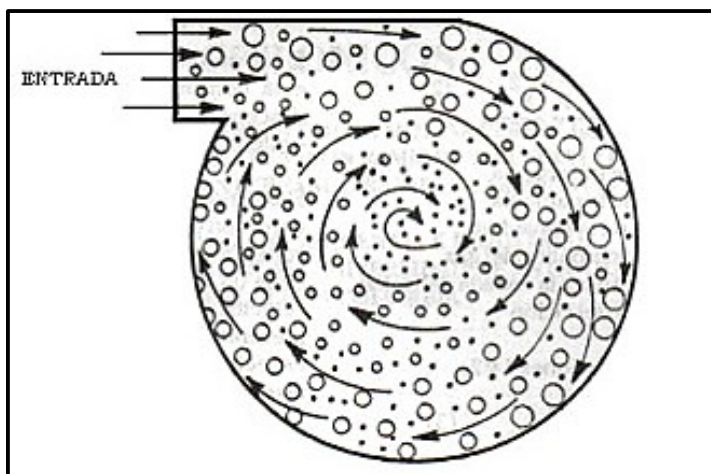
Los equipos de recolección de polvo dirigen las partículas mayores hacia las paredes del ciclón debido a la fuerza centrífuga, como se muestra en la figura 6-26.

##### 6.1.2.1 Principio de funcionamiento

Todas las partículas suspendidas en el aire que entran en el ciclón siguen este movimiento giratorio y a consecuencia del mismo, son transferidas gradualmente hacia las paredes externas y después caen al fondo del cono en parte por la gravedad y en parte porque son arrastradas por la corriente. La separación del polvo del aire es mejor cuando el diámetro

del ciclón es pequeño, la velocidad de entrada es alta y las circunvoluciones del torbellino o vórtice son relativamente altas (Ver figura 6-27).

**Figura 6.26:** Trayectoria de las partículas dentro del ciclón



**Fuente:** CASAL, J. y MARTÍNEZ-BENET, J. 1989. Cálculo y diseño de ciclones. En: Ingeniería Química. Madrid (CASAL, 1989) (CASAL, 1989)

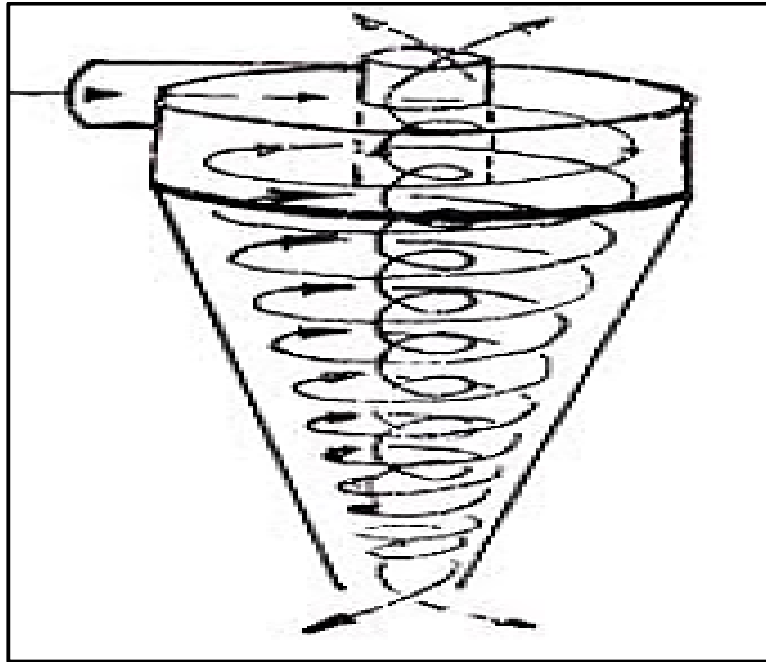
La fuerza centrífuga de separación es proporcional al radio de rotación. La resistencia de separación es función de la distancia radial que la partícula de polvo debe atravesar para alcanzar la pared del ciclón, a su velocidad de asentamiento gravitacional en el aire quieto y al tiempo que actúan las fuerzas centrífugas sobre la partícula. El tiempo de exposición a estas fuerzas depende de la velocidad de rotación y del número de circunvoluciones que recorre el polvo entre su entrada y su salida figura 6.26

### 6.1.2.2 Tipo de ciclones

Los principales tipos de ciclones son:

- ciclones de alta eficiencia
- ciclones convencionales
- ciclones de alta capacidad

La tabla 6-11, esquematiza el intervalo de eficacia de separación para las disímiles cunas de ciclones.

**Figura 6.27:** Trayectoria de las partículas

**Fuente:** BATURIN V. V. Fundamentos de ventilación industrial. *Editorial Labor. Barcelona, Pagina 15; 1976.*

**Tabla 6.11: Valores de eficiencia de remoción**

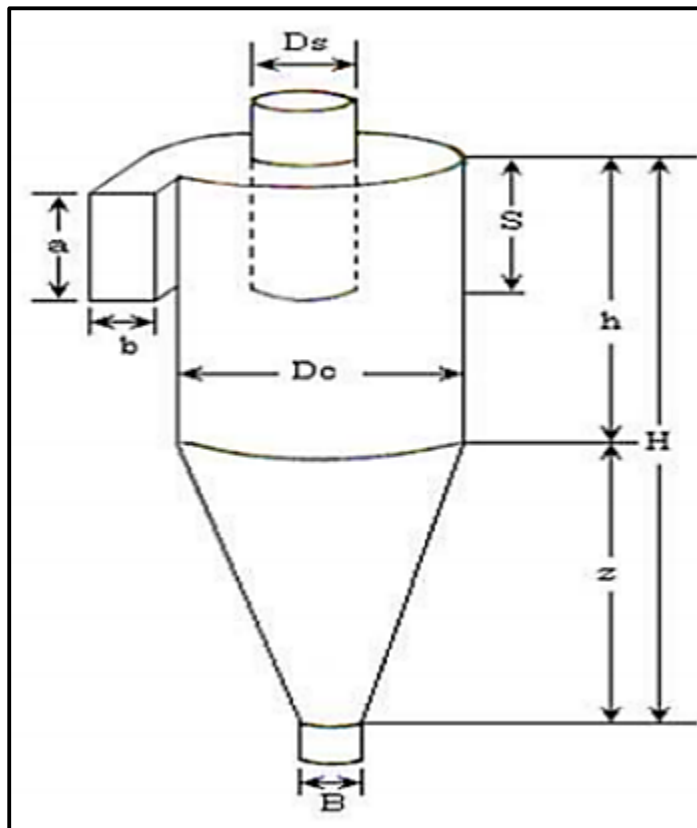
Familia de ciclones	Eficiencia de remoción (%)		
	PST	PM10	PM2.5
Convencionales	70 - 90	30 - 90	0 - 40
Alta eficiencia	80 - 99	60 - 95	20 - 70
Alta capacidad	80 - 99	10 - 40	0 - 10

Los ciclones de alta eficiencia pueden remover partículas de 5  $\mu\text{m}$  con eficiencias hasta del 90%, y los multiciclones alcanzan eficacias de recolección de 80 a 95 % para partículas de 5 a 20  $\mu\text{m}$ , pero con mayores caídas de presión. Un resumen de las características de las principales familias de ciclones se presenta en las tablas 6.12 a la 6.14. Además, la figura 6.28 identifica las principales dimensiones del ciclón.

### 6.1.2.3 Calculo de la eficiencia de colección

La figura 6-29 presenta una comparación gráfica de los resultados experimentales con las predicciones teóricas de eficiencia de colección en función del tamaño de las partículas, a partir de la teoría de Leith y Licht.

**Figura 6.28** Dimensiones del ciclón



**Fuente.** Shepherd, C. B., and Lapple, C. E. (1940). Ind. Eng. Chem. 32: 1246.  
(Shepherd, 1939 )

#### 6.1.2.3.1 La eficiencia fraccional por tamaño de partículas

Esta se calcula con la siguiente ecuación (Leith, 1980)

$$\eta_i = 1 - e \left[ - 2X \left( \frac{G \times T_i \times Q \times (n+1)}{D_c^3} \right)^{\frac{0.5}{(n+1)}} \right] \quad (6-36)$$

Donde:

$\eta_i$ : eficiencia fraccional por intervalos de tamaño.

$G$ : factor de configuración del ciclón.

$T_i$ (s): tiempo de relajación para cada partícula,

$D_c$ (m): diámetro del ciclón.

**Tabla 6.12** Características de los ciclones de alta eficiencia

Dimensión	Nomenclatura	Tipo de ciclón		
		Stairmand	Swift	Echeverri
Diámetro del ciclón	$D_c/D_c$	1.0	1.0	1.0
Altura de entrada	$a/D_c$	0.5	0.44	0.5
Ancho de entrada	$b/D_c$	0.2	0.21	0.2
Altura de salida	$S/D_c$	0.5	0.5	0.625
Diámetro de salida	$D_s/D_c$	0.5	0.4	0.5
Altura parte cilíndrica	$h/D_c$	1.5	1.4	1.5
Altura parte cónica	$z/D_c$	2.5	2.5	2.5
Altura total del ciclón	$H/D_c$	4.0	3.9	4.0
Diámetro salida partículas	$B/D_c$	0.375	0.4	0.375
Factor de configuración	$G$	551.22	698.65	585.71
Número cabezas de velocidad	$NH$	6.4	9.24	6.4
Número de vórtices	$N$	5.5	6.0	5.5



**Tabla 6.13:** Características de los ciclones convencionales

Dimensión	Nomenclatura	Tipo de ciclón			
		Lapple	Swift	Peterson-Whitby	Zenz
Diámetro del ciclón	$D_c/D_c$	1.0	1.0	1.0	1.0
Altura de entrada	$a/D_c$	0.5	0.5	0.583	0.5
Ancho de entrada	$b/D_c$	0.25	0.25	0.208	0.25
Altura de salida	$S/D_c$	0.625	0.6	0.583	0.75
Diámetro de salida	$D_s/D_c$	0.5	0.5	0.5	0.5
Altura parte cilíndrica	$h/D_c$	2.0	1.75	1.333	2.0
Altura parte cónica	$z/D_c$	2.0	2.0	1.837	2.0
Altura total del ciclón	$H/D_c$	4.0	3.75	3.17	4.0
Diámetro salida partículas	$B/D_c$	0.25	0.4	0.5	0.25
Factor de configuración	G	402.88	381.79	342.29	425.41
Número cabezas de velocidad	NH	8.0	8.0	7.76	8.0
Número de vórtices	N	6.0	5.5	3.9	6.0

**Tabla 6.14 Características de los ciclones de alta capacidad**

Dimensión	Nomenclatura	Tipo de ciclón	
		Stairmand	Swift
Diámetro del ciclón	$D_c/D_c$	1.0	1.0
Altura de entrada	$a/D_c$	0.75	0.8
Ancho de entrada	$b/D_c$	0.375	0.35
Altura de salida	$S/D_c$	0.875	0.85
Diámetro de salida	$D_s/D_c$	0.75	0.75
Altura parte cilíndrica	$h/D_c$	1.5	1.7
Altura parte cónica	$z/D_c$	2.5	2.0
Altura total del ciclón	$H/D_c$	4.0	3.7
Diámetro salida partículas	$B/D_c$	0.375	0.4
Factor de configuración	G	29.79	30.48
Número cabezas de velocidad	NH	8.0	7.96
Número de vórtices	N	3.7	3.4

N: exponente del vórtice del ciclón.

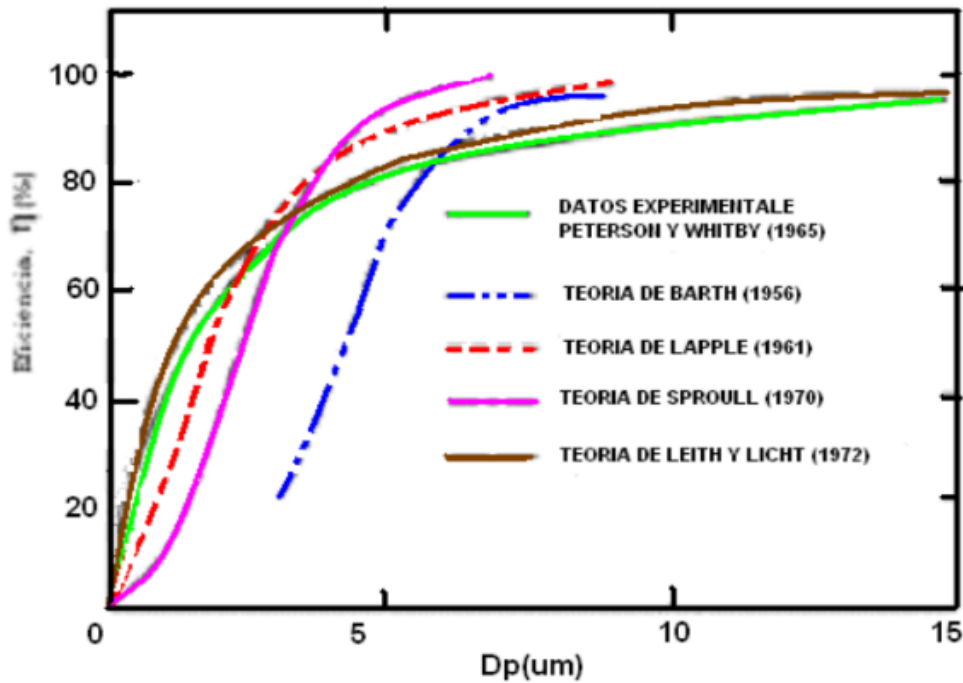
$Q(m^3/s)$ : caudal de gas.

La eficiencia total se calcula con:

$$\eta_t = \sum \eta_i \times m_i \quad (6-37)$$

Las ecuaciones 6-36 y 6-37, permiten obtener condiciones de referencia.

**Figura 6.29** Eficiencia de colección del ciclón



**Fuente:** HEALTH AND SAFETY EXECUTIVE Maintenance, examination and testing of local exhaust ventilation *HSE Books, 1998*.

- **Factor de configuración  $G$**

Resulta de la ecuación 6-38:

$$G = \frac{8 \times Kc}{(Ka \times Kb)^2} \quad (6-38)$$

Donde:

$Kc$ : factor dimensional de las proporciones volumétricas del ciclón

$Ka$ : relación entre la altura de la entrada y el diámetro del ciclón  $a/D_c$ .

$Kb$ : relación entre el ancho de la entrada y el diámetro del ciclón  $b/D_c$

El factor de configuración  $G$  es común para cada familia de ciclones; las tablas 6-12 a 6-14 presentan el valor de  $G$  para las principales familias.

El factor dimensional de las proporciones volumétricas del ciclón  $Kc$ , se calcula con la ecuación 6-39

$$Kc = \frac{(V_{sc} + \frac{1}{2}Vr)}{Dc^3} \quad (6-39)$$

Donde:

$V_{sc}(m^3)$ : Volumen evaluado sobre la salida del ciclón,

$Vr(m^3)$ : Volumen evaluado sobre la longitud natural del ciclón

siempre que se cumpla la siguiente condición:

$$L < H - s \quad (6-40)$$

En la cual:

Donde:

$L(m)$ : longitud natural del ciclón,

$H(m)$ : altura total del ciclón,

$s(m)$ : altura de la salida

La longitud natural del ciclón se puede calcular con la ecuación 6-51.

$$L = 2,3 \times Ds \times \sqrt[3]{Dc^2/a \times b} \quad (6-41)$$

Donde:

$Dc$ : diámetro del ciclón

El volumen evaluado sobre la salida del ciclón  $V_{sc}$  se evalúa con la ecuación 6-55

$$V_{sc} = \frac{\pi}{4} \times \left(S - \frac{a}{2}\right) \times (Dc^2 - Ds^2) \quad (6-42)$$

El volumen del ciclón evaluado sobre la longitud natural  $V_R$ , se calcula con la ecuación 6-56

$$V_R = \frac{\pi}{4} \times Dc^2 \times (h - S) + \frac{\pi}{12} \times Dc^2 \times (L + S - h) \times \left[1 + \frac{K_L}{Dc} + \left(\frac{K_L}{Dc}\right)^2\right] - \frac{\pi}{4} \times Ds^2 \times L \quad (6-43)$$

Donde:

$K_L$  se denomina el factor de dimensiones lineales y se calcula con la ecuación 6-44

$$K_L = Dc - (Dc - B) \times \left[\frac{S+L-h}{z}\right] \quad (6-44)$$

### 6.1.2.3.2 Tiempo de relajación $T$

El tiempo de relajación es el tiempo necesario para que una partícula alcance la velocidad terminal de caída, se evalúa con la ecuación 6-45

$$T_i = \frac{\rho_p \times Dpi^2}{18\mu} \quad (6-45)$$

Donde:

$\rho_p$  ( $Kg/m^3$ ): densidad de la partícula,

$Dpi$  (m): diámetro de la partícula,

$\mu$  ( $Kg/ms$ ): viscosidad del gas, kg/ms.

6-1-2-3-3: Exponente del vértice  $n$

El exponente del vórtice resulta de la ecuación 6-46.

$$n = 1 - (1 - 0,67 \times Dc^{0,14}) \times \left[\frac{T}{283}\right]^{0,3} \quad (6-46)$$

Donde:

$n$ : exponente del vórtice (valor adimensional).

$D_c(m)$ : diámetro del ciclón.

$T$ : temperatura del gas, en grados Kelvin.

#### 6.1.2.3.4 Numero de giros $N$

El número de giros puede ser estimado con la fórmula:

$$N = \frac{1}{a} \times \left[ h + \frac{Z}{2} \right] \quad (6-47)$$

El número de vórtices es común para cada familia de ciclones (ver las tablas 6-12 a la 6-14).

La eficiencia de remoción con parámetros del ciclón y de operación es: (Kalen, 1974)

$$\eta_i = 1 - e^{\left[ \frac{-\pi - N \times \rho_p \times D_p^2 \times V_i}{9 \times \mu \times b} \right]} \quad (6-48)$$

Donde:

$\eta_i$ : eficiencia fraccional por intervalos de tamaño.

El diámetro crítico de la partícula está calculado con:

$$D_{p\text{critico}} = \sqrt{\frac{9 \times \mu \times b}{\pi \times N \times \rho_p \times V_i}} \quad (6-49)$$

#### 6.1.2.3.5 Velocidad de saltación

La denominada velocidad de entrada o saltación, ha sido estipulado como un parámetro técnico fundamental en el proceso de sedimentación de partículas, ya que cuando las velocidades son bajas se neutraliza la fuerza centrífuga ocasionando con ello una reducción en la eficacia de colección y disposición del particulado, mientras que por el contrario, las velocidades altas tienden a la suspensión de partículas disminuyendo con ello la eficiencia del proceso, por tanto, el parámetro indicado de ciclón sugiere que esté en el intervalo de los 15.2 a 27.4 metros por segundo (m/s).

Kalen y Zenz (1974) sugieren la existencia de una velocidad de saltación en el ciclón que permite explicar la eficiencia en la recolección de algún tipo de particulado desde la perspectiva de las variaciones en la velocidad de entrada, con lo cual se observaría un

estado ideal de suficiencia de la velocidad, en el ánimo de generar un aprovechamiento en la aceleración centrífuga, sin que se sobrepase aquella calculada para la suspensión del material ya recolectado, y por tanto, genere una re-suspensión del MP con relación a la velocidad calculada, para la cual se propone por parte de los autores la siguiente correlación semiempírica:

$$V_s = \frac{4,913 \times W \times Kb^{0.4} \times Dc^{0.067} \times \sqrt[3]{Vi^2}}{\sqrt[3]{1-Kb}} \quad (6-50)$$

Donde:

$V_s(m/s)$ : velocidad de saltación.

$Vi(m/s)$ : velocidad de entrada del gas en el ciclón

$W(m/s)$ : velocidad equivalente

La velocidad equivalente se evalúa a través de la siguiente ecuación (Kalen, 1974)

$$W = \sqrt[3]{\frac{4 \times g \times \mu \times (\rho_p - \rho)}{3 \times \rho^2}} \quad (6-51)$$

Donde:

$\rho_p(Kg/m^3)$ : densidad de la partícula.

$\rho(Kg/m^3)$ : densidad del gas portador.

$\mu(Kg/m \cdot s)$ : viscosidad del gas portador.

Así pues, la velocidad de saltación viene siendo una función en atención a las propiedades de las partículas y del fluido, así como del dimensionamiento del ciclón, en donde algunas investigaciones han explorado experimentalmente la existencia de una velocidad óptima de entrada, de acuerdo a lo sugerido por autores como Kalen y Zenz en sus correlaciones experimentales de entrada y velocidad para la eficiencia del ciclón, encontrando que la eficiencia máxima ocurre a una velocidad de entrada de 1.25 veces la velocidad de saltación, y que cuando dicha velocidad es 1.35 veces mayor, se produce una resuspensión del MP ya colectado.

### 6.1.2.4 Estimativa de la caída de presión

Estas pérdidas están asociadas a una fricción en el conducto de entrada del ciclón o en su defecto al proceso de contracción y expansión de la entrada, producirá una fricción en las paredes del ducto. Adicionalmente, se ha considerado la pérdida cinética tanto en el ciclón como en el tubo de salida, así como en la presión estática tanto en la entrada como en la salida, con lo cual se establece el parámetro de caída de presión como un aspecto a tener en cuenta en la relación directa de la eficiencia y los costos de operación, ya que los procesos de entrada y salida generan pérdidas de energía cinética y fricción en el ciclón que llevan a una deficiencia en la remoción del material, incrementando las velocidades de entrada con las caídas de presión al interior del sistema.

Se ha establecido que las deflexiones de presión inferiores a 2488.16 pascales o 0.0248 Bar se aceptan generalmente, en atención a la ecuación de cálculo de pérdida de presión para el ciclón desarrollada por Shepherd (1939), a sí:

$$\Delta P = \frac{1}{2} X \times \rho \times Vi^2 \times N_H \quad (6-52)$$

Donde:

$\Delta P(Pa)$ : caída de presión en el ciclón,

$\rho (Kg/m^3)$ : densidad del gas portador.

$Vi(m/s)$ : velocidad de entrada del gas en el ciclón,

$N_H$ : número de cabezas de velocidad a la entrada del ciclón.

El número de cabezas de velocidad a la entrada del ciclón se puede hallar con la siguiente ecuación:

$$N_H = K \times \frac{a \times b}{Ds^2} \quad (6-53)$$

Donde:

$K$ : constante, toma el valor de 16 para entrada tangencial.

El valor de  $N_H$  es común para cada familia de ciclones, las tablas 6-12 a la 6-14. Presentan los valores para cada familia de ciclones.

## 6.2 Parámetros de diseño y cálculo de lo equipo con medio filtrante

Dentro de las características de referencia para el cumplimiento de una emisión de corriente para la utilización de ciclones se encuentran:

### a) Caudal de aire:

Típicamente el caudal de gas para unidades que involucran un solo ciclón debe estar en el rango de 0.5 a 2 m<sup>3</sup>/s en condiciones estándar, en donde los caudales en el nivel más alto del intervalo pueden llegar hasta los 50 m<sup>3</sup>/s, que requieren el manejo de multiciclones. No obstante, ciclones en usos especializados requieren flujos desde los 0.0005 hasta los 30 m<sup>3</sup>/s.

### b) Temperatura:

Para el caso de la temperatura del gas, la referencia de entrada está limitada solamente por aquellos materiales que hacen parte de la estructura de los ciclones, y los cuales vienen siendo operados a temperaturas estándar tan altas que pueden alcanzar los 540 grados Celsius.

### c) Concentración de partículas:

En relación a la concentración de partículas, típicamente se han encontrado condiciones de referencia para el gas que tienen oscilaciones entre los 2.0 a 230 g/m<sup>3</sup>, donde para el caso de aplicaciones de mayor especificidad, las cargas pueden tener un referente muy alto que puede alcanzar los 16.000 g/m<sup>3</sup>, y por el contrario, pueden llegar a ser tan bajas que pueden alcanzar 1.0 g/m<sup>3</sup>.



## 6.2.1 Procedimiento de diseño

Para el procedimiento de diseño del medio filtrante el equipo de diseño, técnico y de ingeniería, deben tener en cuenta los siguientes parámetros:

1. Seleccionar el tipo de ciclón.
2. Obtener un estimativo de tamaño de las partículas.
3. Calcular el diámetro del ciclón (ver tablas 6-12 a la 6-14).
4. Realizar una estimación del número de ciclones que se requieren para los trabajos en serie y paralelo.
5. Además debe hacerse un cálculo de la eficiencia de cada ciclón para determinar qué tipo de acciones complementarias deben realizarse.
6. Asimismo, hay que realizar un cálculo de las caídas de presión, teniendo en cuenta estudios empíricos experimentales y algunas fórmulas de proceso para seleccionar otro tipo de ciclón de ser necesario.
7. Adicionalmente, el costo que se requiere para la optimización del proceso debe tener en cuenta el uso de las caídas de presión para poder otorgar el costo más ventajoso de operación del sistema.

Hay que tener en cuenta que los ciclones por lo general tienen establecidos una serie de parámetros en el diseño que involucran el diámetro del mismo, la estimación de las caídas de presión, las velocidades de entrada del sistema y, claro está, la velocidad de saltación, tal y como se ilustra en la tabla 6-15.

**Tabla 6.15:** Parámetros de diseño para los ciclones de entrada tangencial

Parámetro	Valor
Diámetro del ciclón ( $DC$ )	< 1.0 m
Caída de presión	< 2488.16 Pa
Relación de velocidades ( $V_i/V_S$ )	< 1.35
Velocidad de entrada	15.2 - 27.4 m/s

## 6.2.2 Método de cálculo

Los métodos de cálculo se realizan teniendo en cuenta los pasos seguidos en el procedimiento de diseño iniciales.

### 6.2.2.1 Selección del ciclón

Selección del ciclón se realiza, dependiendo del funcionamiento o necesidades requeridas.

### 6.2.2.2 Cálculo del diámetro del ciclón

Para calcular el diámetro del ciclón se selecciona una velocidad de entrada que está en el intervalo de 15.2 a 27.4 m/s, y un caudal de diseño o de referencia que están en el intervalo de  $0.5m^3/s$  a  $12m^3/s$ . Los cálculos de las dimensiones se realizan en base a las tablas 6-12 a la 6-14, en el momento de seleccionar el ciclón siguiendo los siguientes pasos. (Shepherd, 1939 )

1°- Área del ducto de entrada:  $A$

$$A = \frac{Q}{v} \quad (6-54)$$

2°- Área del ducto de entrada ciclón:

$$a \times b \quad (6-55)$$

3°- Altura de entrada al ciclón:  $a$

$$aDc \quad (6-56)$$

4°- Ancho de entrada al ciclón:  $b$

$$bDc \quad (6-57)$$

5°- Diámetro del ciclón:  $Dc$

$$Dc = \sqrt{\frac{A}{a \times b}} \quad (6-58)$$

6°- Altura de salida del ciclón:  $S$

$$sDc \quad (6-59)$$

7°- Diámetro de salida del ciclón:  $D_s$

$$D_s D_c \quad (6-60)$$

8°- Altura parte cilíndrica del ciclón:  $h$

$$h D_c \quad (6-61)$$

9°- Altura total del ciclón:  $H$

$$H D_c \quad (6-62)$$

10°- Altura parte cónica del ciclón:  $Z$

$$z D_c \quad (6-63)$$

11°- Diámetro de salida del polvo:  $B$

$$B D_c \quad (6-64)$$

Calculo del número de ciclones necesarios para trabajar en paralelo: aunque  $D_c > 1.0$  m, solo se requiere un ciclón simple, ya que el valor del diámetro del ciclón está relativamente cercano a 1.0 m. Se sugiere que para caudales entre 0.5 y 12 m<sup>3</sup>/s se utilice un solo ciclón.

### 6.2.2.3 Cálculo de la eficiencia del ciclón:

Para calcular la eficiencia se sugiere la ecuación de Leith y Licht.

### 6.2.2.4 Velocidad equivalente:

La velocidad equivalente la obtenemos despejando la ecuación 6-65. (Leith, 1980)

$$W = \sqrt[3]{\frac{4 \times g \times \mu \times (\rho_p - \rho)}{3 \times \rho^2}} \quad (6-65)$$

### 6.2.2.5 Velocidad de saltación

Esta velocidad la obtenemos aplicando la ecuación 6-66

$$V_s = \frac{4,913 \times W \times K b^{0,4} \times D_c^{0,067} \times \sqrt[3]{V_i^2}}{\sqrt[3]{1 - K b}} \quad (6-66)$$

### 6.2.2.5 Relación entre velocidades

Esta relación se realiza entre la velocidad equivalente, ecuación 6-75, y la velocidad de saltación, ecuación 6-76. Si esta relación es menor de 1,35, nos confirma que no hay resuspensión del MP, teniendo en cuenta la ecuación 6-38, 6-45 y 6-46.

### 6.2.2.6 Volumen de ciclón:

Este cálculo del volumen del ciclón, se realiza en la salida utilizando la ecuación 6-66

$$V_{sc} = \frac{\pi}{4} \times \left( S - \frac{a}{2} \right) \times (Dc^2 - Ds^2) \quad (6-42)$$

### 6.2.2.7 Longitud natural del ciclón

Esta longitud la hallamos de la ecuación 6-51

$$L = 2,3 \times Ds \times \sqrt[3]{Dc^2 / a \times b} \quad (6-41)$$

Si  $L < H - S$ , Calculamos el volumen evaluado sobre la longitud natural del ciclón, hallando primero el factor de dimensiones lineales.

### 6.2.2.8 Factor de dimensiones lineales

Para calcular el factor de dimensiones lineales utilizamos la ecuación 6-57

$$K_L = Dc - (Dc - B) \times \left[ \frac{S+L-h}{z} \right] \quad (6-44)$$

### 6.2.2.9: Volumen del ciclón evaluado sobre la longitud natural

Para el cálculo de este volumen recurrimos a la ecuación 6-56

$$V_R = \frac{\pi}{4} \times Dc^2 \times (h - S) + \frac{\pi}{12} \times Dc^2 \times (L + S - h) \times \left[ 1 + \frac{K_L}{Dc} + \left( \frac{K_L}{Dc} \right)^2 \right] - \frac{\pi}{4} \times Ds^2 \times L$$

### 6.2.2.9: Factor dimensional de las proporciones volumétricas del ciclón

Utilizamos la ecuación 6.39

$$Kc = \frac{(Vsc + \frac{1}{2}Vr)}{Dc^3} \quad (6-39)$$

### 6.2.2.10: Relación entre la altura de entrada y el diámetro del ciclón

Para realizar esta calculo utilizamos la ecuación

$$Ka = \frac{a}{Dc} \quad (6-53)$$

### 6-2-2-11: Relación entre la base de entrada y el diámetro del cicló

$$Kb = \frac{b}{Dc} \quad (6-54)$$

Ahora hallamos el factor de configuración

### 6.2.2.12: Factor de configuración

Para este cálculo utilizamos la ecuación 6-38

$$G = \frac{8 \times Kc}{(Ka \times Kb)^2} \quad (6-38)$$

### 6.2.2.13: Exponente de vórtice

Se utiliza la ecuación 6-46

$$n = 1 - (1 - 0,67 \times Dc^{0,14}) \times \left[ \frac{T}{283} \right]^{0,3} \quad (6-46)$$

### 6.2.2.14: Tiempo de relajación

Hallamos la ecuación 6-45 y utilizamos la tabla de cálculo de eficiencias par partículas

$$Ti = \frac{\rho_p \times Dp i^2}{18\mu} \quad (6-45)$$

#### 6-2-2-15: Eficiencia fraccional por intervalos de tamaño (Leith, 1980)

$$\eta_i = 1 - e \left[ - 2X \left( \frac{G \times Ti \times Q \times (n+1)}{Dc^3} \right)^{\frac{0.5}{(n+1)}} \right] \quad (6-36)$$

#### 6.2.2.16: Eficiencia total

$$\eta_t = \sum \eta_i \times m_i \quad (6-37)$$

#### 6.2.2.17: Caída de presión del ciclón

Para calcular la caída de presión del ciclón, debemos calcular primero, el número, de cabezas de velocidad ecuación, 6-53.

$$N_H = K \times \frac{a \times b}{Ds^2} \quad (6-53)$$

#### 6.2.2.18: Caída de presión

Esta caída de presión la calculamos mediante la ecuación 6-52

$$\Delta P = \frac{1}{2} X \times \rho \times Vi^2 \times N_H \quad (6-52)$$

### 6.2.3: Parámetro de diseño del medio filtrante

Para el caso de diseño del medio filtrante se requiere en el cuerpo principal tres secciones a saber:

- Una primera sección que está ubicada en la parte superior en la cual se conecta el aire limpio,
- Una segunda sección a la cual se le denomina cámara de filtrado, en la cual están ubicadas una serie de mangas de tipo cilíndrico en la región ventral, y una
- Tercera sección que involucra el alojamiento de una tolva, en donde recae la colección de polvo en su parte inferior.

Cada una de las citadas secciones se encuentran separadas la una de la otra a través de una estructura laminar, que tiene como propósito la manutención de la cámara de filtrado distante de la sección de aire limpio (*plenum* de aire limpio).

De esta forma, el aire que requiere ser filtrado ingresa al colector pasando por una estructura difusora la cual absorbe en primera instancia el impacto del material particulado debido a la velocidad de entrada, distribuyendo de esta manera el aire, a la vez que disminuye la velocidad del mismo. En consideración de lo anterior, la disminución en la velocidad de las partículas permite que aquellas de mayor peso se precipiten a la tolva que se encuentra en la tercera sección, en la que se descarga el residuo fuera del filtro cuando termina el ciclo del sistema. Por su parte, el aire que contiene el particulado más fino se direcciona hacia la cámara de filtrado, distribuyendo allí las partículas de polvo más delicado hacia el exterior de las mangas, mientras que el aire limpio sigue circulando hacia la primera sección del sistema, para ser descartado finalmente a la atmósfera, tal y cómo se esquematiza en la figura 6-30.

### 6.2.3.1: Velocidad de filtración (Relación aire-tela)

La velocidad de filtración se calcula con la ecuación 6.67 (Dennis, 1979)

$$\frac{A}{T} = V_f = \frac{Q \left[ \frac{\text{m}^3}{\text{min}} \right]}{A_T \left[ \text{m}^2 \right]} \quad (6-67)$$

Donde:

$Q$ : caudal de diseño del sistema

$A_T$ : área total filtrante; viene dada por la siguiente ecuación (Dennis, 1979)

$$A_T = \pi \cdot C_m \cdot D_m \cdot L_m \quad (6-68)$$

Dónde:

$C_m$ : Cantidad de mangas en el filtro

$D_m$ : Diámetro de la manga

$L_m$ : Longitud de la manga

La ecuación 6-67, la reemplazamos en la ecuación 6-68 y hallamos la relación aire tela  $\frac{A}{T}$ .

### **6.2.3.2: Criterio de selección para la tela de filtrado**

En relación al criterio de selección para la tela de filtrado se han considerado dos tipos de textiles a los cuales se han denominado tejido y no tejido o fieltros. De esta forma, cuando se elige el primer tipo, es decir el textil tejido, se puede identificar una serie de porosidades que tienen una distribución uniforme, mientras que en el caso del fieltro, se tiene un sistema poroso infinito más alto que el textil tejido, en atención a la falta de una secuencia en el patrón de costura. Este tipo de filtro, tiene la particularidad de tener velocidades de filtración más altas que no se asimilan a los de filtración de aire reverso, en donde la tensión superficial en las mangas cuando se realiza el proceso de limpieza, tiende a ser mayor que en otro tipo de filtros.

Entre los aspectos más importantes a considerar para la selección tenemos:

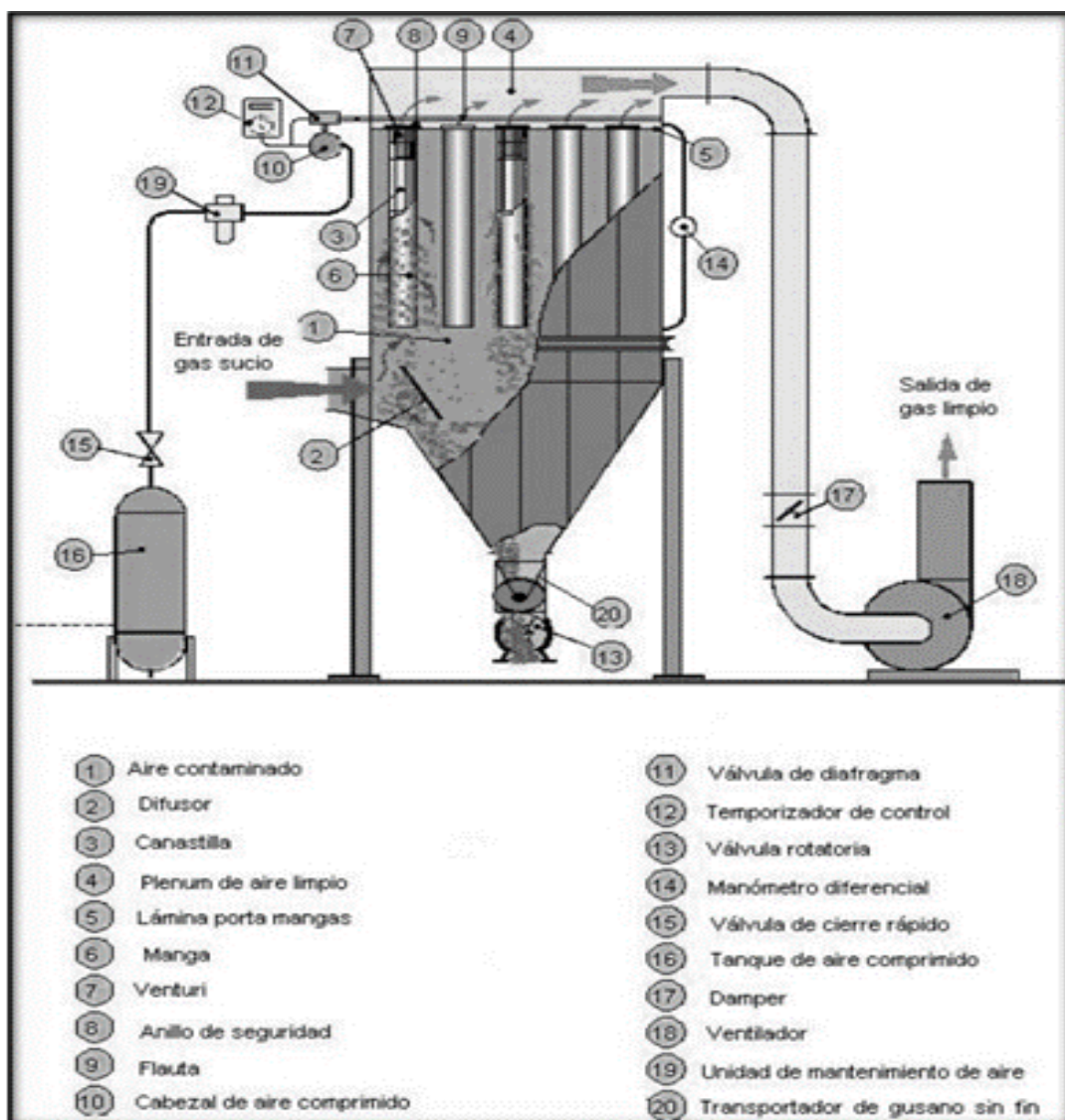
- Tipo de sistema de medio filtrante.
- Índice de calor y temperatura
- Composición química
- Abrasividad

Además, el medio filtrante debe satisfacer las siguientes condiciones:

- Permeabilidad
- Capacidad de esfuerzo
- Estabilidad térmica



Figura 6.30 Partes de medio filtrante pulse jet



FUENTE: Arias, Juan, Análisis al Sistema de Desempolvado del Área de Trituración

### 6.2.3.3. Dimensionamiento de mangas

Al paso del proceso de filtración la dimensión de las mangas es una variable dependiente de la eficiencia de la limpieza, así como de la velocidad del proceso, en atención al dimensionamiento de la cámara de filtrado en la cual por lo general, su diámetro oscila desde los 120 a 160 milímetros que, en relación al proceso de estandarización del

fabricante las mangas, en su mayoría tiende a diseñar filtros que coinciden a una sola medida.

Así pues, cuando se establece por parte del fabricante un aumento en la longitud de las mangas es plausible que ésta se adapten sólo para un tipo de diseño del sistema, mientras que, si el ajuste lo hace el operario con otro tipo de mangas, lo usual es que no queden ajustadas verticalmente en el montaje, causando con ello que puedan chocar con la sección inferior, ocasionando un desgaste por fricción. Además, esto hace más difícil el proceso de limpieza, ya que el agujero de ingreso de polvo a la manga no se ajusta al recomendado por el fabricante, por tanto, se sugiere cumplir con una relación para evitar el problema citado aquí a través de la siguiente fórmula:

$$\frac{Lm(m)}{Dm(m)} \leq 25 \quad (6-68)$$

Donde:

$Lm(m)$ : longitud de la manga

$Dm(m)$ : diámetro de la manga

6-2-3-4: Numero de mangas

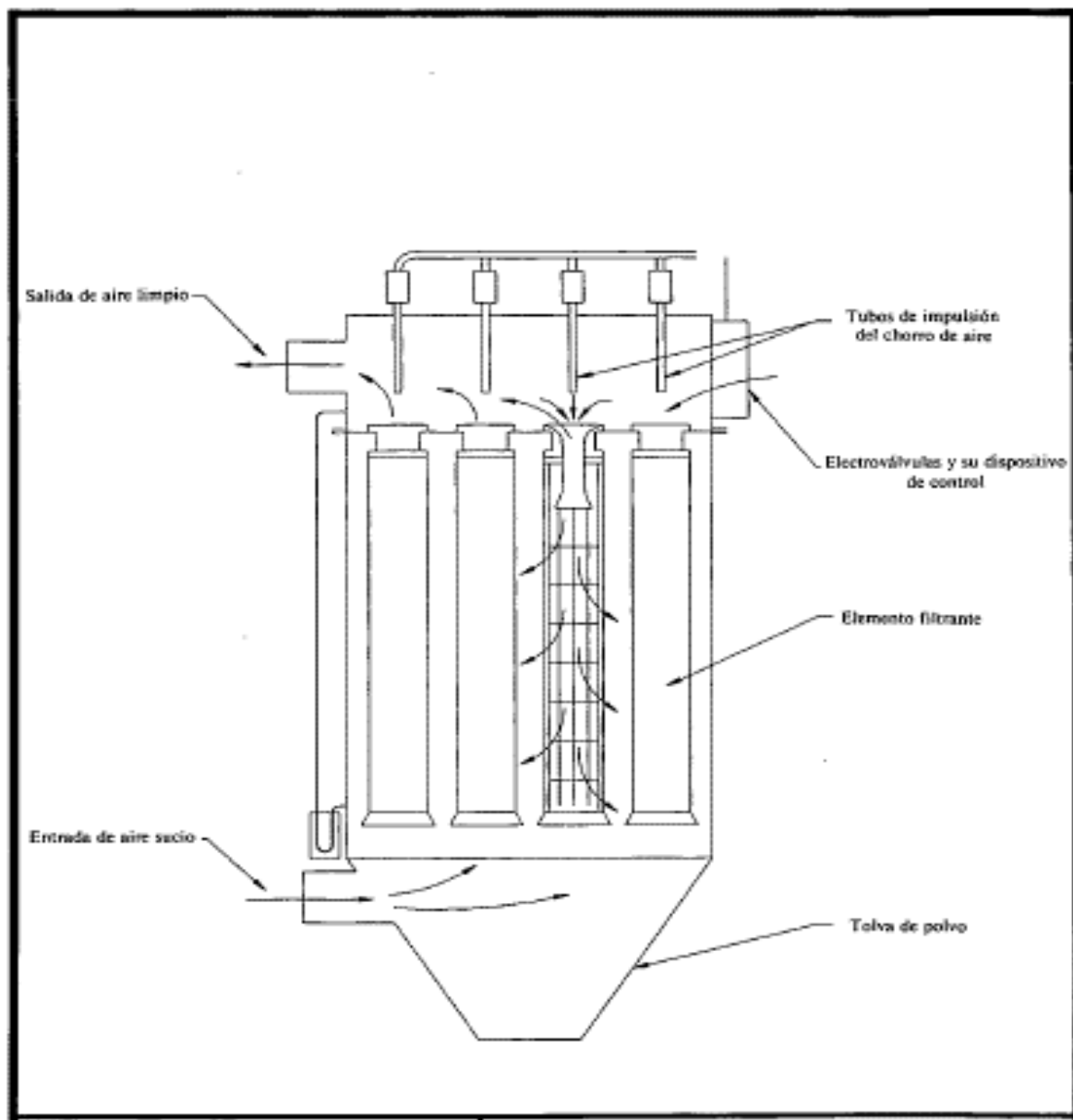
El cálculo del número de mangas viene dado por la siguiente ecuación (Dennis, 1979)

$$\# \text{ de mangas} = \frac{Q(\frac{m^3}{min})}{\frac{A(\frac{m^3}{m^2 \cdot min})}{T}} \div A(m^2) \quad (6-70)$$

#### 6.2.3.4: Venturis

Los venturis de colectores del tipo pulse-jet, figura 6-31 garantizan un eficaz desprendimiento de polvo y ahorro de aire comprimido por cada disparo generado.

Figura 6.31 Sistema de limpieza de filtros



Fuente: Ventilación industrial (higyenists, 1992)

### 6.2.3.7: Pérdidas en el filtro de mangas.

Es necesario mencionar que las pérdidas de presión a nivel del filtro de las mangas se pueden ocasionar por la subsecuente caída de presión del gas circulante o porque la presión de los gases filtrados por las mangas deflexiona en el proceso de filtrado, lo cual en relación a valores empíricos obtenidos de estudios experimentales, recalcan en

considerar la evaluación de los dos tipos de caídas de la presión,, puesto que la primera es inferior en importancia con respecto a la segunda por lo que se hace necesario una evaluación del sistema de flujo de los gases que se filtran a través de las mangas.

La pérdida de presión, se puede calcular con la fórmula de Dennis & Klemm (1979): (Dennis, 1979)

$$(Pe)_{\Delta w} = 1045 \cdot V_f \cdot Pf^{-0,65} \quad (6-71)$$

Donde:

$V_f(m/min)$ : Velocidad de filtración; que es igual a  $1,5(m/min)$

$P_f(Kpa)$ : Presión a la cual se inyectan los pulsos de aire comprimido, esta presión no debe sobre pasar el rango de 415-830Kpa.

Luego de transcurrir cierto tiempo  $t$ , la caída de presión es: (Dennis, 1979)

$$\Delta P_F = Pe_{\Delta w} K_2 \cdot W_0 \cdot V_f \quad (6-72)$$

$$W_0 = C_i \cdot V_f \cdot t \quad (6-73)$$

Donde:

$C_i$ : Cantidad de polvo que circula por unidad de longitud de volumen de aire, el cual va a ser igual a  $C_i = 0,01$

$t(seg)$ : tiempo entre los pulsos de aire comprimido que se aplican a una manga para su limpieza,

$K_2$ : resistencia al flujo debido a la acumulación de polvo en la superficie de la manga, este valor se determina experimentalmente, donde  $K_2 = 1,5 \times 10^5$

$W_0$ : masa de polvo como una función del tiempo

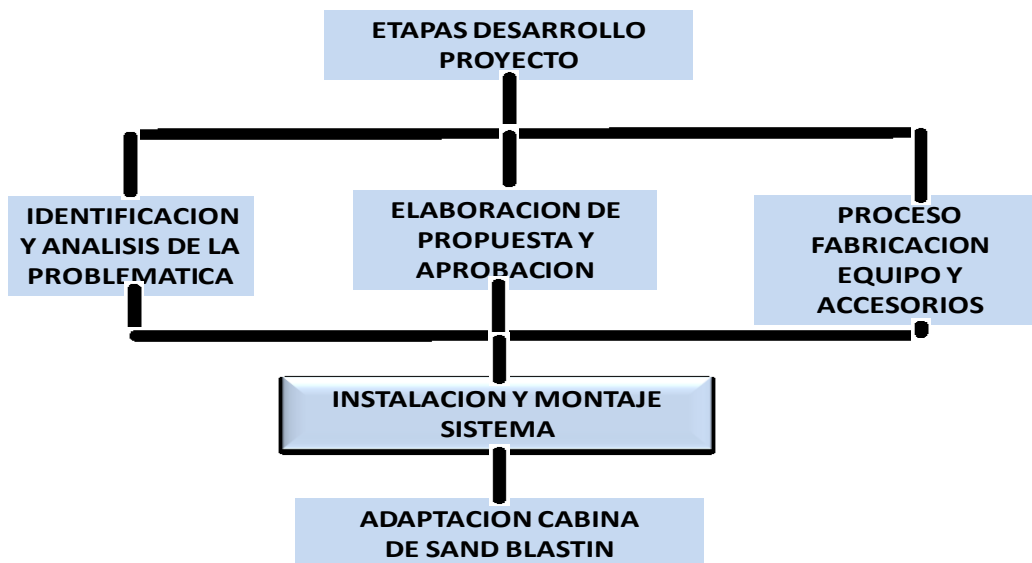
**Tabla 6.17** Resumen de filtros de tela y sus características

	<b>OPERACIÓN DISCONTINUA</b> Concentraciones bajas y medias	<b>OPERACIÓN DISCONTINUA</b> Concentraciones altas		<b>OPERACIÓN CONTINUA</b> Cualquier concentración	
Requerimientos de limpieza de la tela	Intermitente	Continuo			
Tipo de limpieza	Vibrador	Vibrador	Aire inverso (baja presión)	Inverso pulsante - (alta presión) aire comprimido o ventilador	
Configuración del depurador	Un compartimento	Múltiples compartimentos con válvulas en la entrada o la salida de cada uno		Un compartimento	
Configuración del medio filtrante	Mangas o bolsas	Mangas o bolsas	Mangas	Mangas o bolsas	Plegado en cartucho
Tipo de tela	Tejido	Tejido		Fieltro	Fieltro (lámina de papel)
Caudal de aire	Muy variable	Ligeramente variable		Prácticamente constante	Prácticamente constante
Rango del caudal específico de filtrado (velocidad de filtración, m/s)	0,005 a 0,030	0,005 a 0,015	0,005 a 0,010	0,025 a 0,060	< 0,005 a 0,012 <sup>A</sup>

## 7. Caso de aplicación técnico del proyecto eco tecnologías

El proyecto se desarrolló en la sede de ECOTECNOLOGIAS S.A.S. Se trabajó en el rediseño de una cabina de sand - blasting (CASAL, 1989) a la cual se le adaptó el sistema de extracción, para lo cual se desarrollaron las etapas siguientes.

Figura 7.36. Etapas del desarrollo del proyecto



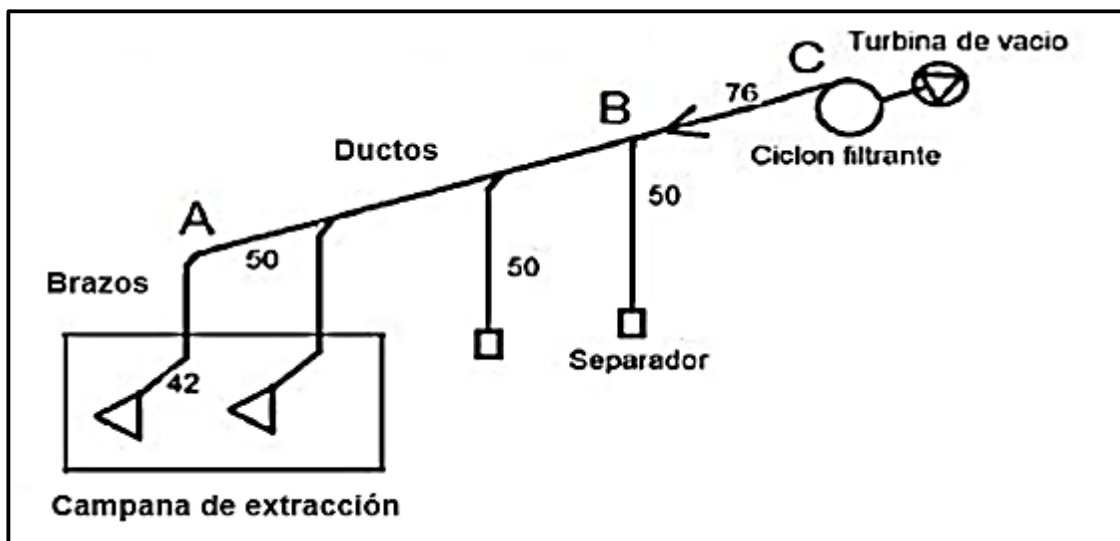
### 7.1 Identificación y análisis de la problemática.

1°- Se inició con la identificación y análisis de la problemática en las instalaciones de la empresa, donde existía una cabina de sand blasting la cual generaba contaminación con material particulado tanto interno como externamente en el momento de realizar el

pulimiento de piezas, la cual afectaba el entorno de trabajo, afectando de esta manera a el funcionario que trabajara realizando esta labor trabajo.

2°- Luego se elabora un esquema del sistema de ductos incluyendo las dimensiones en planta, el sitio de ubicación del ventilador o bomba de vacío, la del equipo con medio filtrante, etc. Es conveniente identificar cada tramo de los ductos primarios y secundarios con números, letras o cualquier otro método como lo muestra la figura 3-15

### Esquema isométrico de un sistema de ecuación



Fuente: Autor.

## 7.2 Etapas preliminares

1° Captación de material particulado generado por una cabina de sand blasting.

2° El foco de emisión se extiende por una superficie igual  $0.50 \times 1.10 \text{ m}^2$ .

3° No hay corrientes de aire.

4° El trabajador necesita que la boca de aspiración esté situada 0.40 m por encima de la mesa.  $X = 0,40 \text{ m}$

5° Elegimos una campana circular de 7.5 cm de radio, lo que supone un área:

$$A = \pi \times 0,0057 = 0,0176 \text{ m}^2$$

6° La velocidad de captura recomendada para material particulado es  $V = 12.5 \text{ m/s}$

7° El caudal necesario es

$$Q = V (10X^2 + A) = 20.22 \text{ m}^3/\text{s}$$

8° Velocidad mínima en ducto para procesos de sand-blasting es =  $30 \text{ m/s}$

9° Sección =  $\frac{Q}{V} = 0.674 \text{ m}^2$  Tubería: Se toma la más próxima normalizada:

10° Longitud de tubería instalad 8,0 metros

Dos codos de 90°, R=2D equivale a 24m

Un sombrerete 0,75 D equivale a. 3,8 m

Longitud total de tubería 35,6 metros

Pérdida de carga en tubería y accesorios:

Pérdida por metro de tubería = 0,7 mmca/m

$$H_{\text{Tubería + accesorios}} = 35.6 \text{ m} \times 0,7 \text{ mmca/m} = 24.92 \text{ mca}$$

Pérdida de carga en campana de aspiración:

Coefficiente n de la campana: 0,05

Velocidad del aire en ducto:  $\frac{Q}{A} = 15,59 \text{ m/s}$

Presión dinámica:  $\frac{V^2}{2g} \times 1,2 = 14,87 \text{ mmca}$

Pérdidas en campana:  $0,05 \times 14,87 = 0,74 \text{ mmca}$

Pérdida de carga total:  $12,46 + 0,74 = 13,2 \text{ mmca}$

11° Ecuación del sistema:  $H = K \times Q^2$

$$H = 13,2 \text{ mmca} \quad Q = 1,5 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

$$K = H / Q^2 = 5,87 \frac{\text{mmca}}{(\text{m}^3/\text{s})^2}$$

$$H = 5,87 \times Q^2$$

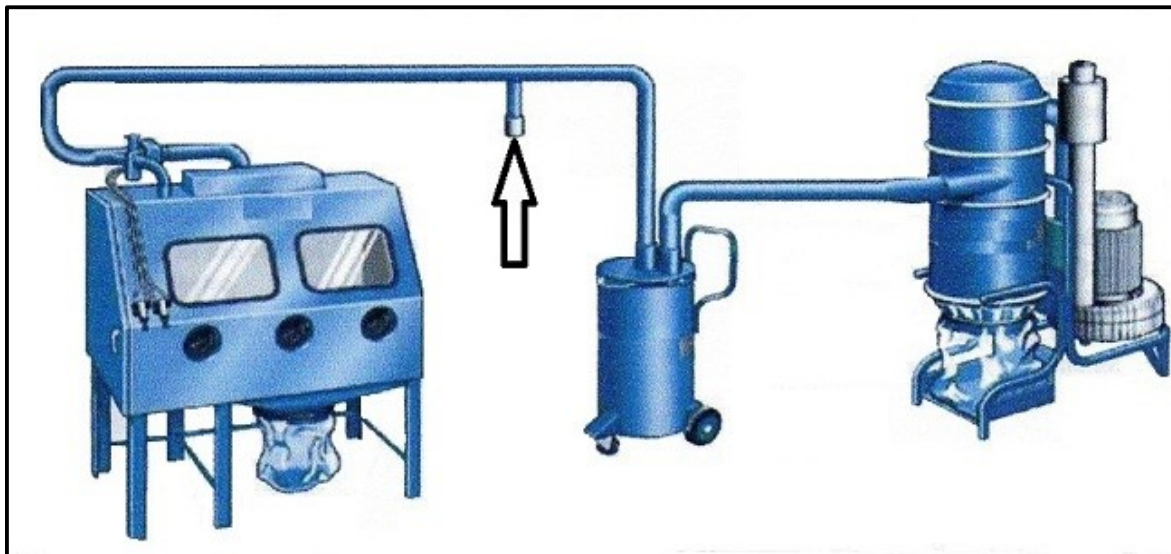
12° Seleccionar ventilador



### 7.3 Elaboración de la propuesta

Se hizo la propuesta formal para la adaptación del sistema de extracción focalizada a la cabina de sand-blasting y se complementó con otros puntos como lo muestra la figura 24.

**Figura 7.32.** Principio de Conexión Integrado para Proceso de Sand-Blasting con sistema de extracción focalizada



**Fuente:** HANDBOK FOR PLANERING OCH DIMENCIONARING AV PUNKTUTSUGNING presión de vacío, pagina 99 Dustcontrol AB 1986 (Dustcontrol, 1986).

### 7.4 Proceso de fabricación de equipos y accesorios

**Figura 7.38.** Proceso de fabricación de campanas, soporte brazo, bifurcador, y válvula de sellamiento

COMPONENTES DEL SISTEM

1°- Campana



2°- Soporte brazo extractor con codos giratorios



3°- Bifurcador tubo metálico



4°- Válvula de sellamiento semi automática



5°- Acoples ducto a ducto diferentes diámetros



#### 6°- Curvas tubo metálico diferentes diámetros y radios



Cabina de sand-blasting seleccionada para la Adaptación y reconversión a tecnologías más limpia

**Figura 7.33** Cabina de Sand-blasting a intervenir



**Figura 7.34.** Proceso de fabricación de bomba de vacío



## 7.5 Instalación y puesta en marcha del proyecto

Se intervino la cabina de sand-blasting de la figura 7.41, de acuerdo a los requerimientos. Se hizo el montaje de los soportes correspondientes a los brazos de extracción con sus respectivas campanas de captación de la cabina de sand-blasting

El paso siguiente se enfocó en instalar y acoplar el separador primario a la cabina tal y como lo muestra la figura 30, a través de los ductos de conexión, los cuales fueron adaptados en la parte trasera de la cabina para una mejor ubicación y de esta manera no interferir con el trabajo y funcionamiento de la cabina a demás para una mejor intervención de los elementos del sistema de extracción

A continuación, se acoplo la unidad compuesta por el ciclón filtrante y la bomba de vacío, junto con la válvula de alivio y el silenciador tal y como lo muestra la figura 27.

Se terminó por acoplar todo el sistema de extracción focalizad a la cabina de sand-blasting a través de los ductos de conexión como lo muestra la figura 31.

**Figura 7.35.** Cabinas con adaptación de brazos extractores



## Conclusiones

Concluimos que para la elección y diseño de un buen sistema de extracción focalizado, después de realizar la identificación del problema de contaminación y tener el diagrama de ubicación de los elementos a utilizar, es muy importante saber que los cálculos de diseño, se deben empezar por el final del diseño, es por eso que se debe realizar una buena selección de la campana de extracción que vamos a utilizar, ya que los valores que halleemos en su cálculos, van a ser claves para la selección de los demás elementos y por ende de la mejor selección del ventilador a utilizar en el diseño del sistema de extracción focalizado

El enfoque de este manual es sobre el control de las partículas de tamaños que se encuentran entre los 0.01 y 10  $\mu\text{m}$ , provenientes de fuentes industriales en donde según la legislación se precisaron las normas mínimas necesarias para prevenir y controlar la contaminación atmosférica, de los siguientes contaminantes: Partículas Totales en Suspensión (PST), Monóxido de Carbono (CO), Dióxido de Azufre (SO<sub>2</sub>), Dióxido de Nitrógeno (NO<sub>2</sub>) y oxidantes fotoquímicos expresados como Ozono (O<sub>3</sub>). Este documento no trata las fuentes no industriales, tales como la combustión residencial de leña y el polvo extendido por el viento, ni la contaminación por fuentes móviles

Este manual brinda las herramientas necesarias para que los lectores de la comunidad académica que no se encuentra especializada, tengan una orientación clara y precisa de los parámetros claves de diseño de identificación, distribución, elaboración e implementación de los elementos que se necesitan para el diseño de los equipos de extracción focalizado existentes para enfrentar la problemática en la salud y otros tópicos, relacionada con el material particulado en el ambiente.

El propósito de este manual es el de apoyar el desarrollo de estrategias de implementación para el diseño de sistemas de extracción focalizados, basados las 11 fases planteados para el diseño y la implementación de nuevas técnicas de control para emisiones de material particulado provenientes de fuentes estacionarias.



## Bibliografía

- Alden J.L, K. J. (1982). *Design Of Industrial Ventilation Systems*. New York,.
- Baturin., V. V. (S.F.). *Fundamentos De Ventilacion Industrial*. Barcelona - 15. España.: Editorial Labor S.A. Calabria, 235 - 239. Barcelona - 15. España.
- Bha. (1998). *Guía De Referencias Y Soluciones De Problema*. Madrid: : Bha.
- Carpio, L. B., & Sánchez, M. R. (2014). Disminución de contaminantes aéreos en una planta de balanceados mediante la propuesta de un sistema de extracción de polvo. *Ingenius. Revista de Ciencia y Tecnología*, (12), 5-14.
- Casal, J. Y.-B. (1989). *Cálculo Y Diseño De Ciclones*. . Madrid.
- Dennis, R. A. (1979). *A Model For Coal Fly Ash Filtration*. New York : Marcel Dekker,Inc.
- Dustcontrol. (1986). *Dustcontrol.Com/Category/121-Food-Industry.Html*. Obtenido De [Https://Dustcontrol.Com/Category/121-Food-Industry.Html](https://Dustcontrol.Com/Category/121-Food-Industry.Html)
- Epa. (01 De Febrero De 2009). *Epa.Gov*. Obtenido De Epa.Gov: [Www.Epa.Gov](http://www.Epa.Gov)
- Higyenists, A. C. (1992). *Ventilación Industria*. Ohio.
- García, O. A., Pencue, L., & Gaona, S. (2009). Sistema De Extracción De Características Microestructurales De Sistemas Cerámicos Utilizando Técnicas De Procesamiento Digital De Imágenes. *Suplemento De La Revista Latinoamericana De Metalurgia Y Materiales*, 1(1), 327-333.
- Kalen, B. Z. (1974). *Theoretical Empirical Approach To Saltation Velocity In Cyclone*. Neworleans: Aiche.
- Leith, D. M. (1980). *Theory For Penetration In A Pulse-Jet Cleaned Fabric Filter-*. New York: Marcel Dekker,Inc.

Morales Vargas, R. (2003). Contaminación del aire y efectos tóxicos por partículas respirables (PM10) en el humo, de madera en comercios de alimentos San José-Costa Rica. *Revista Costarricense de Salud Pública*, 12(22), 16-28.

Minambiente. (01 De Noviembre De 2017). *Www.Minambiente.Gov.Co*. Obtenido De [Http://Www.Minambiente.Gov.Co/Images/Normativa/App/Resoluciones/96-Res%202254%20de%202017.Pdf](http://Www.Minambiente.Gov.Co/Images/Normativa/App/Resoluciones/96-Res%202254%20de%202017.Pdf)

Perez, F. Y. (S.F.). *Diseño Óptimo De Colectores Ciclonicos*.

Rojano, R. E., Mendoza, Y. I., Arregoces, H., & Restrepo, G. M. (2016). Dispersión de Contaminantes del Aire (PM10, NO2, CO, COV y HAP) emitidos desde una Estación Modular de Compresión, Tratamiento y Medición de Gas Natural. *Información tecnológica*, 27(5), 99-110.

Shepherd, C. B. ( 1939 ). *Química Industrial Y De Ingeniería*. Wilmington: Publicaciones Acs.

Yunus A. Çengel, J. M. (2002). : *Mecánica De Fluidos: Fundamentos Y Aplicaciones*. Mexico: Mcgraw Hill.